

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



МАТЕРИАЛЫ

IV МЕЖДУНАРОДНОГО
МОЛОДЁЖНОГО ФОРУМА

«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ»

ТОМ 1.

Томск – 2016

УДК 620.9(063)
ББК 31л0
И73

Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума. В 3т. Томск 10 - 14 октября 2016г. Т.1.-Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 377 с.

Настоящий сборник содержит материалы IV Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», проведенного 10 - 14 октября 2016г. на базе Энергетического института Томского политехнического университета, при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

Материал сборника представлен без редактирования авторских электронных версий.

СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ СБОРНИКА ТРУДОВ ФОРУМА

1. Губин В.Е., к.т.н., доцент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ, председатель;
2. Легро Жан Клод Числан, PhD, профессор Бельгийского свободного университета, (Бельгия);
3. Ажаев В.С., PhD, профессор Южного университета Далласа, (США);
4. Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ;
5. Кладиев С.Н., к.т.н., доцент кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ;
6. Дементьев Ю.Н., к.т.н., доцент, зав. кафедрой ЭПЭО ЭНИН ТПУ;
7. Обухов С.Г., д.т.н., доцент кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ;
8. Заворин А.С., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ;
9. Муравлев О.П., д.т.н., профессор кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ
10. Стрижак П.А., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой АТП ЭНИН ТПУ;
11. Кобенко Ю.В., д.ф.н., профессор кафедры ИЯ ЭНИН ТПУ;
12. Литвак В.В., д.т.н., профессор кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ;
13. Сулайманов А.О., к.т.н., доцент, зав. кафедрой ЭЭС ЭНИН ТПУ;
14. Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ;
15. Ардашкин И.Б., д.филос.н., профессор ФИЛ ИСГТ ТПУ;
16. Лукутин А.В., к.т.н., доцент, начальник учебно-методического отдела ЭНИН ТПУ.

Вёрстка и дизайн оригинал макета: Зими́на Н.А.

СЕКЦИЯ 1. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАКРЫТОМ ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОНЕ

Л.Е. Валиева
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, группа 5Б4Б

Известно [1], что тепловые трубы (термосифоны) являются высокоэффективными теплопередающими устройствами. Свое применение они нашли в проблеме обледенения дорог, при охлаждении лопаток турбин, электронных компонентов и др. [1] Термосифон (ТС) состоит из герметичной емкости, заполненной рабочей жидкостью. Однако режимы работы термосифонов до конца не изучены. Это обусловлено сложностью протекающих при работе ТС теплофизических и гидродинамических процессов.

Целью настоящего исследования является моделирование процесса пространственного теплопереноса в закрытом двухфазном термосифоне в условиях фазовых превращений хладагента.

Постановка задачи

Рассматривался термосифон в форме параллелепипеда. Такая форма ТС является наиболее типичной для применения их в промышленности. На рис.1 представлена геометрическая модель задачи.

Математическая модель

Уравнения теплопроводности для рассматриваемой системы имеют следующий вид:

Для меди

$$c_1 * \rho_1 * \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Для пара

$$c_2 * \rho_2 * \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Начальные и граничные условия

В начальный момент времени $T_1(x, y, z, 0) = T_2(x, y, z, 0) = T_0$;

- На границе $z=0$; $0 < y < 2l+L$; $0 < x < 2l+M$;

граничные условия первого рода:

$$T = T_h;$$

- На границе $z=2l+H$; $0 < y < 2l+L$; $0 < x < 2l+M$

граничные условия третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T_1}{\partial n} = \alpha(T_c - T_e)$$

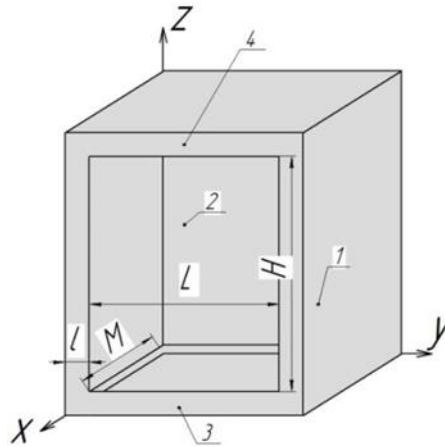


Рис. 1. Область решения: 1 – медный корпус, 2 – паровой канал; 3 – нижняя крышка; 4 – верхняя крышка.

где T_c – температура внешней поверхности верхней крышки термосифона, K ; T_e – температура окружающей среды, K ; T_0 – температура в начальный момент времени, K ; α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{м^2 \cdot K}$.

На границе испарения хладагента:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_1 \left(\frac{\partial T_2}{\partial y} \right) - Q_{evp} W_{isp}; \quad (3)$$

$$T_1 = T_2;$$

На границе конденсации хладагента:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_{cond} W_{cond}; \quad (4)$$

где $W_{evp/cond}$ – удельная массовая скорость испарения/конденсации, $\frac{кг}{с \cdot м^2}$.

Скорость испарения/конденсации рассчитывалась по формуле Герца-Кнудсена: [1]

$$W_{isp/cond} = \frac{A (P_H - P^*)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}} \quad (5)$$

где A – коэффициент аккомодации; P_H – давление насыщения, $Па$; P^* – давление, $Па$; R – универсальная газовая постоянная, $\frac{Дж}{моль \cdot K}$; T – температура, K ; M – молекулярный вес, $\frac{кг}{моль}$.

В зависимости от положения границы, рассматривались так же граничные условия четвертого рода. При переходе из парового канала в медную среду и наоборот они имеют следующий вид [2]:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n};$$

$$T_1 = T_2.$$

Уравнения теплопроводности для сформулированной задачи решены методом конечных разностей.

Результат и обсуждение

Исследование процесса теплопереноса в типичном термосифоне проведено при различных значениях высоты (H , $м$) и температуры (T , K) нижней крышки ТС. При построении полей температур масштаб не учитывался.

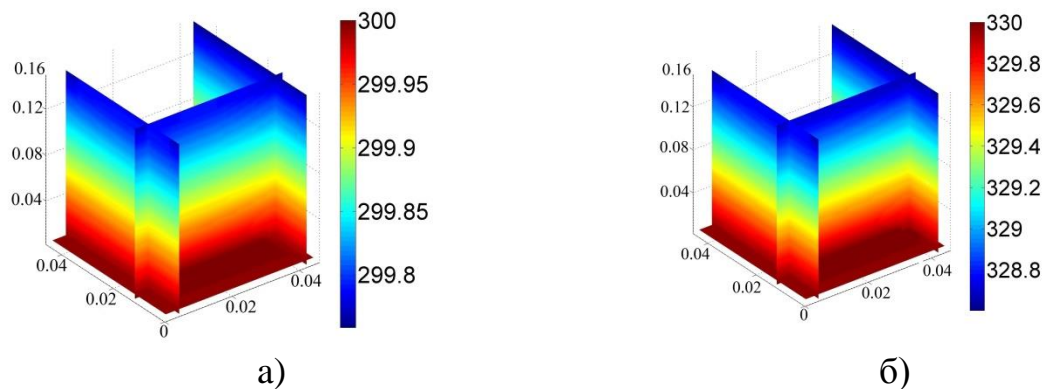


Рис. 2. стационарное поле температур при:
 а) $H=0.15\text{м}$, $T_h=300\text{К}$; б) $H=0.15\text{м}$, $T_h=330\text{К}$

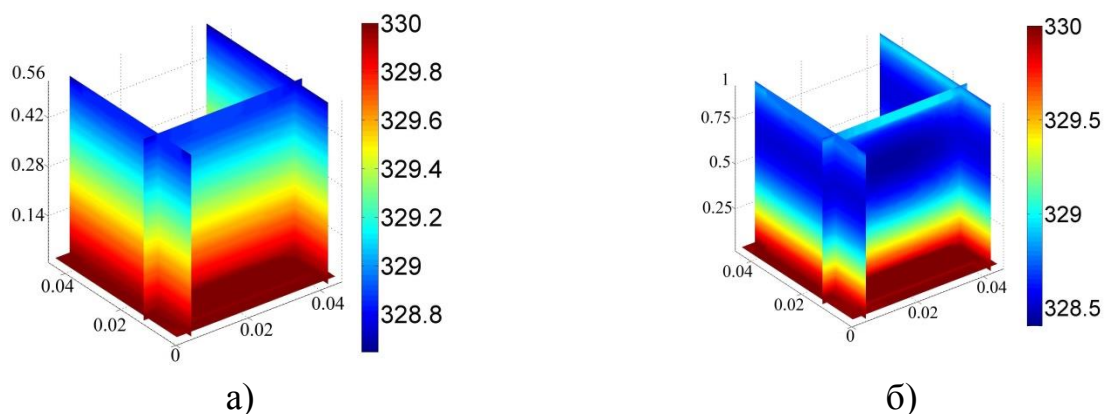


Рис. 3. стационарное поле температур при:
 а) $T_h=330\text{К}$, $H=0.5\text{м}$; б) $T_h=330\text{К}$, $H=1\text{м}$

В заключении можно отметить, что при росте температуры нижней крышки и высоты ТС возрастает перепад температур в паровом канале. Также при увеличении высоты ТС время его выхода на стационарный режим ($t_{\text{ст}}$) работы увеличивается. При $h=0.15\text{ м}$ $t_{\text{ст}}$ составило 500с, при $H=1\text{м}$ $t_{\text{ст}}$ – 1500с. При увеличении высоты термосифона вдоль оси Z задавалось больше узлов разностной сетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ – 7538.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Г.В. Кузнецов, М.А. Аль – Ани, М.А. Шеремет . Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне.– Известия Томского Политехнического Университета Т.318 №4 – Томск, 2011 – с. 18-23
2. Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие./ Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.

Научный руководитель: А. Э. Ни, ассистент каф. ТПТ НИ ТПУ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОНЕ В ДИАПАЗОНЕ ТИПИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ ПОВЕРХНОСТИ МАСЛЯНОГО БАКА ТРАНСФОРМАТОРА ТЭС

А.Е. Нурпейис, Л.Е. Валиева
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

Силовые трансформаторы являются одним из важных агрегатов тепловых электрических станций, от надежности и качества функционирования которых зависят параметры и характеристика вырабатываемой энергии на ТЭС [1–3]. Одним из главных факторов, определяющих надежность работы трансформаторов, является их эффективное охлаждение [4]. Основными системами охлаждения трансформаторов являются: естественное масляное охлаждение, масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла, масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла через воздушные охладители, масло–водяное охлаждение трансформаторов с принудительной циркуляцией масла [3,5]. Для охлаждения такой системы используется трансформаторное масло, которое поглощает выделяемой от активной части теплоту и далее передает внешнему теплообменнику. В настоящее время применяется масло–водяное охлаждение с принудительной циркуляцией масла, где используются вентиляторы и насосы. Выход из строя таких вспомогательных оборудования приводит к аварийному режиму работы силового трансформатора. Целесообразным в этой связи является анализ возможности использования автономных (независящих от источников электроэнергии) теплопередающих устройств охлаждения трансформаторов. Замкнутые двухфазные термосифоны зарекомендовали себя, как высокоэффективные, надежные теплопередающие теплообменные устройства за счет конструкционной гибкости; простоты изготовления; отсутствия движущихся частей, необходимости использования электроэнергии, насосов и т.д. В связи с этим актуальным является исследование возможности применения термосифонов как основного элемента системы охлаждения трансформатора. Но исследований такого рода до настоящего времени не проводилось.

Целью настоящей работы является численное моделирование вынужденной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне и анализ возможности использования их в системе охлаждения трансформаторов ТЭС.

Численные исследования теплопереноса и гидромеханики в двухфазном термосифоне (рис.1) в условиях отвода энергии от верхней крышки бака силового трансформатора проводились в достаточно типичных диапазонах изменения тепловых потоков [1–3]. Максимальные допустимые температуры поверхности изоляции трансформатора ограничены значением 333°К. При таких температурах тепловые потоки к нижней крышке термосифона составляют в зависимости от условий теплопередачи от 10^3 Вт/м² до $2 \cdot 10^3$ Вт/м². В качестве основного возможного теплоносителя рассматривалась дистиллированная вода.

Численные исследования проводились в безразмерных параметрах. По этой причине безразмерные комплексы (Re , Pr , Ki , Vi) приняты в соответствии с анализируемым режимом течения пара (ламинарный) и достаточно типичными габаритными размерами рассматриваемого теплообменника (высота – 150 мм, ширина парового канала – 34 мм, толщина стенок – 3 мм).

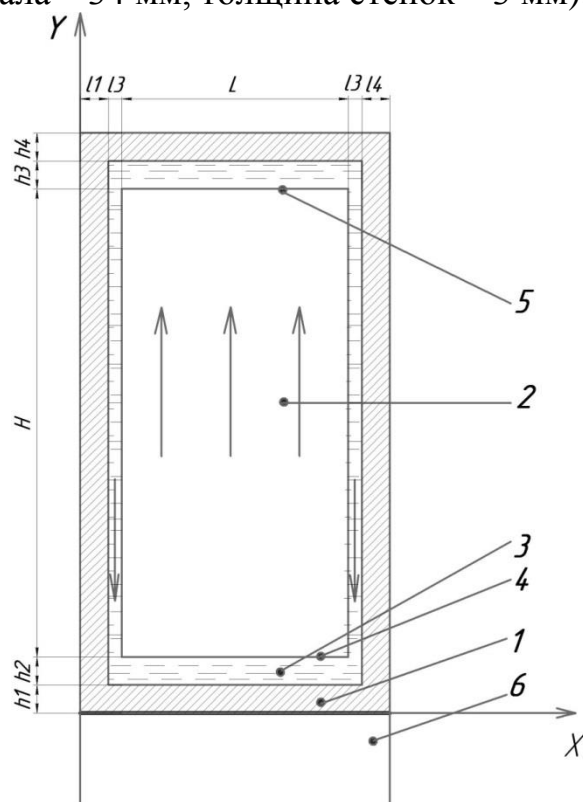


Рис. 1. Область решения: 1 – металлический корпус; 2 – паровой канал; 3 – пленка жидкости; 4 – поверхность испарения; 5 – поверхность конденсации; 6 – верхняя стенка бака трансформатора. Вертикальными стрелками показаны направления движения пара и жидкости.

Рассматривался термосифон прямоугольного поперечного сечения. Область решения приведена на рис.1. Энергия верхней стенки масляного бака силового трансформатора, расположенного вблизи нижней крышки термосифона, поступает через границу $y=h_1$, $0 < x < 1$. В результате интенсивного парообразования возникает перепад давления, что приводит к продвижению пара вверх и его конденсации на верхней границе парового канала. Слой конденсата под действием сил гравитации стекает по вертикальным стенкам канала вниз и растекается по нижней поверхности рассматриваемого теплообменника. Система уравнений с нелинейными краевыми условиями решена методом конечных разностей [6,7]. Использовался итерационный алгоритм аналогично [8] разработанный для решения нелинейных нестационарных задач сопряженного теплопереноса в многосвязных областях с интенсивным локальным выделением теплоты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Пер. с венгерского. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 36).
2. Голунов А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов. – М.: Энергия, 1964.
3. Бернштейн И.Я. Нагрев и охлаждение трансформаторов.- «Энергетика за рубежом», сер. «Трансформаторы», вып. 5. М., Госэнергоиздат, 1960.
4. Сещенко Н.С. Охлаждение силовых масляных трансформаторов. Материалы научно-технического совещания по трансформаторостроению (Тольятти, 1969), 1969.
5. Силовые трансформаторы: Справочная книга / под. ред. С.Д. Лизунова, А.К. Лоханина. – М.: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
6. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Mathematical modeling of complex heat transfer in a rectangular enclosure // Thermophysics and Aeromechanics. – 2009. – V. 16. – № 1. – P. 119–128.
7. Nurpeiiis A.E. The opportunity analyses of using thermosyphons in cooling systems of power transformers on thermal stations. / A.E. Nurpeiiis, T.N. Nemova // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72. Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy – Technical and technological equipment.
8. Nurpeiiis A.E. Mathematical modeling of force convection in a two-phase thermosyphon in conjugate formulation / A.E. Nurpeiiis, A.E. Nee // EPJ Web of Conferences. – 2016. – Vol. 110. Thermophysical Basis of Energy Technologies.

СОХРАНЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГИИ ЖИЛОГО ДОМА С ПОМОЩЬЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И МАТЕРИАЛОВ

В.П. Толстоухова

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

1. Введение

Климат природы на всей территории республики Саха (Якутия) резко континентальный. Перепад температуры достигает в среднем 100°C от -60°C до $+40^{\circ}\text{C}$, холодный период зимы продолжается почти 4 месяца. Поэтому проблемы сохранения и сбережения теплоты в помещении жилого дома являются жизненно важными и являются весьма актуальными. Цель: исследование и проектирование энергосберегающего жилого дома различных геометрических форм и материалов, другими словами, создание оптимальных климатических условий жизнедеятельности в таких суровых природных условиях. Гипотезой

является мысль о том, что оптимальные геометрические размеры и фигуры дома уменьшают теплоотдачу из внутренней части помещения во внешнюю среду. Практическая значимость - минимизация потери тепловых ресурсов, таких как газ, нефть, уголь и электроэнергия. Идея и основные положения научного исследования рассмотрены в статьях №1,3,4,5.

2. Экспериментальная установка и методика исследования.

Для проверки гипотезы проведены множество экспериментов: были изготовлены полусферы из полистирола, базальта и из дерева. Рассчитаны объем полусферического дома с помощью формулы:

$$U = \frac{\pi d^3}{12} = 0,2423 \text{ м}^3 ; d = 0,21 \text{ м}; S = 2\pi r^2 = 0.0692 \text{ м}^2.$$

Параметры арочной модели:

$$U = \frac{\pi r^2 l}{2} = 0,2423 \text{ м}^3; r = 0,105 \text{ см}; l = 14 \text{ см}; S = \pi r l = 0.0791 \text{ м}^2.$$

Размеры кубических моделей из полистирола, базальта и древесины:

$$U = a^3 = 0,2423 \text{ м}^3; a = \sqrt[3]{U} = 0,13 \text{ м}.$$

U- объем модели, d- диаметр модели, r- радиус модели, l- длина модели

Проведены эксперименты измерения падения температуры через равные промежутки времени всех моделей и получен интересный факт, показывающий, что потеря теплоты действительно зависит от внешней формы модели дома. По измеренным температурам рассчитываем потери тепловой энергии через стену трех моделей дома: кубическая, арочная (половина цилиндра) и полусферическая.

Чтобы убедиться, что потеря теплоты действительно зависит от внешней формы и материала, мы провели повторный эксперимент колебания температуры, не только падения, но и повышения температуры с помощью лампы накаливания. Для этого использован тепловизор testo 881-2 со спектральным диапазоном 8-14 мкм.

Тепловизор testo 881-2 отображает потенциально проблемные места, такие, как тепловые мостики и строительные дефекты ограждающих конструкций здания. Также тепловизор визуализирует дефекты изоляционного материала или неисправную изоляцию. Благодаря способности различать даже небольшую разницу температур с помощью температурной чувствительности <110 мК, testo 881-2 визуализирует дефекты изоляции здания и, как следствие, места утечек тепла. Таким образом, можно выполнить целенаправленную диагностику качества строительства и предпринять необходимые меры по устранению дефектов конструкций.



Рис. 1. Тепловизор Testo 881-2

3. Результаты эксперимента

По этим данным рассчитали тепловые потери по формуле Фурье, которые приведены в таблице 1.

№	Модель	Температура внутри модели, °С	Температура окружающей среды, °С	Количество потерянной теплоты, Q, Дж
1	Полусфера из базальта	30	- 46	-214,575
2	Арочная из базальта	29,5		-243,659
3	Куб из базальта	29,25		-259,432
4	Полусфера из полистирола	29,25		-220,886
5	Арочная из полистирола	28,75		-250,826
6	Куб из полистирола	28		-264,401
7	Полусфера из дерева	30		-2249,554
8	Арочная из дерева	29,5		-2554,297
9	Куб из дерева	28,5		-2701,296

Повторный эксперимент колебания температуры показал, что наибольшее повышение температуры зафиксировано для полусферы из базальта.

Табл. 2. Наблюдение повышения температур моделей домов из разных форм и материалов.

Наименование модели	время, мин	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
арочная из полистирола	t, °С	25,1	25,6	25,6	25,9	27,6	28,1	28,6	29	29,9	30,2	30,8	30,8
полусфера из базальта		25,1	25,8	26,3	27,4	28,2	29,1	29,9	30,6	31,2	31,9	32,4	32,6
куб из древесины		25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,1	25,3	25,2	25,2	25,4	25,4	25,4

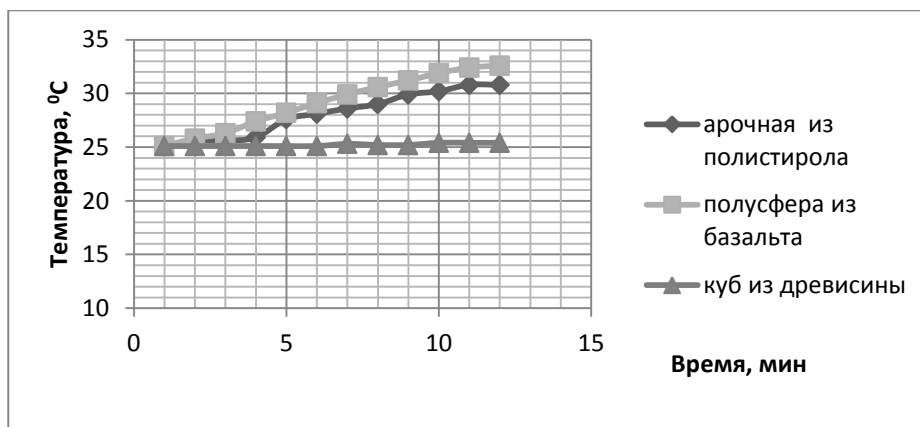


Диаграмма 1. Повышения температур моделей домов различных конструкций.

Табл. 3. Наблюдение повышения температур полусферических моделей домов

Наименование модели	время, мин	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
полусфера из полистирола	t, °C	25,1	25,8	26,2	27,8	28,1	28,7	29,3	30,4	30,8	31,1	31,2	31,4
полусфера из базальта		25,1	25,8	26,3	27,4	28,2	29,1	29,9	30,6	31,2	31,9	32,4	32,6
полусфера из древесины		25,1	25,1	25,1	25,2	25,3	25,3	25,4	25,3	25,5	25,7	25,7	25,9

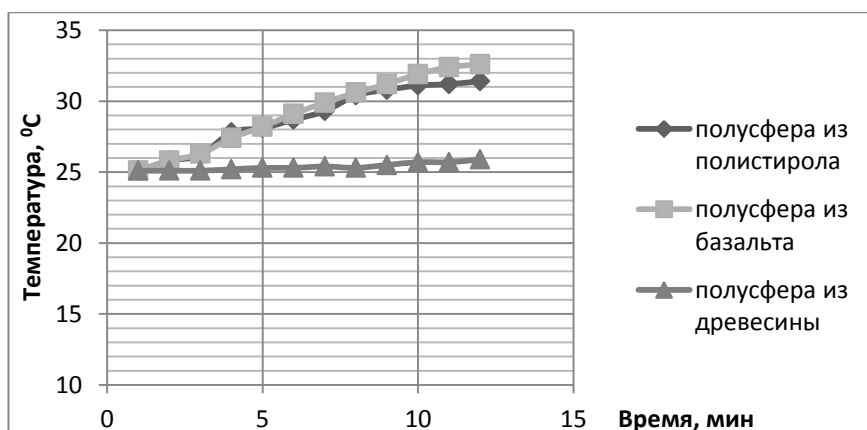


Диаграмма 2. Повышения температур полусферических моделей домов.

По результатам экспериментов пришли к выводу, что минимальная потеря теплоты наблюдается для полусферической модели, а максимальная для кубической модели при этом реальные объемы моделей одинаковые. Вторым важным моментом работы является выбор теплоизоляционного материала модели. Измерена динамика падения и повышения температуры со временем, для моделей из древесины (куб, полуцилиндр, полусфера), из полистирола (куб, полуцилиндр, полусфера), из базальта (куб, полуцилиндр, полусфера). И по этим критериям спроектирована модель с полусферической формой (в качестве несущей, мы взяли полистиролбетон). Проведен сравнительный анализ себестоимости сферической и кубической модели, утепленный «СахаБазальтом». Как показал анализ себестоимость полусферического дома из полистиролбетона, утепленный «СахаБазальтом» будет на 224351 рублей меньше, чем кубический дом из дерева утепленный «СахаБазальтом» при равных объемах.

4. Заключение.

Потеря теплоты в виде теплового потока можно минимизировать, если уменьшить площадь поверхности излучения (например, модель полусферического дома). В настоящее время, когда цены на энергоресурсы значительно выросли, то проблема теплоизоляции встала особенно остро. Нужно стремиться сокращать потери энергии из-за теплопроводности стен, применяя современные теплоизолирующие материалы и строя дома с оптимальными геометрическими параметрами. Также для энергоэффективности жилого дома можно применить дополнительные технологии по автоматизации и энергосбережению такие как:

- Использование для освещения датчиков движения и освещенности
- Использование автоматизированных систем отопления.
- Применение солнечных коллекторов, тепловых насосов.
- Применение теплого пола.
- Автоматизированный клапан для вентиляции.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гладун. А.Д., журнал «Потенциал», статья Дом, в котором мы живем, 2005г.
2. Луканин. В.Н. Теплотехника: Учеб.для вузов/В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк. 1999. – 671 с.
3. Местников. А.Е.,Абрамова. П.С., Антипкина. Т.С., Егорова. А.Д. Тепловая защита зданий на севере: материалы, изделия и конструкции: Гос. Образоват. Учреждения высш. Проф. Образования Российской Федерации, Якутский гос. ун-т им. М.К. Аммосова. – М.: Изд-во АСВ, 2009-236 с.
4. H.M. Taleb, Natural ventilation as energy efficient solution for achieving low-energy houses in Dubai. // Source of the Document Energy and Buildings, 284-291 (2015)
5. Ingeli, R.a , Minarovičová, K.a , Čekon, M.b , Architectural elements with respect to the energy performance of buildings (Conference Paper)// Pages 534-565 6th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction; Ostrava; Czech Republic; 24 June 2014 through 27 June 2014;

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ЗАМКНУТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕРМОСИФОНАХ

А.С. Красношлыков
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

Применение термосифонных систем охлаждения до настоящего времени не получило широкого распространения в силу отсутствия обоснованной научно-технической базы. Экспериментальные исследования теплопередающих характеристик замкнутых двухфазных термосифонов (ЗДТС) и тепловых трубок [1-3] ориентированы на конкретные варианты конструкций ЗДТС и условий их работы. При этом закономерности совместно протекающих процессов фазовых превращений и конвекции не изучены на уровне, обеспечивающем проектирование систем обеспечения теплового режима на основе устройств, использующих испарительно-конденсационный цикл.

Для решения такого рода задач наиболее целесообразным является применение методов математического моделирования процессов теплопереноса, основанных на решении систем уравнений переноса массы, импульса и энергии. Это подтверждается тем, что в последние годы в зарубежных периодических изданиях публикуются статьи, в которых предпринимаются попытки моделирования процессов теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах на базе систем уравнений в частных производных [4-6].

В то же время пока не проведены теоретические исследования, достаточные для обоснования возможности использования теории движения вязкой жидкости для детального анализа влияния основных значимых факторов на характеристики работы термосифонов. Одним из таких факторов является тип теплоносителя (хладагента). Такие свойства хладагента как зависимость температуры кипения от давления, тепловой эффект процесса испарения и др. могут играть важную роль в регулировании процессов теплопереноса через исследуемое устройство. Такой анализ пока не проведен, хотя применение системы охлаждения на основе термосифонов может позволить значительно увеличить эффективность отвода тепла за счет снижения градиентов температур в теплонагруженных технических устройствах (например, литий-ионных аккумуляторных батареях) [2, 3].

Цель работы – теоретический анализ влияния свойств хладагента на характеристики теплопередачи в двухфазных замкнутых термосифонах при тепловых нагрузках, соответствующих предельно допустимому режиму работы аккумуляторных батарей воздушных судов.

Рассматривается термосифон, принципиальная схема которого приведена на рисунке 1.

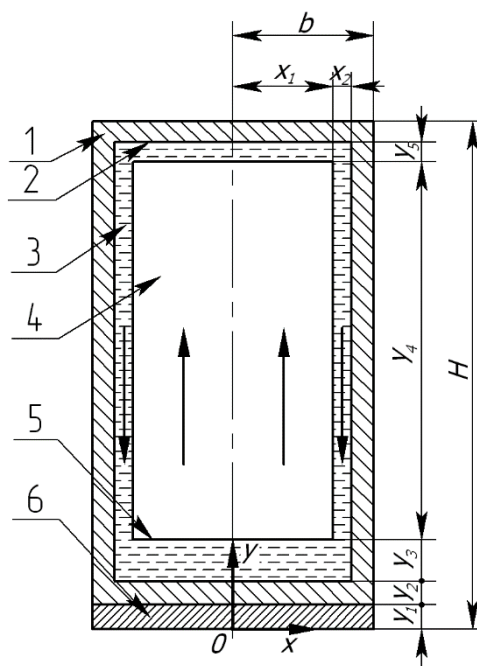


Рис. 1. Принципиальная схема термосифона. 1 – корпус термосифона; 2 – поверхность конденсации; 3 – пленка хладагента; 4 – паровой канал; 5 – поверхность испарения; 6 – поверхность источника нагрева.

Система дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных для потоков пара и жидкости в исследуемой области и краевые условия аналогичны постановке задачи [7].

Математическое моделирование теплопереноса в двухфазном термосифоне прямоугольного поперечного сечения выполнено с использованием пакета ANSYS FLUENT [8].

Анализ полученных результатов

Проведено численное моделирование теплофизических процессов в замкнутом двухфазном термосифоне прямоугольной формы (рис.1) с размерами: высота $H=200$ мм, поперечный размер $L=70$ мм. Приняты следующие варианты плотностей теплового потока на нижней крышке термосифона в сечении $y=0$: $2,5 \cdot 10^4$ Вт/м²; $3 \cdot 10^4$ Вт/м². В качестве рабочих жидкостей рассматривались метиловый, этиловый и пропиловый спирты.

Выбор этих теплоносителей обусловлен их температурами кипения, соответствующими диапазону допустимых температур энергонасыщенного авиационного оборудования, а также высокой удельной теплотой парообразования.

На рис.2 представлены распределения температур по оси симметрии термосифона для различных теплоносителей и плотностей теплового потока.

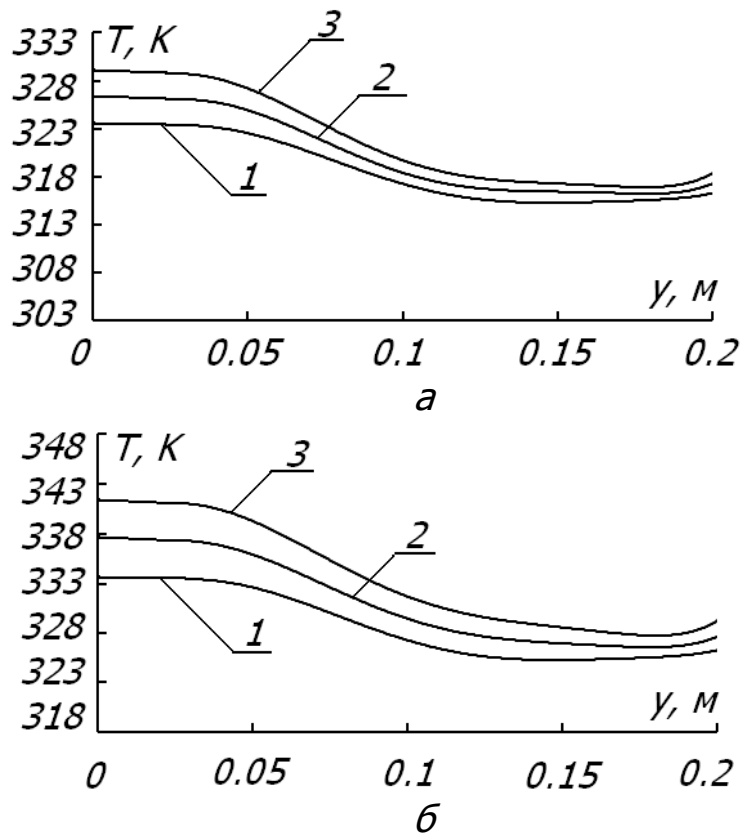


Рис. 2. Распределение температуры по оси симметрии в исследуемой области. 1 – метиловый спирт; 2 – этиловый спирт; 3 – пропиловый спирт.
 а – $q_h=2,5 \cdot 10^4$ Вт/м²; б – $q_h=3 \cdot 10^4$ Вт/м²;

Как видно из приведенных зависимостей (рис.2а), при плотности теплового потока $2,5 \cdot 10^4$ Вт/м² самый низкий перепад температур между нижней крышкой и верхней составляет около 8 К (теплоноситель – метиловый спирт) (кривая 1). Самая высокая разность температур (13 К) получена для пропилового спирта (кривая 3).

По результатам анализа приведенных распределений можно сделать вывод, что наиболее эффективный сток тепла в результате интенсификации процесса испарения происходит в случае, когда хладагентом является метиловый спирт. Эффективность снижается в порядке убывания у этилового и пропилового спирта соответственно. Последнее обусловлено, очевидно, разными затратами энергии на парообразование рассматривавшихся достаточно типичных хладагентов.

Заклучение

Установлено, что использование метилового спирта в качестве хладагента приводит к эффективному стоку тепла с нижней крышки термосифона в диапазоне критических температур аккумуляторных батарей воздушных судов. При этом перепад температур между нижней и верхней крышками составляет не более 8 °К. Можно сделать вывод, что для более эффективного охлаждения теплонагруженного оборудования предпочтительнее теплоноситель с большими значениями теплоты парообразования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Васильев Л.Л., Журавлёв А.С., Шаповалов А.В., Родин А.В. Горизонтальные пародинамические термосифоны. В сборнике: Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену Москва, 2014. С. 676–679.
2. Jouhara H., Robinson A.J. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283. Applied Thermal Engineering. 2010. V. 30. P. 201–211.
3. Khazaei I., Hosseini R., Noie S.H. Experimental investigation of effective parameters and correlation of geyser boiling in a two-phase closed thermosyphon. Applied Thermal Engineering. 2010. V.30. P. 406–412.
4. Kuznetsov G.V., Al-Ani, M.A., Sheremet M.A. // Numerical analysis of convective heat transfer in a closed two-phase thermosyphon // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. P. 201–210.
5. Jiao B., Qiu L.M., Zhang X.B., Zhang Y. Investigation on the effect of filling ratio on the steady-state heat transfer performance of a vertical two-phase closed thermosyphon. Applied Thermal Engineering. 2008. V.28. P. 1417–1426.
6. Lin Z., Wang S., Shirakashi R., Winston L., Zhang Y. Simulation of a miniature oscillating heat pipe in bottom heating mode using CFD with unsteady modeling. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V.57. P. 642–656.
7. Krasnoshlykov A.S., Zagromov Y.A. Mathematical Modeling of Thermal Modes of Closed Two-Phase Thermosyphons with Refrigerant R600A. European Physical Journal Web of Conferences. 2016. — Vol. 110. — Article number 01051. P.5.
8. Ansys Help. FLUENT Theory Guide.

Научный руководитель: Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО И РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО НАГРЕВА ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ

С.В. Сыродой, А.А. Косторева, Ж.А. Косторева
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

Введение

За последние годы в России начался стремительный рост деревообрабатывающей промышленности, которая нуждается в заготовках из хвойных и лиственных пород древесины. Таким производствам нужна высококачественная обработанная продукция [1]. Поэтому древесина является одним из наиболее востребованных материалов на настоящее время [2].

Как правило, на производство привозят не прошедшую предварительную обработку влажную древесину [3]. Основным этапом деревообработки является удаление влаги. Этот этап подготовки является самым энергоемким (до 30% всей затрачиваемой мощности) [4]. Понижение влажности в бруске увеличивает ее прочность, уменьшает массу и улучшает склеиваемость [5].

Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса приобретает значительную роль для науки и техники. Для современного производства необходим точный прогноз таких процессов. Натурные исследования (эксперимент) очень дороги и сложны, а иногда и просто невозможно. Моделирование позволяет исключить сложные и дорогостоящие эксперименты для исследования процессов сушки древесины [6]. К последнему стоит добавить, что экспериментальное изучение процессов обезвоживания затрудняется большим количеством видов древесины (клён, осина, дуб, берёза, пихта и т.п.) с различными характеристиками (линейные размеры, влажность, начальная температура, вид сруба и т.д.) [5].

Цель работы: математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового и комбинированного радиационно-конвективного нагрева влажной древесины.

Постановка задачи

Физическая постановка

В начальный момент времени ($\tau=0$) древесная заготовка попадает в сушильную камеру, и нагревается за счет конвекции и излучения (в случае СВЧ-сушки нагрев осуществляется за счет комбинированного воздействия конвекции и микроволнового излучения). В результате инициируется процесс испарения влаги. Фронт испарения движется от поверхности вглубь заготовки. Соответственно формируется слой сухой древесины с низким коэффициентом теплопроводности. Промежуток времени от начала нагрева до момента полого высыхания (прохода фронта испарения по всему образцу), считается временем сушки ($\tau_{\text{сушки}}$).

Процесс «обезвоживания» рассматривается в рамках фронтальной модели испарения воды. Необходимо отметить, что процессы фазовых превращений

являются одними из самых сложных задач математической физики. Особенно это касается процессов испарения. Последнее связано с тем, что испарение влаги происходит в очень узкой (много меньше линейного размера заготовки) постоянно перемещающейся зоне. При этом стоит отметить, что испарение воды протекает с высоким эндотермическим эффектом (до $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг). Также необходимо сказать, что в процессе «обезвоживания» древесины формируется пористый древесный каркас с высоким термическим сопротивлением. Последний существенно затягивает процесс влагоудаления.

В случае СВЧ-воздействия возникает внутреннее тепловыделение. В результате возможно формирование сухого слоя внутри образца. Соответственно, возникает второй фронт испарения, который движется из глубины заготовки к поверхности.

Математическая постановка задачи, соответствующая выше изложенной физической модели состоит из следующей системы нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных:

- уравнение энергии для влажной древесины с учетом эндотермического эффекта испарения:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) - \frac{Q_{isp}W_{isp}}{h_d} + q_{свч} \quad (1)$$

В случае СВЧ-нагрева в уравнение (1) добавляется экзотермический эффект тепловыделения: $q_{свч} = \varepsilon f t g \delta |E|^2$

- уравнение (1) решалось при следующих краевых условиях и замыкающих соотношениях:

$$\tau = 0: T = T_0$$

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$x = l: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_e - T); \quad (3)$$

В случае комбинированного радиационно-конвективного нагрева в уравнение энергии $q_{свч} = 0$, при этом условие (3) преобразуется к следующему виду:

$$x = l: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_e - T) + \sigma \varepsilon (T_e^4 - T^4) \quad (4)$$

Система уравнений (1)-(4) математической физики решалась методом конечных разностей [7-9]. Задача «обезвоживания» вычислялась методом неявного выделения фронта испарения [10].

Исходные данные для системы (1)-(4) приведены в таблице 1.

Табл. 1.

	$C_p, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
Дерево - береза	1250	0,15	600
воздух	4187	0,034	1
вода	1000	0,6	1000

Анализ полученных результатов

На рисунке 1 представлены зависимости времени полной сушки τ , с образца от температуры внешней среды T_e , К. для разных видов древесины. Начальная влажность заготовки составляла $\varphi=40\%$, толщина принималась 0,04 м, коэффициент теплоотдачи $\alpha=250 \text{ Вт/м}^2\text{К}$

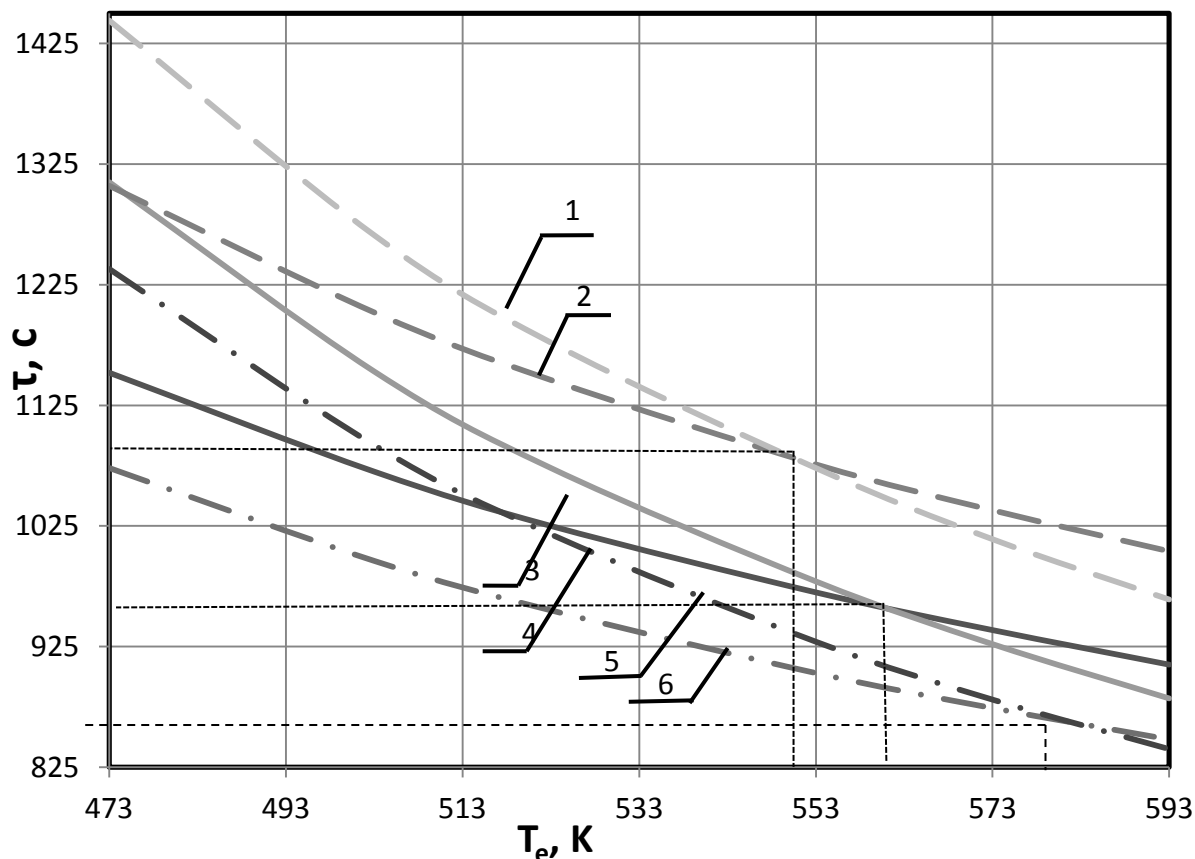


Рис. 1. Зависимость времени полной сушки τ , с от температуры внешней среды T_e , К в разных условиях нагрева: 1,2 – дуб, 2,3 – береза, 4,5 – пихта. 2,4,6 – СВЧ нагрев, 1,3,5 – радиационно-конвективный нагрев.

Анализ кривых приведенных на рисунке 1 показывает, что возможны 2 режима сушки: высокотемпературный и низкотемпературный. При относительно низких температурах внешней среды более выгодна комбинированная микроволново-конвективная сушка (малое значение τ по сравнению с радиационно-конвективным нагревом). При более высоких температурах сушильного агента более выгодной сушкой является радиационно-конвективное «обезвоживание». Например, для дуба при температуре окружающей среды выше 550 К, более предпочтительная радиационно-конвективная сушка. Скорее всего, это объясняется тем, что в случае высокотемпературного «обезвоживания» наибольшее воздействие на скорость сушки начинает оказывать радиационное воздействие внешней среды (лучистый тепловой поток). Однако стоит отметить, что повышение T_e может привести к возгоранию приповерхностного слоя древесной заготовки или (по крайней мере) к деформациям и термическому разрушению древесины.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сафин Р.Р. Современные тенденции развития технологии сушки древесины // Вестник ТГУ, т.11. – 2006. N 4.
2. Кизина О.А., Адамович А.Л. Анализ современных методов и оборудования для сушки древесины // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В. – 2011.
3. Морозов Г.А. Микроволновые технологии в промышленности и сельском хозяйстве: современные тенденции и новые подходы / Материалы научно-техн. Конф. - Казань 2000.
4. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Галяветдинов Н.Р., Валиев Ф.Г. Разработка энергосберегающих технологий сушки древесины в жидкостях //
5. Проблемы энергетики. – 2008. - № 11-12.
6. Расеев А.И Сушка древесины: учебное пособие. - СПб.: Издательство «Лань», 2014.
7. Лыков А.В. Сушка древесины. - М., 1937. – 471 с.
8. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности Учебное пособие. Издательство ТПУ: Томск, 2007.
9. Рыкунин С.Н. Технология деревообработки. Учебник для образовательных учреждений начального профессионального образования / С. Н. Рыкунин, Л. Н. Кандалина. Москва, 2007. Сер. Федеральный комплект учебников (3-е изд., стер.)
10. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Том 1, Москва: «Мир», 1991.
11. Самарский А.А. Моисеенко Б.Д. Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Вычислительной математики и математической физики. – 1965. - №5.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

В.А. Сергиенко
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, гр.5БМ62

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования тепловых режимов запорной арматуры тепловых сетей. Показано, что для запорной арматуры с относительно не большими условными проходами эквивалентную длину трубопровода можно сократить более чем в два раза.

Ключевые слова: запорная арматура, тепловые сети, тепловые потери
Известно [1], что тепловые потери тепловой сети слагаются из линейных (тепловых потерь участков трубопровода, не имеющих арматуры и фасонных частей) и местных потерь тепловой энергии (тепловых потерь фасонных частей, запорной арматуры, опорных конструкций, фланцев и т.д.)

Тепловые потери отводов, гнутых компенсаторов и других деталей, периметр поперечного сечения которых близок к периметру трубопровода, подсчитываются по формулам для прямых труб круглого сечения [1], а тепловые потери фланцев, фасонных частей и арматуры определяются в эквивалентных длинах трубы того же диаметра по формуле [1]:

$$Q_m = ql_3, \quad (1)$$

где Q_m – местные тепловые потери, Вт; q – линейные тепловые потери, Вт/м; l_3 – эквивалентная длина трубы, м.

Тепловые потери от неизолированного вентиля или задвижки принимаются равными тепловым потерям изолированного трубопровода длиной $l_3 = 12-24$ м того же диаметра [1]. Эквивалентную длину изолированного на 3/4 поверхности вентиля или задвижки в зависимости от диаметра трубопровода и температуры теплоносителя можно принимать равной 4-8 м изолированного трубопровода. Меньшие значения относятся к трубопроводу диаметром 100 мм и температуре теплоносителя 100 °С, большие – к трубопроводу диаметром 500 мм и температуре 400 °С. Эквивалентную длину неизолированного фланца можно принимать равной 4–5 м изолированного трубопровода [1].

Описанный выше подход к оценке местных тепловых потерь [1] носит эмпирический характер, основан на многолетней эксплуатации тепловых сетей, однако не имеет теоретического обоснования. Основная причина отсутствия теоретических исследований тепловых режимов арматуры и фасонных частей (фланцы, задвижки и др.) теплопроводов тепловых сетей заключается в достаточно сложной геометрии этих источников местных тепловых потерь.

Решить эту задачу можно с использованием современных подходов к моделированию тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла [2], основанных на численном моделировании физических процессов.

Целью данной работы является анализ тепловых потерь шаровых кранов, как одного из видов типичной запорной арматуры тепловых сетей.

В качестве примера рассматривается не изолированный шаровой кран фирмы Броен Балломас модельного ряда 62.102.000 (Интернет сайт ООО «БРОЕН», 2016, URL: <http://www.broen.ru/> (дата обращения: 21.04.2016)). На рисунке 1 приведено схематическое изображение рассматриваемого крана. Предполагается, что перенос тепла на внешних поверхностях крана осуществляется в условиях радиационного теплообмена и естественной конвекции, кран находится в открытом состоянии, а на внутренних поверхностях поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя.

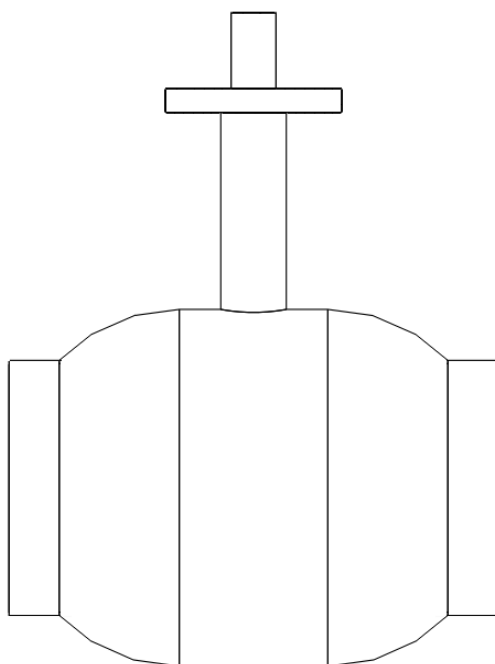


Рис. 1. Схематическое изображение шарового крана.

Для рассматриваемой области (рисунок 1) решается трехмерная стационарная задача теплопроводности в системе «шаровой кран – окружающая среда». Математическая модель для рассматриваемой задачи включает в себя уравнение теплопроводности для корпуса крана с соответствующими постановке задачи граничными условиями. Решение задачи получено с применением средств и функций пакета программ мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения.

Исследования проводились для шаровых кранов с диаметрами условного прохода 125, 250 и 500 мм. Краны изготовлены из стали ST 37, степень черноты поверхности принималась равной – 0.8. Температуры теплоносителя и окружающей среды составляли 100 °С и 25 °С соответственно. Среднее значение коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности корпуса крана принималось равным – 5 Вт/(м²·°С).

Основные результаты численного исследования тепловых режимов и тепловых потерь рассматриваемых шаровых кранов приведены в таблице на рисунке 2.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,1 %, что является приемлемым при оценке местных тепловых потерь в тепловых сетях.

В таблице в зависимости от диаметра условного прохода трубопровода приведены результаты численного расчета тепловых потерь от не изолированных шаровых кранов Q , местные тепловые потери Q_m , вычисленные по формуле (1), значения нормативных линейных тепловых потерь q [3], эквивалентные

длины труб l_3 , выбранные на основе рекомендаций [1], эквивалентные длины труб l , рассчитанные в зависимости от Q , а так же представлено сопоставление Q и Q_m между собой.

Табл. 1. Результаты численного анализа

Условный проход трубопровода, мм	125	250	500
Q , Вт	204.2	633.9	1894.6
Q_m , Вт	456	855	1764
q , Вт/м [3]	38	57	98
l_3 , м [1]	12	15	18
$l = \frac{Q}{q}$, м	5.37	11.12	19.33
$\frac{ Q - Q_m }{Q} \cdot 100\%$	123.3	34.9	6.9

Результаты численного моделирования тепловых потерь от не изолированных шаровых кранов, приведенные в таблице, свидетельствуют о закономерном росте теплотерь с увеличением диаметра условного прохода (увеличением площади поверхности) крана.

Сопоставление между собой результатов численного моделирования Q и местных тепловых потерь Q_m (таблица) позволяет сделать вывод о том, что расхождение между ними составляет от 6.9 % до 123.3 % в зависимости от величины условного прохода трубопровода. Это обстоятельство свидетельствует о возможности снижения расчетной эквивалентной длины трубопровода l_3 для относительно не больших условных диаметров при проведении оценки местных тепловых потерь в тепловых сетях.

Пересчет эквивалентных длин трубопроводов l в соответствии с результатами численного моделирования (таблица) позволяет говорить о том, что для кранов с относительно не большими условными проходами l_3 можно сократить более чем в два раза.

На рисунке 2, в качестве иллюстрации результатов моделирования, приведено типичное температурное поле шарового крана с диаметром условного прохода 500 мм для условий, рассматриваемых в данной работе.

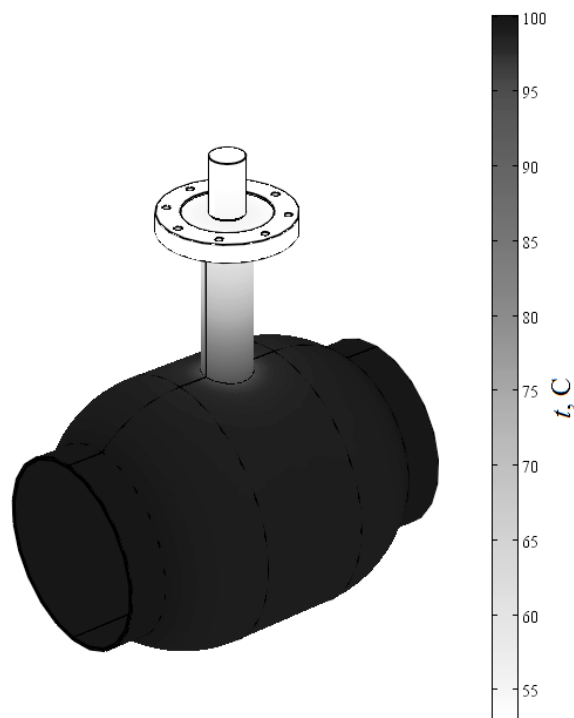


Рис. 2. Температурное поле шарового крана с диаметром условного прохода 500 мм.

Основные выводы по исследованию состоят в следующем:

На основании проведенного численного моделирования тепловых режимов типичной запорной арматуры тепловых сетей впервые теоретически установлены масштабы тепловых потерь шаровых кранов.

Показано, что для кранов с относительно не большими условными проходами эквивалентную длину трубопровода можно сократить более чем в два раза.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Издательство МЭИ, 2006.
2. Половников В.Ю., Губанов Ю.Ю. Тепловые потери в бесканальных тепловых сетях в условиях эксплуатации // Электрические станции, 2014 - № 8. - С. 19-23.
3. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Минрегион России, 2012.

Научный руководитель: Половников В.Ю., к.т.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

УСТОЙЧИВАЯ РЕГУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА ПРИ ДВИЖЕНИИ СЛОЯ ЖИДКОСТИ В МИНИКАНАЛЕ

Д.В. Феоктистов, Е.Г. Орлова, Н.О. Артёмов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

Одна из главных тенденций современного развития техники – это миниатюризация устройств [1-3]. В различных миниразмерных энергетических устройствах осуществляются процессы конденсации и испарения [5, 6] в мини- и микро- каналах [7]. В технологиях энергетической, химической, нефтехимической и горнодобывающей промышленности происходит переход от процессов тепло – и массообмена в большом объеме к процессам в тонких слоях жидкости.

Применение миниканальных технологий существенно повышает эффективность теплообменных устройств. Преимуществами теплообменников с миниканалами по сравнению с традиционными являются увеличение поверхности теплообмена на единицу объема, меньшая материалоемкость, а также более высокие коэффициенты теплоотдачи.

Несмотря на перспективность исследования процессов испарения тонких слоев жидкости, движущихся в миниканале под действием потока газа, экспериментальных [1, 6, 7] и теоретических [8, 9] работ недостаточно для детального понимания процессов тепломассопереноса на поверхности раздела жидкости и газа.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование возникновения самоорганизованных структур на поверхности подвижного слоя жидкости обтекаемого потоком газа в миниканале.

Экспериментальные исследования проведены на установке [10] по изучению динамики испарения и конвективных течений в миниканалах. Концепция эксперимента представлена на рис. 1 и включает использование апробированных ранее [6] методов изучения тепломассопереноса через межфазную границу раздела жидкости и газа.

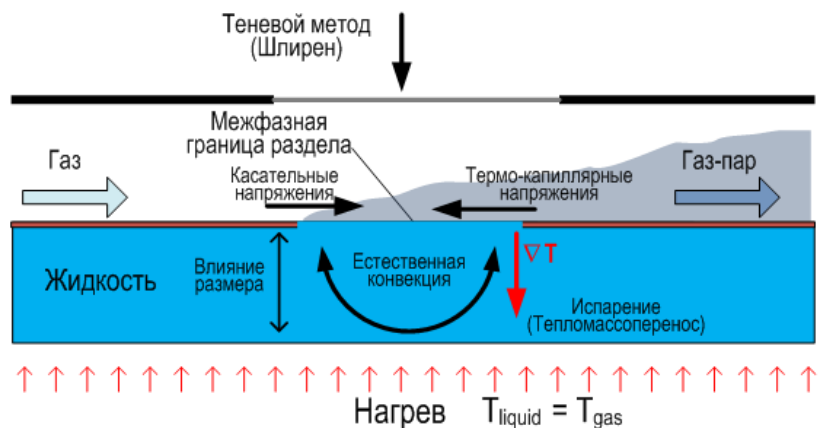
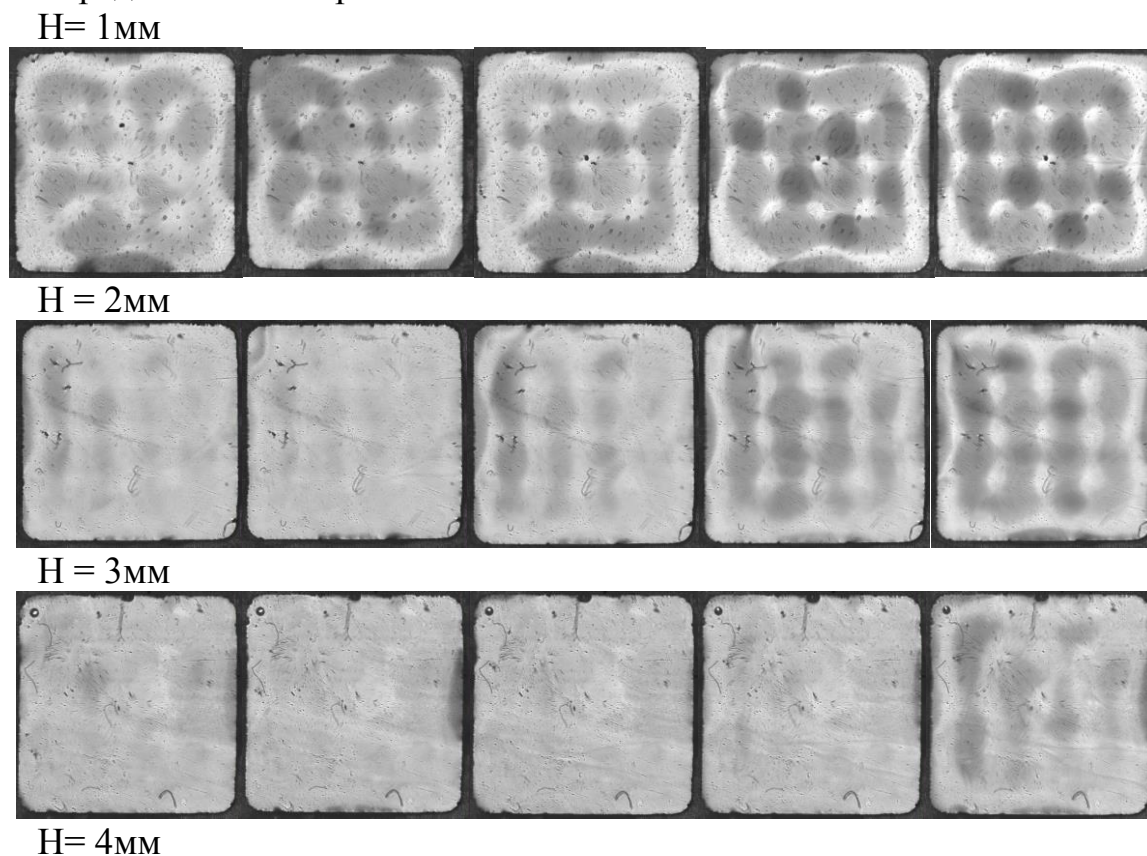


Рис. 1. Концепция эксперимента.

Эксперименты проводились при атмосферном давлении в рабочем участке, толщина подвижного слоя жидкости изменялась от 1 до 8 мм. Исследование пленок жидкости толщиной от 1 до 10 мм обусловлено тем, что в мини- и микроканальной аппаратуре используются слои жидкости, толщина которых попадает в данный диапазон. В качестве рабочей жидкости использовался этанол (95% (масс.), ГОСТ Р 51723-2001). Поверхность испарения, обдуваемая потоком газа (воздуха), составляла 100мм^2 при размере выреза в пластине $10\times 10\text{мм}$. Расход газа варьировался от 100 до 1000 мл/мин с шагом 100 мл/мин, что соответствует средней скорости газа от 0,014 м/с до 0,139 м/с. Выбор интервала изменения скорости газа обусловлен техническими возможностями регулятора расхода, используемого в экспериментальной установке. Эксперимент повторялся при температурах газа и жидкости от 20 до 50 °С, погрешность измерения термopарамн составляла не более 0,1 °С. Диапазон изменения экспериментальных температур, обусловлен физико-химическими свойствами рабочей жидкости, нагрев до температур выше 50°С приводит к нарушению экспериментальных условий, необходимых для получения достоверных результатов.

Известно [3], что наиболее распространенный метод визуализации конвективных течений – теневой, основанный на температурной зависимости коэффициента преломления света. Холодные нисходящие потоки фокусируют свет и в проекции на экране выглядят светлыми, а теплые восходящие действуют рассеивающе и выглядят темными.

Полученные типичные фотокадры поверхности пленки жидкости в микроканале представлены на рис. 2.



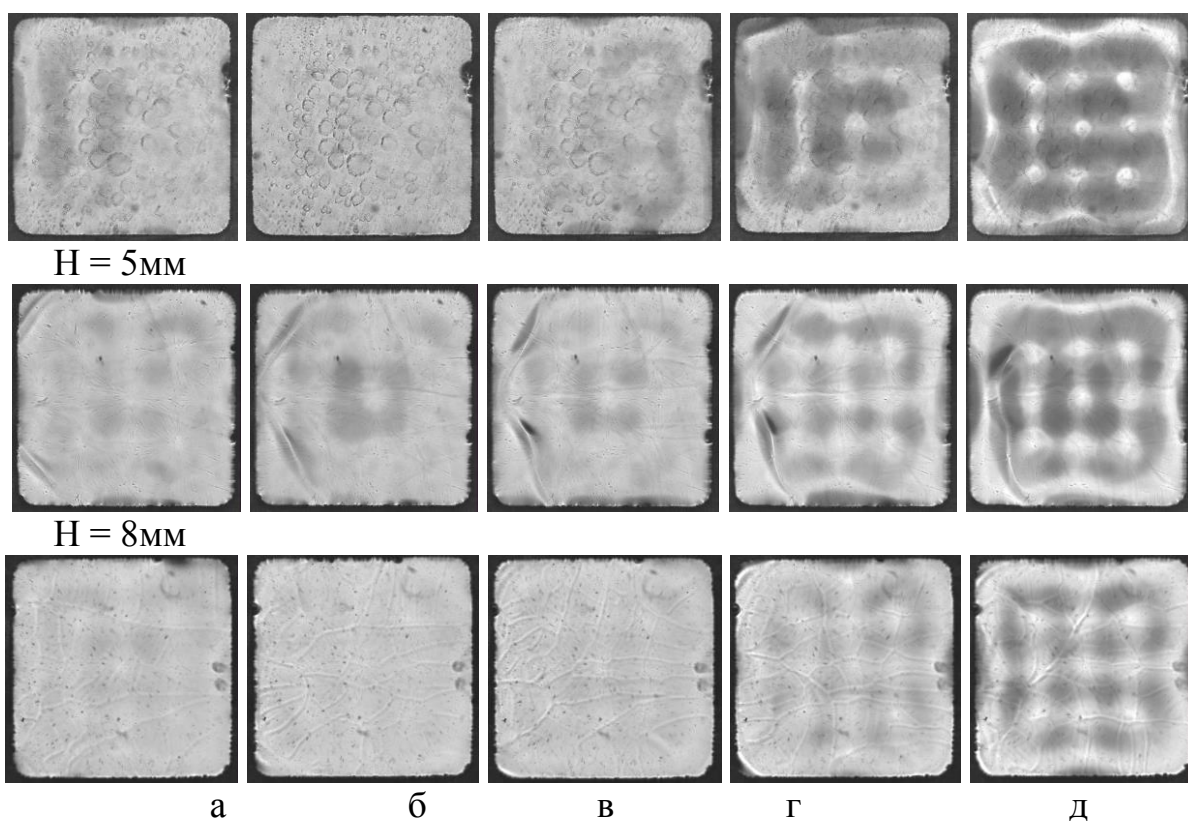


Рис. 2. Типичные фотокадры межфазной поверхности при температуре 50 °С. Скорость воздуха миниканале, м/с: а) 0,028; б) 0,055; в) 0,083; г) 0,111; д) 0,139.

По результатам анализа фотокадров рис. 2 установлено, что в подвижном слое жидкости, обтекаемом потоком газа образуется самоорганизованная структура в виде пространственных ячеек квадратной формы. Формирование ячеек происходит пропорционально увеличению средней скорости потока воздуха, при максимально возможной скорости воздуха ячейки имеют наиболее выраженную форму.

Установлено, что при толщине слоя жидкости 5 мм со стороны входа газа в миниканал, на поверхности жидкости образуется регулярная структура в виде «вала жидкости», которая становится более выраженной при возрастании скорости потока газа.

При использовании миниканала, в котором формируется слой жидкости толщиной жидкости 8 мм «вал жидкости» не зарегистрирован, установлено наличие только конвективных ячеек.

В проведенных ранее работах [11] исследовалось влияние структуры пленки на интенсивность испарения, отмечалось, что различного рода неустойчивости способны увеличивать массовую скорость испарения. Можно сделать вывод, что возникновение максимума скорости испарения при толщине слоя жидкости 5 мм, и снижение интенсивности испарения при дальнейшем увеличении толщины слоя жидкости может быть вызвано регулярной структурой, которая образуется при толщине слоя 5 мм.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (НШ-7538.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Особенности двухфазного течения в прямоугольном микроканале // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – № 10. – С. 52-58.
2. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Елистратов С.Л. Особенности испарения капель воды на нагреваемой поверхности // Доклады академии наук. – 2013. – Т. 448. – № 3. – С. 293.
3. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капли воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78. – №3. – С. 335-339.
4. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 12. – С. 531-538.
5. Lyulin Y., Kabov O. Evaporative convection in a horizontal liquid layer under shear-stress gas flow // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 70. – PP. 599-609.
6. Afanasyev I., Orlova E., Feoktistov D. Evaporation of stationary alcohol layer in minichannel under air flow // EPJ Web of Conferences. – 2015. – V. 82. – 01054.
7. Misyura S.Y., Morozov V.S. Nonisothermal desorption of the LiBr aqueous salt solution in minichannels // MATEC Web of Conference Volume. – 2015. – V. 37. – 01033.
8. Kuang, Y., Wang W., Miao J., Yu X., Zhuan R. Theoretical analysis and modeling of flow instability in a mini-channel evaporator // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2017. – V.104. – PP.149-162 (in Press).
9. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (Обзор) // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т.51. – №3. – С.421.
10. Люлин Ю.В., Феоктистов Д.В., Афанасьев И.А., Чачило Е.С., Кабов О.А., Кузнецов Г.В. Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – Вып. 14. – С.1-7.
11. Д.В. Зайцев, Д.А. Родионов, О.К. Кабов. Критический тепловой поток в локально нагреваемой пленке жидкости, движущейся под действием потока газа в мини-канале. // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – № 7. – С.680-682.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА “ЖИДКОСТЬ-ГАЗ”

Д.В. Феоктистов, Е.Г. Орлова, Д.С. Меньшиков
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ

В настоящее время развитие отраслей (металлургии, микроэлектроники и др.) идет по пути роста энергонасыщенности оборудования [1-3]. Одной из проблем техники данных областей производства является создание систем обеспечения теплового режима работы оборудования [4, 5]. Решение последней возможно созданием энергоэффективных систем, работа которых основана на фазовых переходах [5-7].

Разработка теоретических положений процессов кипения и испарения ведется давно многими научными коллективами разных стран. Однако до настоящего момента они не разработаны на уровне прогностического моделирования. Так, например, еще в начале XX века велась работа [8] по определению температуры на поверхности раздела фаз “жидкость-газ”. Но в настоящее время отсутствуют аналитические выражения по ее определению, которые возможно использовать при создании теплообменных устройств. Существующие зависимости, как правило, включают переменные, физически которые очень сложно определить. Также отсутствуют экспериментальные данные, подтверждающие наличие температурного перепада на поверхности раздела фаз “жидкость-газ”.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение наличия и величины перепада температуры на поверхности раздела фаз жидкость-воздух с помощью термопары с диаметром королька 80 мкм и линейного актуатора.

Экспериментальные исследования проведены на установке [9], моделирующей условия процессов кипения и испарения тонких слоев жидкости. Принцип её действия и методика проведения исследований приведены в [9].

Основные факторы воздействия приведены в таблице 1.

Табл. 1. Основные факторы воздействия

Фактор	Значение факторов		
Жидкость	Этиловый спирт	Дистиллированная вода	3M™ Novec™ 7100 Engineered Fluid, метокси-нонафторбутан
Материал подложки	фторопласт, диаметр – 50 мм, толщина 5 мм		

Наличие перепада температур на поверхности раздела фаз будет свидетельствовать о наличии термического сопротивления на поверхности жидкости. В случае если последнее присутствует, необходимо учитывать неравенство коэффициентов испарения и конденсации при расчетах данных процессов.

Эксперименты по измерению температурного распределения поперек слоя в системе жидкость-воздух проводились с помощью откалиброванной

термопары типа К (Omega) с диаметром королька термопары 80 мкм. По всей поверхности рабочего участка осуществлялся нагрев, за счет чего образовывался поток паров воды с поверхности жидкости. Исследовался один стационарный режим при температуре поверхности материала 55 °С. Начальный объем жидкости, размещаемый на поверхности подложки, составлял 3,5 мл. Данному объему соответствует толщина слоя жидкости в 1,5 мм. Так как фторопласт является изоляционным материалом, температура подложки при испарении жидкости оставалась постоянной.

Поскольку использовались легкоиспаряющиеся жидкости, конвекция, конденсация и испарение с поверхности термопары оказывали значительное влияние на результаты проведения исследований. Даже для дистиллированной воды конденсация капель жидкости на термопаре приводила к колебаниям регистрируемой температуры. На рисунках 1-2 приведены типичные зависимости температуры, регистрируемой термопарой в условиях прохождения через поверхность раздела фаз в процессе испарения жидкости. По оси абсцисс (рис. 1-2) отмечено положение термопары. Отметка 0 соответствует моменту, когда происходило касание термопары поверхности раздела фаз.

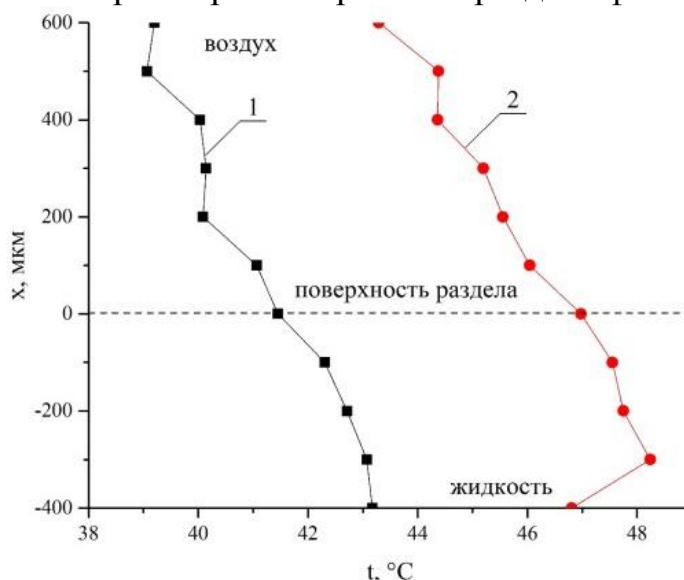


Рис. 1. Зависимость температуры от положения термопары в вертикальной плоскости по отношению к поверхности раздела “жидкость-воздух” при испарении дистиллированной воды (2 мл) с поверхности подложки из фторопласта и температуре нагревательного элемента: 1 – 60 °С, 2 – 80 °С.

Результаты при использовании этилового спирта и жидкости HFE 7100 не приводятся, так как они имеют аналогичный характер зависимости.

Установлено, что температура воздуха и жидкости вблизи поверхности раздела “жидкость-газ” изменяется колебательно. Причем на расстоянии ± 80 мкм (соответствует толщине королька термопары) от нее не зарегистрировано “скачков” температуры. Колебательный характер температуры можно объяснить следующим. При дозировании жидкости на поверхность прогревается слой, расположенный на поверхности нагрева. Возникает градиент температуры, направленный от поверхности раздела фаз, а также градиент плотности. Последнее приводит к конвекции жидкости Рэлея-Бинара (конвекция в плоском

горизонтальном слое жидкости или газа, подогреваемом снизу). При такой конвекции пространственные и временные эффекты в значительной степени расцеплены из-за отсутствия интенсивного потока, навязанного внешними условиями. Верхний более холодный слой жидкости опускается вниз, прогретый поднимается на поверхность. Очевидно, что циркуляция жидкости оказывает влияние на движение воздуха вблизи поверхности раздела, чем вызвано колебательное изменение температуры воздуха.

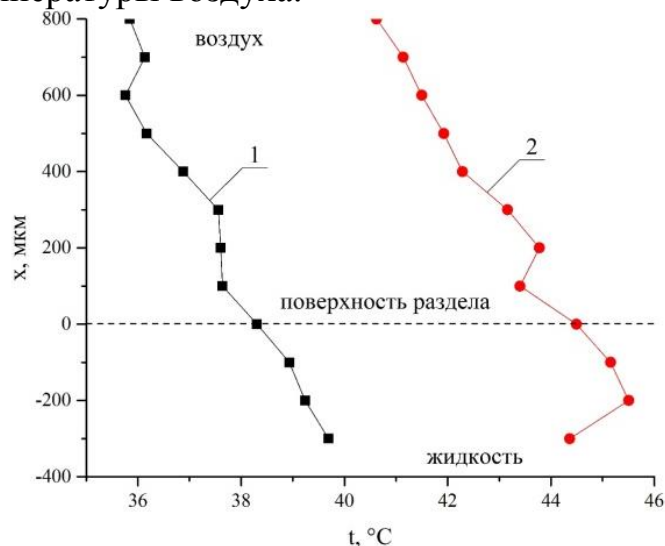


Рис. 2. Зависимость температуры от положения термопары в вертикальной плоскости по отношению к поверхности раздела “жидкость-воздух” при испарении дистиллированной воды (4 мл) с поверхности подложки из фторопласта и температуре нагревательного элемента: 1 – 60 °C, 2 – 80 °C.

Стоит отметить, что вблизи поверхности раздела фаз толщина слоя, в котором может происходить быстрое изменение термодинамических параметров (температуры и давления) мала. При нормальных условиях (атмосферное давление) в которых проводился эксперимент, эта величина составляет 1 мкм для паров воды. Таким образом, для дальнейшего решения проблемы определения термодинамических параметров на поверхности раздела фаз и их влияние на процесс испарения и конденсации необходимо проведение экспериментальных исследований с применением термопар диаметр королька которых не должен превышать 10 мкм.

По результатам серии экспериментов выявлено, что при движении термопары к поверхности раздела фаз на ней образуется слой конденсата. Последний влиял на регистрируемые параметры. Сделан вывод, что для повышения точности измерения температуры поверхности раздела фаз необходимо использовать термопару, в которой электроды будут располагаться горизонтально (“телескопически”). Такое расположение электродов будет соответствовать изотермам поверхности раздела “жидкость-газ” и позволит уменьшить утечки тепла, связанные с градиентом температур по электродам термопар. Также это позволит уменьшить толщину слоя конденсата образующегося на поверхности термопары.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-6810.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Чиннов Е.А., Кабов О.А. Особенности двухфазного течения в прямоугольном микроканале // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36. – № 10. – С. 52-58.
2. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – С. 17-22.
3. Накоряков В.Е., Мисюра С.Я., Елистратов С.Л. Особенности испарения капель воды на нагреваемой поверхности // Доклады академии наук. – 2013. – Т. 448. – № 3. – С. 293.
4. Kuznetsov G.V., Zakharevich A.V., Bel'kov N.S. Effect of heat-transfer conditions on the ignition characteristics of liquid fuel // Chemical and Petroleum Engineering. – 2014. – V. 50. – PP. 424-429.
5. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of radiative heat and mass transfer mechanism in system water droplet - high-temperature gases on integral characteristics of liquid evaporation // Thermal Science. – 2015. – V. 19. – PP. 1541–1552.
6. Lyulin Y., Kabov O. Evaporative convection in a horizontal liquid layer under shear-stress gas flow // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – V. 70. – PP. 599-609.
7. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капли воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78. – №3. – С. 335-339.
8. Thomas N., Ferguson A. Evaporation from a Circular Water Surface // Philos. Mag. – 1917. – V.34. – PP. 309–321.
9. Velicanov V.D., Orlova E.G., Saigash A.S., Korneva O.S. Experimental observation of the temperature at the liquid/gas interface // MATEC Web of Conference. – 2016. – V. 72. – 01028.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТНОГО ОСНОВАНИЯ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

О.В. Степанова, В.И. Максимов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ61

Введение

Хранилища сжиженного природного газа имеют различную конструкцию, форму и размеры. Для экономичного и безопасного хранения сжиженного

газа производится исследование теплового состояния фундаментного основания резервуара [1].

Цель работы:

Математическое моделирование теплового состояния фундаментного основания наземного низкотемпературного резервуара для хранения сниженного природного газа.

Рассматривается низкотемпературный наземный резервуар для хранения СПГ, имеющий плитный фундамент (Рисунок 1)[1].

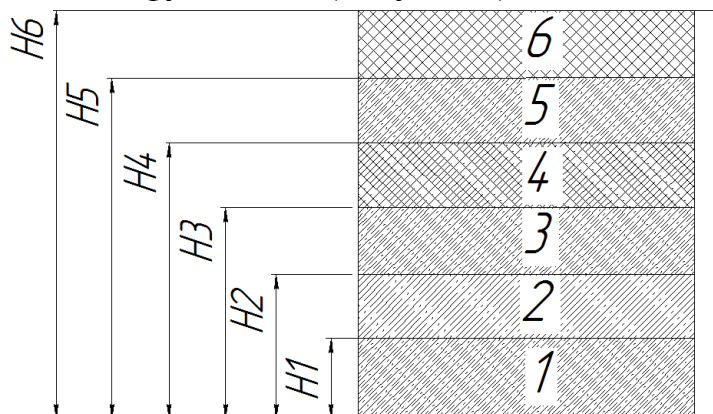


Рис. 1. Фундаментное основание низкотемпературного резервуара для хранения СПГ бетонные сваи, 2- слой с теплообменниками, 3- опорный фундамент, 4- амортизирующие прокладки, 5- наружная оболочка, 6- блоки пеностекла.

Фундаментное основание разделено на равные части, рассматривается одна из частей, длина и высота $H=L=1$ м. Правая и левая граница области решения (Рисунок 2) теплоизолированные. На верхней границе отвод тепла $q_2=-20$, Вт/м², на нижней границе подвод тепла $q_1=0,0005$, Вт/м². Подвод тепла производится за счет теплоты грунта. Отвод тепла осуществляется за счет соприкосновения фундаментного основания с низкотемпературным резервуаром. Начальная температура принимается равной температуре грунта $T_0=5$, °С. Имеется внутренний источник тепла во втором слое за счет теплообменника (подогревателя фундамента) $q_3=0,0004$, Вт/м³.

Физические условия определяют теплофизические характеристики тела [2]: коэффициент теплопроводности λ_{1-6} , плотность ρ_{1-6} , удельная теплоемкость c_{1-6} приведены в таблице 1.

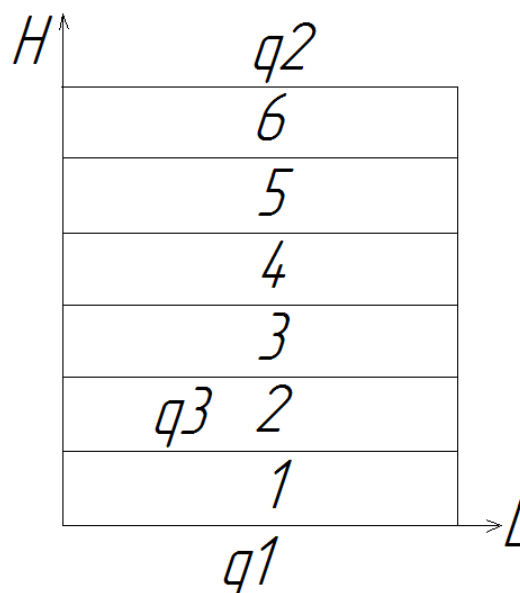


Рис. 2. Область решения.

Табл. 1. Теплофизические характеристики материала

№	Элемент конструкции	Материал	λ , Вт/м ⁰ С;	c , кДж/кг ⁰ С;	ρ , кг/м ³
1	Сваи	Бетон (особо тяжелый/легкий)	1,3	0,88	2800/800
2	Теплообменник	Бетон	1,3	0,88	2000
3	Опорный фундамент	Бетон	1,3	0,88	2000
4	Амортизирующие прокладки	Жесткий пенистый полистирол	0,12	1,11	1050
5	Наружная оболочка	Бетон	1,3	0,88	2000
6	Блоки пеностекла	пеностекло	0,14	1	500

Математическая постановка задачи

Решается одномерная нестационарная задача теплопроводности (1) в фундаменте резервуара, представляющего собой 6 неоднородностей с разными теплофизическими свойствами и подводом тепла в одном из слоев[3].

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right) + q_3, |0 < x < L, 0 < y < H_i| \quad (1)$$

Начальные и граничные условия

$$t = 0, T = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H;$$

$$x = 0: -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0;$$

$$x = L: -\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0;$$

$$y = 0: \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} = q_1, t > 0;$$

$$y = H: \lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} = q_2, t > 0;$$

$$\begin{cases} T_i(x_i, y_i, t) = T_j(x_j, y_j, t); \\ -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = -\lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y} \end{cases}, \text{ пр } |y = H_i, 0 < x < L. \quad (2)$$

Сформулированное уравнение (1) с соответствующими краевыми условиями (2) решается с помощью метода конечных разностей, используя неявную четырехточечную схему [4]. Результаты получены для стационарного режима с конечным временем 6 часов.

Установлено влияние теплофизических свойств материалов на тепловое состояние фундаментного основания низкотемпературного резервуара для хранения СПГ при замене тяжелого бетона на легкий (Рисунок 3-4).

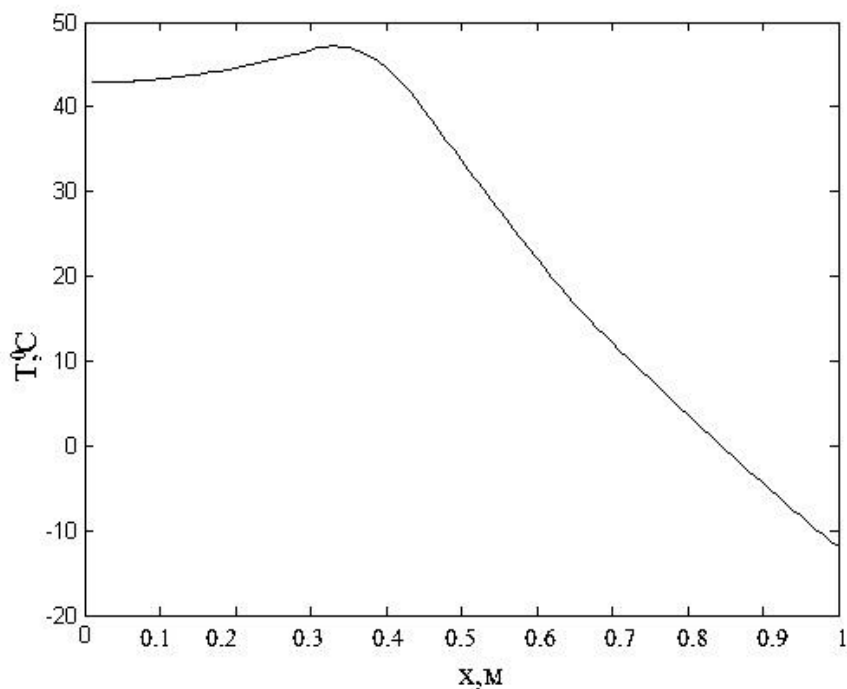


Рис. 3. Распределение температуры по высоте при использовании тяжелого бетона для конструкции свай.

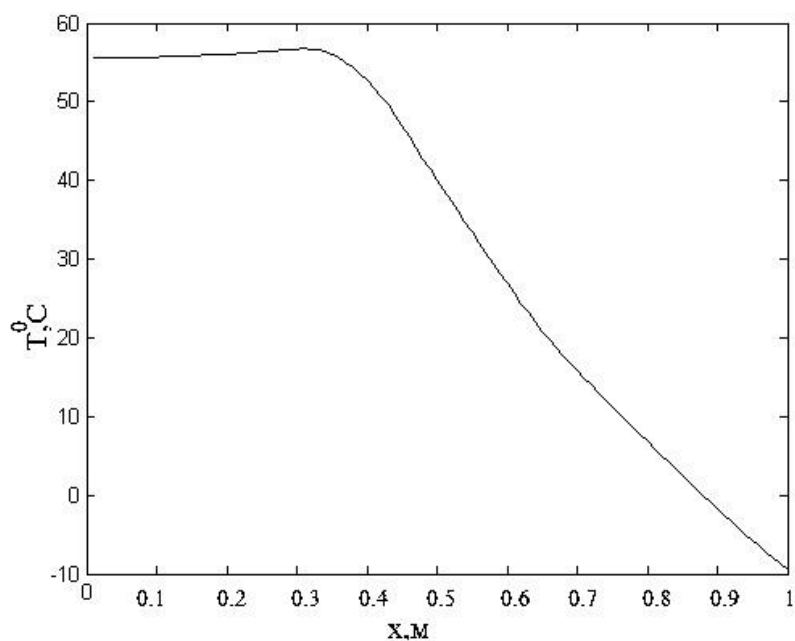


Рис. 4. Распределение температуры по высоте при использовании легкого бетона для конструкции свай.

Вывод

Проведено численное моделирование теплового состояния фундаментного основания резервуара для сжиженного природного газа.

Выявлено что, при замене в конструкции фундамента тяжелого бетона на легкий бетон, происходит увеличение промерзания основания на 65 %.

Необходимая тепловая мощность подогревателя для исключения промерзания такой конструкции уменьшается на 30%.

Полученные результаты численного моделирования теплового состояния многослойного фундаментного основания можно использовать при проектировании и эксплуатации новых и уже существующих низкотемпературных наземных резервуаров для хранения сжиженного природного газа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рачевский Б.С. Сжиженные углеводородные газы.- М.: Изд-во «Нефть и Газ», 2009. - 640 с.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача.-М.: Изд-во «Энергия», 1975.-487 с.
3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: Учебное пособие. - Томск: Изд-во ТПУ, 2007-172с.
4. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2000. – 316 с.

Научный руководитель: В.И. Максимов, к.т.н, доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАПОЛНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТЕРМОСИФОНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПО ВЫСОТЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ЧАСТИ

К.О. Зайкан^{1,2}, Д.В. Феоктистов¹, Е.Г. Орлова¹

¹Томский политехнический университет, ЭНИН, ТПТ, ²группа 5ФМ61

Разработка эффективных систем отведения теплоты от поверхности [1-5], является одной из задач при проектировании технологического оборудования в нефтяной, космической, химической отрасли. Вследствие этого для промышленной теплоэнергетики большой интерес представляют такие теплоотводящие устройства как двухфазные термосифоны. Данные устройства просты по своей конструкции и способны отводить высокие локальные тепловыделения, принцип действия которых основан на режимах кипения и конденсации в условиях свободной конвекции.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование степени заполнения вертикального термосифона теплоносителем на распределение температур по высоте конденсационной части.

Экспериментальные исследования проведены на установке [4, 5], принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.

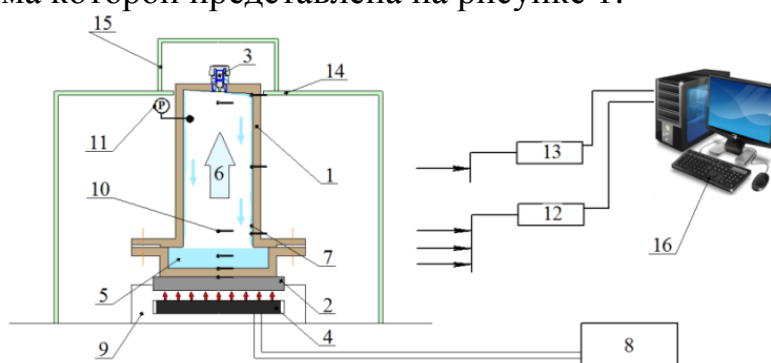


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 – термосифон, 2 – металлическая подложка, 3 – клапан, 4 – спираль нагрева, 5 – рабочая жидкость, 6 – пары жидкости, 7 – конденсат, 8 – источник питания, 9 – рабочий столик, 10 – термопары, 11 – датчик давления, 12 – аналого-цифровой преобразователь NI 9214, 13 – аналого-цифровой преобразователь NI USB-6000, 14 – стеклянный бокс, 15 – крышка под верхнее отверстие, 16 – персональный компьютер.

Конструкция термосифона изготовлена из меди и состоит из двух частей: нижней 1 и верхней 2 крышки. Толщина боковых стенок 1,5мм, нижней стенки 2мм. Верхняя стенка термосифона выполнена под углом 3° к горизонту, что обеспечивает движение конденсата по одной стенке.

Условно термосифон можно разделить на 3 рабочие части: испарительную I, паровую II и конденсационную III.

Нижняя крышка термосифона с внутренним диаметром 54 мм, объемом 50 мл выполняет функцию испарительной части.

Паровой канал изготовлен из медной трубы с внутренним диаметром 39,2 мм. Температура паров в II измеряется термопарами, установленными в нижней, верхней и центральной части. Их расположение изображено на рисунке 2.

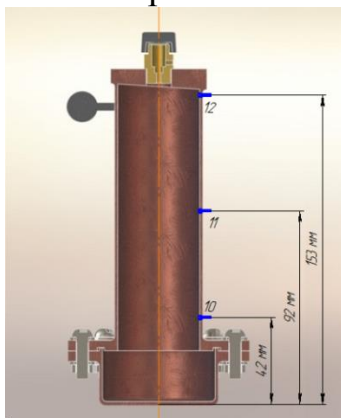


Рис. 2. Геометрическое расположение термопар на стенке парового канала

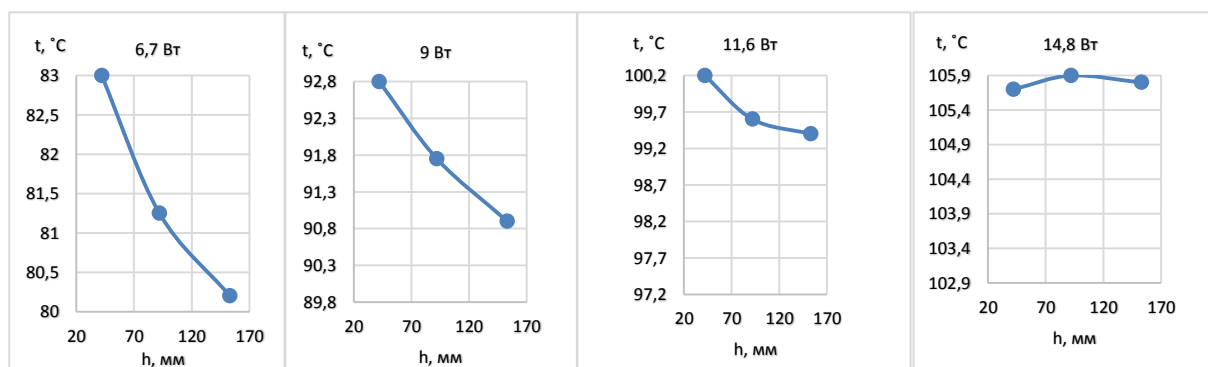
Верхняя стенка термосифона выполняет функцию конденсационной части III. Измерение температуры конденсата, движущегося по боковой стенке, осуществляется термопарами 10,11,12 рис. 2. В таблице 1 представлены варьируемые параметры.

Табл. 1 – Основные варьируемые параметры

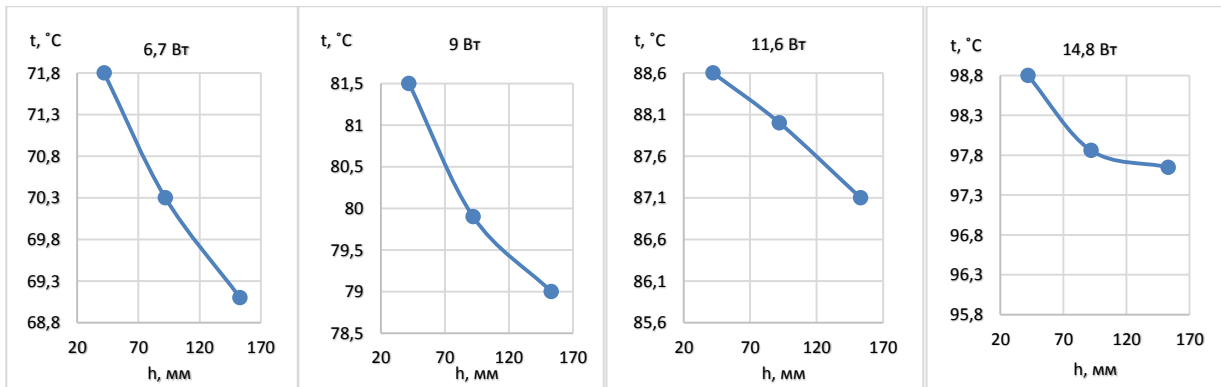
Основные факторы	Значения факторов
Объем заполнения термосифона	10 – 50 мл, с шагом 10 мл.
Мощность нагрева, Вт	6,7; 9; 11,6; 14,8;

Экспериментальные результаты распределения температур на вертикальной стенке термосифона при различном его заполнении представлены на рис. 3.

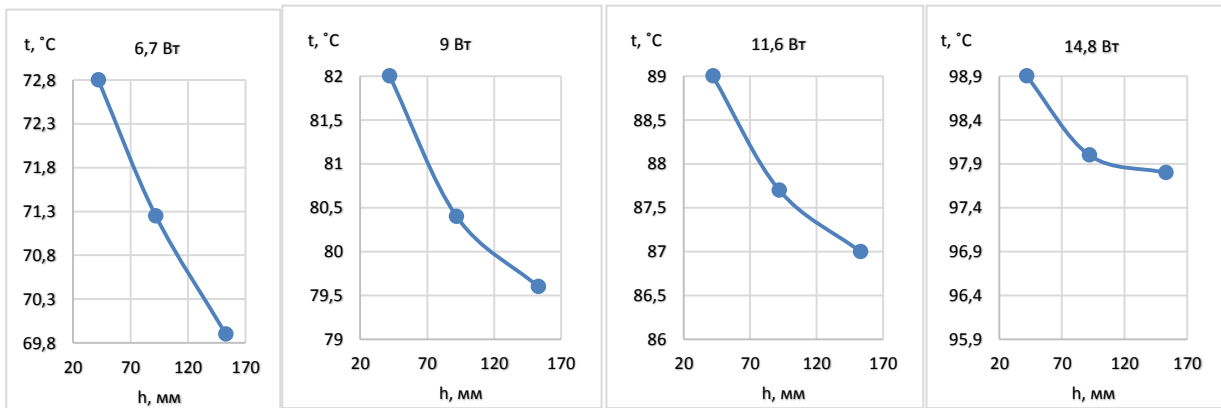
Анализ полученных зависимостей по изменению температуры на вертикальной стенке (в квазистационарных условиях работы термосифона) показывает, что при увеличении мощности подводимой к термосифону сокращается перепад температур между термопарами №10, 11, 12. Так при нагреве 6,7Вт перепад температур на стенке между точками 10 и 12 составил 3°C, при 9Вт – 2,5°C, при 11,6Вт – около 2°C, при 14,8Вт перепад составил не более 0,5 – 1°C.



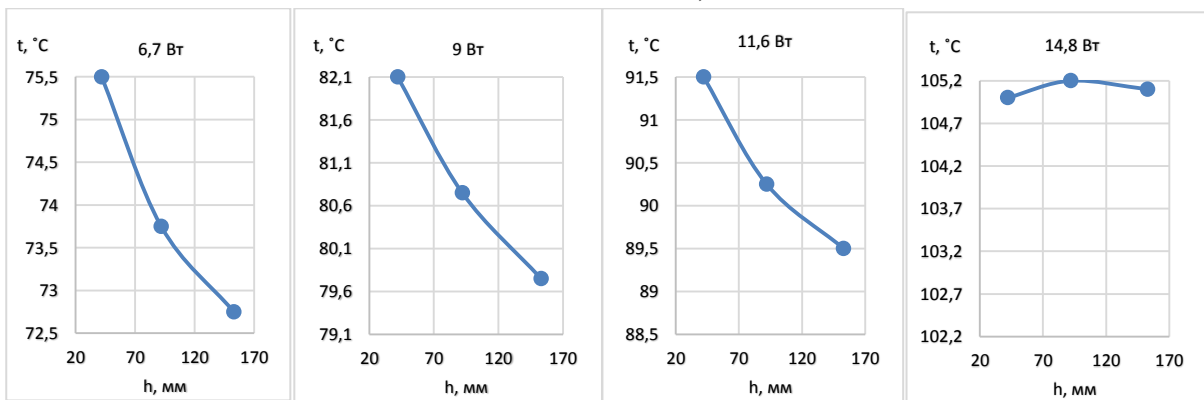
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Распределение температур на вертикальной стенке термосифона при различном заполнении: а) – 10мл; б) – 20мл; в) – 30мл; г) – 40мл; д) – 50мл.

Выявлено, что при относительно высоких условиях нагрева термосифона 14,8Вт температура в точках №10, 11, 12 составляла $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, при этом давление было равным 120-130 кПа. В этих условиях температура в точке 11 выше, чем в точке 10 и 12. Последнее возможно объяснить следующим. При данных условиях работы термосифона могут возникать сухие пятна на стенке, предназначенной для транспортировки конденсата из паровой части в испарительную. При образовании такого пятна может значительно повышаться температура.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-6810.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капель воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т.78. – С.335-339.
2. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Evaporation of water solution droplets on a horizontal heating surface // International Journal of Energy Technology – 2012. – P. 1-7.
3. Люлин Ю.В., Кабов О.А. Измерение массовой скорости испарения в горизонтальном слое жидкости, частично открытом в движущийся газ // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т.39. – С. 88-94.
4. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №1. – С. 17-22
5. Семенов А. А., Зайцев Д. В., Феоктистов Д.В., Кузнецов Г. В., Кабов О. А. Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности // Теплофизика и аэромеханика. - 2015 - Т. 22 - №. 6. - С. 801-804.

МЕХАНИЗМ ДВИЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ЛИНИИ В УСЛОВИЯХ РАСТЕКАНИЯ КАПЛИ ПО ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

¹ Д.В. Феоктистов, ^{1,2} Л.С. Жидкова, ^{1,2} К.А. Батищева
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, ²5БЗБ

Известно [1-17], что капля, помещенная на твердую поверхность, растекается, стремится принять равновесное состояние. Характеристиками, используемыми для описания растекания капли по твердой поверхности являются: динамический краевой угол, скорость движения линии трехфазного контакта (ЛТК) и диаметр пятна контакта. Наиболее значимой из них является динамический краевой угол. Известны [18-20], теории процесса растекания, в которых ДКУ математизирован в виде функциональных зависимостей от скорости перемещения ЛТК.

В настоящих исследованиях проведено обоснование возможности применения положений комбинированной теории процесса растекания (как наиболее интегрированной так, как она учитывает адсорбцию и десорбцию молекул, силы вязкостного трения в объеме жидкости) к описанию натекания/оттекания капли жидкости по полированной и структурированной поверхностям алюминиевых подложек.

В комбинированной теории предполагается, что равновесный контактный угол зависит от скорости перемещения ЛТК [18]:

$$\theta_D^3 = (\theta_0(U))^3 \pm (9\mu U / \sigma) \ln(L/L_m)$$

$$\text{где } \theta_0(U) = \arccos \left[\cos \theta_D \mp (2k_B T / \sigma \lambda^2) \operatorname{arcsinh}(U / 2k_0 \lambda) \right]$$

Исследования проводились на установке принцип действия установки подробно описан в [21]. В экспериментах использовались две подложки, изготовленные из алюминия. Поверхность одной полировалась, на вторую наносилась микроструктура лазерной обработкой. Поверхности исследовались с помощью профилометра “Micro Measure 3D station” (рис.1). Установлены средние арифметические отклонения профиля $Ra=0,0558\text{мкм}$ и $Ra=4,2096\text{ мкм}$ соответственно для полированной и структурированной подложки. На микроскопе «Hitachi-3000M» исследована микроструктура. Их фотоизображение приведено на рис. 1.

Расход жидкости, подаваемый электронным насосом варьировался в следующем диапазоне: 0,05 мл/с, 0,07 мл/с, 0,09 мл/с, 0,11 мл/с.

Обработка экспериментальных данных и сопоставление с моделью [18] проводилась методом наименьших квадратов. Для оценки согласования данных получен коэффициент детерминации R^2 . Результаты определения параметров комбинированной модели для полированной поверхности приведены в табл. 1

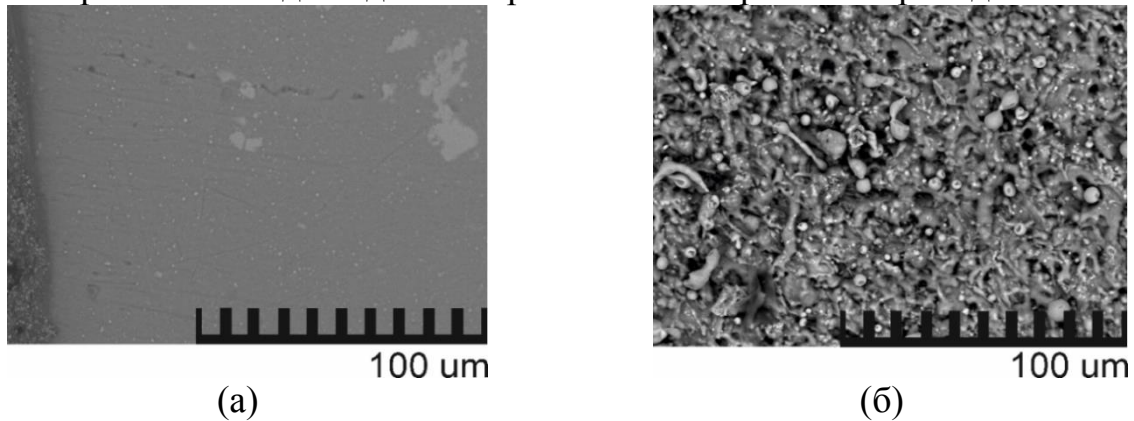


Рис. 1. Поверхность подложек ($\times 1000$): (а) полированная; (б) структурированная

Табл. 1. Параметры полированной поверхности

Расход жидкости, мл/с	Динамический контактный угол	Экспериментально установленный статический угол $\theta_0, ^\circ$	Расчетные параметры			
			$\theta_0, ^\circ$	$k^0, 10^3 s^{-1}$	$\lambda, \text{нм}$	R^2
0,05	Наступающий	96,5	96,2	507,0	2,30	0,990
	Отступающий		95,5	8639,4	0,46	0,997
	Наступающий/ отступающий		91,6	0,47	3,02	0,758
0,07	Наступающий	92,8	92,8	6693,1	0,56	0,998
	Отступающий		92,4	49,4	1,69	0,991
	Наступающий/ отступающий		90,4	4,69	2,73	0,650
0,09	Наступающий	85,3	87,0	5084,9	1,14	0,992
	Отступающий		84,2	7287,7	0,62	0,999
	Наступающий/ отступающий		80,5	0,863	2,98	0,634
0,11	Наступающий	99,0	99,4	1443,2	2,03	0,973
	Отступающий		0,096	8210,8	0,096	0,957
	Наступающий/ отступающий		96,7	1,80	4,85	0,765

Установлено, что комбинированная модель хорошо согласуется с экспериментальными результатами на полированной поверхности. Это объясняется тем, что она учитывает одновременно трение контактной линии и силы вязкости в объеме жидкости. Также стоит отметить, что значения отступающего ДКУ в сравнении с наступающим согласуются лучше.

В таблице 2 представлены результаты параметров комбинированной модели для структурированной поверхности.

Установлено, что зависимости наступающего/отступающего ДКУ от скорости перемещения ЛТК на структурированной поверхности лучше согласуются с комбинированной моделью по сравнению с полированной. Так, при расходе жидкости 0,05 мл/с коэффициент детерминации на полированной поверхности для комбинированной модели равен $R^2=0,758$, на структурированной – $R^2=0,975$. Отличие коэффициентов детерминации связано с разным значением гистерезисов КУ на двух поверхностях.

Табл. 2. Параметры модели для структурированной поверхности

Расход жидкости, мл/с	Эксперимен- тально уста- новленный ста- тический угол $\theta_0, ^\circ$	Комбинированная модель			
		$\theta_0, ^\circ$	$k^0,$ $10^3 \Gamma\zeta$	$\lambda, \text{нм}$	R^2
0,05	71,9	69,7	132,8	1,59	0,975
0,07	80,2	74,2	4,71	1,75	0,965
0,09	75,8	76,2	394,0	1,07	0,980
0,11	78,9	77,3	534,3	1,02	0,989

Также установлено, что помимо шероховатости и химической неоднородности поверхностей, на значение гистерезиса влияет форма микроструктуры поверхности, ее пористость. Так, на полированной поверхности со средним арифметическим отклонением профиля $Ra = 0,0558$ мкм гистерезис КУ составляет 5° , а на поверхности, структура которой создана лазерной обработкой, с $Ra = 4,2096$ он не превышает и 2° .

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-6810.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батищева К.А. Режимы испарения капель воды на медных подложках // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78. – С.335-339.
2. Зайцев Д.В., Чиннов Е.А., Кабов О.А., Марчук И.В. Экспериментальное исследование волнового течения пленки жидкости по нагреваемой поверхности // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – В. 6. – С. 31-37.
3. Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L. Evaporation of water solution droplets on a horizontal heating surface.// International Journal of Energy Technology – 2012. – P. 1-7.
4. Li X., Zhang L., Ma X., Zhang H. Dynamic characteristics of droplet impacting on prepared hydrophobic/superhydrophobic silicon surfaces // Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 307. – P. 243-253.
5. Люлин Ю.В., Феоктистов Д.В., Афанасьев И.А., Чачило Е.С., Кабов О.А., Кузнецов Г.В. Измерение скорости испарения с локальной поверхности слоя жидкости под действием потока газа // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – С. 1-7.
6. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of water droplets shape influence on mathematical modeling results of its evaporation in motion through a high-temperature gas // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – V. 2014. – Article Number. 920480. – P. 1-8.

7. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Бельков Н.С. Влияние условий теплопередачи на характеристики зажигания жидкого топлива // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – В. 7-8. – С. 9-12.
8. Накоряков В.Е., Мисюра С.Ю., Елистратов С.Л. Кризис кипения в каплях этанола раствора воды на поверхности нагрева // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 22 – С. 1-7.
9. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Испарение капель жидкости с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и Аэро-механика. – 2016. – Т. 23. – С. 17-22.
10. Kirichenko D.P., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Levitation of Liquid Microdroplets above A Solid Surface Subcooled to the Leidenfrost Temperature // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 72. – Article number. 01046.
11. Sivkov A., Shanenkova Y., Saigash A., Shanenkov I. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity // Surface and Coatings Technology. – 2016. – V. 292. – P. 63-71.
12. Oko A., Claesson P.M., Niga P., Swerin A. Measurements and dimensional scaling of spontaneous imbibition of inkjet droplets on paper // Nordic Pulp and Paper Research Journal. – 2016. – V. 31. – Issue 1. – P. 156-169.
13. Basu S., Shravan S. Preparation and characterization of petroleum sulfonate directly from crude // Petroleum Science and Technology. – 2008. – Volume 26. – Issue 13. – P. 1559-1570.
14. Sivkov A.A., Pak A.Y., Nikitin D.S., Rakhmatullin I.A., Shanenkov I.I. Plasmodynamic synthesis of nanocrystalline structures in the C-N system // Nanotechnologies in Russia. – 2013. – V. 8. – Issue 7-8. – P. 489-494.
15. Люлин Ю.В., Кабов О.А. Измерение массовой скорости испарения в горизонтальном слое жидкости, частично открытом в движущийся газ // Письма в ЖТФ. – 2013. – Т. 39. – С. 88-94.
16. Накоряков В.Е., Мисюра С.Ю. Пузырьковое кипение в каплях чистой воды и в каплях водного раствора соли // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 458. – №4. – С. 410-414.
17. Накоряков В.Е., Елистратов С.Л., Мисюра С.Я. Особенности диссоциации газовых гидратов при тепловом воздействии // Журнал технической теплофизики. – 2013. – Т. 22. – В. 3. – С. 169-173.
18. Petrov P.G., Petrov J.G. A combined molecular-hydrodynamic approach to wetting kinetics // Langmuir. – 1992. – №8 – P.1762-1767.
19. Blake T. D., Haynes J. M. Kinetics of liquidliquid displacement // Journal of Colloid and Interface Science. – 1969. – V. 30. – Issue 3. – P.421-423.
20. Voinov O. V. Hydrodynamics of Wetting // Journal of Fluid Dynamics. – 1976. – V. 11. – Issue 5. – P. 714-721.
21. Orlova E.G., Malyhina E.R., Feoktistov D.V., Zhidkova L.S. Dynamic Wetting and Dewetting: Comparison of Experiment with Theories // MATEC Web of Conferences. – 2016. – V. 72. – Article number. 01062.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ПЛАСТИНЫ

С.Е. Гердт

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5032

Методы, в которых используется одномерный тепловой поток, привлекают простотой расчетной формулы для бесконечного плоского слоя и наглядностью с физической точки зрения, так как сущность их является в какой-то мере отражением самого определения коэффициента теплопроводности. Чаще всего рассматриваются исследуемые образцы в виде пластины конечных размеров или цилиндрического столбика. В обоих случаях требуется тепловая изоляция боковых поверхностей для предотвращения искажения одномерности теплового потока. При использовании пластины последнее требование выражено менее жестко, так как соответствующим выбором соотношения геометрических размеров легче добиться одномерного распределения температуры, если не по всему образцу, то хотя бы в его центральной части. В этом случае периферийные участки образца выполняют роль вспомогательной теплоизоляции.

Измерения теплопроводности плохих проводников тепла в работе проводятся на приборе с одним плоским образцом в виде круглого диска. Исследуемый образец располагается горизонтально на керамической плите, внутри которой находятся центральный, основной и компенсационный нагреватели. Снизу исследуемый образец прижимается плоским теплосъемником, охлаждаемый проточной водой. При установившемся стационарном тепловом режиме измерения сводятся к определению тепловой мощности основного спирального электрического нагревателя $Q=IV$ Вт и температуры на «горячей» и «холодной» сторонах образца (T_1 и T_2) с помощью термопар. Расстояние между термопарами и их расчетную площадь определяют до начала эксперимента, а полученный по формуле коэффициент теплопроводности относят к температуре $T_{ср}=0.5(T_1+T_2)$. Специально установленные термопары контролируют возможные вредные утечки тепла в различных местах сборки. Рассмотренную установку можно применять для определения коэффициента теплопроводности строительных кирпичей и различных теплоизоляционных материалов с погрешностью измерения не менее 5%. Максимальные рабочие температуры в воздушной среде составляют примерно 1000 кельвин. Большие размеры исследуемых образцов и значительное время достижения стационарного режима (4-5 часов) ограничивают использование этой установки. Достижение одномерного теплового потока требует определенных усилий. Для уменьшения бокового теплоотвода нагревательный элемент выбирают не толще 0.3 мм и предусматривают тепловую защиту токоподводящих контактов нагревателя.

При выборе геометрических размеров исследуемых образцов с низкой теплопроводностью необходимо выполнять условие $\delta \leq (1/7 \dots 1/10) D$, где D – диаметр круглой пластины (или сторона квадрата), обеспечивающее одномерность температурного поля. Для устранения тепловых потерь с боковых по-

верхностей образца используют тепловую изоляцию или охранные электрические нагреватели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Данилин, Б.С. Основы конструирования вакуумных систем / Б. С. Данилин, В. Е. Минайчев.— Москва: Энергия, 1971. — 392 с.
2. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов / Л.Н. Розанов. — Москва: Высшая школа, 1990. — 320 с.
3. Чиркин, В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. — Москва: МАШГИЗ, 1962.—247 с.
4. Пипко, А.И. Основы вакуумной техники / А.И. Пипко. — Москва: Энергоиздат, 1981 — 432 с.

Научный руководитель: Раков Ю.Я., к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ АВТОМАТИКИ РАЗГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ RTDS

М.О. Терентьев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Данная работа посвящена проблемам статической устойчивости в энергосистеме, а именно – выявлению аварийной перегрузки сечения.

Развивающиеся технологии в энергетике сегодня позволяют с высокой точностью измерять взаимные углы векторов между узлами системы в реальном времени, что позволяет оценить перетоки мощности, опасные сечения и динамически отслеживать режим. Ранее сравнить векторы по концам линии было затруднительно, и это делалось по данным одного конца линии, с использованием физической модели (моделирование удалённого напряжения). Относительно новая для России система мониторинга переходных режимов (СМНР) и её устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) в этом смысле предоставляют новые возможности по сбору векторных данных. Ключевым преимуществом данной системы является синхронизация по времени (с помощью GPS или ГЛОНАСС) и возможность определения взаимных углов между векторами электрических параметров в разных, сколь угодно удалённых точках энергосистемы. Так как система только начинает развиваться в ОЭС РФ, то актуальной задачей становится исследование и применение этих перспектив. [1]

Автоматика разгрузки при перегрузке по мощности (АРПМ) предназначена для разгрузки при возникновении статической перегрузки контролируемой связи или группы связей, входящих в сечение. При этом основными требованиями к ней являются: срабатывание при резком и медленном нарастании перето-

ка мощности, отсутствие ложного срабатывания при коротких замыканиях (КЗ) и синхронных качаниях, наличие учета направления мощности. [3] Измерительные органы (ИО) АРПМ, уже применяемой в энергосистемах, измеряют величину и направление активной трёхфазной мощности. ИО ступени с ускорением измеряют величину тока и скорость изменения мощности. [2] В данной работе предлагается рассмотреть дополнительный способ фиксации перегрузки – по углу между векторами напряжений по концам защищаемой линии.

Для этого создан и исследован алгоритм АРПМ линии электропередачи, использующий величину взаимного угла между векторами напряжений по её концам. При этом входные для устройства АРПМ данные поступают от УСВИ. Модель энергосистемы и автоматики создана на программно-аппаратном комплексе RTDS. Алгоритм разделён на несколько блоков, каждый из которых описан ниже.

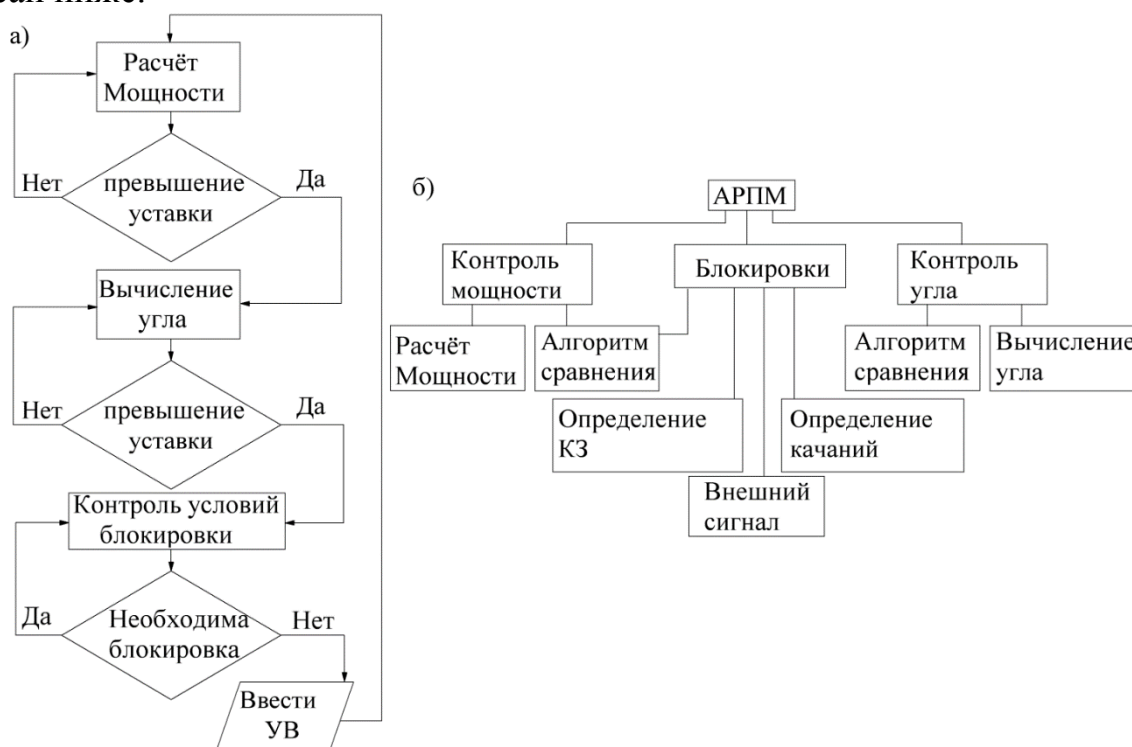


Рис. 1. а) Блок-схема формирования управляющего воздействия, б) Структура созданного алгоритма АРПМ.

На блок-схеме последовательное расположение блоков мощности и угла указывает лишь на логику формирования управляющего воздействия (УВ), однако расчёт величин по данным УСВИ ведётся параллельно.

Взаимный угол между векторами напряжений по концам линии является косвенной величиной (пропорциональной углу между ЭДС систем/машин). А так как напряжения подвержены сильным искажениям во время переходных процессов в энергосистеме, показания угла между напряжениями в некоторых случаях не будет соответствовать углу между ЭДС. [2] Поэтому предлагается в нормальном режиме контролировать значение мощности, а величину взаимного угла использовать в режиме, близком к предельному. Также, по требованиям

сетевых компаний к устройствам АРПМ, предусмотрены отстройка алгоритма от качаний, отстройка от КЗ и блокировка алгоритма по внешнему сигналу. [3]

Отстройка от коротких замыканий в исследуемом алгоритме выполнена по фиксации симметричных составляющих. Расчёт симметричных составляющих токов и напряжений при этом возможен как устройствами УСВИ, так и на устройстве АРПМ. Для уменьшения количества передаваемых данных целесообразнее выбрать второй вариант.

Для определения режима качаний в энергосистеме предлагается использовать первую производную взаимного угла между векторами напряжений по концам линии. Проблемы возникают при резком изменении мощности либо КЗ. В данных режимах рассчитываемое значение взаимного угла будет изменяться скачками, при этом как само значение взаимного угла, так и его производная будут определяться с большими погрешностями. Что, в свою очередь, вызовет некорректную работу алгоритма. Т.к. для существования производной функции необходимым условием является непрерывность (отсутствие скачков – малые приращения аргумента приводят к малым изменениям функции), предложено использовать фильтр нижних частот для функции взаимного угла.

Для сравнения были рассмотрены фильтры Чебышева, Баттерворта и Бесселя. Экспериментально определено, что фильтр Бесселя имеет слишком большую задержку и не подходит для данной задачи. Фильтры Чебышева и Баттерворта имеют более подходящие характеристики. Наименьшую задержку имеет фильтр Чебышева.

Рассмотрено 2 разных подхода к фиксации синхронных качаний:

1. Ввести выдержку времени на возврат блокирующего сигнала, пропорциональную периоду синхронных качаний. Таким образом, если в предыдущий полупериод качаний модуль производной превысит установленное значение, то блокирующий сигнал продлевается до следующего полупериода и так до тех пор, пока колебания не снизятся до необходимого уровня.
2. Пуск блокирующего сигнала осуществлять аналогичным образом – по модулю мгновенного значения производной взаимного угла. Одновременно вести расчёт среднего значения модуля производной за половину периода (либо среднеквадратического значения). Возврат блокирующего сигнала осуществить по снижению среднего значения производной до необходимого уровня.

На рисунке 2 видно, что второй способ является модификацией первого. Способ, использующий только мгновенное значение, имеет существенный недостаток – дребезг в конце блокирующего сигнала.

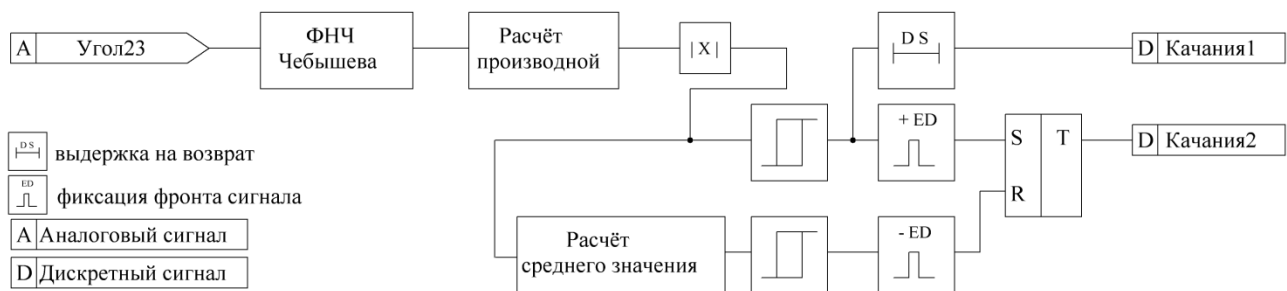


Рис. 2. Алгоритм, включающий оба способа фиксации синхронных качаний

Работа алгоритма фиксации синхронных качаний при резком возникновении небаланса активной мощности изображена на рис. 3. Как видно, второй способ фиксации более предпочтителен, так как обеспечивает непрерывность блокирующего сигнала.

Моделирование показало, что сам принцип использования УСВИ вполне применим, а созданный алгоритм АРПМ работоспособен и удовлетворяет требованиям в пределах математической модели. Однако, необходима разработка новой методики выбора уставок, а так же более глубокая оценка работы УСВИ для нужд противоаварийной автоматики (ПА). По данному вопросу уже существует ряд статей, в которых говорится о необходимом расширении функциональных возможностей УСВИ, модификации и доработке протокола С37.118, а так же модернизации существующих каналов передачи информации в части быстродействия и надёжности. Таким образом, данная работа показывает перспективность развития технологии синхронизированных измерений для средств ПА в ЕЭС РФ.

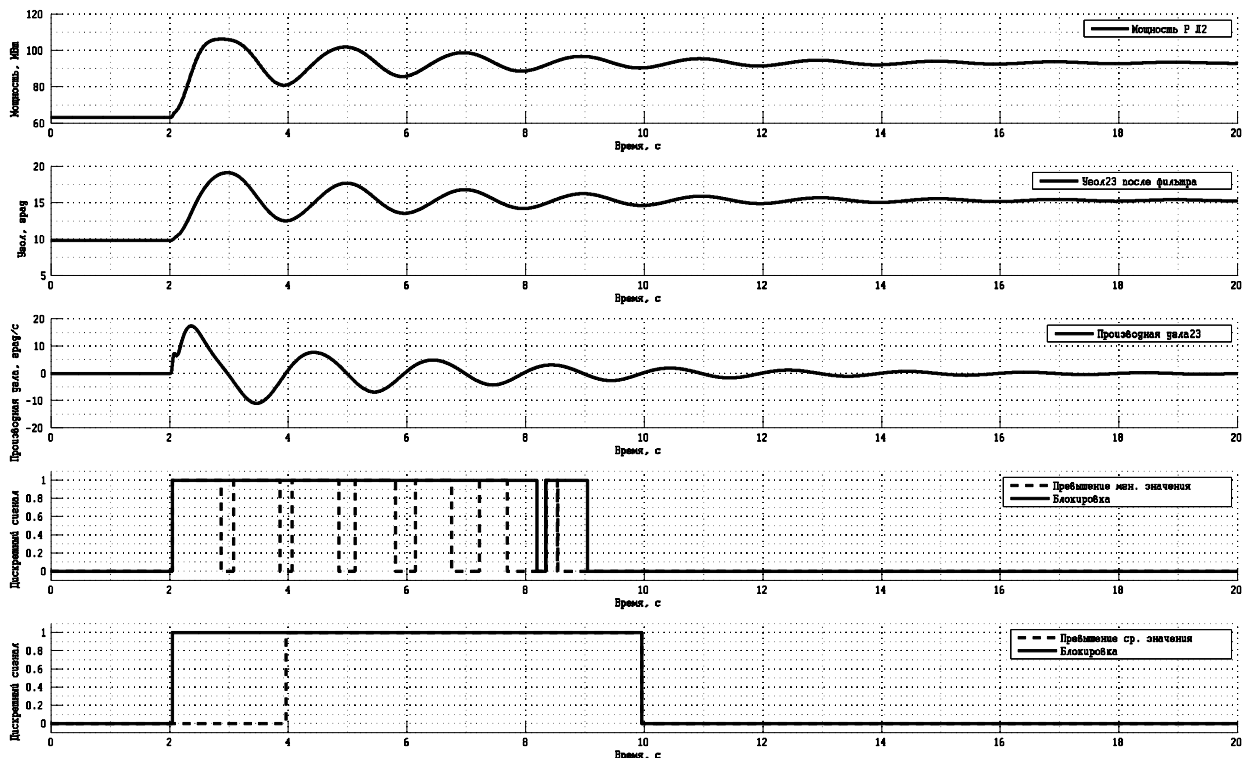


Рис. 3. Работа 2-х методов отстройки от синхронных качаний

ЛИТЕРАТУРА:

1. IEEE C37.118.1,2-2011. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. -The Institute of Electrical and Electronics Engineers: 2011 г.
2. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. М. : "Знак", 2011. – 528 с.
3. ОАО "ФСК ЕЭС". Стандарт организации. Аттестационные требования к устройствам противоаварийной автоматики. 2012 г.
4. Методические указания по устойчивости энергосистем. Приказ Минэнерго от 30.06.2003 №277.

Научный руководитель: А.В. Богданов, старший преподаватель кафедры «Электрические станции и автоматизация энергетических систем» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

ЗАВИСИМОСТИ СТАТИЧЕСКОГО КОНТАКТНОГО УГЛА ОТ ОБЪЕМА КАПЕЛЬ ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ НА СПЕЦИАЛЬНО СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

К.А. Батищева¹, Д.В. Феоктистов², В.В. Овчинников², С.Я. Мисюра²

¹ Томский политехнический университет, ЭНИН, ТПТ, 5БМ62

² Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Лаборатория интенсификации процессов теплообмена

В настоящее время, ведется поиск способов создания поверхностей с контролируемым процессом смачивания [1-5]. Известно [6-8], что на межмолекулярное взаимодействие конденсированных фаз жидкости и твердого тела (смачивание) влияет множество факторов. Основными, из которых, являются химический состав жидкости и поверхности, а также шероховатость.

Лазерное излучение как способ обработки поверхности для придания ей необходимых смачиваемых свойств перспективен. Но научные основы применения лазерного излучения не разработаны на уровне, позволяющем создать поверхность металлов с гидрофобными или гидрофильными свойствами.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное определение зависимостей статического контактного угла (θ) от объема (V) капли дистиллированной воды на обработанных поверхностях лазерным излучением.

Исследования проводились на установке, принцип действия которой приведен в [9-11].

Эксперименты проведены с использованием пяти специально структурированных лазерным излучением и одной полированной поверхностей из нержавеющей стали.

На подложку высокоточным дозатором “сажалась” капля дистиллированной воды объемами 10, 20, 30, 40, 50, 60 мкл.

С помощью микроскопа «Hitachi-3000M» получены фотографии микро-структуры увеличением в 500 раз (рис. 1). Среднее арифметическое отклонение профиля (Ra) определено с использованием профилометра «HOMMEL TESTER T1000».

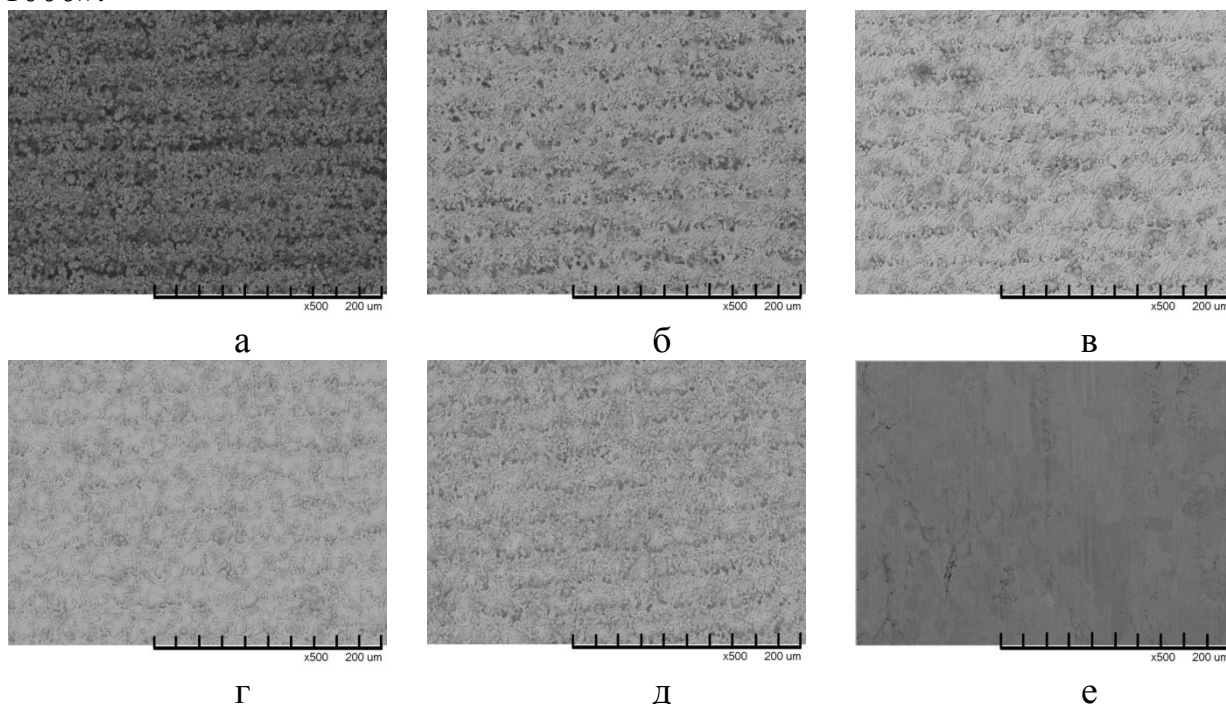
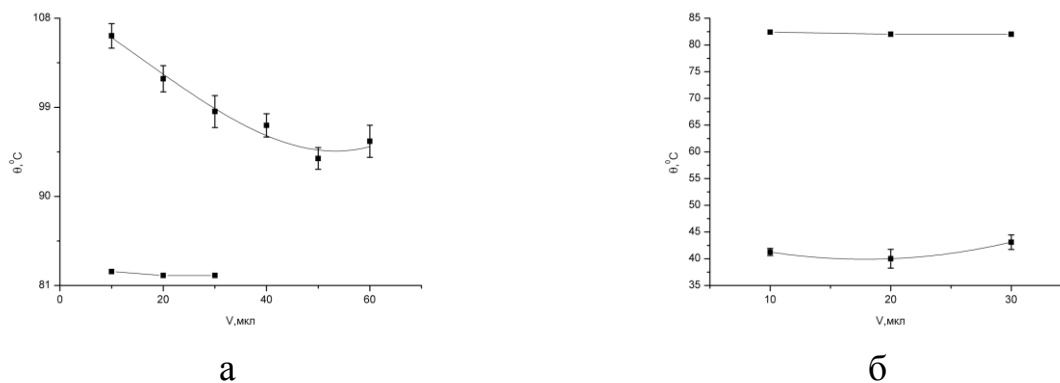


Рис. 1. Микроструктура поверхности: а - №1, Ra=1,79мкм; б - №2, Ra=2,58мкм; в - №3, Ra=1,29мкм; г - №4, Ra=0,618мкм; д - №5, Ra=0,63мкм, е- №0, Ra=0,079мкм.

При определении погрешности эксперимента систематическая составляющая не учитывалась. Промахи отбрасывались на стадии обработки результатов. Каждый опыт повторялся не менее пяти раз. За действительное значение принято среднее арифметическое результатов измерений. Относительная погрешность измерения не превышала 5%.

По результатам экспериментов построены зависимости (рис.2) статического контактного угла от объема жидкости.



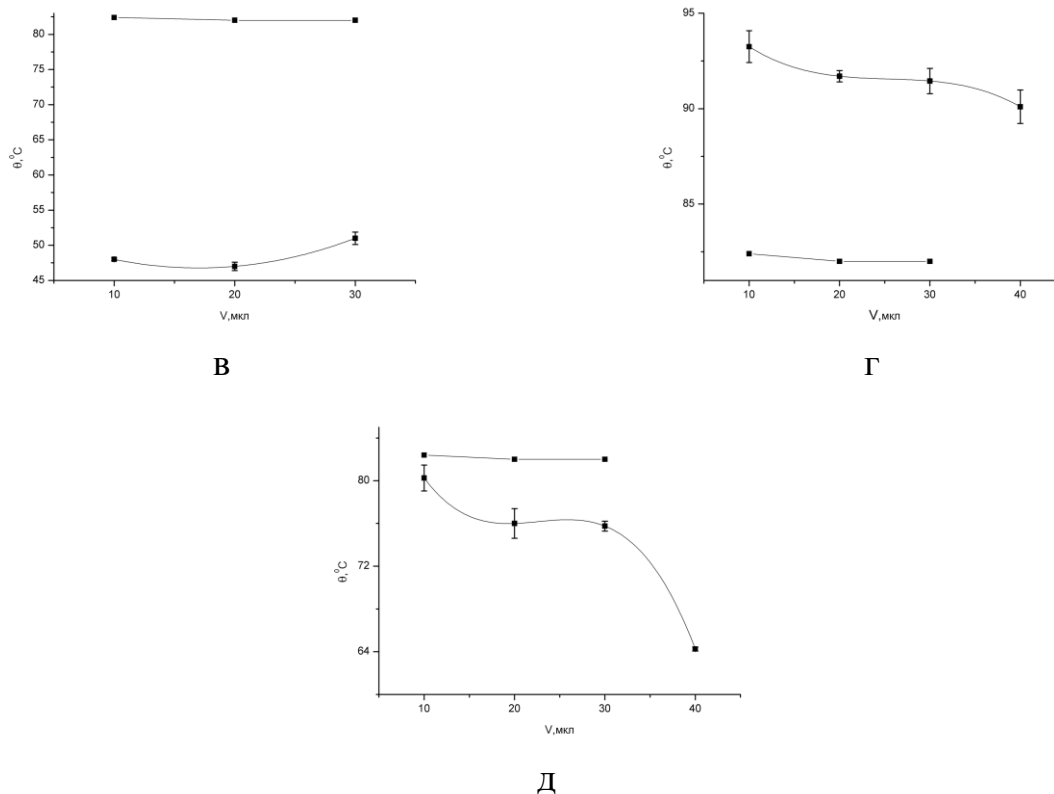


Рис. 2. Зависимости статического контактного угла от объема капли дистиллированной воды на поверхностях из нержавеющей стали под номерами: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5; е) 6; ж) 7; з) 8; и) 9; к) 10; л) 11. Контактный угол на: 1 – полированной поверхности; 2 – структурированной.

Установлено, что статический контактный угол на полированной поверхности нержавеющей стали ($Ra=0,079\text{ мкм}$) не зависит от объема капли дистиллированной воды. Изменение θ микроструктурированных поверхностей можно объяснить следующим. Известно [12-13], что поведение капли на поверхностях описывается двумя моделями – Касси-Бакстера и Венцеля. В состоянии Касси-Бакстера (1) при увеличении объема жидкости меняется доля проекции смоченной площади на поверхность подложки (f):

$$\cos \theta = f(\cos \theta_0 + 1) - 1 \quad (1)$$

Уменьшение последней приводит к увеличению статического контактного угла. Можно сделать вывод, что отрезки кривых (рис. 2), на которых θ уменьшается при увеличении объема, соответствуют состоянию Касси-Бакстера. Дальнейшее увеличение объема жидкости приводит к полному заполнению углублений на поверхности. Происходит переход от гетерогенного к гомогенному режиму смачивания. Можно предположить, что участок, на котором происходит резкое изменение θ соответствует переходу из состояния Касси-Бакстера к Венцелю.

Установлено, что на поверхностях 1, 4 статический контактный угол увеличился (улучшились гидрофобные свойства поверхностей). θ на поверхностях 2, 3, 5 уменьшилась (улучшились гидрофильные свойства).

Закключение. Рассмотрено влияние объема капли дистиллированной воды на значение статического контактного угла в условиях формирования непо-

движной линии трехфазного контакта в процессе смачивания специально структурированных поверхностей из нержавеющей стали лазерным излучением.

Показана возможность управления процессом смачивания обработкой лазерным излучением поверхностей.

Работа проведена в институте теплофизики СО РАН при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект номер 15-19-10025)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kabov O.A., Zaitsev D.V. Effect of shear stress and gravity on rupture of a locally heated liquid film // *Multiphase Science and Technology*. - 2009. - Т. 2. - N. - 3. - С. 249-266.
2. Zaitsev D. V., Kabov O. A., Cheverda V. V., Bufetov N. S.. The Effect of Wave Formation and Wetting Angle on the Thermocapillary Breakdown of a Falling Liquid Film // *High Temperature*. - 2004. - Т. 42. - N 3. - С. 450-456.
3. Nakoryakov V. E., Misyura S. Y., Elistratov S. L., Boiling crisis in droplets of ethanol water solution on the heating surface // *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013. - Т. 22. - N. 1.- С. - 1-7.
4. Misyura S.Y., Nakoryakov V.E., Elistratov S.L., Evaporation of water solution droplets on a horizontal heating surface // *Int. J. Energy Technol.* - 2012. - Т. 4. - N .9. -С . 1–7
5. Kuznetsov G. V., Zakharevich A. V., Bel'kov N. S.. Effect of heat-transfer conditions on the ignition characteristics of liquid fuel // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2014. - Т. 50. - С. 424-429.
6. Zakharevich A. V., Bel'kov N. S.. Experimental research of heat transfer conditions influence on the distillate fuels ignition characteristics // *EPJ Web of Conferences*. - 2014. Т. 76.
7. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of radiative heat and mass transfer mechanism in system water droplet - high-temperature gases on integral characteristics of liquid evaporation // *Thermal Science*. - 2015. - Т. 19. - N. 5. - С. 1541–1552.
8. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S. Experimental investigation of evaporation enhancement for water droplet containing solid particles in flaming combustion area // *Thermal Science*. - 2016. - Т. 20. - N 1. - С. 131–141.
9. Кузнецов Г.В., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // *Теплофизика и аэромеханика*. - 2016. - Т. 23. N - 1. - С. 17-22.
10. Семенов А. А., Феоктистов Д.В. Зайцев Д. В., Кузнецов Г. В., Кабов О. А. Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности // *Теплофизика и аэромеханика*. - 2015. - Т. 22. - N. 6. - С. 801-804.

11. Кузнецов Г. В., Орлова Е.Г., Феоктистов Д.В. Режимы растекания капли воды по подложкам с различной смачиваемостью // Инженерно-физический журнал. - 2016. - Т.89. - N 2. - С. 310-315.
12. Bo Wu, Ming Zhou, Jian Li, Xia Ye, Gang Li, LanCai Superhydrophobic surfaces fabricated by microstructuring of stainless steel using a femtosecond laser // Applied Surface Science. - 2009. - Т. 256. - С. 61–66.
13. Cardoso M.R., Tribuzi V., Balogh D.T., Misoguti L., Mendonca C.R. Laser microstructuring for fabricating superhydrophobic polymeric surfaces // Applied Surface Science. - 2011. - Т. 257. - С. 3281–3284.

Научный руководитель: Феоктистов Д.В., к.т.н., научный сотрудник института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

NATURAL CONVECTION OF NANOFLUID FROM AN ISOTHERMAL VERTICAL FLAT PLATE USING SINGLE-PHASE MODEL

Hoang Hiep¹, Sheremet Mikhail A.^{1,2}

¹Department of Nuclear and Thermal Power Plants, Tomsk Polytechnic University

²Department of Theoretical Mechanics, Tomsk State University

Abstract: Free convection from an isothermal vertical wall embedded in a water-based nanofluid is studied numerically using boundary layer approach and similarity method. The obtained results allow to analyze the effects of nanoparticles volume fraction and type of nanoparticles material on nanofluid flow and heat transfer.

1. Introduction

Obviously, low thermal conductivity coefficient of traditional coolants is the main problem that prevents to an intensification of heat transfer in energy systems. It has been shown experimentally [1, 2], that one of interesting and effective technique for the heat transfer enhancement is to add metallic nanoparticles or their oxides inside the conventional fluids. The obtained fluid known as nanofluid is the suspension of clear fluid and metallic nanoparticles or their oxides. A large number of conflicting experimental data does not allow to clearly explain the reasons for a significant change in transport regimes of mass, momentum and energy in nanofluids. Therefore, the most effective method for the study of hydrodynamics and heat transfer in these environments is to solve the equations of mathematical physics, developed on the basis of the conservation laws of continua mechanics.

2. Mathematical model

In the present work we numerically analyzed free convection of nanofluid from the vertical isothermal flat plate presented in Fig. 1.

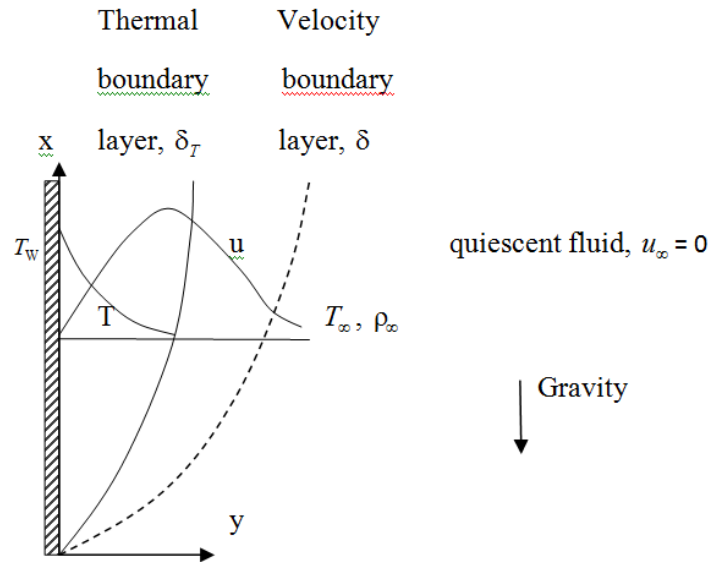


Fig. 1. Physical model.

For mathematical analysis the authors have utilized partial differential equations on the basis of the boundary layer approach [2, 3]. These equations have been formulated taking into account the conservation laws for mass, momentum and energy:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left[\mu_{nf} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (\rho\beta)_{nf} g(T - T_\infty) \right] \quad (2)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{(\rho C_p)_{nf}} k_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3)$$

The following boundary conditions have been added to the formulated governing equations (1)–(3):

$$u = v = 0, T = T_w \text{ at vertical wall } y = 0$$

$$u \rightarrow 0 \text{ and } T \rightarrow T_\infty \text{ at } y \rightarrow \infty$$

where T_w is the temperature of vertical wall and T_∞ is the temperature of ambient fluid.

For solution to the formulated boundary-value problem the author has used the similarity method with following non-dimensional variables [4]:

$$\eta = \frac{y}{x} \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4}, \quad \psi = 4\nu f(\eta) \left(\frac{Gr_x}{4} \right)^{1/4}, \quad \theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty}$$

Taking into account these dimensionless variables governing equations can be written as a system of two ordinary differential equations:

$$\begin{cases} \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \frac{\rho_f}{\mu_f} f''' + 3ff'' - 2(f')^2 + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} \theta = 0 \\ 3f\theta' + \frac{k_{nf}}{Cp_{nf}\mu_{nf}} \theta'' = 0 \end{cases}$$

The effective dynamic viscosity and thermal conductivity of nanofluid have been defined on the basis of the Brinkman's law [5] and Maxwell's model [6], respectively. Brinkman's law for the viscosity of nanofluid is $\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-C_v)^{2.5}}$, where C_v is the nanoparticles volume fraction. Maxwell's model for thermal conductivity of

nanofluid is $k_{nf} = k_f \left(1 + \frac{3C_v \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right)}{\frac{k_p}{k_f} + 2 - C_v \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right)} \right)$, where k_p , k_f , k_{nf} are the thermal conductivity of nanoparticles, base fluid and nanofluid.

The formulated ordinary differential equations with appropriate boundary conditions have been solved by Runge–Kutta method combined with shooting technique.

3. Results and discussion

The effects of nanoparticles volume fraction in the range 0–4% and types of nanoparticles material (Ag, Cu, Al₂O₃, CuO, TiO₂) have been analyzed. A comparison between clear fluid and a nanofluid containing Cu nanoparticles with concentration of 4% is also carried out.

Profiles of dimensionless velocity and temperature at $C_v=0.04$ are presented in Figs. 2 and 3 in comparison with clear fluid. An addition of nanoparticles inside the clear fluid leads to the velocity reduction due to a growth of the dynamic viscosity, while temperature increases. Meanwhile, it is clear in Fig. 3 that the thermal boundary layer of nanofluid increases in comparison with clear fluid [7].

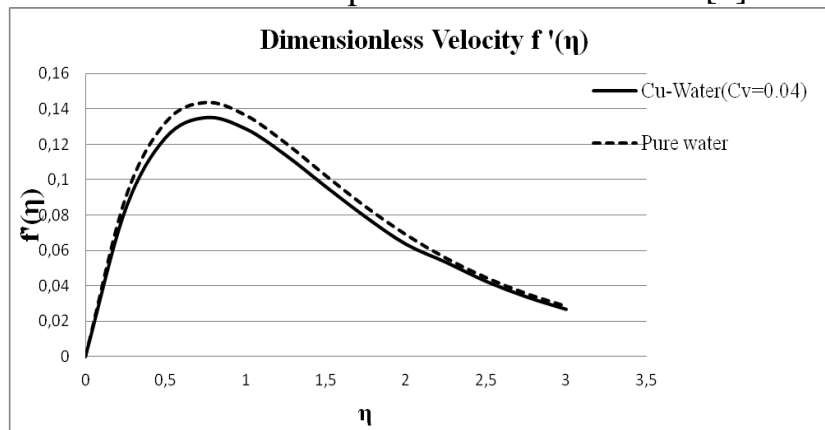


Fig. 2. Velocity profiles for clear fluid and Cu-water nanofluid at $C_v=0.04$.

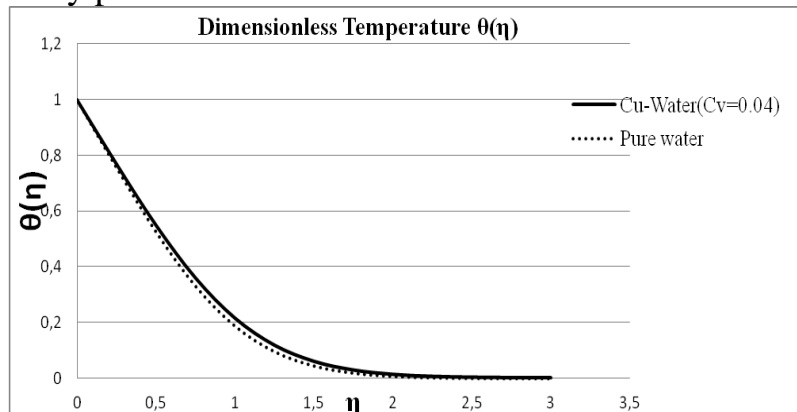


Fig. 3. Temperature profiles for clear fluid and Cu-water nanofluid at $C_v=0.04$.

Table 1 describes results for reduced skin friction parameter of nanofluids for various C_v in the range 0-4%. The reduced skin friction number increases with higher value of concentration. Due to greater thermal conductivity, Cu-water and Ag-water nanofluids have the highest value of reduced skin friction number as compared to other nanofluids. The reduced Nusselt numbers are performed in Table 2. With lower thermal conductivity of TiO_2 , TiO_2 -water nanofluid shows a smaller reduced Nusselt number. The higher concentrations of nanoparticles lead to a growth of the average Nusselt number. In the case of CuO-water nanofluid with $C_v=0.04$, reduced Nusselt number increases by 7% as compared to clear water.

Table 1

Comparison of results for reduced skin friction number $C_f = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} f'(\eta = 0)$ for various C_v .

C_v	Cu	CuO	Al_2O_3	TiO_2	Ag
0.0	0.4738	0.4738	0.4738	0.4738	0.4738
0.01	0.4757	0.4756	0.4748	0.4744	0.4762
0.02	0.4777	0.4775	0.4756	0.475	0.4788
0.03	0.4799	0.4795	0.4766	0.4756	0.4815
0.04	0.4821	0.4815	0.4774	0.4762	0.4844

Table 2

Comparison of results for reduced Nusselt number $Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f} \theta'(\eta = 0)$ for various C_v .

C_v	Cu	CuO	Al_2O_3	TiO_2	Ag
0.0	0.9777	0.9777	0.9777	0.9777	0.9777
0.01	0.9937	0.9940	0.9939	0.9909	0.9934
0.02	1.0095	1.0001	1.0102	1.0043	1.0093
0.03	1.026	1.0272	1.0267	1.0177	1.0255
0.04	1.0425	1.0441	1.0430	1.0312	1.0418

REFERENCES

1. Choi S.U.S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Siginer, H.P. Wang (eds.), Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-vol. 231/MD-vol. 66, ASME, New York, pp. 99-105 (1995).
2. Shenoy A, Sheremet M, Pop I. Convective Flow and Heat Transfer from Wavy Surfaces: Viscous Fluids, Porous Media and Nanofluids. New York: CRC Press; 2016.
3. Bejan A. Convection Heat Transfer. New York: Springer; 2013.
4. Jaluria Y. Natural Convection Heat and Mass Transfer, Pergamon Press, U.K., 1980.
5. Brinkman H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions // Journal of Chemical Physics. – 1952. – Vol. 20. – P. 571–581.

6. Maxwell J.C. A Treatise on Electricity and Magnetism, 1904.
7. Rana P., Bhargava R. Numerical study of heat transfer enhancement in mixed convection flow along a vertical plate with heat source/sink utilizing nanofluids // Commun Nonlinear Sci Numer Simulat. – 2011. – Vol. 16. – P. 4318–4334.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОВМЕСТНЫХ ДОБАВОК НАНОПОРОШКА ALN, ПОЛУЧЕННОГО ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ, И МИКРОННОГО ПОРОШКА Y₂O₃ НА КОНЕЧНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИКИ, ОСНОВАННОЙ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПОРОШКЕ ALN

¹М.И. Гуков, ²И.И. Шаненков, ¹А.И. Циммерман
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПП, ¹гр. 5А4Д

Введение

Актуальной задачей силовой и микроэлектроники является увеличение эффективности рассеяния тепла [1]. Одним из наиболее распространенных способов рассеяния тепла является его отвод через подложку. Раньше в качестве материала теплоотводящей подложки использовали BeO, который обладает высокими значениями теплопроводности и диэлектрической константы [2], но из-за его высокой токсичности от него были вынуждены отказаться. Сейчас значительно распространены керамические подложки из нитрида алюминия, который помимо высоких значений теплопроводности и диэлектрической константы совершенно не токсичен [3].

Известно, что для получения высокоплотной керамики на основе AlN можно использовать модифицирующие добавки (добавки, активирующие спекание, добавки раскисляющих фтористых соединений редкоземельных металлов, углерода или активных металлов, оксидов иттрия, магния и кальция). Наиболее часто используемой из них является добавка оксида иттрия. Кроме того, считается, что даже небольшая добавка нанопорошка может значительно улучшать свойства объемных материалов. Существуют различные способы получения нанопорошков: термолиз, золь-гель метод, электрохимический метод, плазмохимические методы. Последние из них обладают следующими преимуществами: высокая скорость протекания реакции, низкие энергозатраты, высокие достигаемые энергетические параметры в процессе синтеза и высокая скорость охлаждения. Одним из таких является метод плазмодинамического синтеза на основе импульсного сильноточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) [4], разработанного в НИ ТПУ.

В данной работе рассматривается влияние совместных добавок нанопорошка нитрида алюминия, полученного плазмодинамическим способом, и коммерческого порошка оксида иттрия на конечные свойства керамики, основанной на промышленном порошке AlN марки ТЧ-1.

Синтез нанопорошка AlN

Для реализации эксперимента по получению нанодисперсного нитрида алюминия с использованием только газообразного прекурсора были выбраны следующие энергетические параметры: $U_{зар} = 2$ кВ, $C_{зар} = 14,4$ мФ. Газообразный прекурсор (азот) закачивался в предварительно вакуумированную камеру-реактор (1 атм.). Твердый прекурсор (меламин) массой 0.5 г дополнительно закладывался в канал формирования плазменной структуры.

Получившийся порошкообразный продукт был подвергнут ультразвуковому диспергированию в ультразвуковой ванне Ultrasonic Cleaner 50 Вт в течение 8 минут в изопропиловом спирте. После этого продукт разливался в 2 разные чашки Петри: в одной мелкая фракция, в другой – осадок. Далее изопропиловый спирт выпаривался, и собирались образцы.

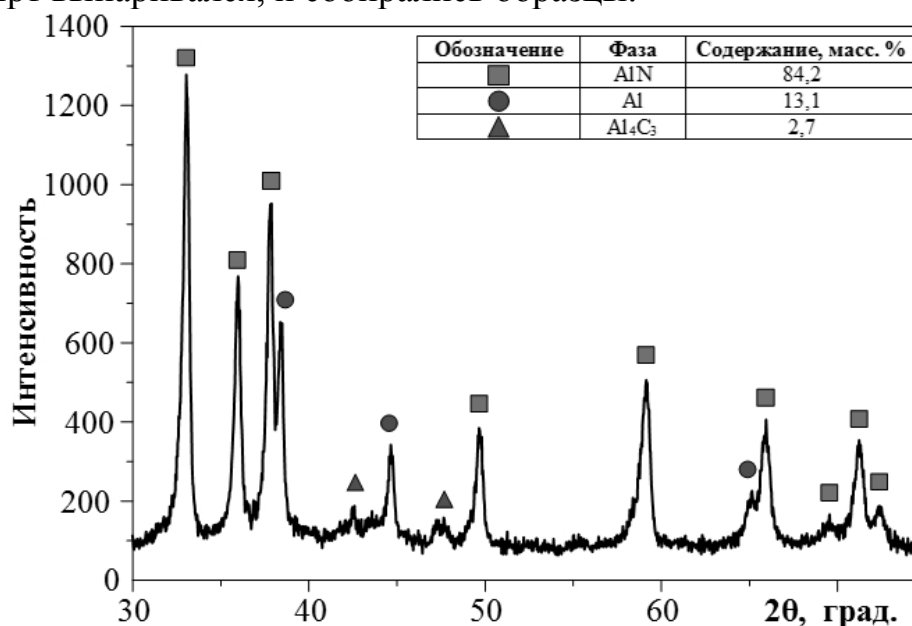


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма полученного порошка

Конечный порошкообразный продукт был исследован методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре Shimadzu XRD-7000S. Оценка количественно-фазового состава проводилась с помощью полученных рентгеновских дифрактограмм в программной среде «PowderCell 2.4» с использованием базы данных PDF 2+. Из рентгеновской дифрактограммы полученного продукта (рисунок 1) видно, что фаза нитрида алюминия является доминирующей, а интенсивность пиков фаз алюминия и карбида алюминия является достаточно низкой. Количественный анализ установило приблизительное процентное содержание фаз: AlN – 84%, Al – 13%, Al₄C₃ – 3%.

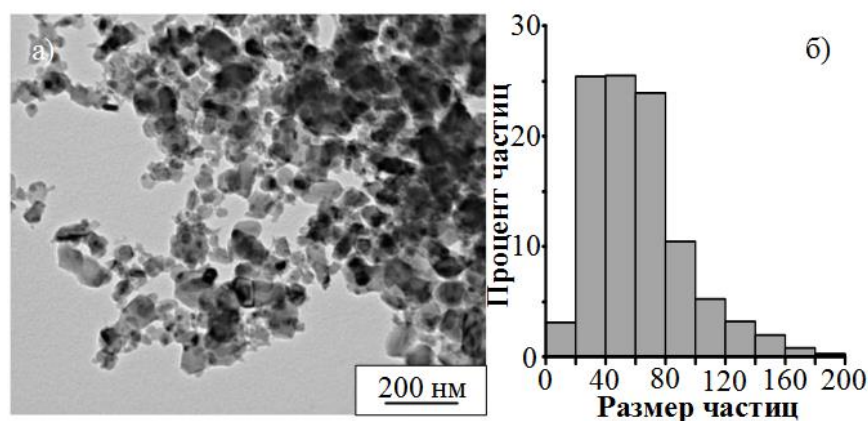


Рис. 2. а) ТЕМ-снимок полученного порошка; б) гистограмма распределения частиц по размеру в исследуемом порошке

Исследование полученного продукта методом просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе Philips CM-12 (типичный светлопольный снимок представлен на рисунке 2а) позволило установить, что большинство частиц имеют гексагональную структуру, что характерно для фазы гексагонального нитрида алюминия AlN. По полученной серии светлопольных снимков была построена гистограмма распределения частиц по размеру (рисунок 2б), согласно которой большинство частиц в исследуемом порошке имеют размер от 20 до 100 нм, что позволяет характеризовать получившийся продукт как наноразмерный с достаточно высокой степенью чистоты.

Таким образом, фазовый состав полученного порошка и распределение его частиц по размеру является удовлетворительным и позволяет использовать его в дальнейшем для спекания керамических образцов.

Изготовление керамических образцов

Для изготовления керамики было взято две одинаковые порции коммерческого порошка AlN марки ТЧ-1 без предварительной подготовки. В одну из них была произведена совместная добавка нанодисперсной фракции порошка нитрида алюминия в количестве 5 % масс и микронного порошка оксида иттрия в таком же количестве (образец 2), а другая порция осталась неизменной (образец 1). Спекание двух образцов осуществлялось в SPS-установке при температурах 1800°C в вакууме. Образец помещался в графитовую пресс-форму (рисунок 3.5) диаметром 20 мм и предварительно прессовался давлением до 20 МПа. Во обоих случаях скорость нагрева образцов была установлена 500°C/мин. С указанной скоростью образец нагревался до температур спекания. После этого давление на образцы росло до 60 МПа в течение 1 минуты, и еще одну минуту они выдерживались при этом давлении. После этого выключался источник питания пресса, происходило снижение температуры с последующим снятием и давления прессования.

После полного охлаждения и выемки образца из пресс-формы проводилась оценка плотности методом гидростатического взвешивания. Оценка плотности показала, что образец 1 имеет относительную плотность (82,2%) гораздо меньшую, чем плотность образца 2 (98,5 %), а измерение теплопроводности об-

разцов проводилось методом лазерной вспышки на приборе Discovery DLF-1 и показало, что значение теплопроводности второго образца (160,15 Вт/м·К) почти в 3 раза превосходит теплопроводность первого образца (55,24 Вт/м·К).

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что совместная добавка нанопорошка AlN, полученного методом плазмодинамического синтеза, и микронного порошка Y_2O_3 в одинаковых порциях (5 % масс.) к основному коммерческому порошку нитрида алюминия марки ТЧ 1 позволила увеличить относительную плотность керамического образца на 16,3 % и почти в 3 раза повысить его теплопроводность.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. S Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №1. – С. 17-22
2. Wang, X., Wang, R., Peng, C., Li, T., Liu, B. Synthesis and sintering of beryllium oxide nanoparticles // Journal of Progress in Natural Science: Materials International. – 2010. – Vol. 20. – pp. 81–86.
3. Pee J.H., Park J.C., Hwang K.T., Kim S., Cho W.S. Properties of AlN powder synthesized by self-propagating high temperature synthesis process // Key engineering materials. – 2010. – № 434–435. – P. 834–837.
4. Sivkov A.A., Saigash A.S., Kolganova Yu.L. The research of copper coatings properties obtained by plasmodynamic method // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 12-3. С. 138-141.

Научный руководитель: А.А. Сивков, д.т.н., профессор каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ СТЕРЖНЯ

М.А. Вергаскина, Л.С. Головина, И.А. Нечупей
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5032

Рассмотрим подгруппу методов с осевым, продольным потоком тепла. Наиболее простым, с принципиальной точки зрения, является эксперимент в условиях, когда распределение температуры в образце одномерно, т.е. когда поток тепла в каждой точке образца направлен строго по оси симметрии. Такие условия будут созданы в случае, когда боковая поверхность образца, представляющего собой цилиндр или параллелепипед, теплоизолирована. Теплопроводность при этом определяется по формуле (1), где Q – количество тепла, проходящее через сечение S в единицу времени, ΔT – разность температур в точках стержня, находящихся на расстоянии l друг от друга.

$$\lambda = \frac{Q}{\Delta T \cdot S} \quad (1)$$

Мы использовали относительный метод определения осевого теплового потока: два стержня – изучаемый и эталонный, теплопроводность второго известна. Стержни располагаются вплотную друг к другу внутри системы с нагревателем, который монтируется на свободном конце одного из стержней. (Рис.1)

В данном случае уравнение сохранения энергии запишется в виде (2).

$$\lambda \Delta T = 0 \quad (2)$$

Приведем вывод уравнения для определения коэффициента теплопроводности исследуемого образца (3).

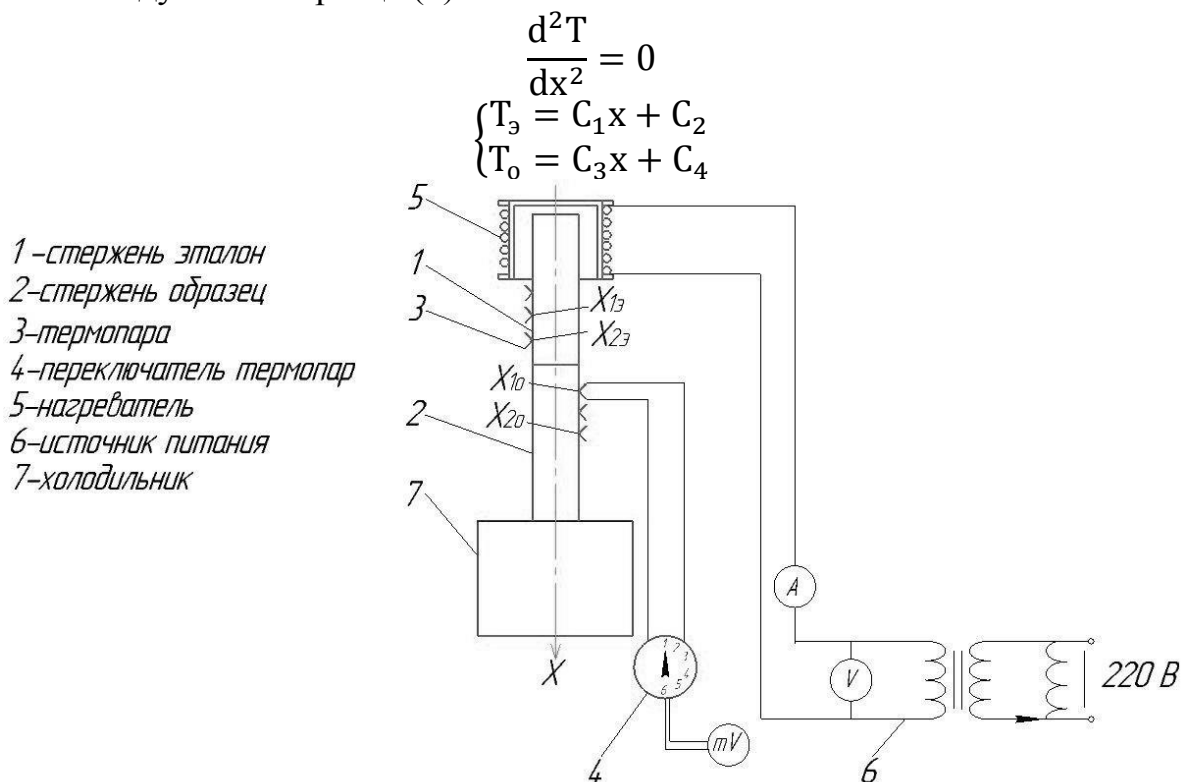


Рис.1. Принципиальная схема установки для определения коэффициента теплопроводности

Граничные условия:

1. при $x = x_{13}$, $T = T_{13}$;
2. при $x = x_{23}$, $T = T_{23}$;
3. при $x = x_{10}$, $T = T_{10}$;
4. при $x = x_{20}$, $T = T_{20}$.

Подставив граничные условия, получим следующие системы уравнений:

$$\begin{cases} T_{13} = C_1 x_{13} + C_2 \\ T_{23} = C_1 x_{23} + C_2 \\ T_{10} = C_3 x_{10} + C_4 \\ T_{20} = C_3 x_{20} + C_4 \end{cases}$$

После несложных алгебраических преобразований получим:

$$T_3 = \frac{T_{13} - T_{23}}{x_{13} - x_{23}} (x - x_{13}) + T_{13}$$

$$T_0 = \frac{T_{10} - T_{20}}{x_{10} - x_{20}} (x - x_{10}) + T_{10}.$$

Так как тепловой поток через стержни постоянный, то, подставив выражения в закон Фурье, получим:

$$\lambda_0 = \lambda_э \cdot \frac{T_{1э} - T_{2э}}{T_{10} - T_{20}} \cdot \frac{x_{10} - x_{20}}{x_{1э} - x_{2э}} \cdot \frac{S_э}{S_0}$$

где $\lambda_0, \lambda_э$ – коэффициент теплопроводности образца и эталона соответственно; $(T_{1э} - T_{2э})$ – разность температур между точками, находящимися на расстоянии $(x_{1э} - x_{2э})$; $(T_{10} - T_{20})$ – разность температур между точками, находящимися на расстоянии $(x_{10} - x_{20})$; $S_э, S_0$ – площадь поперечного сечения эталона и образца соответственно.

В лаборатории по теплофизическим исследованиям нами была собрана установка по определению теплопроводности металлов методом стержня. (Рис.2)



Рис. 2. Установка по определению коэффициента теплопроводности методом стержня

Снятые с установки данные будут приведены на выступлении.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кудинов, А.А. Тепломассообмен : учебное пособие / А. А. Кудинов. — Москва: Инфра-М, 2012. — 375 с.: ил. — Высшее образование. — Библиогр.: с. 356-359.
2. Чиркин, В.С. Теплопроводность промышленных материалов / В.С. Чиркин. — Москва: МАШГИЗ, 1962.—247 с.

Научный руководитель: Раков Ю.Я., к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

Е.А. Маслов^{1,2}, В.В. Фарапонов³, А.А. Чупашев², В.В. Мацкевич¹, С.Ю. Чижов³,
А.Б. Бадмаев³

¹Томский государственный университет

²Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики
Томского государственного университета

³Томский политехнический университет, г. Томск

В настоящее время существует интерес к исследованию обтекания и определения аэродинамических характеристик тел различной формы при разной относительной скорости движения. Экспериментальные результаты используются для проверки адекватности физических и математических моделей, применяемых для расчёта сложных внешних и внутренних течений, верификации программ расчёта и определения областей их применения.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований обтекания сверхзвуковым воздушным потоком плоской (клин) и осесимметричной моделей (конус) на модельной аэродинамической установке (МАУ) [1].

Для получения достоверных результатов дренажных испытаний был разработан и смонтирован стенд для поверки датчиков типа

ДМ 5007 А – ДИ У2 и типа ТДМ2-А, используемых для измерений давлений на МАУ. Стенд для поверки датчиков давления показан на рис. 1.

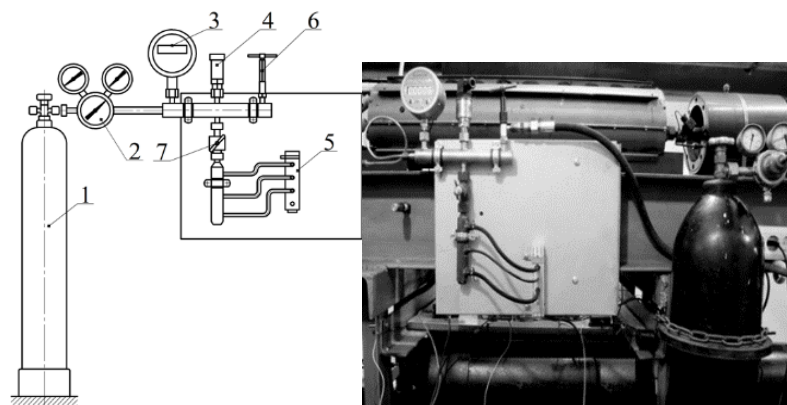


Рис. 1. Схема (а) и фотография (б) стенда для контроля используемых датчиков давления: 1 – баллон со сжатым воздухом, 2 – редуктор, 3 – цифровой манометр, 4 – датчик давления в форкамере, 5 – блок с датчиками давления, 6 и 7 – регулирующие вентили

На рис. 2 приведены градуировочные зависимости датчиков избыточного давления. Средняя относительная погрешность для датчика типа ТДМ2-А составила 0,19%, а для датчика типа ДМ 5007 А – ДИ У2 – 0,14%. Наличие стенда позволяет контролировать точность измеряемых давлений, при регистрации показаний, используемых датчиков перед проведением каждой серии экспериментов.

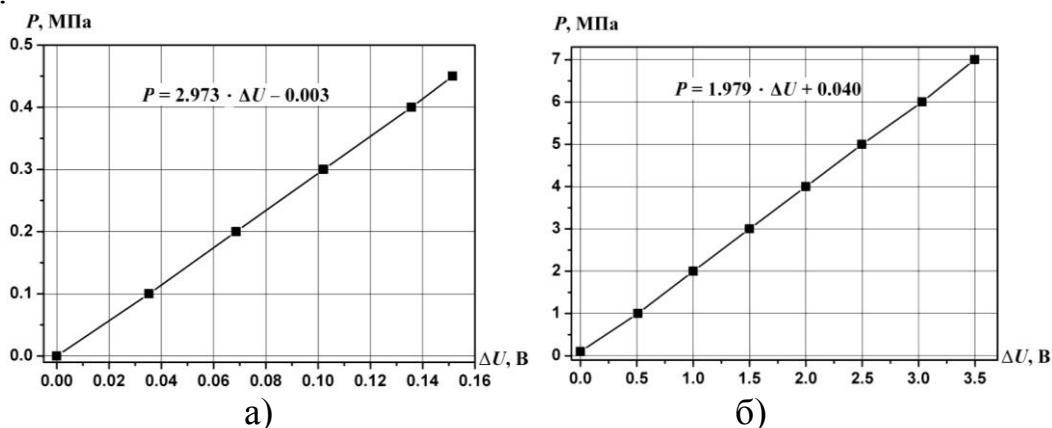


Рис. 2. Градуировочные зависимости датчиков давления типа ТДМ2-А (а) и ДМ 5007 А – ДИ У2 (б)

Проведены дренажные испытания на моделях двух видов [2]. В качестве осесимметричной модели был взят конус, а плоской – клин. Схемы расположения дренажных отверстий приведены на рис. 3.

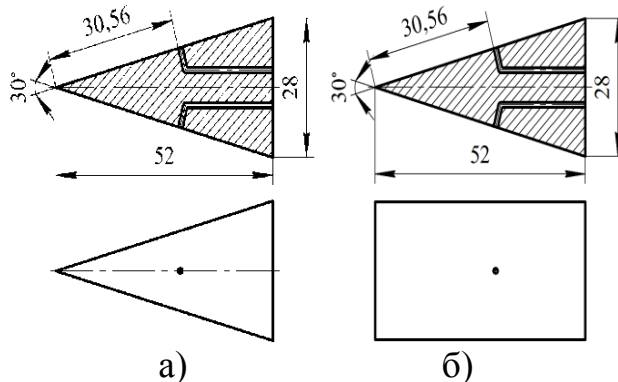
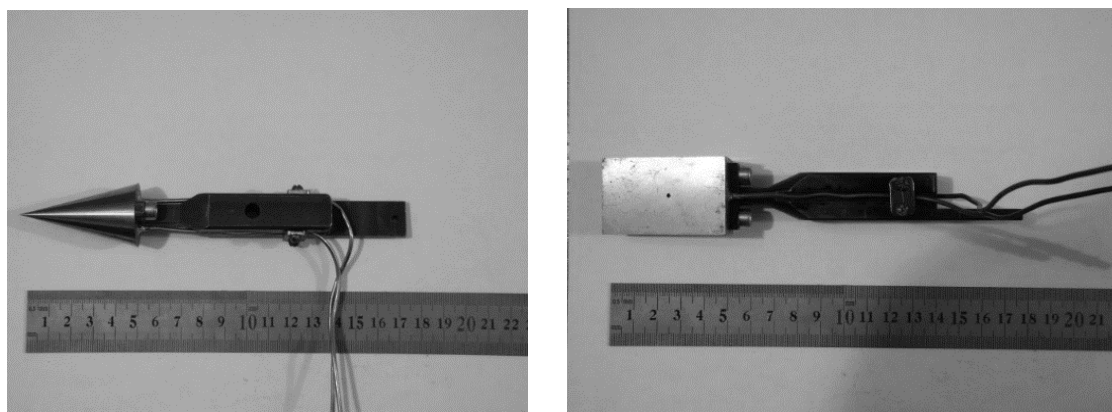


Рис. 3. Схемы моделей в виде конуса (а) и клина (б)

На рис. 4. приведены фотографии используемых в эксперименте моделей, закреплённых на державке.

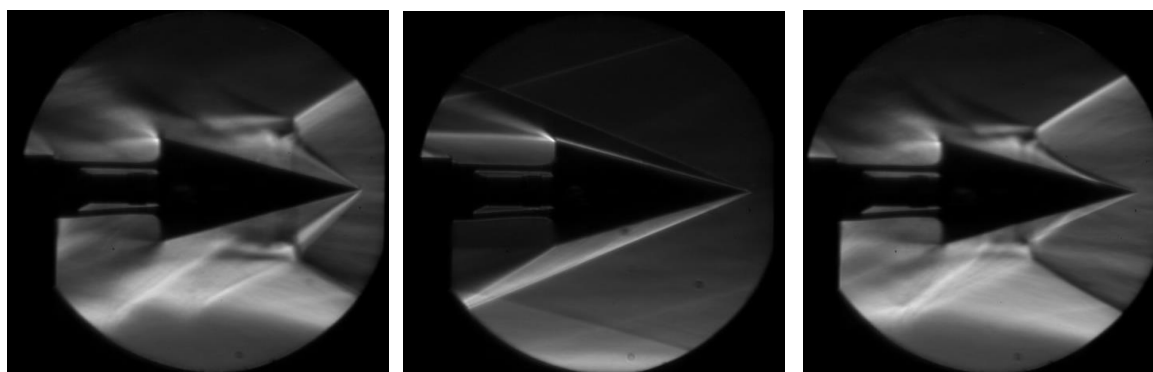


а)

б)

Рис. 4 Модели в виде конуса (а) и клина (б)

Все датчики давления подключены к цифровой регистрирующей системе, в которой опрос сигналов каждого регистрирующего канала с частотой 500 Гц поступал на АЦП, а по завершению эксперимента производилась запись в файл данных. Для обработки полученных данных использовалась разработанная авторами программа, позволяющая получить значения давлений по регистрируемым значениям измеряемого напряжения.



а)

б)

в)

Рис. 5 Фрагменты визуализации высокоскоростной видеокамерой процесса обтекания конуса

Полученные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), зарегистрированные осциллографом, сопоставлялись с визуализацией процесса. При открытии электромагнитного клапана – происходит резкое возрастание давления в форкамере, ударная волна начинает взаимодействовать с телом. При прохождении дренажных отверстий ударной волной ($M = 3$), регистрируется скачок статических давлений (рис. 5 (а)).

Затем, в течении двух секунд давление в форкамере слабо меняется, и статические давления на дренажных отверстиях остаются неизменными. Тело находится в ромбе Маха и картина обтекания не меняется (рис. 5 (б)).

После закрытия электромагнитного клапана – происходит резкое уменьшение давления в форкамере, ударная волна проходит в обратном направлении

дренажные отверстия, и регистрируется скачок статических давлений (рис. 5 (в)).

В серии опытов для вычисления числа Маха измерялось полное и статическое давление. В ЦАГИ были разработаны комбинированные датчики давления (трубка Пито–Прандтля), которые дают возможность измерять оба давления одновременно в сверхзвуковом воздушном.

На рис. 6 приведены результаты серий экспериментов при обтекании плоской и осесимметричной моделей воздушным потоком в диапазоне чисел Маха $M = (2 \div 5)$ при нулевом угле тангажа [3].

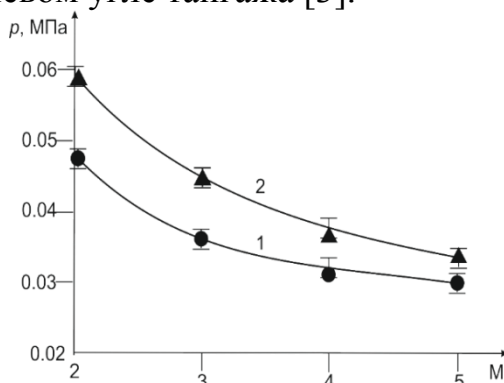


Рис. 6 Давление в фиксированной точке на боковой поверхности моделей: 1 – конус; 2 – клин

Анализ полученных результатов показал различие значений давления на поверхности клина и конуса в рассматриваемом диапазоне скоростей обтекания. Выделен эффект объясняется тем, что обтекание конуса носит пространственный характер.

Данные результаты означают, что при математическом моделировании газодинамических процессов в двигательных установках в диапазоне $M = (2 \div 5)$ необходимо учитывать пространственный характер течения.

Статья написана в рамках научного проекта № 8.2.46.2015, выполненного при поддержке Программы «Научный фонд Томского государственного университета им. Д.И. Менделеева» в 2015 г.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Звезгинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть 1 Установки для научных исследований. – Новосибирск: Параллель, 2014. – 551 с.
2. Маслов Е.А., Жарова И.К., Фарапонов В.В., Мацкевич В.В., Чижов С.Ю. Физическое моделирование обтекания тел плоской и осесимметричной формы сверхзвуковым потоком // Труды Томского государственного университета. – Т. 298. Серия физико-математическая: Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики / под ред. М.Ю.Орлова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2016. 136с. С. 84 – 88. DOI: 10.17223/9785751124199/17
3. Maslov E.A., Farapov V.V., Chupashev A.A., Matskevich V.V. Physical modeling of supersonic flow Over bodies with plane and Axisymmetric

shape // MATEC Web of Conferences Volume 72, 9 August 2016, Article number 01065 Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, HMTTSC 2016; Tomsk; Russian Federation; 19 April 2016 through 21 April 2016; Code 123283. DOI: 10.1051/2016-727201065. Pp. 1 – 3.

4. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Данилов А.Н. и др. Аэродинамика в вопросах и задачах. – М.: Высш. школа, 1985. – 759

Научный руководитель: Е.А. Маслов, доцент, Томский политехнический университет, кафедра АТЭС.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ С ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТЬЮ В ЗАМКНУТОЙ ПОРИСТОЙ ПОЛОСТИ

М.С. Астанина

Томский государственный университет

Естественная конвекция – один из важнейших механизмов передачи энергии в окружающей среде и в технических системах. Роль этого процесса велика в повседневной жизни (обогрев помещений), в природе (образование облаков), а также в промышленности и производстве. Данный механизм переноса энергии является преобладающим в таких приложениях, как выращивание монокристаллов, охлаждение элементов электронной техники, а также в задачах теплоэнергетики и строительства. Отметим, что изучение процессов конвективного теплопереноса в пористых средах имеет ряд важных приложений в различных отраслях, например, ядерные энергетические системы, солнечные коллекторы и другие. Рассмотрение моделей конвекции с переменной вязкостью более точно отражает реальные процессы, так как далеко не всегда вязкость жидкости постоянна: она может зависеть от температуры, давления и других факторов.

В настоящей работе рассматривается процесс конвективного теплообмена в пористой квадратной полости с источниками энергии (рис. 1). Температура источников максимальна во всей области. Предполагается, что верхняя и нижняя стенка области адиабатические, боковые границы поддерживаются при постоянной температуре. Вязкость жидкости изменяется с температурой по закону

ну $v = v_0 \cdot \exp\left(-C \frac{T - T_0}{T_h - T_c}\right)$, (v_0 – коэффициент кинематической вязкости при

начальной температуре $T_0 = 0.5(T_h + T_c)$), поток ламинарный. Жидкость теплопроводная и ньютоновская, удовлетворяющая приближению Буссинеска.

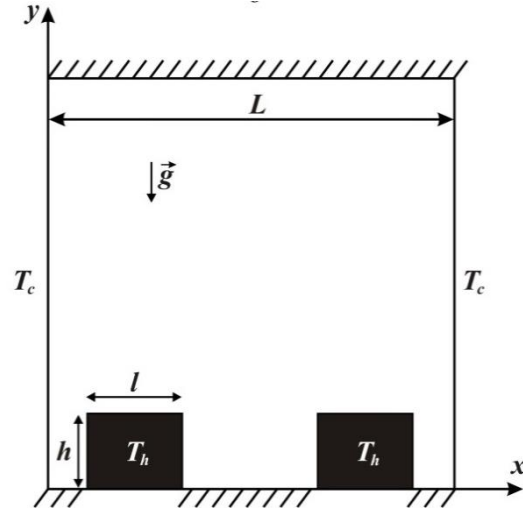


Рис. 1. Область решения задачи

Определяющие уравнения для стационарного двумерного естественно-конвективного теплопереноса в пористой полости в безразмерных переменных «функция тока – завихрённость» $\left(U = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}, V = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}, \Omega = \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{\partial U}{\partial Y} \right)$ можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad (1)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + \frac{U}{\varepsilon^2} \frac{\partial \Omega}{\partial X} + \frac{V}{\varepsilon^2} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \sqrt{\text{Pr}} \left(\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 (M\Omega)}{\partial X^2} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 (M\Omega)}{\partial Y^2} - \frac{M\Omega}{Da} \right) + \frac{\partial \Theta}{\partial X} +$$

$$+ 2\sqrt{\frac{\text{Pr}}{\text{Ra}}} \left[\frac{U}{2Da} \frac{\partial M}{\partial Y} - \frac{V}{2Da} \frac{\partial M}{\partial X} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 M}{\partial X^2} \frac{\partial U}{\partial Y} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial^2 M}{\partial Y^2} \frac{\partial V}{\partial X} - \frac{2}{\varepsilon} \frac{\partial^2 M}{\partial X \partial Y} \left(\frac{\partial V}{\partial Y} - \frac{\partial U}{\partial X} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial X} + V \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{1}{\sqrt{\text{Ra} \cdot \text{Pr}}} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right). \quad (3)$$

В этих уравнениях используются следующие безразмерные переменные: Ψ – функция тока ($U = \partial \Psi / \partial Y, V = -\partial \Psi / \partial X$); Θ – температура; Ω – завихренность скорости ($\Omega = \partial V / \partial X - \partial U / \partial Y$); X, Y – безразмерные координаты; τ – время; U, V – составляющие скорости в проекции на оси X, Y ; $\text{Pr} = \nu_0 / a$ – число Прандтля; $\text{Ra} = g\beta(T_h - T_c)L^3 / \nu_0 a$ – число Рэлея; $Da = K / L^2$ – число Дарси; ε – проницаемость среды; $M = \nu / \nu_0 = \exp(-C\Theta)$ – безразмерная вязкость.

При обезразмеривании уравнений в качестве характерного расстояния была взята длина полости L , $\sqrt{g\beta(T_h - T_c)}/L$ – масштаб завихрённости, $\sqrt{g\beta(T_h - T_c)L}$ – масштаб скорости, $\sqrt{L/g\beta(T_h - T_c)}$ – масштаб времени, $\sqrt{g\beta(T_h - T_c)L^3}$ – масштаб функции тока, ν_0 – масштаб кинематической вязкости. Безмерная температура рассматривалась в следующем виде: $\Theta = \frac{T - T_0}{T_h - T_c}$.

В начальный момент времени жидкость неподвижна, и начальные условия для предложенной системы уравнений имеют следующий вид [3]:

$$\Psi(X, Y, 0) = \Omega(X, Y, 0) = 0$$

$$\Theta(X, Y, 0) = \Theta_0 = 0$$

Граничные условия имеют вид:

- на границах $Y = 0$ и $Y = 1$: $\Psi = 0$, $\partial\Psi/\partial Y = 0$, $\partial\Theta/\partial Y = 0$;
- на границах $X = 0$ и $X = 1$: $\Psi = 0$, $\partial\Psi/\partial X = 0$, $\Theta = -0.5$;
- на поверхности источников энергии: $\Psi = 0$, $\partial\Psi/\partial\bar{n} = 0$, $\Theta = 0.5$.

Дифференциальные уравнения (1)–(3) с начальными и граничными условиями решались методом конечных разностей на равномерной сетке. Значение скорости на стенках области и источников находилось с помощью формулы Вудса [1–3]. Уравнения решались последовательно, каждый временной шаг начинался с определения функции тока внутри полости, затем решались уравнение дисперсии завихренности (2) и уравнение энергии (3). Параболические уравнения завихренности (2) и энергии (3) решались локально одномерной схемой Самарского [1], с помощью которой плоская задача сводится к системе одномерных задач. Конвективные слагаемые аппроксимировались с помощью схемы с донорными ячейками, а диффузионные слагаемые – центральными разностями. Эволюционный член представлял собой одностороннюю разность по времени и имел первый порядок точности относительно шага по времени. Производные по пространственным координатам аппроксимировались со вторым порядком точности относительно шага по координате. Дискретизация уравнения Пуассона (1) проводилась на основе формул симметричной аппроксимации вторых производных. Полученное разностное уравнение разрешалось методом последовательной верхней релаксации. Значение параметра релаксации выбиралось на основе вычислительных экспериментов. Разработанный численный алгоритм был подробно протестирован на модельных задачах [2, 3].

В результате моделирования были получены и проанализированы поля распределений изолиний функции тока и температуры при различных значениях определяющих параметров: $Ra=10^4-10^6$, $Pr=70$; $C=0-3$; $Da=10^{-2}$; $\varepsilon=0.9$, а также установлены зависимости интегрального коэффициента теплообмена на поверхности источников:

$$Nu_{avg} = \frac{1}{3} \left[\frac{L}{h} \int_0^{h/L} \left(-\frac{\partial\Theta}{\partial X} \right)_{X=(L-l)/2L} dY + \frac{L}{l} \int_{(L-l)/2L}^{(L+l)/2L} \left(-\frac{\partial\Theta}{\partial Y} \right)_{Y=h/L} dX + \frac{L}{h} \int_0^{h/L} \left(-\frac{\partial\Theta}{\partial X} \right)_{X=(L+l)/2L} dY \right].$$

На рисунке 2 показаны распределения изотерм и линий тока в полости при $Ra=10^6$, $C=0$, $Pr=70$, $Da=10^{-2}$. Видно, что в случае постоянной вязкости внутри полости формируются две конвективные ячейки, отражающие развитие восходящих и нисходящих течений вблизи источников энергии и охлаждающих вертикальных стенок.

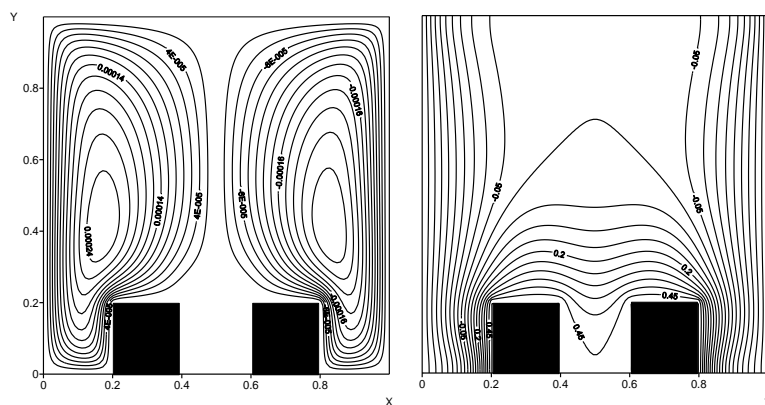


Рис. 2 Изолинии температуры и функции тока при постоянной вязкости

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
2. Гибанов Н.С., Шеремет М.А. Влияние формы и размеров локального источника энергии на режимы конвективного теплоперноса в квадратной полости // Компьютерные исследование и моделирование. – 2015. – Т.7. - N 2 – С. 271-280.
3. Astanina M. S., Sheremet M. A., Umavathi J. C. Unsteady natural convection with temperature-dependent viscosity in a square cavity filled with a porous medium // Transport in Porous Media. - 2015. - Vol. 110. - No. 1. - P. 113–126.

Научный руководитель: М.А.Шеремет, доцент, профессор кафедры теоретической механики ТГУ.

АНАЛИЗ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ТЕКСТУРЫ КРУПНОЗЕРНИСТЫХ СЛИТКОВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$

В.Д. Демчегло

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

В качестве основных материалов для устройств прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, работающих при температурах ниже $300\text{ }^\circ\text{C}$, используется теллурид висмута и твердые растворы на его основе. Структуру теллурида висмута Bi_2Te_3 можно представить в виде набора сложных слоев – квинтетов, в которых слои атомов $\text{Te}^{(1)}$ и $\text{Te}^{(2)}$ и Bi чередуются в последовательности:



Химическая связь в пределах квинтетов сильная ковалентная, а между квинтетами - слабая Ван-дер-Ваальсова связь. Это обуславливает значительную анизотропию как механических, так и электрофизических свойств.

Анализ кристаллографической анизотропии и связанной с ней анизотропии физических свойств твердых растворов на основе Bi_2Te_3 показывает, что коэффициент термоЭДС α - изотропная величина, а электропроводность σ и теплопроводность k - анизотропны, и их величины максимальны вдоль плоскостей спайности и минимальны в направлении, перпендикулярном этим плоскостям [1]:

$$\frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\perp}} = 4 - 6, \frac{\kappa_{\parallel}}{\kappa_{\perp}} = 2 - 3 \quad (2)$$

где σ_{\parallel} - удельная электропроводность вдоль плоскостей спайности;
 σ_{\perp} - удельная электропроводность перпендикулярно плоскостям спайности;

κ_{\parallel} - теплопроводность вдоль плоскостей спайности;

κ_{\perp} - теплопроводность перпендикулярно плоскостям спайности.

Термоэлектрическая эффективность Z зависит от отношения анизотропных коэффициентов электро- и теплопроводности и определяется по формуле:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} \quad (3)$$

где α - термо ЭДС [В/К];

σ - удельная электропроводность [(Ом·см)⁻¹];

κ - теплопроводность [Вт/(см·К)].

Поэтому целью работы является проведение анализа анизотропии свойств термоэлектрического твердого раствора n-типа проводимости $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ с помощью построения указательной поверхности для термоэлектрической эффективности и на основе изучения текстуры в слитках, полученных модифицированным методом Бриджмена.

Построение указательных поверхностей электрофизических свойств позволяет оценить влияние ориентации кристаллитов в поликристаллическом текстурированном слитке на его электрофизические свойства. Тензоры теплопроводности и электропроводности твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ имеют по две независимые компоненты каждый. Тензор электропроводности имеет компоненту σ_{11} в плоскостях спайности и компоненту σ_{33} в направлении, перпендикулярном к ним. Сечение эллипсоидов вращения описывается уравнением указательной поверхности тензора:

$$\frac{x_i^2}{x_{\max}^2} + \frac{y_i^2}{y_{\max}^2} = 1 \quad (4)$$

где x_i, y_i - соответствуют текущим координатам - значениям свойства;

x_{\max}, y_{\max} - максимальные значения этих свойств.

Вид матрицы удельной электропроводности в диагональном виде для $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$:

$$[\sigma_{ij}] = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

где $\sigma_{11} = \sigma_{22}$. Компоненты тензора электропроводности в ортогональной системе координат, в которой ось Z параллельна оси роста и нормали к плоскости спайности (0001), а оси X и Y параллельны этой плоскости вычисляются по формуле свойства в заданном направлении:

$$\sigma_n = \sigma_{ij} n_i n_j \quad (6)$$

где n_i, n_j направляющие косинусы для направлений нормали к отражающей плоскости с индексами $\{hkl\}$.

Используя приведенную формулу, были рассчитаны значения для удельной электропроводности, теплопроводности и термоэлектрической эффективности для монокристаллического твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ и построена диаграмма анизотропии коэффициента термоэлектрической эффективности (рис. 1).

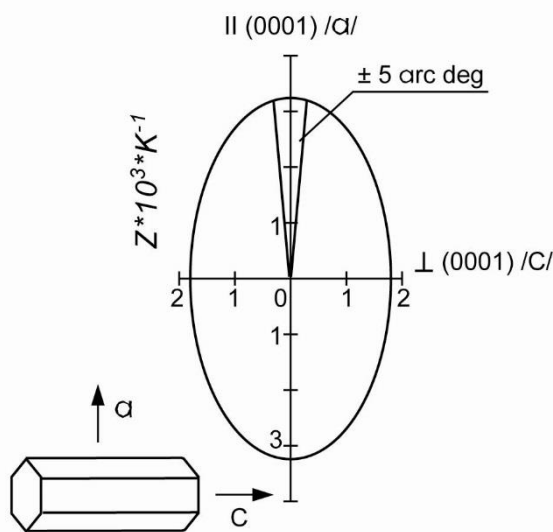


Рис.1. Указательная поверхность коэффициента термоэлектрической эффективности для твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$.

Из анализа формы эллипсоида вращения следует, что рассеяние ориентировок в пределах $\pm 5^\circ$ не будет существенно сказываться на величине термоэлектрической эффективности.

Объектом исследования являлись объемные термоэлектрические материалы в виде пластин, выращенные модифицированным методом Бриджмена (метод нормальной направленной кристаллизации в плоской полости) [4, 5]. В данном методе кристаллизация каждой пластины происходит в отдельной графитовой ячейке, которая задает геометрию пластины. Особенностью данного метода является то, что за один процесс кристаллизации получают одновременно ряд пластин, с толщиной необходимой для сборки готового изделия. В результате использования метода нормально направленной кристаллизации в плоской полости можно получить материалы со структурой, в которой плоскости спайности не только параллельны направлению роста кристалла (что характерно для зонной плавки), но и практически параллельны между собой и внешним граням слитка.

В работе модифицированным методом Бриджмена были получены пластины твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ при разных скоростях кристаллизации. Скорость кристаллизации изменяли от 1,2 мм/мин до 0,15 мм/мин.

Для изучения текстуры в крупнозернистых слитках $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$ использовали рентгенодифрактометрический метод построения прямых полюсных фигур (ППФ). Контроль анизотропии электрофизических параметров осуществляли на основе построения полюсов плоскостей (11.0), перпендикулярных оси роста. Характеристиками распределения полюсной плотности и степени концентрации полюсов вдоль оси слитка служили отклонение полюсов (11.0) от оси слитка, азимутальная протяженность полюсного «пятна» на полюсной фигуре, характеризующая развитость субграниц внутри зерна и разориентировку зерен и субзерен относительно оси слитка, радиальная протяженность «пятна», характеризующая степень рассеяния полюсов относительно оси слитка [6, 7].

Измерения проводили на разных участках пластины.

На рисунке 2 (а) приведена ППФ (11.0) для пластины, полученной при скорости кристаллизации 1,2 мм/мин. Отклонение оси текстуры от оси слитка для разных зерен составляет 10° , 15° и 45° . Рассеяние нормалей к плоскостям (11.0) в радиальном направлении составляет $10-12^\circ$. Протяженность максимумов в азимутальном направлении (разориентировка субзерен в пределах одного зерна) у 50 % текстуры составляет от 20° до 30° . По эллипсоиду, приведённому на рисунке 1 видно, что такое отклонение плоскостей спайности от оси роста слитка будет сильно снижать уровень термоэлектрической эффективности твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$. Можно предположить что в пластинах, выращенных при быстрой скорости кристаллизации, наблюдается дендритная микроструктура, так как данный тип кристаллизации характеризуется случайными кристаллографическими ориентировками кристаллов по отношению к оси роста.

При скорости кристаллизации 0,3 мм/мин наблюдается искривление формы фронта кристаллизации. Образец имеет неоднородную текстуру на краях и в центре пластины. В середине пластины плоскости спайности параллельны оси роста, а на краях пластины – нормали к плоскостям (11.0) отклонены на различные расстояния от 0° до 25° от оси роста.

На рисунке 2 (б) приведена ППФ (11.0) для пластины, полученной при скорости кристаллизации 0,15 мм/мин. Отклонение оси текстуры от оси слитка составляет от 0° до 5° для отдельных зерен или групп зерен. При такой текстуре из анализа формы эллипсоида вращения следует, что рассеяние ориентировок в пределах $\pm 5^\circ$ существенно не скажется на величине термоэлектрической эффективности.

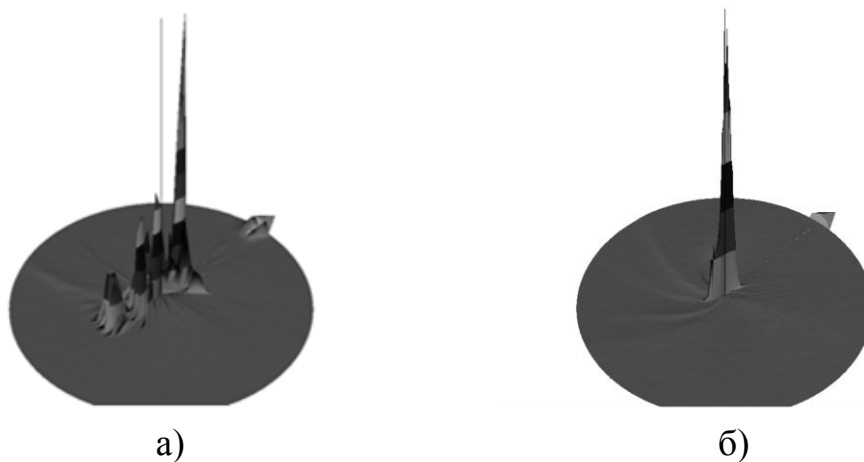


Рис. 2 ППФ (11.0) для пластин, полученных со скоростью кристаллизации (а) - 1,2 мм/мин (б) - 0,15 мм/мин.

На рис. 3 приведены изображения пластин, полученных при разных скоростях кристаллизации.

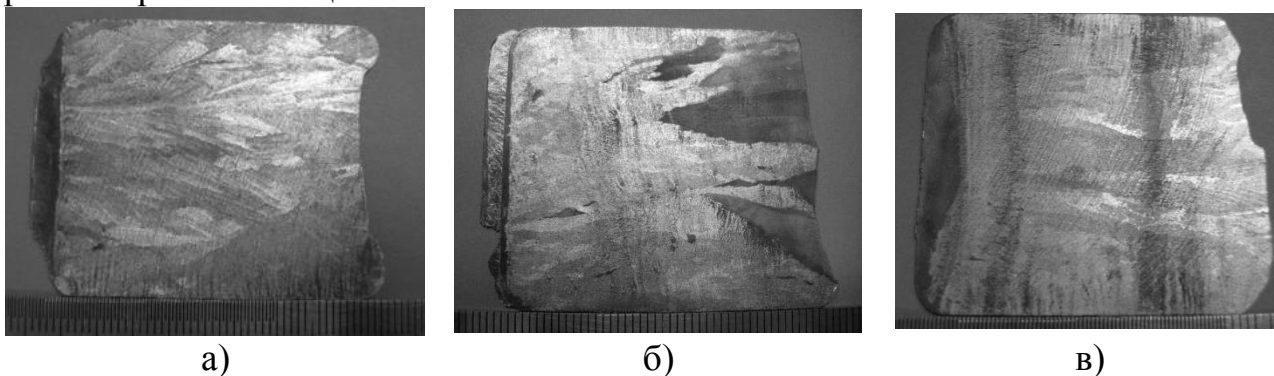


Рис. 3 Внешний вид пластин при различной скорости кристаллизации (а) 1,2 мм/мин (б) 0,3 мм/мин (в) 0,15 мм/мин.

Таким образом, при скорости кристаллизации 0,15 мм/мин возможно получить на поликристаллическом текстурированном образце значение термоэлектрической эффективности максимально приближенное к значению для монокристалла.

Проведен анализ анизотропии свойств на основе изучения текстуры в слитках, полученных модифицированным методом Бриджмена. Построена указательная поверхность для коэффициента термоэлектрической эффективности твердого раствора $\text{Bi}_2\text{Se}_{0,3}\text{Te}_{2,7}$. Из анализа формы эллипсоида вращения следует, что рассеяние ориентировок в пределах $\pm 5^\circ$ существенно не сказывается на величине термоэлектрической эффективности. Показано, что при скорости кристаллизации пластины 0,15 мм/мин плоскости спайности ориентируются почти параллельно оси роста, что позволяет максимально использовать анизотропию термоэлектрических свойств, характерную для ромбоэдрической кристаллической решетки твердых растворов на основе халькогенидов висмута.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Л.П. Булат, Термоэлектрическое охлаждение (Санкт-Петербург: СПбГУНиПТ, 2002).

2. Л.Е. Шелимова, О.Г. Карпинский, П.П. Константинов и др., Неорганические материалы 40, 530-540 (2004).
3. Л.Е. Шелимова, Т.Е. Свечникова, О.Г. Карпинский и др., Неорганические материалы 43, 2, 165 – 171 (2007).
4. V.T. Bublik, A.I. Voronin, N.Yu. Tabachkova e. a., Inorganic materials 47,14, 77-82 (2011).
5. A.I. Voronin, V.T. Bublik, N.Yu. Tabachkova e. a., Journal of electronic materials 40, 5, 794-800 (2011).
6. V.T. Bublik, A.I. Voronin, Vygovskaya E.A. e. a. // Inorganic Materials, 47, 14, 1563 – 1568 (2011).
7. В.В. Аленков, Ю.М. Белов, В.Т. Бублик и др., Материалы электронной техники 2, 22 – 25 (2008).

Научные руководители: Н.Ю. Табачкова, к.ф.-м.н., ст.н.с. каф. материаловедения полупроводников и диэлектриков, А.И. Воронин, инженер 1 кат. каф. функциональных наносистем и высокотемпературных материалов.

РАСПАД СУЩЕСТВЕННО НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

М.В. Пискунов, А.О. Опарин
Томский политехнический университет

Введение

Результаты исследований [1] показывают, что за счет введения в капли воды объемом 5–15 мкл одиночных частиц (объемом не менее 50–70 % от объема капли воды), изготовленных из графита природного происхождения, могут быть достигнуты условия интенсивного фазового перехода внутри капель (на границах раздела «включение – жидкость»), сопровождающегося взрывным дроблением слоя жидкости. Установленный эффект представляет интерес для разработки и совершенствования технологий пожаротушения с применением потоков жидкости с твердыми примесями [2] и высокотемпературной очистки существенно неоднородных вод [3].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование количественных (число и размер отделяющихся фрагментов жидкости, увеличение площади поверхности теплообмена) характеристик взрывного дробления слоев жидкости капель, содержащих одиночные твердые включения, при интенсивном фазовом переходе на внутренних границах раздела «одиночное включение – слой жидкости». Исследование проводится при высокотемпературном нагреве неоднородных капель жидкости без направленного движения потока газовой среды (нагрев в печи в воздушной среде при атмосферном давлении).

Экспериментальный стенд и методы исследований

Для экспериментального исследования закономерностей фазовых превращений капель воды с твердыми непрозрачными включениями при нагреве в высокотемпературной газовой среде разработан экспериментальный стенд,

схема которого представлена на рис. 1. Оборудование и экспериментальная методика по большей части аналогичны тем, которые применены в исследовании [1]. Однако, в данном случае создание высокотемпературной газовой (воздушной) среды обеспечивает муфельная трубчатая печь 3. Контроль и установление необходимой температуры нагрева выполняется с помощью интегрированных регулятора и термопары типа *S* (платинородий-платиновая; максимальная рабочая температура 1623 К, предел допускаемых отклонений ± 1 К). Использование муфельной печи делает возможным проведение экспериментов при поддержании постоянной температуры нагрева, в отличие от экспериментов [1], где соблюдение этого параметра являлось довольно сложным. В данном экспериментах температура нагрева варьировалась в диапазоне от 1073 до 1373 К. Высокоскоростная видеокамера 1 осуществляла регистрацию изучаемых процессов, находясь по одну сторону от печи, а ввод неоднородных капель в полость трубки нагрева до зоны видеорегистрации обеспечивался работой передвижного механизма 6 с другой стороны (рис. 1). Неоднородная капля в настоящем исследовании состоит из твёрдого включения (материал – графит природного происхождения) в форме куба или параллелепипеда, которое полностью покрывается слоем водопроводной воды. Размеры графитовых частиц следующие: $2 \times 2 \times 1$ мм, $2 \times 2 \times 2$ мм и $2 \times 2 \times 3$ мм. Твёрдые включения использовались единожды (т.е. каждый опыт применялось новое включение). Объём слоя воды составлял 5, 10 и 15 мкл. Также в опытах в состав неоднородных капель воды добавлялась суспензия графита (размер частиц – 0,05 мм; массовая концентрация – 2 %). Перед проведением очередного эксперимента твёрдое включение механически закреплялось на тонком заострённом стержне 9, изготовленном из теплоизоляционного материала (керамика). На включение опускалась капля воды / суспензии заданного объема. Таким образом формировалась неоднородная капля воды.

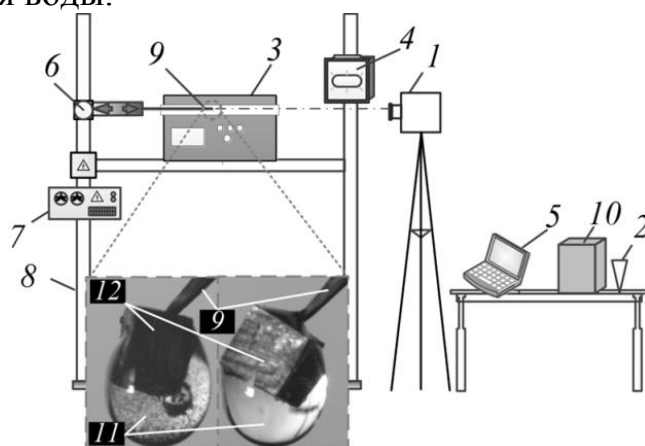


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – высокоскоростная камера; 2 – дозирующее устройство; 3 – муфельная печь; 4 – прожектор; 5 – компьютер; 6 – моторизованное координатное устройство (МКУ); 7 – блок питания МКУ; 8 – алюминиевая стойка; 9 – керамический стержень; 10 – аналитические весы; 11 – капля воды / суспензии; 12 – твердое включение

Записанные видеоматериалы обрабатывались в программном обеспечении «Phantom Camera Control». Основной задачей при обработке снятых данных являлось определение количественных характеристик процесса дробления

слоя жидкости вокруг твёрдого включения (размеры отделяющихся капель и их количество). Полученные данные использовались для вычисления такой величины как суммарная площадь поверхности отделившихся в процессе дробления капель воды S_{out} (в рамках одного опыта, а также серии экспериментов), которая в настоящем исследовании представляла наибольший с практической точки зрения интерес. Систематические погрешности измерения размеров отделяющихся при дроблении капель составили не более 0,001 мм, определения временных характеристик процессов – $\pm 0,01$ с. Серия экспериментов при идентичных условиях нагрева (размер твёрдого включения, объем жидкости, ее начальная температура, полное обволакивание включения каплями жидкости, применение ранее неиспользованного включения в каждом опыте) включала семь опытов, которые, как уже указывалось выше, проводились в диапазоне температур нагрева $T_g=1073-1373$ К с шагом 50 К. В каждой серии варьировались размеры включений и начальные объёмы жидкости.

Процедура экспериментов с использованием муфельной трубчатой печи включала следующие основные пункты: введение закреплённой на стержне 10 неоднородной капли в полость нагревательной трубки печи 3; запуск высокоскоростной съёмки в процессе движения капли в зону регистрации; выведение твёрдого включения 12 после полного испарения обволакивающего его слоя капли воды / суспензии 11 из высокотемпературной области; подготовка к следующему опыту; проведение серии экспериментов; обработка полученных видеogramм опытов.

Результаты и обсуждение

Для установления режимов взрывного дробления неоднородных капель жидкости при наличии в их составе частиц порошка графита и сравнения полученных данных о количестве и размерах отделяющихся капель при парообразовании слоев воды и суспензии проведены эксперименты, результаты которых представлены на рис. 2.

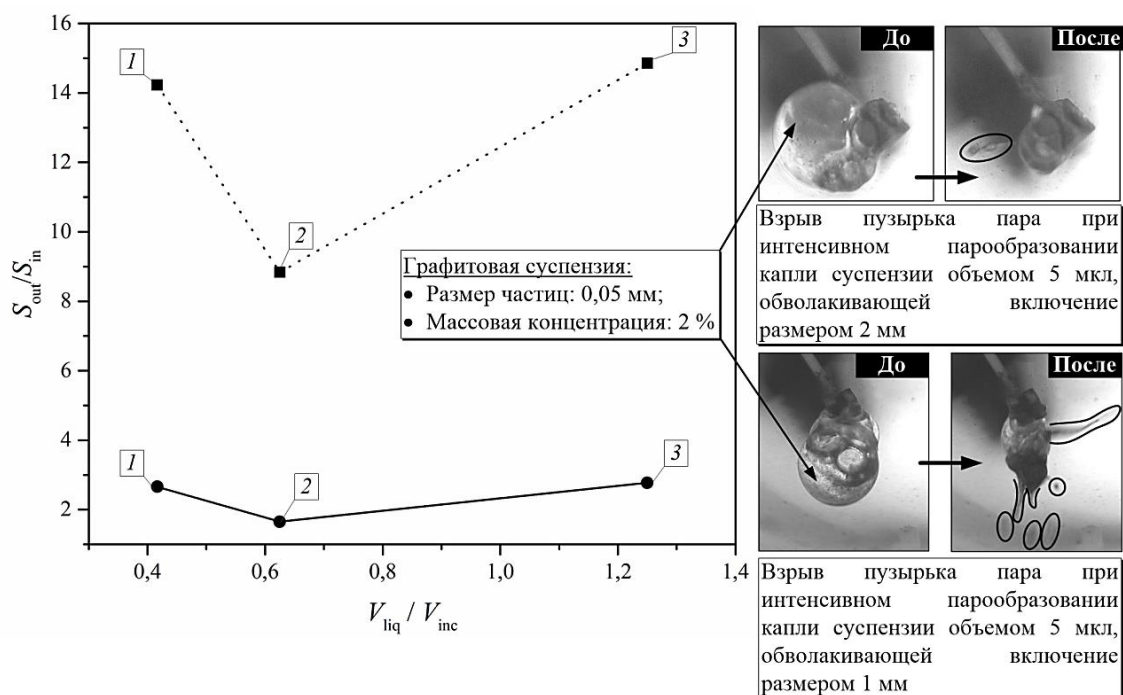


Рис. 2. Зависимости отношения площади поверхности испарения жидкости после взрывного дробления (S_{out}) к начальной площади поверхности (S_{in}) капли (объемом 5 мкл) от отношения объемов жидкости (воды или графитовой суспензии) V_{liq} и включения V_{inc} в неоднородной капле: 1 – параметр V_{liq}/V_{inc} при размере включения $2 \times 2 \times 3$ мм; 2 – V_{liq}/V_{inc} при размере включения $2 \times 2 \times 2$ мм; 3 – V_{liq}/V_{inc} при размере включения $2 \times 2 \times 1$ мм

На рис. 2 видно, что минимальные значения отношения S_{out}/S_{in} соответствуют условиям использования включения в форме куба с размерами $2 \times 2 \times 2$ мм. Установлено, что при использовании включения в форме куба происходит довольно равномерное его обволакивание водой. При этом приток энергии внешней газовой среды к поверхности включения со всех сторон проходит с примерно равной скоростью. В случае включения в форме параллелепипеда толщина пленки на всех гранях была отличной. Это приводило к неравномерному прогреву неоднородной капли. На гранях включений с минимальной пленкой жидкости происходило зарождение пузырьков и интенсивное дробление. Поэтому в экспериментах с включениями в форме параллелепипеда дробление начиналось раньше и характеризовалось отрывом большего числа капель. Как следствие, и отношения S_{out}/S_{in} в этом случае выше.

Взрывное дробление капель суспензий характеризуется (рис. 2) меньшими значениями S_{out}/S_{in} по сравнению с водой (т.е. при дроблении слоя суспензии формируется меньше капель жидкости). По видеоданным установлено, что частицы суспензии при формировании пузырьков пара на поверхности основного включения «сбиваются» в группы. При дроблении формировались жидкостные фрагменты с скопившимися твердыми частичками. Чем крупнее были области с такими скопившимися фрагментами, тем крупнее были отрывающиеся капли. Как следствие, в экспериментах с суспензиями формирующиеся при дроблении капли были больших размеров, чем в опытах с водой. Но число таких отрывающихся капель было существенно меньше, чем в экспериментах с водяными

неоднородными каплями. Как следствие, отношения S_{out}/S_{in} для суспензии были меньше.

Заключение

Установлено, что за счет эффекта взрывного дробления слоя воды неоднородной капли площадь поверхности теплообмена может увеличиться практически в 15 раз. Однако, при использовании суспензии графита выявлено менее значительное (двух-, трехкратное) увеличение площади поверхности испарения. Благодаря скоростной съемке удалось установить, что причиной таких различий параметра S_{out}/S_{in} является свойство частиц скапливаться в группы (агломераты) при интенсивном парообразовании слоя жидкости неоднородной капли, обеспечивая при этом условие увеличения размеров и уменьшения количества отделяющихся жидкостных фрагментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД-2806.2015.8) и стипендии Президента Российской Федерации (СП-1049.2016.1).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. Evaporation, boiling and explosive breakup of heterogeneous droplet in a high-temperature gas // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2016. – V. 92. – P. 360–369.
2. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area // *Int. J. Therm. Sci.* – 2015. – V. 88. – P. 193–200.
3. Кофман Д.И., Востриков М.М., Антоненко А.В. Барабанные инсинераторы для термического уничтожения иловых осадков сточных вод // *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* – 2009. – № 9. – С. 41–43.

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., зав. каф. АТП ЭНИН ТПУ.

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

К.К. Назаров, А.А. Абдулаев

Дагестанский государственный технический университет

Установка затрагивает область электроники, тем самым, имеет непосредственное отношение к устройствам, предназначенным для выпрямления переменного электрического напряжения. Главной целью данной установки служит повышение, генерирующим устройством, величины постоянного напряжения.

Принцип работы установки заключается в том, что при пуске переменного напряжения в омическую область, проходящее после этого сквозь изоляционную прослойку, использование данного слоя необходимо для более качественного теплового взаимодействия с имеющейся термоэлектрической структурой, в последствие с которой уже проводится фиксирование значений постоянного напряжения. Противоположно стороне взаимодействия омической области и термоэлектрической структуры, располагается приемник бросового тепла. Для того чтобы предотвратить значительное увеличение температуры при взаимодействии, вентиляторный блок обдувает термоэлектрическую структуру.

Примерным образцом установки послужил агрегат, изложенный в [2].

Ниже приведено строение прибора (см. рис. 1). Примыкающая к термоэлектрической структуре (3), сквозь изолирующую прослойку (2), омическая область (1) служит качественным тепловым контактом. Противоположно стороне контактирующей с термоэлектрической структурой (3) с наружной части омической области (1), располагается приемник бросового тепла (4). В качестве данного приемника (4) необходимо использовать располагающим цельносталевым объемным видом аккумулятор теплоты, находящийся в плотном тепловом контакте с вентиляционной системой выбросов, выбросов конденсируемых газов, горячей воды для сброса и т.д. Вдобавок к тому же, для предотвращения значительного повышения температуры, термоэлектрическая структура дополнительно охлаждается вентиляторным блоком (5).

Принцип работы установки заключается в следующем.

С помощью генератора переменного напряжения U_{\sim} осуществляется подача сигнала на омическую область (1), где в свою очередь, начинается процесс активного выделения теплоты в соответствии с законом Джоуля-Ленца. В то же время, происходит дополнительный нагрев области (1) от источника теплоты (4), выполненного в форме емкости с геотермической жидкостью. Тепло поступает сквозь тонкую изолирующую прослойку (2) к нагревающимся спаям термоэлектрической структуры (3), здесь уже возникает термо-ЭДС, появляется оно за счет установившегося стационарного распределения температур.

Имеющаяся структура характеризуется высокой теплоемкостью, что говорит об ее инерционности. В ходе этого процесса постоянное напряжение, снятое с контактов, будет характеризоваться небольшой амплитудой пульсаций. Стоит отметить и тот факт, что приемник бросового тепла (4) сверх того осуществляет нагревание области (1) посредством которого и вызывается повышение постоянного напряжения. Для того, чтобы тепло своевременно отводилось от холодных спаев расположенных на термоэлектрической структуре (3) используется вентиляторный блока (5), тем самым, данный процесс приводит к тому, что на ее контактах происходит повышение постоянного напряжения [1].

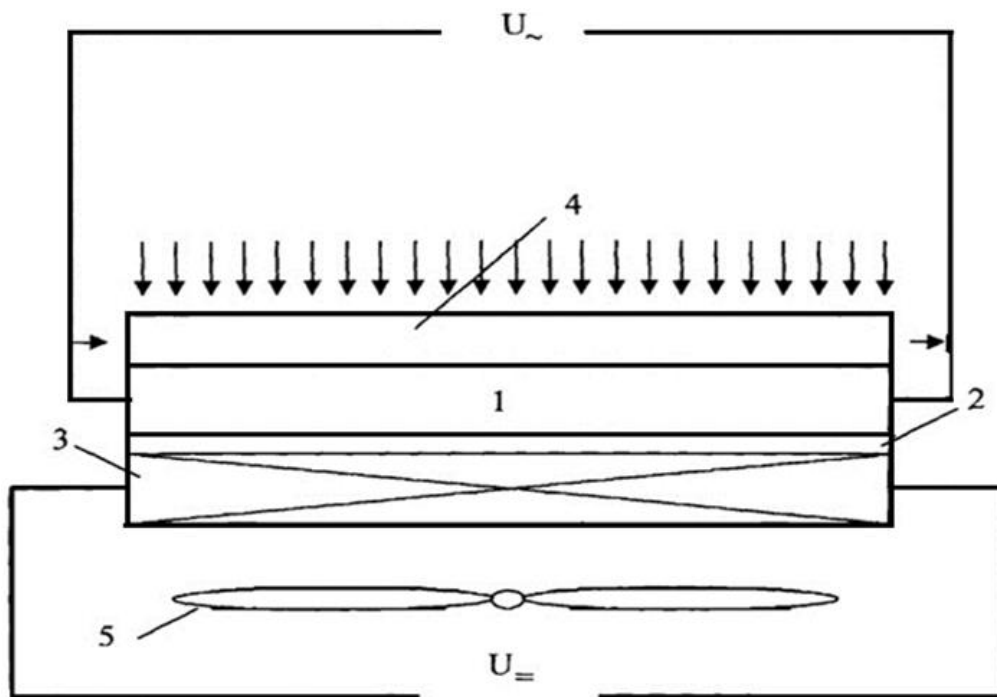


Рис. 1. Функциональная схема разработанной установки для преобразования

ЛИТЕРАТУРА:

1. Выпрямитель переменного напряжения // Патент РФ № 2542609 от 20.02.2015. / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Хазамова М.А.
2. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника: Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. – М.: Высшая школа, 1987. – 416 с.

Научный руководитель: Д.В. Евдулов, к.т.н., старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, Дагестанский государственный технический университет.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА В СПП-500-1 ДЛЯ АЭС С РЕАКТОРАМИ РБМК

В.В. Легкоступова, А.В. Судаков
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого

Низкие начальные параметры пара турбин атомных электрических станций (АЭС) с водоохлаждаемыми реакторами и пока недостаточно эффективная внутритурбинная сепарация влаги не позволяют обеспечить на последних ступенях цилиндра низкого давления (ЦНД) допустимую влажность пара, что отрицательно сказывается на надежности лопаток и экономичности турбины. По-

этому практически все турбины АЭС, работающие на насыщенном паре, имеют внешние сепараторы или сепараторы-пароперегреватели (СПП). Сепараторы-пароперегреватели – самостоятельные аппараты, которые располагаются вне корпуса турбины (между цилиндрами высокого и низкого давления (ЦВД и ЦНД)), и предназначены для сепарации и перегрева пара. В настоящее время на всех действующих энергоблоках с реакторами РБМК-1000 на турбинах К-500-65/3000 установлены сепараторы СПП-500-1 конструкции ЗиО. Конструкция данного СПП описана в [1,2].

В ходе эксплуатации аппаратов СПП-500-1 на действующих энергоблоках наблюдалось усталостное или коррозионное растрескивание труб разводки греющего пара и трубок поверхности нагрева и снижение эффективности перегрева пара. Основной причиной повреждений является пронос влаги через сепаратор, вызванный неравномерной нагрузкой сепарационных блоков, связанной с боковым вводом влажного пара.

С целью снижения неравномерности распределения парового потока по сепарационным блокам и повышения надежности и эффективности систем сепарации пара на Ленинградской АЭС и Смоленской АЭС была проведена модернизация СПП-500-1 [3,4,5]. Проект модернизации был выполнен специалистами ОАО НПО ЦКТИ совместно с фирмой Valke-Durr (Германия). Результатами реализации проекта по модернизации стало:

- увеличение размеров входной камеры;
- изменение схемы движения пара;
- замена сепарационных блоков на жалюзийные пакеты Powervane фирмы Valke-Durr с влагозахватами, допускающими существенно большие нагрузки по влажному пару;
- организация сепарации влаги со стен и потолка входной камеры;
- организация системы коллекторов для отвода отсепарированной влаги от жалюзийных пакетов, перфорированных листов, а также отсепарированной влаги со стен и потолка входной камеры.

Проведенная модернизация потребовала проведения расчетно-экспериментальных исследований, которые позволили бы определить характеристики парового потока во входной камере СПП и по сепарационным блокам, а также количественно оценить эффективность проведенной модернизации.

Расчетные исследования распределения двухфазного потока (воздух-вода) в сепарационной части СПП-500-1 проводились методом моделирования. Для этого были построены геометрические модели сепарационной части СПП-500-1 до и после модернизации с разными углами подвода потока (0° и 28°). Затем модели импортировались в программный комплекс ANSYS CFX, в котором и проводились все расчеты. На рисунках 1 и 2 представлены расчетные модели.

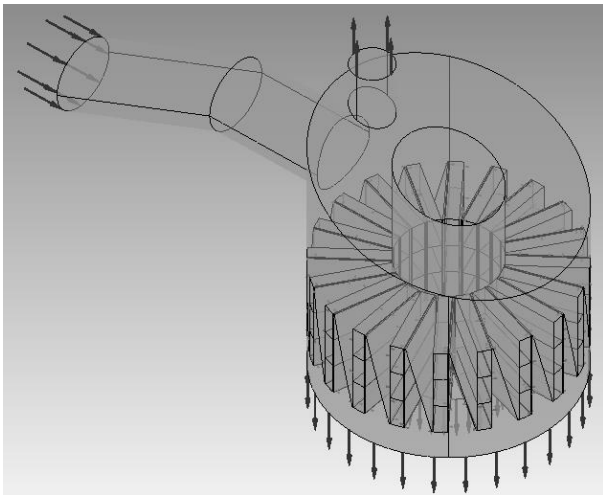


Рис. 1. Расчетная модель сепарационной части СПП-500-1 до модернизации.

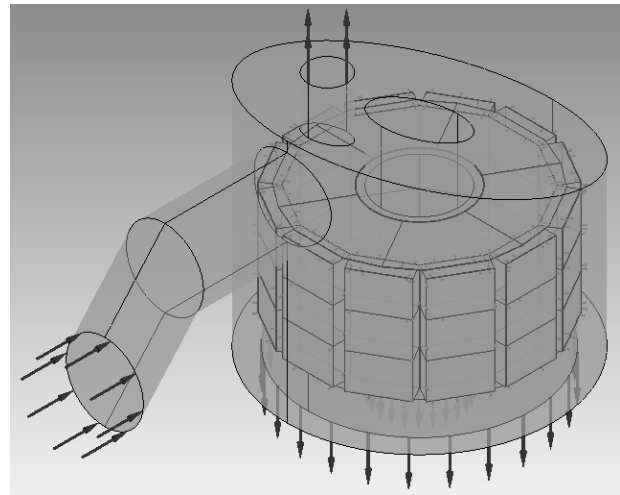


Рис. 2. Расчетная модель сепарационной части СПП-500-1 после модернизации.

Исходные данные для исследования:

- конструкция СПП-500-1 до и после модернизации;
- рабочие параметры СПП-500-1: скорость потока на входе 58,2 м/с , рабочее давление 0,336 МПа;
- рабочая среда – воздух с примесью капель воды;
- объемная концентрация капель воды на входе в сепаратор 15%;
- вода представлена в виде дискретной (дисперсной) фазы (Particle Transport Fluid), при задании воды используется стандартный материал Water из библиотеки материалов;
- определение граничных условий на стенках: перпендикулярный коэффициент сопротивления (0,2), параллельный коэффициент сопротивления (1) – таким образом учитывается осаждение частиц воды на поверхности стенок, результатом такого процесса являются пленки влаги, образующиеся на стенках и потолке входной камеры и во входном коллекторе.

Порядок проведения исследования:

Этап 1: проведение расчетов двухфазного потока в расчетной модели сепарационной части СПП-500-1 до модернизации;

Этап 2: проведение расчетов двухфазного потока в расчетной модели сепарационной части СПП-500-1 после модернизации, на входе в сепарационные блоки установлены перфорированные листы с одинаковой степенью перфорации 28%;

Этап 3: как на втором этапе, но дополнительно с целью равномерного распределения потока по сепарационным блокам на входе установлены листы с разной степенью перфорации – напротив входного патрубка – 14%, в верхней части боковых блоках – 40%, остальные листы – 28%;

Этап 4: как на третьем этапе, но степень перфорации листов у сепарационных блоков под входным патрубком и у боковых блоков в нижней части изменена на 14%;

Этап 5: как на четвертом этапе, но с дополнительным перфорированным листом на перекрытии, цель установки данного листа – дополнительная сепарация влаги со стен и потолка входной камеры.

Получены распределение двухфазного потока во входной камере СПП-500-1, построены распределения скоростей потока по сепарационным блокам. Результаты исследования представлены на рисунках 3÷5.

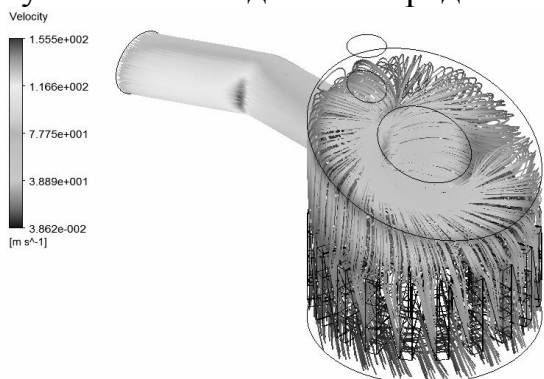


Рис. 3. Линии тока (пространственное распределение потока) в модели сепарационной части СПП-500-1 до модернизации.

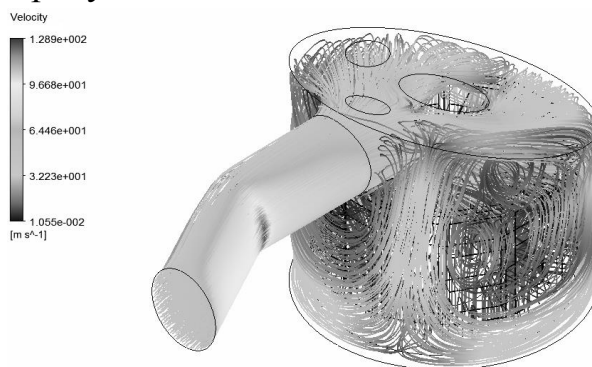


Рис. 4. Линии тока (пространственное распределение потока) в модели сепарационной части СПП-500-1 после модернизации.

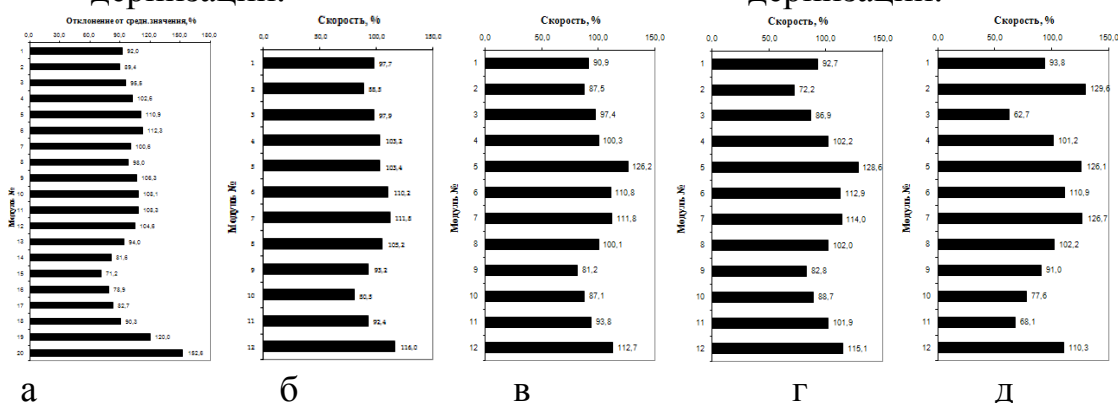


Рис. 5. Эпюры распределения скоростей потока по сепарационным блокам: а – результаты первого этапа; б – результаты второго этапа; в – результаты третьего этапа; г – результаты четвертого этапа; д – результаты пятого этапа.

Проанализировав результаты проведенных расчетных исследований можно сделать следующие выводы:

- жалюзийные пакеты Rowervane обеспечивают высокую эффективность влагоудаления;
- установка перед пакетами перфорированных листов с различной степенью перфорации позволяет добиться равномерного распределения скоростей;
- перфорированный лист, перекрывающий низ входной камеры, обеспечивает дополнительный отвод влаги и обеспечивает улучшение в работе сепаратора;

- наиболее нагруженными являются сепарационные блоки, расположенные под входным патрубком, и блоки, расположенные напротив;
- во входной камере имеются области с обратным движением потока среды.

В дальнейшем данная методика моделирования двухфазного потока может быть использована при расчетном анализе на начальных этапах проектирования и модернизации конструкций других СПП и теплообменных аппаратов, разрабатываемых и эксплуатируемых на действующих энергоблоках АЭС.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Филиппов Г.А., Поваров О.А. Сепарация влаги в турбинах АЭС. М.: Энергия, 1980. 320 с.
2. Шишкин А.А., Федорович Е.Д. Опыт эксплуатации промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин Ленинградской АЭС // Труды ЦКТИ. - 1981. - Вып.189. - С. 3-9.
3. Егоров М.Ю. Варианты модернизации сепараторов-пароперегревателей Ленинградской АЭС // Материалы докладов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов». М.: Физический факультет МГУ, 2007. - С. 104-105.
4. Гредасов П.О. Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 турбоустановок Ленинградской АЭС // Сборник тезисов докладов XII Международной молодежной научной конференции «Полярное сияние 2009». М.: НИЯУ МИФИ, 2009. - С. 30-34.
5. Судаков А.В., Легкоступова В.В. Модернизация сепараторов-пароперегревателей СПП-500-1 турбоустановок Ленинградской АЭС // Теплоэнергетика. - 2015. - № 3. - С. 16-21.

Научный руководитель: А.В. Судаков, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

И.З. Багаутдинов, Р.Ш. Мисбахов, И.Н. Лизунов, А.Н. Фунт
Казанский государственный энергетический университет

В общем случае системы телемеханики (ТМ) представляют собой комплекс оборудования и программного обеспечения, который обеспечивает возможность приема/передачи телеинформации, телесигнализации и телеуправления от удаленных электроэнергетических установок в пункты управления. Важными элементами ТМ являются системы сбора и передачи информации (ССПИ), играющие большую роль в обеспечении необходимого уровня качества и надежности ТМ [1].

На данный момент в электроустановках (ЭУ) различных классов напряжения электросетевых и промышленных предприятий используются две основные технологии для организации ССПИ:

- на основе прокладываемых внутри объектов медных интерфейсных кабелей для каждой реализуемой в нем системы автоматизации отдельно (АСКУЭ, АСУТП, мониторинг РЗА и ПА, ТМ). Причем такие линии связи имеют низкую помехоустойчивость, обусловленную влиянием сложной электромагнитной обстановки на ЭУ, а также низкую скорость передачи данных и высокие затраты на монтажные и пусконаладочные работы;
- на основе организуемого оптического кольца, что значительно повышает стоимость таких систем, прежде всего, из-за высокой стоимости коммуникационного оборудования с оптическими интерфейсами, а также из-за устанавливаемого дополнительного, зачастую импортного, коммутирующего оборудования в отсеках РЗА

При сравнении существующих методов канализации информации в ССПИ можно сделать вывод, что в настоящее время все более актуальным становится использование линий связи на основе оптоволоконна. Преимущества оптоволоконных кабелей перед медно-жильными достаточно большие. Во-первых, это его цена, по сравнению с кабелем, состоящим из медной проволоки - оптоволоконный кабель стоит дешевле. Во-вторых, сигналы в оптическом волокне практически не затухают, что тоже характеризует данный материал с положительной точки зрения. Полная нечувствительность оптоволоконного кабеля к внешним электрическим помехам и наводкам обеспечивает устойчивую работу системы передачи информации в сложной электромагнитной обстановке. Также использование оптоволоконных кабелей гарантирует высокую степень защиты от неправомерного доступа, это достигается за счет того, что информация скрыта, и ее невозможно отследить в радиодиапазонах, к тому же оптическое волокно имеет специальные способы подключения, которые достаточно трудно взломать [2].

На сегодняшний день существует два основных вида оптических сетей:

- активные оптические сети;
- пассивные оптические сети.

В системах с «активной» оптикой используется коммутационное оборудование, требующее подключения к электрической сети: для приема, передачи и обработки информации используются промежуточные коммутаторы и маршрутизаторы, которые необходимо смонтировать, наладить и запитать от электрической сети 220/380 В.

В пассивных оптоволоконных системах, напротив, нет промежуточного оборудования, питающегося от электричества. Вместо этого здесь используются специальные оптические разветвители (сплиттеры), которые самостоятельно разделяют и группируют оптические сигналы, проходящие сквозь них. Таким образом, питание здесь необходимо только для источников и приемников данных, т.н. ONU (абонентские терминалы) и OLT (узловые сетевые терминалы) [3].

Пассивные оптические сети имеют ряд явных преимуществ. Благодаря тому, что каждое оптическое волокно кабеля (от одного порта OLT) такой сети может обслуживать одновременно до 32 пользователей (ONU), такие системы являются очень эффективными. В сравнении с активными оптическими сетями, пассивные сети более экономичны в установке и при дальнейшем техническом обслуживании. А поскольку в них используется намного меньше электронных компонентов, вероятность поломки в них ниже.

Однако на данный момент пассивные оптические сети не нашли широкого практического применения на объектах электроэнергетики, хотя волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) по сравнению со всеми кабельными системами отличаются очень высокой надежностью, качеством связи, широкой пропускной способностью, значительно большей протяженностью без усиления и защищенностью от электромагнитных помех [4].

Практически полное отсутствие применения на практике пассивных оптических сетей в электроэнергетике привело к тому, что на данный момент на рынке не существует контроллеров ТМ, поддерживающих xPON сети. Существующие на рынке т.н. bay-контроллеры ТМ не поддерживают интерфейсы xPON, в том числе и из-за необходимости увеличения производительности центральных ядер, применяемых в них. Несмотря на это, а также с учетом постоянного и непрерывного прогресса в информационно-вычислительной технике можно предположить, что практика применения xPON в электроэнергетике может в самое ближайшее время существенно измениться. Преимущества, которые дают ТМ пассивные оптические технологии - очевидны, их применение перспектива самого ближайшего времени.

Необходимо также отметить, что применение технологии пассивных оптических сетей позволит обеспечить снижение капитальных вложений и издержек при проектировании, построении и обслуживании систем сбора и передачи информации (ССПИ) для современных систем автоматизации объектов компании (АСКУЭ, АСУТП, мониторинг РЗА и ПА, системы ТМ).

Очевидно, волоконно-оптические сети доступа будут развиваться быстрыми темпами не только в телекоммуникационной сфере. При этом возможны различные комбинации оптических и медных сегментов сети — в зависимости от конкретных задач в конкретном промышленном решении. В электроэнергетике перспектива применения пассивных оптических сетей согласуется с «Концепцией развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса», принятой в 22 июня 2016 года Правлением ПАО «Россети», где указано, что основным видом связи, применяемым для целей РЗА, должна являться оптоволоконная связь по выделенным волокнам или с применением мультиплексоров. В свою очередь это позволит обеспечить надежное функционирование устройств РЗА и минимизацию удельных капитальных и эксплуатационных затрат [5].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Митюшкин К.Г., «Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах». – М.: Энергоатомиздат, 2005 г.
2. СТО 70238424.17.220.20.005-2011 Системы связи для сбора и передачи информации в электроэнергетике. Условия создания. Нормы и требования
3. И.И. Петренко, Р.Р. Убайдуллаев, "Пассивные оптические сети PON. Часть 2. Ethernet на первой миле", Lightware Russian edition №2,2004 год.
4. Меккель А. М. Технологии пассивной оптической сети / А. М. Меккель. - Москва: Фотон-Экспресс. 2013. - 69-74 с.
5. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе, утверждено Советом директоров ОАО «Россети» (протокол № 138 от 23.10.2013).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ МЕТОДОМ СПЛОШНЫХ СРЕД И МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ФАЗ

Ю.А. Каграманов, Е.С. Лабинцев, М.И. Ершов, В.Г. Тупоногов
Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина

В данной работе при помощи программных продуктов Ansys Fluent тестировалась многофазная физико-математическая модель Эйлера описания пузырькового кипящего слоя, основанная на уравнении Навье-Стокса и законе трения Гидаспова. Главным образом исследовались следующие параметры: значения объемных долей твердой фазы в определённых зонах от времени, частота извержения пузырей, частота образования пузырей, частота колебаний давления около газораспределительной системы, эквивалентные диаметры пузырей. В ходе решения была воссоздана модель экспериментальной установки Дж. Дэвидсона и К. Бойса [1], были построены графики изменения давления, объемных долей и частот извержения и образования пузырей от высоты слоя засыпки. Результаты расчетов по методу многофазных сплошных сред удовлетворительно совпадают с опытными данными К. Мюллера (2007) [2] и результатами дискретного моделирования (модель Лагранжа) [1], что свидетельствует о применимости использованной физико-математической модели к проблеме описания гидродинамики пузырькового кипящего слоя.

Для описания поведения пузырькового кипящего слоя была создана экспериментальная установка (рис. 1), параметры, которой легли в основу моделирования. Установка представляет собой цилиндр диаметром 0,05м и высотой 0,5м. Цилиндр имеет перфорированное дно с 37 отверстиями по 1мм в диаметре каждое. Верхняя часть цилиндра открыта.

Под днище подавался газ со скоростями в сечении днища 0,425 м/с и 0,563 м/с. В экспериментах [2] и дискретном моделировании [1] плотным слоем

служили несферические семена с эквивалентным диаметром 1,2мм. В моделировании на основе сплошных сред использовались сферические частицы с диаметром 1,2 мм. Плотность частиц принималась 960 кг/м³.

Эксперименты проводились при разных высотах h плотного слоя: 40 мм, 50 мм и 156 мм. Моделирование при помощи сплошных сред позволило изучить поведение кипящего слоя при высотах плотного слоя до 1м.

Используемая математическая модель описана в [3].

Порозность, падение давления, частота образования пузырей, частота извержения пузырей, распределение объемных долей порошка в объеме аппарата являются основными характеристиками, по которым проводилось сравнение моделирования и экспериментов. Колебания порозности и падения давления фиксировались в трех точках. Для опытов с высотой плотного слоя 40мм точка 1 находилась на высоте 6,75 от днища, точка 2 на высоте 20,25 мм и точка 3 на высоте 38,25 мм от днища установки. Для опытов с высотой плотного слоя 50мм точка 1 находилась на высоте 6,75 от днища, точка 2 на высоте 24,75 мм и точка 3 на высоте 51,75 мм от днища установки. Для опытов с высотой плотного слоя 40мм точка 1 находилась на высоте 6,75 от днища, точка 2 на высоте 83,25 мм и точка 3 на высоте 159,75 мм от днища установки.

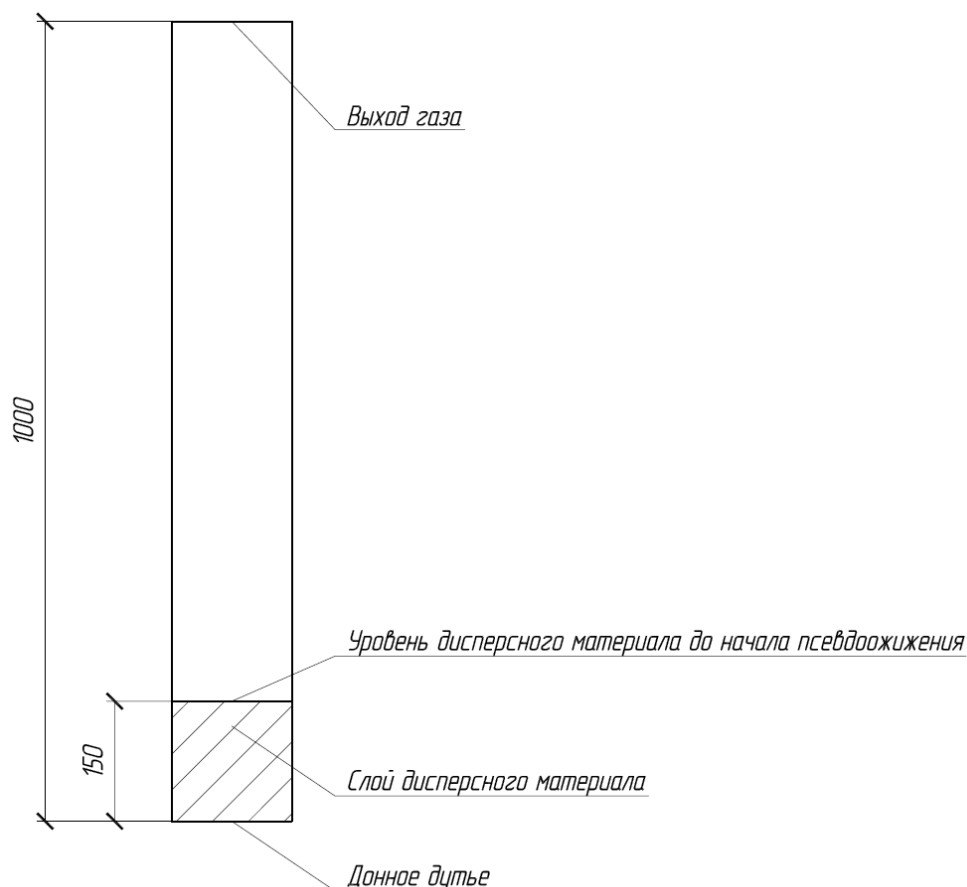


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Объемная доля исследуемой фазы определяется из соотношения

$$vof = \frac{V_k}{V_c}, \quad (1)$$

где V_k – объем исследуемой фазы, V_c – объем клетки сетки, м³.

Порозность рассчитывается на основании (1) по соотношению

$$\varepsilon = 1 - \nu \omega f. \quad (2)$$

Построение и анализ графиков исследуемых величин, показал, что колебания давления P , Па в контрольных точках, полученные по модели Эйлера и Лагранжа совпадают (рис. 2). При этом колебания порозности (2) в этих же точках у данных моделей несколько отличаются по амплитуде и частоте (рис. 3).

Данные колебания, однако, ещё позволяют описать процесс с качественной точки зрения. Из графика видно, что порозность в точке 1 не превышает значения 0,6, тогда, как порозность в точке 2 доходит до максимального значения 0,7, а порозность в точке 3 пробивает отметку 0,8. Амплитуда колебаний порозности в точке 3 превышает амплитуду колебаний порозности в точке 1 более чем в 2 раза. Колебания в точке 1 и точке 3 происходят в противофазе но с примерно одинаковой частотой. В момент зарождения пузыря в точке 3 слой уплотняется, по мере движения пузыря через слой растет порозность в точке 3, и возрастает объемная доля сыпучего материала в точке 1.

Весьма хорошее сходство моделей дают графики частоты извержения и образования пузырей от высоты слоя засыпки. Так из рис. 4 следует, что при высоте слоя до 150 мм имеется практически полное равенство частот извержения f , s^{-1} между моделями Эйлера, Лагранжа и опытными данными. Однако после данного рубежа обе модели дают некоторое отклонение от эксперимента с сохранением общего тренда.

На графиках приведенных ниже черными треугольниками, ромбами и квадратами обозначены значения, полученные в результате моделирования на основе сплошных сред. Сплошными и пунктирными линиями показаны оцифрованные графики полученные путем дискретного моделирования [1].

Поскольку рассматривается установившийся режим псевдооживления, то на графиках момент $t = 0$ мс не соответствует началу процесса псевдооживления.

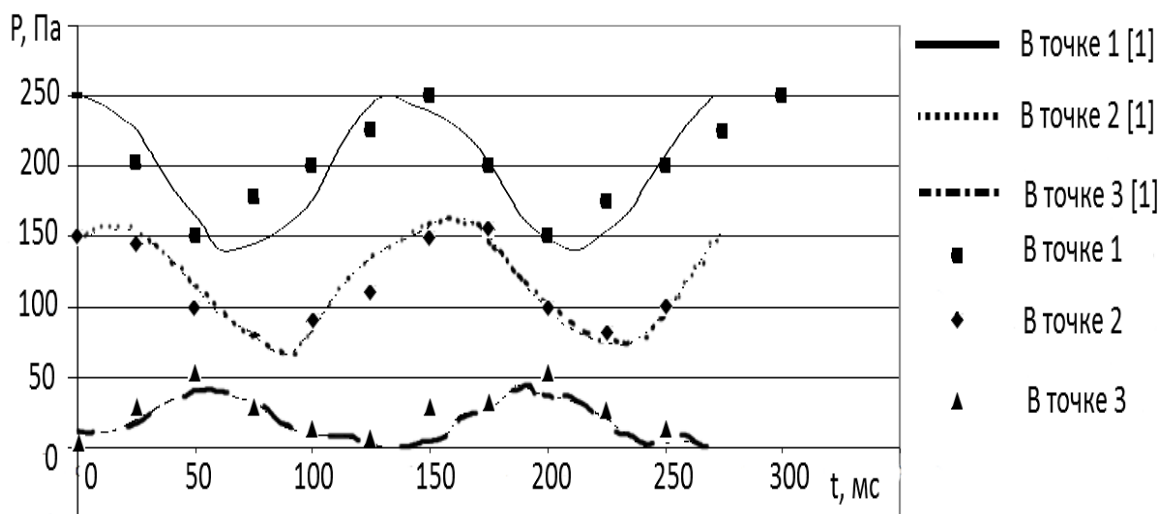


Рис. 2. Изменение давления от времени в точках 1, 2, 3 при высоте слоя 40мм

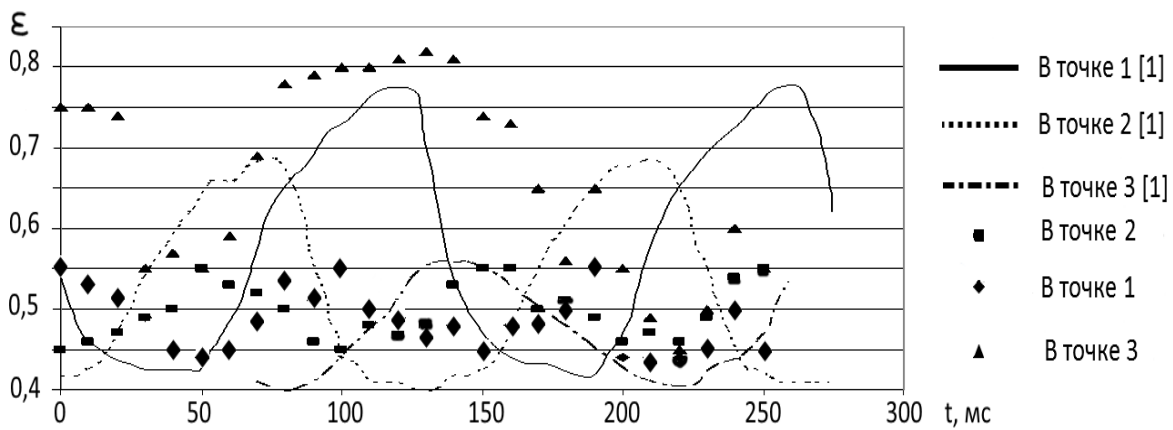


Рис. 3. Изменение порозности от времени в точках 1, 2, 3 при высоте слоя 40мм

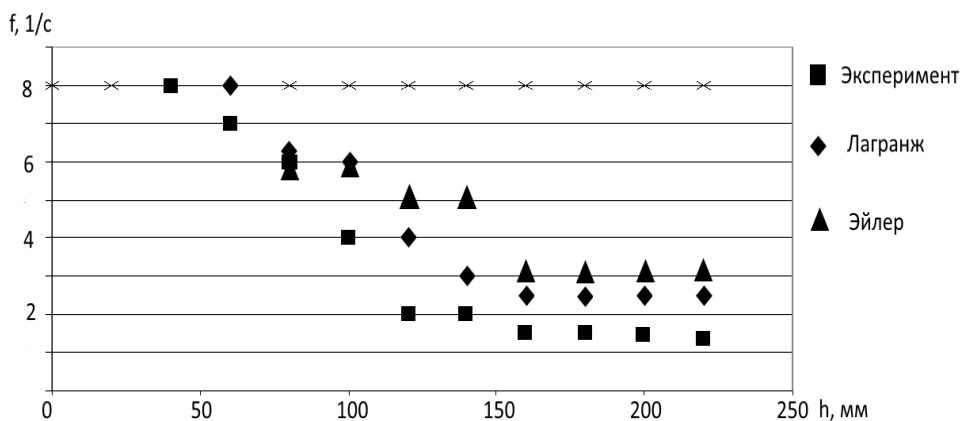


Рис. 4. Частота извержения пузырей от высоты слоя для скорости потока газа 0,563 м/с

Таким образом, метод многофазного моделирования сплошных сред может весьма успешно применяться в задаче моделирования пузырькового кипящего слоя. Данный метод, очевидно, требует значительно меньшей вычислительной мощности, чем дискретное моделирование, а любые его несоответствия с последним могут быть устранены с помощью программирования и введения в модель эмпирических зависимостей, что требует дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. C.M. Boyce a,n, J.F.Davidson a, D.J.Holland a, S.A.Scott b, J.S.Dennis. The origin of pressure oscillations in slugging fluidized beds: Comparison of experimental results from magnetic resonance imaging with a discrete element model. *Chemical Engineering Science* 116 (2014) 611–622.
2. C.R. Müller, J.F. Davidson, J.S. Dennis, P.S. Fennell, L.F. Gladden, A.N. Hayhurst, M.D. Mantle, A.C. Rees, A.J. Sederman, 2007. Oscillations in gas-fluidized beds: ultra-fast magnetic resonance imaging and pressure sensor measurements. *Powder Technol.* 177, 87–98
3. C.R. Müller, S.A. Scott, D.J. Holland, D.C. Clarke, A.J. Sederman, J.S. Dennis, L.F. Gladden, 2009. Validation of a discrete element model using magnetic resonance measurements. *Particuology* 7, 297–306

4. A.P. Baskakov, V.G. Tuponogov, N.F. Filippovsky, 1986. A study of pressure fluctuations in a bubbling fluidized bed. Powder Technol. 45, 113–117.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЩЕННОГО ПРОЦЕССА СОВМЕСТНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БУРОГО УГЛЯ И ПЛАСТИКА

И.Г. Донской

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск

Введение

Переработка некондиционных топлив, таких как отходы лесной и сельскохозяйственной промышленности или бытовые отходы, часто затруднено из-за их низкой теплотворной способности, или из-за образования вредных веществ [1]. Поэтому представляет интерес совместная переработка таких низкокачественных топлив вместе с качественными (уголь, газ) [2].

Вместе с тем, при совместной переработке могут появляться качественно новые эффекты, связанные с взаимодействием разных топлив. Одним из примеров в данном случае может быть плавление полимеров, которые составляют значительную часть твердых бытовых отходов. Известно, что при их термическом разложении образующиеся жидкие продукты способствуют агломерации частиц топлива [3].

В настоящей работе с помощью математического моделирования исследуется процесс совместной газификации бурого угля и пластика в обращенном газогенераторе. Забивание и частичное спекание слоя моделируется изменением локальной порозности при росте концентрации смолистых продуктов.

Исходные данные для расчетов

В работе используется математическая модель слоевого процесса газификации, которая применялась в работах [4, 5].

Удельный расход топлива на сечение слоя составляет $200 \text{ кг/м}^2/\text{ч}$. Длина реакционной зоны составляет 25 см. Расход дутья варьируется от 0.2 до 0.7 от теоретически необходимого для полного сжигания. Содержание пластика в топливе меняется от 0 до 50%. Средний размер частиц слоя составляет 1 см. Топливо, которое используется в расчетах: азейский бурый уголь и полиэтилен (состав и свойства представлены в табл. 1). В процессе пиролиза топлив образуются смолистые продукты, которые для упрощения приведены к одному составу ($\text{CН}_{0.6}$). Массовая доля смолы в продуктах пиролиза приближенно считается постоянной (см. табл. 1). Локальная порозность слоя равна 0.4, однако при высокой концентрации смолистых продуктов (от 5% мол.) уменьшается в 2 раза (изменение происходит ступенчато). Порозность влияет на время пребывания газа в слое и перепад давления по высоте слоя, для оценки этого влияния используется уравнение Эргана для стационарных зернистых слоев [6].

При расчетах учитывается кинетика гетерогенных реакций, которые представлены в табл. 2 вместе с кинетическими параметрами. Реакция термиче-

ского разложения смолы имеет одинаковые кинетические параметры для продуктов пиролиза обоих топлив.

Табл. 1. Состав угля и пластика

Характеристики топлива	Азейский уголь	Пластик
A^d , %	17	13.3
W^r , %	10	1
V^{daf} , %	44	90
C^{daf} , %	76.3	79.8
H^{daf} , %	5.4	15.5
O^{daf} , %	17.3	1.4
N^{daf} , %	1.5	2.3
S^{daf} , %	0.5	0
Доля смолы в продуктах пиролиза	0.2	0.9

Табл. 2. Кинетические характеристики угля и пластика

Реакция	Азейский уголь [7]		Пластик	
	k_0	E_a , кДж/моль	k_0	E_a , кДж/моль
Пиролиз	$3.38 \cdot 10^5$, 1/с	113.3	$1.7 \cdot 10^{14}$, 1/с	220
$C + O_2$	$4.88 \cdot 10^6$, м/с	177	$1.7 \cdot 10^4$, м/с	142
$C + CO_2$	$2.48 \cdot 10^{11}$, м/с	265.8	$2.23 \cdot 10^7$, м/с	259
$C + H_2O$	$1.76 \cdot 10^6$, м/с	180	$1.8 \cdot 10^3$, м/с	175
Разложение смолы	$5 \cdot 10^7$, 1/с	150	$5 \cdot 10^7$, 1/с [8]	150 [8]

В качестве основных индикаторов процесса помимо температурного уровня и степени конверсии топлива выделяются также химический КПД (доля теплоты сгорания исходного топлива, перешедшая в теплоту сгорания газа) и массовая доля смолы в продуктах газификации.

Результаты моделирования

Зависимость химического КПД от коэффициента избытка окислителя имеет характерную особенность: наличие экстремума. Химический КПД достигает величины ок. 70% для чистого угля при $\alpha = 0.4$ и падает при увеличении доли пластика в топливе (поскольку пластик интенсивно разлагается даже при отсутствии окислителя). Полное выгорание пластика происходит в области больших температур и избытков окислителя, чем для бурого угля. Это связано с меньшей реакционной способностью твердого остатка полимеров.

Зависимость выхода смолы от состава топлива также имеет понятный ход: он растет с увеличением доли пластика в топливе, однако уменьшается с ростом температуры слоя. Расчеты показывают закономерный рост температуры с увеличением относительно расхода воздуха. Изменение перепада давления имеет более сложный характер. С ростом содержания пластика в топливе проницаемость слоя падает, поскольку при этом образуется больше смолы. Увеличение избытка окислителя (и связанное с ним увеличение средней температуры

в слое) приводит к уменьшению содержания смолистых продуктов, что улучшает проницаемость слоя, однако объем пропускаемого газа при этом также увеличивается. Поэтому в расчетах (рис. 2, 3) наблюдается экстремальная зависимость.

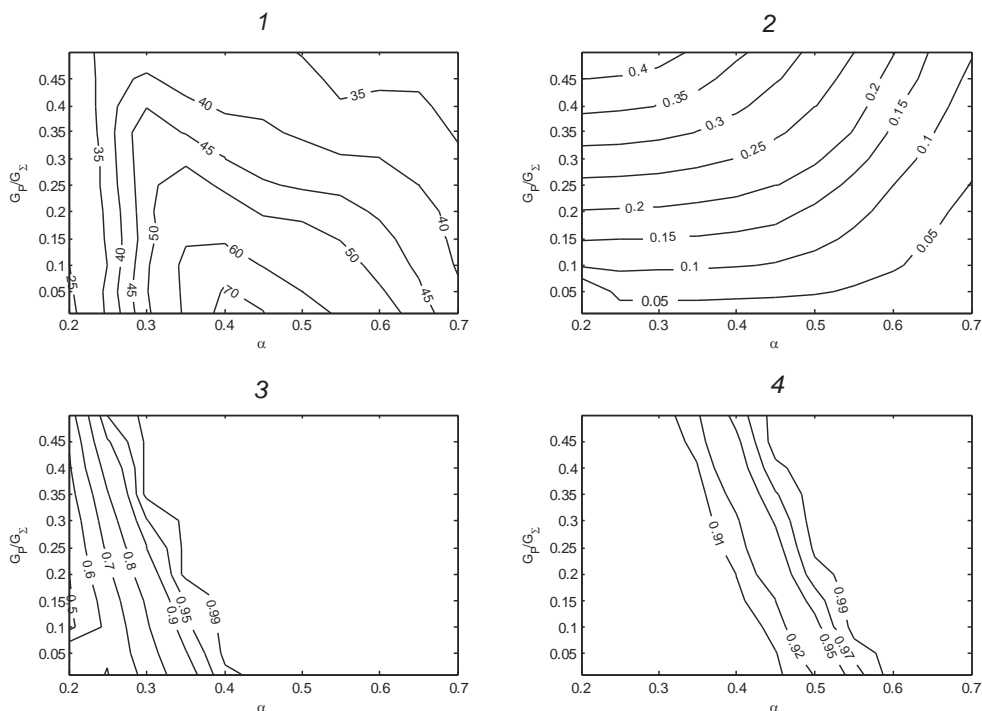


Рис. 1. Расчетные характеристики режимов совместной газификации угля с пластиком: 1 – химический КПД; 2 – выход смолы (на органическую массу топлива); 3 – степень конверсии угля; 4 – степень конверсии пластика.

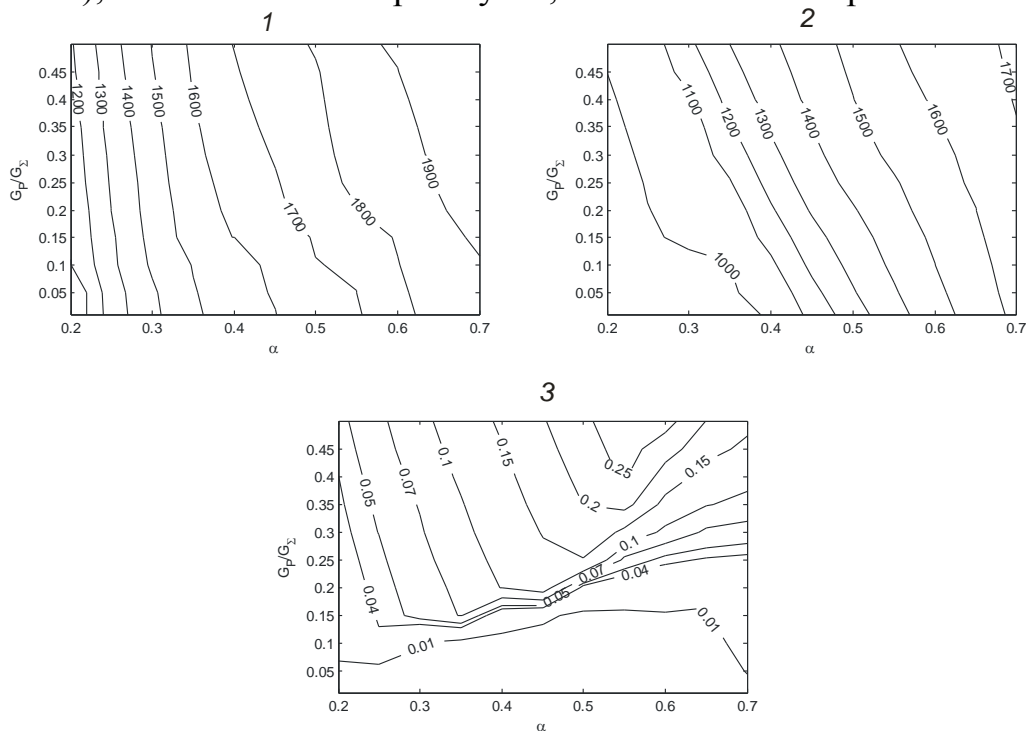


Рис. 2. Расчетные характеристики режимов совместной газификации угля с пластиком: 1 – пиковая температура, К; 2 – температура газа на выходе из слоя, К; 3 – перепад давления по слою, атм.

Таким образом, расчеты позволяют делать предварительную оценку эффективности процесса совместной газификации угля и пластика, и могут быть использованы для выбора перспективных режимов при экспериментальных исследованиях.

Работа выполнена в ИТ СО РАН при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-10025).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review // *Waste Management*. - 2012. - V. 32. - No. 4. - P. 625-639.
2. Straka P., Bickova O. Hydrogen-rich gas as a product of two-stage co-gasification of lignite/waste plastics mixtures // *International Journal of Hydrogen Energy*. - 2014. - V. 39. - No. 21. - P. 10987-10995.
3. Mastellone M.L., Arena U. Bed defluidisation during the fluidised bed pyrolysis of plastic waste mixtures // *Polymer Degradation and Stability*. - 2004. - V. 85. - P. 1051-1058.
4. Calculation of the fixed bed coal gasification regimes by the use of thermodynamic model with macrokinetic constraints / I.G. Donskoi, A.V. Keiko, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev, V.A. Shamanskii // *Thermal Engineering*. - 2013. - V. 60. - No. 12. - P. 904-909.
5. Donskoy I.G. Mathematical modelling of the fixed-bed biomass-coal co-gasification process // *MATEC Web of Conferences*. - 2016. - V. 72. - Paper No. 01026.
6. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. - Л.: Химия, 1979. - 176 с.
7. Thermal analysis in numerical thermodynamic modeling of solid fuel conversion / A. Kozlov, D. Svishchev, I. Donskoy, A.V. Keiko // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. - 2012. - V. 109. - No. 3. - P. 1311-1317.
8. Kinetic study on the thermal degradation of polypropylene and polyethylene / H. Bockhorn, A. Hornung, U. Hornung, D. Schawaller // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. - 1999. - V. 48. - No. 2. - P. 93-109.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ КАЛИНЫ

Л.А. Савина

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5БМ5А

С каждым годом потребление энергии в мире растёт, при этом её немалую часть составляет тепловая энергия. К сожалению, зачастую значительная

часть тепловой энергии просто рассеивается в окружающей среде, по причине её неэффективного использования. В последние десятилетия большие усилия прилагаются для того, чтобы каким-то образом увеличить технико-экономические показатели работы станции.

В связи с ростом цен на энергоресурсы и стремлением к повышению эффективности их использования чрезвычайно актуальными становятся вопросы выбора рабочего тела. Показатели экономичности и эффективность работы станции, а также экологическая безопасность напрямую зависят от качества термодинамических свойств рабочих тел.

В начале 80-х годов из Советского Союза в Соединенные Штаты эмигрировал выпускник Института холодильной промышленности в Одессе А.И. Калина, не имевший в СССР широкой известности, тем не менее – кандидат наук, член Ученого Совета министерства и советник Госплана СССР. Работая еще в Советском Союзе А.И. Калина обнаружил, что растворение аммиака в воде сопровождается уменьшением теплоемкости раствора вдвое. Он предложил и просчитал новый термодинамический цикл для паротурбинных установок, основанный на использовании нового рабочего тела (раствора аммиака), который он назвал "циклом Калины" [2].

Использование водоаммиачной смеси в энергоустановке как рабочего тела имеет ряд преимуществ. Главным преимуществом такой энергоустановки является возможность ее эффективного использования в большом интервале температур. Оба вещества недороги и экстенсивно используются в промышленности. У аммиака и воды приблизительно равные молекулярные массы; следовательно, паровая турбина может использоваться в цикле аммиачной воды с незначительными изменениями. Путем изменения концентрации компонентов смесового рабочего тела можно обеспечить хорошие показатели энергоустановки без изменения ее конструкции во всем интервале температур греющего источника. Основная особенность компонентов смеси - разные критические температуры, а именно - равновесное состояние между газообразной и жидкой фазами у каждого из них наступает при совокупности различных параметров.

В таблице 1 приведены некоторые сравнительные свойства воды и аммиака [1].

Табл. 1. Сравнение свойств воды и аммиака

Параметр	Аммиак (NH ₃)	Вода (H ₂ O)
Молекулярная масса (кг/кмоль)	17,0	18,0
Температура кипения в 1,013 бар (К)	239,8	373,2
Температура замерзания 1,013 бар (К)	195,4	273,2
Критическая температура (К)	405,5	647,3
Критическое давление (бар)	113,5	221,2

Сравним TS-диаграммы цикла Калины и цикла Ренкина (рисунок 1).

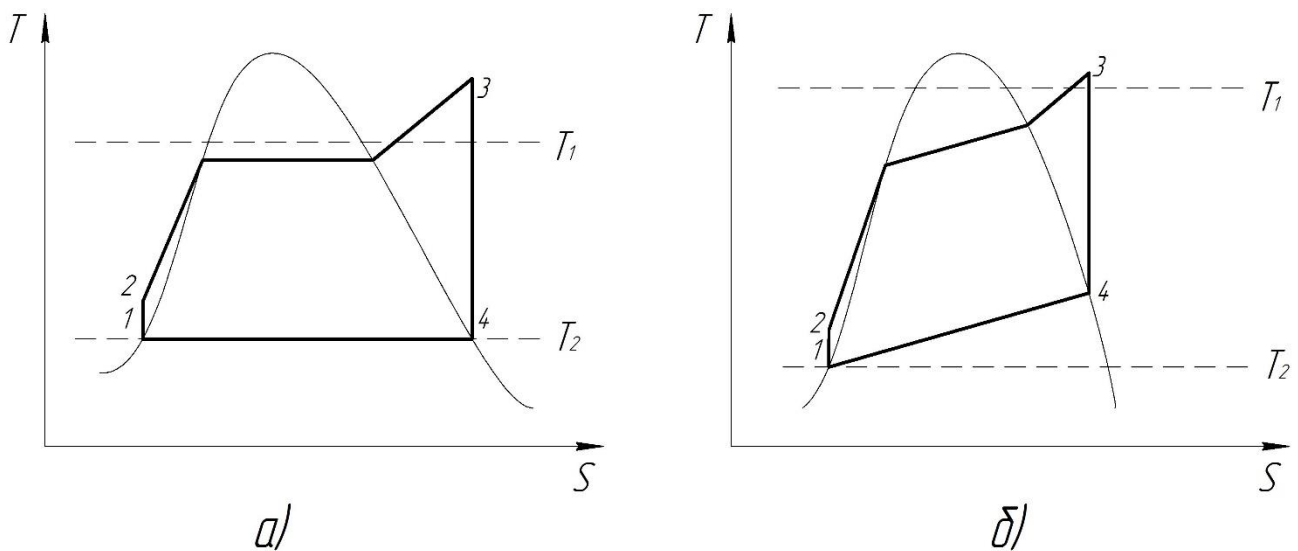


Рис. 1. а) TS-диаграмма цикла Ренкина; б) TS-диаграмма цикла Калины
 КПД любого цикла зависит от разности температур между нагревателем и
 холодильником

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Таким образом, из диаграмм видно, что средняя температура подвода теплоты в цикле Калины получается выше, чем у цикла Ренкина, следовательно, КПД цикла Калины имеет более высокое значение в том же интервале температур.

В настоящее время цикл Калины широко известен среди специалистов. Новый процесс имеет на 10 процентов больший коэффициент полезного действия, а значит, экономит 20 процентов топлива, и сопровождается на 30 процентов меньшими количествами выбросов (а это тоже очень важно, ибо тепловые электростанции и энергетические установки служат основными источниками загрязнения окружающей среды). Таким образом «цикл Калины» значительно эффективнее других бинарных схем.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Guideline on the IAPWS Formulation 2001 for the Thermodynamic Properties of Ammonia-Water Mixtures, The International Association for the Properties of Water and Steam Gaithersburg, Maryland, USA, September 2001.
2. Фазовые переходы, вода Краснова, цикл Калины. Общество и наука. Валерий Тырнова – блог физика и журналиста – 31 января 2011.
3. R. Tillner-Roth and D.G. Friend, A Helmholtz Free Energy Formulation of the Thermodynamic Properties of the Mixture {Water + Ammonia}, J. Phys. Chem. Ref. Data 27, 63 (1998).

Научный руководитель: А.С. Матвеев, к.т.н., зав. кафедрой АТЭС ЭНИН ТПУ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АРОМАТИЗАЦИЕЙ

М.О. Литвиненко, Т.А. Шульга, В.В. Курбацкий
Белорусский государственный технологический университет

Основным аппаратом, который определяет энергетические и качественные показатели процесса при производстве каталитической ароматизации, является реактор. Химический реактор – это аппарат, в котором осуществляются взаимосвязанные процессы химического превращения, массопередачи и теплообмена. Отличительной особенностью каталитической ароматизации является распределенность и много стадийность химических и тепловых процессов.

С точки зрения управления химические реакторы представляют собой многосвязные нестационарные объекты. Динамические свойства химических реакторов зависят от кинетики конкретных реакций, закона изменения во времени параметров окружающей среды и формы реактора.

Скорости реакций могут изменяться в широком интервале: от очень малых до очень больших значений, поскольку сырье представляет смесь углеводородов, которая состоит из различных молекул. Сравнивая скорость реакции и среднее время пребывания молекулы в реакторе, определяют, чем в основном определяется динамика реактора: собственно химическим процессом или процессом перемещения материалов.

Системы управления технологическими объектами относятся к сложным системам и могут классифицироваться по различным признакам. Основными из них являются цель и способ управления технологическим объектом, степень участия человека в управлении, место расположения технических средств сбора и обработки информации и степень централизации управления.

Цель управления при ведении технологических процессов – высокоэффективная работа непосредственно объекта управления. Эффективность работы оценивается значением критерия управления – показателем, характеризующим функционирование объекта управления в целом и принимающим числовые значения в зависимости от возмущающих и управляющих воздействий.

В качестве критерия управления принимают выходные параметры процесса, характеризующие целевой продукт. Чем сложнее и крупнее технологический объект, тем более экономический характер принимает данный критерий.

По цели управления системы управления делятся на стабилизирующие и оптимизирующие. Стабилизирующей системы является поддержание критерия управления на постоянном, заранее определенном значении. Стабилизирующие системы оправданы для простых вспомогательных процессов, критерии управления которых следует поддерживать на значении, определяемом из соображения эффективного ведения основного процесса.

Оптимизирующие системы управления поддерживают критерий управления не на заранее заданном значении, а на экстремальном для создавшейся производственной ситуации при соблюдении ограничивающих условий. По-

следние обусловлены тем, что критерий характеризует процесс только с одной, но более важной стороны. При оценке полной эффективности процесса необходимо иметь в виду и другие параметры целевого продукта. Ограничивающие условия накладываются также на те параметры, изменения которых ограничены технологическим режимом.

Математическая модель системы или процесса отражает в той или иной мере свойства реальной системы, в том числе ограничения, существующие в реальных условиях. Математическая модель составляется (разрабатывается) в математических терминах (на математическом языке) и имеет, как правило, количественное описание.

Каждая исследуемая система имеет m входных величин и n выходных величин. Между входными и выходными величинами существуют внутренние динамические связи, вид которых определяется соответствующими динамическими характеристиками.

Рассмотрим аппарат объемом V , м^3 , в который подается газ под давлением P_H , $\text{кг}/\text{м}^3$ (Па), количестве $F_{\text{пр}}^M$, $\text{кг}/\text{с}$, а с аппарата газ под давлением P , $\text{кг}/\text{м}^3$ (Па), в количестве F_p^M , $\text{кг}/\text{с}$ направленный к потребителям. На линиях входа и выхода газа установлены вентили, площадь поперечного сечения которых равны $A_{\text{пр}}$ и A_p , м^2 . Давление газа в выходной линии после вентиля равно нулю. При $F_{\text{пр}}^M = F_p^M$ давление газа P в аппарате неизменно, а при $F_{\text{пр}}^M \neq F_p^M$ — увеличивается или уменьшается.

Выходной величиной аппарата является изменение давления газа P , а входными переменными — изменение площадей проходных сечений вентилях $A_{\text{пр}}$ и A_p , и изменение давления P_H , которое подается.

Составим уравнение материального баланса газа, который проходит через аппарата за время dt :

$$F_{\text{пр}}^M \cdot dt = V \cdot d\rho + F_p^M \cdot dt \quad (1)$$

Таким образом, количество газа, которое проступает за время dt , равно количеству газа, накоплено в аппарате по причине изменения плотности газа на $d\rho$, $\text{кг}/\text{м}^3$, и количеству газа, которое вышло из аппарата за то же время.

Поделим уравнение (1) на dt и получим, что

$$d\rho = \frac{1}{R \cdot T_r} \cdot dP, \quad (2)$$

где R — газовая постоянная, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$;

T_r — абсолютная температура газа в резервуаре, К.

Получим:

$$\frac{V}{R \cdot T_r} \cdot \frac{dP}{dt} = F_{\text{пр}}^M - F_p^M \quad (3)$$

Таким образом, неравенство между проходом газа в резервуар и его расходом приводит к изменению давления в резервуаре.

Рассмотрим случай сверхкритического расхода газа в дросселирующих органах. Допустимо, состояние газа изотермическое, а его окончание является адиабатическим. Тогда имеем:

$$\begin{cases} F_{np}^M = \frac{\alpha_{np} \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_{np} \cdot P_H, \\ F_p^M = \frac{\alpha_p \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_p \cdot P_H, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$C = \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{1}{K-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot K}{K+1}}$$

K – показатель адиабаты газа;

α – коэффициент расхода газа через дросселирующий орган.

Подставив выражения для F_{np}^M и F_p^M в уравнение (4) в формулу (3) получим:

$$\frac{V}{R \cdot T_\Gamma} \cdot \frac{dP}{dt} = \frac{\alpha_{np} \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_{np} \cdot P_H - \frac{\alpha_p \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_p \cdot P_H \quad (5)$$

Заменяя все переменные величины в уравнении (5) их конечными приращениями, отнесенными к базисным значениям, которые обозначаются как P_0 , P_{H0} , A_{np0} , A_{p0} , и приняв во внимание, что приращение функции двух аргументов $f(x, y)$ определяется равенством:

$$\Delta f(x, y) = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{V \cdot P_0}{R \cdot T_\Gamma} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) + \frac{\alpha_{np} \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_{np} \cdot P_0 \cdot \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) = \frac{\alpha_p \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_p \cdot P_{H0} \cdot \left(\frac{\Delta P_H}{P_{H0}} \right) + \\ + \frac{\alpha_{np} \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_{np} \cdot P_{H0} \cdot \left(\frac{\Delta A_{np}}{A_{np0}} \right) - \frac{\alpha_p \cdot C}{\sqrt{R \cdot T_\Gamma}} \cdot A_p \cdot P_{H0} \cdot \left(\frac{\Delta A_p}{A_{p0}} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая равенства (4) и уравнение материального баланса объекта для статического положения, поделим все составляющие уравнения (7) на постоянный коэффициент при отношении $\Delta P / P_0$. Таким образом, получим:

$$\frac{V \cdot P_0}{F_0^M R \cdot T_\Gamma} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) + \left(\frac{\Delta P}{P_0} \right) = \left(\frac{\Delta P_H}{P_{H0}} \right) + \left(\frac{\Delta A_{np}}{A_{np0}} \right) - \left(\frac{\Delta A_p}{A_{p0}} \right). \quad (9)$$

После преобразования уравнения позволяют получить передаточные функции для настройки каскадной системы регулирования.

Каскадное САУ поддержания давления представлена на рис. 1, а результат ее настройки на рис. 2:

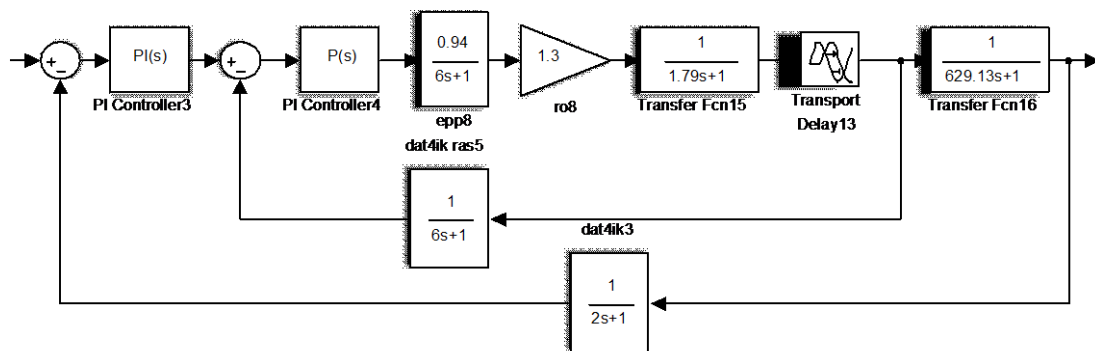


Рис. 1. Структура каскадного контура

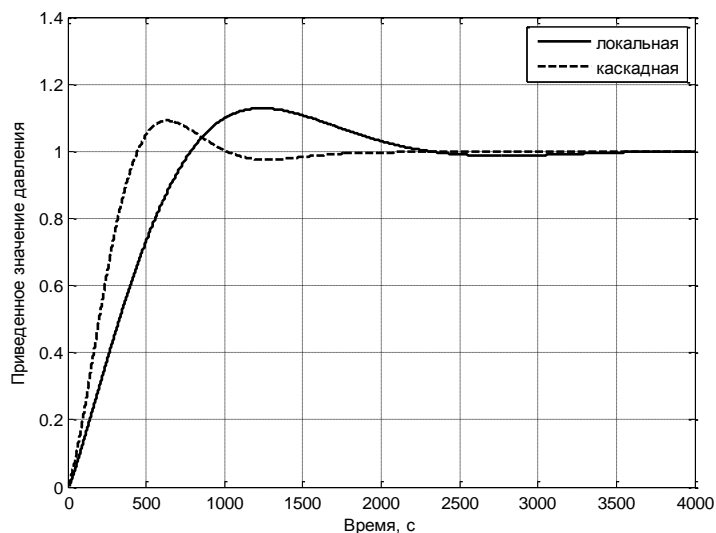


Рис. 2. Переходной процесс локального и каскадного контуров

Как видно из рисунка, каскадная САУ обеспечивает более качественный переходный процесс.

Время переходного процесса: локальная 1865 сек; каскадная 834 сек;

Перерегулирование: локальная 12,8 %; каскадная 9,15 %.

Данную каскадную систему можно усложнить добавив комплекс параметров, которые определяются на существующем производстве для обеспечения стабильности параметров на конечной стадии реактора.

Научный руководитель: Д.А. Гринюк, к.т.н., доц., кафедра АППиЭ, БГТУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРЕСНОВОДНОГО ЛЬДА

М.Ю. Орлов, Ю.Н. Орлова, Г.Н. Богомолов
Томский государственный университет

В настоящее время изучение поведения многих природных материалов являются актуальной и сложнейшей научной задачей. Интереснейшим объектом исследования в последнее время является лед. Практическая значимость объясняется необходимостью развития транспортных связей в северных регионах нашей страны, увеличением добычи природных ископаемых в Заполярье,

борьбой с ледовыми заторами на сибирских реках, отработкой ракетного вооружения в ледяных пустынях Арктики и в районах Антарктики и др.

Основная сложность «ледовых» исследований определена в прошлом веке Мальгредом, Канном, Маэно, Богородским и др. и заключается в том, что такой древнейший природный материал как лед (сегодня известно более 15 его разновидностей) мало изучен в условиях динамического нагружения. Это объясняется сложной внутренней структурой, особенностями кристаллической решетки, аномальными пластическими свойствами, многократными фазовыми переходами в процессе деформирования и т.д. С точки зрения разрушения, лед, вообще может не иметь аналогов. Проблемы прочности и разрушения таких тел только начинают разрабатываться, поэтому картина разрушения льда при динамических нагрузках остается мало изученной.

В данном аспекте математическое моделирование выступает удобным теоретическим инструментом, позволяющим без больших материальных и временных затрат выявлять основные механизмы и закономерности процессов ударно-взрывного нагружения льда в труднодоступной для натурального и физического экспериментов области начальных условий. Однако, для развития средств математического моделирования необходимы надежные экспериментальные данные о процессах деформирования и разрушения льда и других материалов при динамическом нагружении, т.к. некоторые результаты не согласуются между собой [1].

Следует отметить, что в нашей стране нет единой государственной поддержки «ледовых» исследований, как, например, в США, где совместно с военно-морскими силами возобновлена программа «SCICEX», в рамках которой идет сбор научных данных с помощью новейших надводных и подводных средств. В Великобритании протестирован Зонд «Penetrator», способный внедряться в толстые массивы льда без повреждения высокоточного оборудования, установленного внутри. Очевидно, что разработка опытного образца была бы невозможна без знания прочностных свойств льда [2].

В НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета более 25 лет ведутся ПНИР, объектом исследования которых является лед различных типов, в том числе поликристаллический. Развита физико-математическая модель поведения льда при динамических нагрузках, а также численный метод расчета его ударного и взрывного нагружения, способный на качественно высоком уровне воспроизводить основные особенности и механизмы процессов деформирования и разрушения [3].

На базе лаборатории 21 организована мобильная лаборатория «Исследования поведения природных материалов при взрывном нагружении». Основная цель заключается в экспресс-анализе поведения природных материалов при взрывном нагружении. При проведении натуральных экспериментов объектами исследования выступали заснеженный и бесснежный ледяные покровы, а также природный известняк. В ближайшем будущем запланировано экспериментальное исследование каменного угля и сланцевого известняка. Экспедиции проведены в Сибирском Федеральном Округе на территории Томской и Кемеровской

областей. Постоянными партнерами являются МЧС России по Томской области и ООО «КузбассСпецВзрыв» [4].

На сегодняшний день в арсенале мобильной лаборатории имеется современное измерительное оборудование, в том числе штангенциркуль, линейки и измерительные рулетки от 1 до 50 метров, лазерный цифровой ультразвуковой дальномер, строительные алюминиевые уровни от 50 до 150 см и другие меры длины и принадлежности. Состояние объектов исследования после подрыва заряда ВВ (ледяного покрова, известняка) фиксируется при помощи цифровой фотокамеры с высоким разрешением. Все участники экспедиции снабжены индивидуальными средствами защиты, а их доставка в зимнее время осуществляется посредством снегоходов и других спецсредств. Планируется закупка нового оборудования, в том числе ультразвукового, посредством которого станет возможным измерять начальную пористость образцов льда непосредственно на месте проведения экспериментальных работ. Предпринимается попытка по визуализации процесса подрыва ВВ небольшой массы (до 3 кг в тротиловом эквиваленте).

Были получены диаметры и глубины взрывных майн и кратеров, радиус разлета осколков от эпицентра взрыва, температура окружающего воздуха и объектов исследования, фиксировалось состояние кромки льда. На наш взгляд, этого вполне достаточно для проведения некоторых качественных и количественных тестов.

Анализ научно-технической литературы указывает на то, что в литературе практически отсутствуют результаты по взрывному нагружению льда взрывчатым веществом, расположенным в воде. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование эмульсионного заряда ВВ в полиэтиленовой оболочке в воде. В качестве заряда ВВ использовался Эмуласт АС-30-ФП-90.

Место для проведения экспериментальных работ выбиралось путем тщательного осмотра обширных участков ледяного покрова. В данном случае экспериментальная площадка была расположена вблизи фарватера реки недалеко от коммунального моста. Ледяной покров был ровный. Первичный осмотр показал, что в радиусе 10 метров дефектов льда не обнаружено. При выборе места проведения эксперимента были исключены участки с трещинами, разводьями и промоинами. В указанном радиусе также отсутствовали стационарные полыньи. Глубина реки в данном месте более 7 метров. Температура воды и воздуха в день проведения эксперимента +4 °С. Отметим, что в течение нескольких дней предшествующих эксперименту аномально теплой погоды не зафиксировано. Скорость ветра и течения воды не измерялись. Объект исследования – речной лед сэндвич структуры «Снег – Шуга – Лед». Толщина льда была 50 см, снежного покрова ~70 см.

В процессе подготовки к эксперименту пробурена лунка диаметром 14 см (рисунок 1а). Эмульсионное взрывчатое вещество массой 8 кг (тротиловый эквивалент 6 кг) помещалось непосредственно под лед. Подрыв осуществлялся одновременно в 10 лунках. Первые фотографии сделаны со спасательного катера (данные были получены через 5 минут после подрыва ВВ). Отметим, что в радиусе нескольких метров были замечены крупные фракции льда размерами в

поперечном сечении 65–75 см. На поверхности ледяного покрова возле майны образовалась горка из мокрого снега и льда высотой до 50 см. Трещин, которые распространяются от места закладки ВВ в радиальном направлении, на поверхности не обнаружено. Качественно был оценен радиус выброса осколков льда, который составил более 15 метров. Не исключено, что под действием продуктов детонации небольшие осколки льда могли быть выброшены дальше. Однако их размеры были незначительные (осколки льда в поперечном сечении не более 5-10 см).



Рис. 1. Лунка в ледяном покрове до и после взрыва

Исследовано 6 лунок до и после подрыва ВВ. В первые две лунки помещали по два заряда ВВ, а в остальные четыре – по одному. На рисунке 1а зафиксировано состояние ледяного покрова до подрыва ВВ. Рисунок 1в иллюстрирует состояние ледяного покрова после подрыва ВВ массой 8 кг. В процессе взрывного нагружения во льду сформировалась майна по форме близкая к окружности. Диаметр составил около 3,5 метров.

Работа поддержана РФФИ 16-38-00515.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Combescure A, Chuzel-Marmot Y., Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice // *International Journal of Solids and Structures* 48 (2011) 2779–2790.
2. Инженеры испытали зонд пенетратор для Европы [Электронный ресурс] // *Наука и техника. – Электронные данные*, 2013. – URL: <http://lenta.ru/news/2013/07/15/penetratortest> (дата обрац.: 15.07.2014).
3. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // *Вычислительные технологии. – 2008. – Т.13, №.1. Спец.выпуск. – С. 425-432.*
4. Орлов М.Ю., Богомолов Г.Н., Голубятников В.В., Садохин А.Н. Исследование процессов динамического нагружения природных материалов. Часть 1. Эксперимент и расчет взрывного нагружения известняка // *Сборник материалов Под ред. Б.Э. Керта; Балт. гос. техн. университет. - Спб, 2014. С. 164-165.*

СЕКЦИЯ 2. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В РЕЗЕРВУАРЕ В СРЕДЕ MEHBIOS DEVELOPMENT STUDIO

А.В. Адамчук

Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5ГМ5Б

MexBIOS Development Studio – визуальная среда разработки и моделирования встроенного программного обеспечения систем управления электродвигателями, технологическими комплексами, программируемыми логическими контроллерами.

Для целей моделирования работы программ и изучения среды MexBIOS Development Studio предоставляет пользователю возможности:

- создавать собственные программы управления электродвигателями, технологическими комплексами, ПЛК;
- выполнять моделирование работы программы и электромеханических объектов и систем;
- производить отладку программы, загруженной в микроконтроллер;
- устанавливать библиотеки компонентов для новых микроконтроллеров.

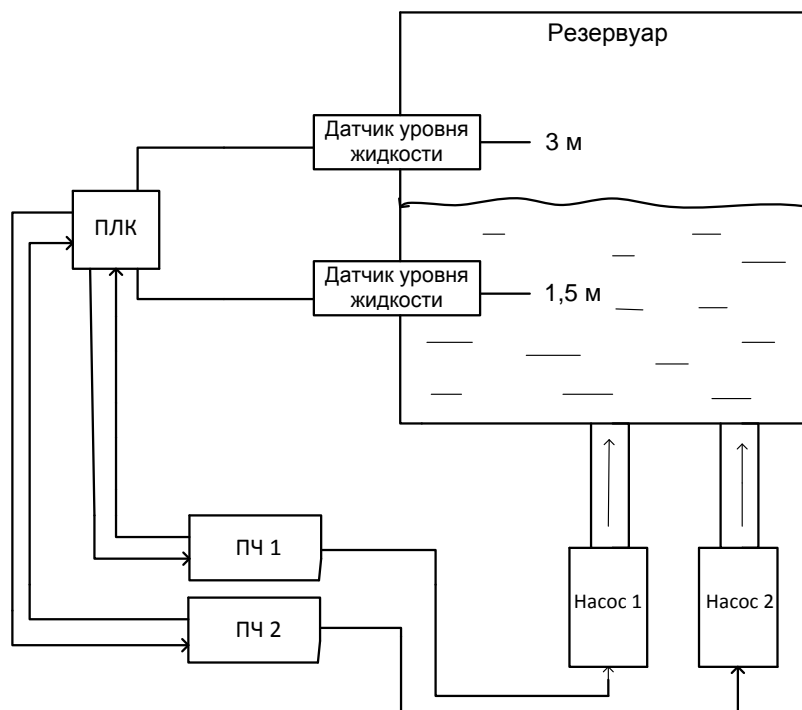


Рис. 1. Технологический процесс поддержания уровня воды в резервуаре

На рисунке 1 изображен резервуар, в который закачивается вода насосом 1. Имеется два дискретных датчика уровня жидкости, верхний на отметке 3

метра и нижний на отметке 1,5 метра. Информация с датчиков поступает в ПЛК, цель которого поддерживать уровень воды между нижним и верхним датчиком. При необходимости включения насоса, команда с микроконтроллера поступает на ПЧ 1, который в свою очередь запускает Насос 1. В случае аварии ПЧ 1 или Насоса 1, ПЛК дает команду ПЧ 2 на включение Насоса 2. При устранении аварии, снова запускается первый ПЧ и первый Насос.

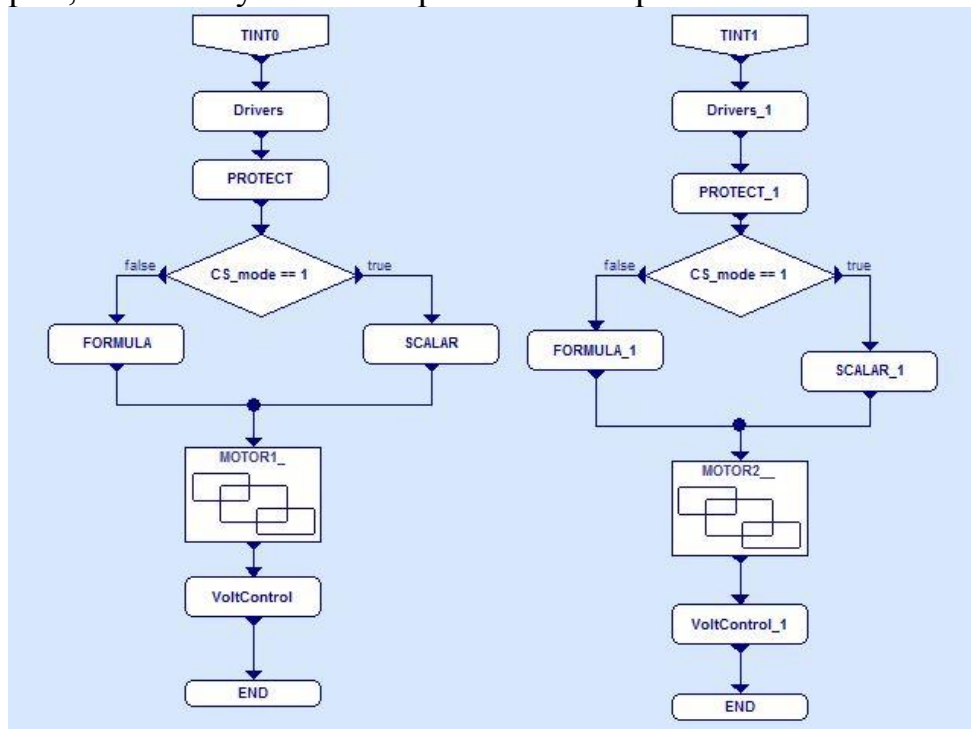


Рис. 2. Алгоритм функционирования системы управления

На рисунке 2 представлены алгоритмы функционирования системы управления в библиотеке TMS320F2833x для первого и второго двигателя. Стартовый блок TINT означает непрерывный режим моделирования с аппаратным прерыванием. Блок Drivers необходим для получения и обработки сигналов с драйверов ПЧ. Ниже изображен блок защиты - Protect. В процессе разработки СУ возможно допустить ошибки, которые приведут к формированию тока, опасного для силового модуля и двигателя, поэтому, прежде чем проверять созданные СУ на ПЧ, в формуле реализован минимальный набор защит. Блок условия CS_Mode определяет режим работы СУ. В нашем случае режимов работы может быть только два: система работает (блок SCALAR, в котором идет формирование сигнала на двигатель) и система не работает (блок FORMULA, в котором реализован нулевой сигнал на останов двигателя). Блок MOTOR1 – машина состояний. В нем реализованы сигналы на запуск и останов двигателя в зависимости от сигналов датчиков уровня жидкости. Последний блок VoltControl необходим для размещения драйвера управления ШИМ и специальных блоков формирования вектора напряжения с помощью ШИМ.

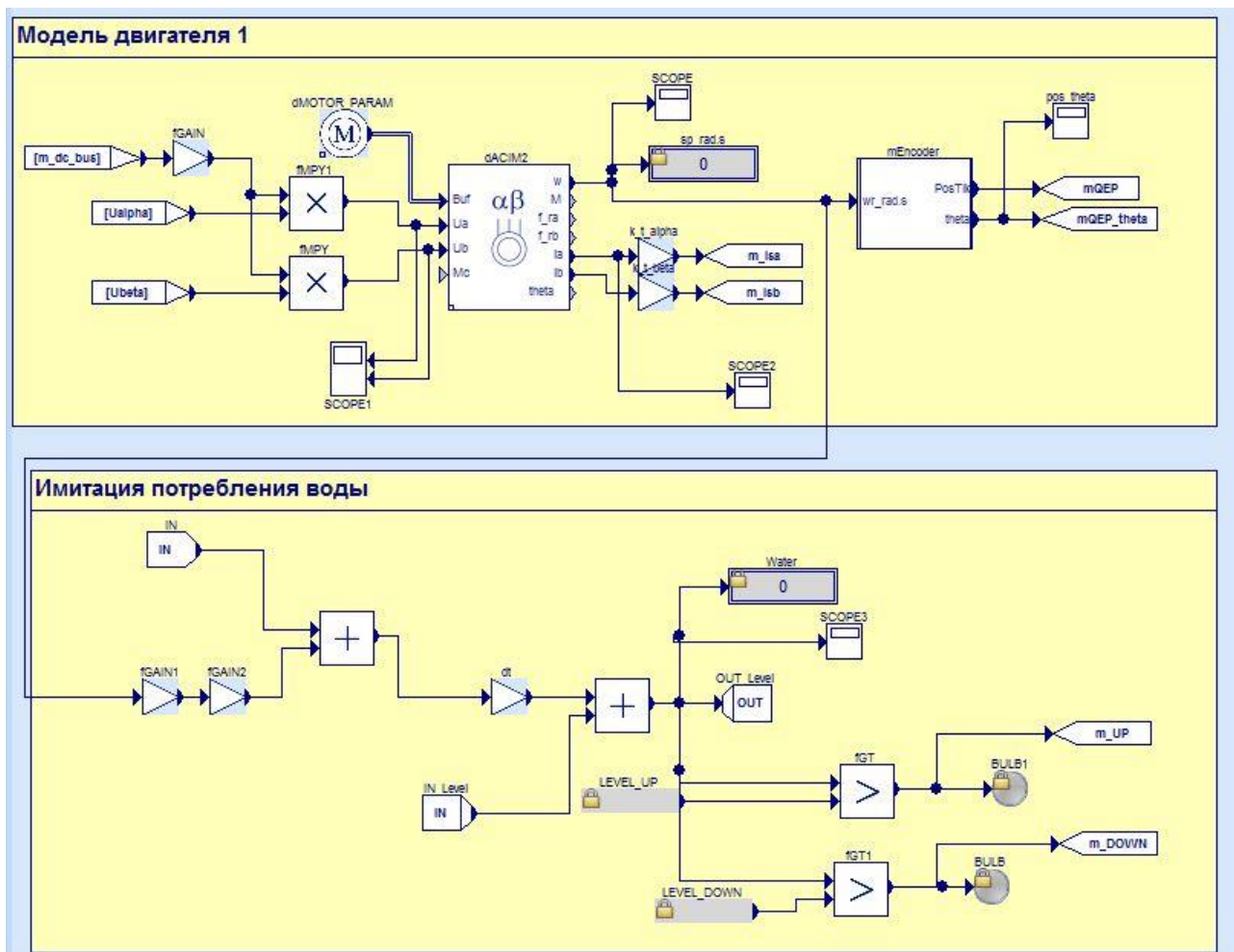


Рис. 3. Модель асинхронного двигателя и имитация потребления воды в Мех- BIOS

Модели основного и резервного двигателя одинаковы, поэтому рассмотрим только одну. На рисунке 3 представлена модель асинхронного двигателя, а также имитация потребления воды. Модель dACIM2 представляет собой двухфазную модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат. Параметры модели задаются с помощью элемента dMOTOR_PARAMS через вход Buf. Модель двигателя выполнена в двухфазной системе координат, а выходы токов получены в трехфазной системе координат, как и на реальном двигателе. Упрощенная модель преобразователя частоты представляет собой величину напряжения на шине постоянного тока Udc, которое с помощью fGAIN преобразуется в амплитудное фазное напряжение и поступает на блоки fMPY. Данная модель имитирует автоматический процесс поддержания уровня воды в резервуаре. Количество воды, перекачиваемое насосом, имитируется блоком fGAIN1, в нем задается коэффициент, этот коэффициент преобразует скорость вращения двигателя в количество воды, перекачиваемое насосом, кубический метр в час. При помощи блока fGAIN2 можно задавать скорость потребления. Потребляемое количество воды отнимается сумматором, и значение задается в блоке IN. В блоках LEVEL_UP и LEVEL_DOWN необходимо задать максимальный и минимальный уровень воды соответственно, на которых будут установлены датчики уровня воды. В данном случае минимальный уровень 1.5 м, а максимальный – 3 м. Блоки fGT и fGT1 сравнивают сигналы действующего

уровня воды и заданного, и при значениях, превышающих заданные, происходит подача сигналов на пуск или останов двигателя.

МехBIOS позволяет создать виртуальный пульт управления, где есть возможность вручную задавать скорость двигателя через частоту или переменный резистор. В режиме реального времени пользователь наблюдает на экране монитора значения напряжения на шине постоянного тока преобразователя частоты и температуры радиатора охлаждения ПЧ. А в случае аварии в системе управления, на экране появляется код ошибки, позволяющий мгновенно определить место аварии.

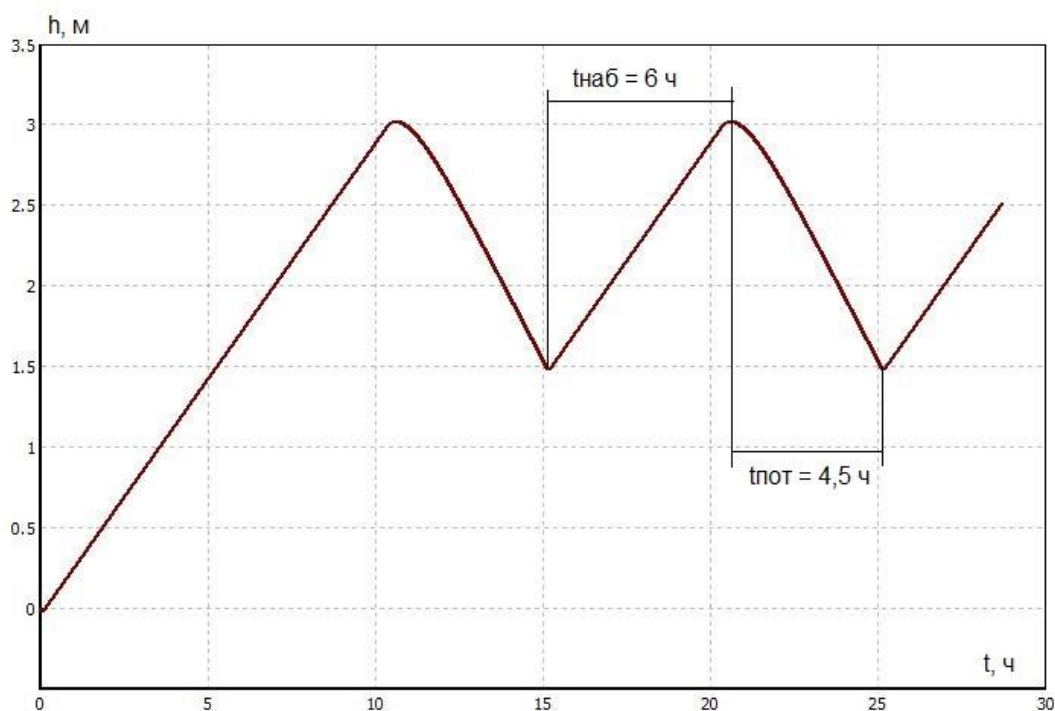


Рис. 4. График зависимости уровня воды в резервуаре от времени

На рисунке 4 изображен график зависимости уровня воды в резервуаре от времени. Время потребления воды от верхней (3 м) до нижней отметки (1,5 м) составляет 4,5 ч. Время набора воды от нижней (1,5 м) до верхней отметки (3 м) при потреблении составляет 6 ч. Отладка системы управления на ПЧ MBS-FC01 производится для проверки драйверов, знаков обратных связей по скорости и току. [1]

ЛИТЕРАТУРА:

1. НПФ «Мехатроника-Про». Создание векторной и скалярной системы управления на преобразователе MBS FC-01. Методическое пособие. МехBIOS™ Development Studio. Томск, 2016. – 79 с.

Научный руководитель: Н.В. Гусев, к.т.н., директор НПФ «Мехатроника-Про».

A TEST SIGNAL GENERATOR OF TELEMETRY AND TELEACTION

R.A. Alehin, S.V. Svechkarev, T.S. Gurin
National Research Tomsk Polytechnic University

Modern power system is one of the most complex engineering systems ever created by man. This is due to a large amount of equipment and automatic devices, continuously operating and impact on each other through the common modes in the power system. The management of such systems requires a fairly complex equipment and software systems that allow to cope with this task. One of these complexes is SCADA-system (Supervisory Control And Data Acquisition), designed for the collection, processing, storing information about mode parameters of grid.

A feature of modern SCADA-systems are working in real-time, large amounts of incoming information, the availability of monitoring the validity of the data, the presence of a sufficiently large volume of automatic software modules intended for operational monitoring and control of power systems, and centralized storage of data [1].

As with all complex technical systems, SCADA-system is constantly being improved, there are new abilities and properties of their operation, which may lead to unpredictable consequences. Therefore, before introducing a new version of the SCADA-system in operation in the energy plants it runs quite a long phase of testing and of working capacity verification. This test is a test connected SCADA-system to real telecommunication data obtained by regular channels, and control of the occurrence of error situations. But this test does not guarantee the absence of errors in all modes of the power system, these regimes simply cannot occur during testing.

Another possible test tool can be any calculation programs that, given the scenarios reproduce the most typical normal and emergency modes in the power system. However, in this case, cannot be played possible emergency situations associated with the loss of data during transmission via communication channels, such invalid data or lack of them for a certain period of time.

In contrast to the existing methods of testing SCADA-systems are encouraged to use a specialized automated system (test signal generator), which takes into account all the properties and features coming to the SCADA information, such as parameters of validity and time stamps, and the possibility of the loss of information or delay in receive it. In modern development environments (for example, Microsoft Visual Studio) is a direct analogy of this method of testing complex programs - Unit test.

The main tasks of the automated testing software module include:

1. Setting teleinformation values for given pre-developed scenarios. This approach allows you to create and complement the different situations in the power regime.
2. The regulation time to send data to the SCADA-system. Guarantee time for sending information allows more accurate determine the properties and temporal region of the reaction SCADA-systems to the received information.

3. Creating abnormal situations when transmitting information such as uncertainty of attributes of transmitted data or delayed transmission, this is also specified in the script.
4. Automatic control of the reaction SCADA-systems to the received information. Predetermined volume of coming into the SCADA-system information and its quality, which is set in the script, can accurately predict the results of the automated software modules SCADA-systems and the demands on their time characteristics. Therefore, differences in the expected data and real data, which are derived from the modules SCADA-system, indicate a presence of errors.
5. Interface of test signal generator is represented in Figure 1.

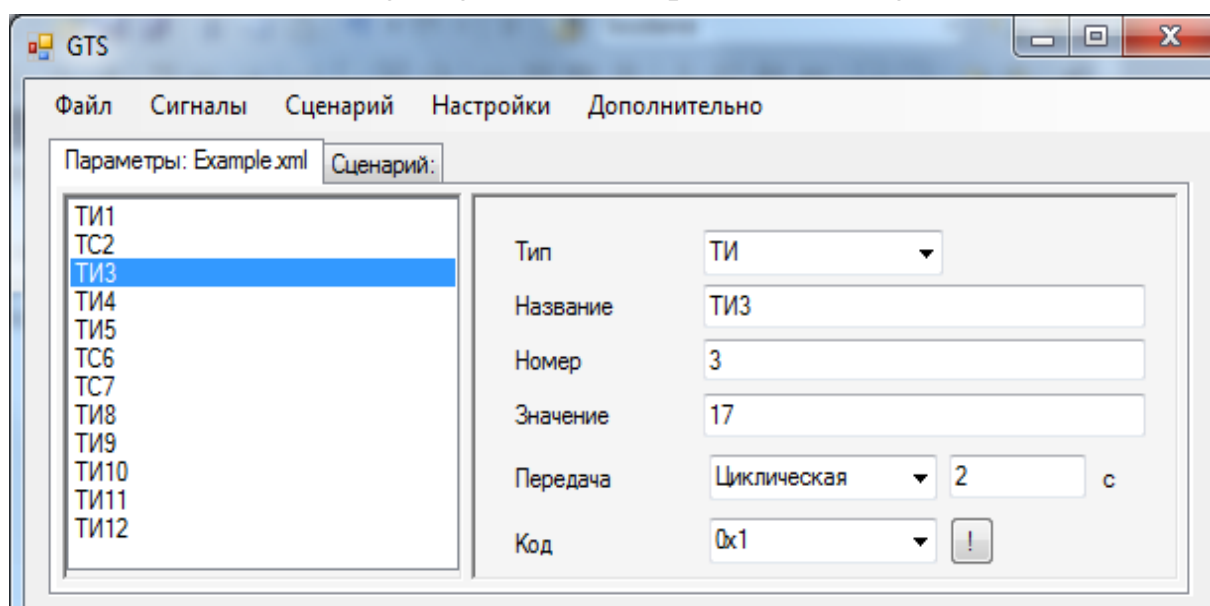


Fig. 1. Interface of test signal generator of telemetry and teleaction
 Test signal generator of telemetry and teleaction has several advantages:

- The program and testing SCADA system can work independently from the actual grid. For the tests do not need to obtain information from the operating power facilities;
- Convenient change of quantity of setting values and their conversion algorithms;
- Provide friendly and intuitive interface to select telecommunication data channels and test algorithms.

All this allows service personnel to reduce the time for testing and increases the efficiency of testing.

The program has two editors, allowing to make and modify information about the various attributes of the test. One of them is the editor of parameters, which specifies the properties of signals such as:

- Type of signal;
- Name;
- Signal number;
- Value;
- Transmission rules: cyclical, on change, according to a schedule;

- Signal sending code: invalidation, manual entry, and others.

These properties allow you to set the initial parameters of the signals required for the test run.

The second editor - the script editor is designed to generate algorithms of changes of signal values over time. It implements four main functions:

- Assigning a value to a variable (for example: $TI1.Value = 5$);
- Mathematical operations: addition, subtraction, multiplication, division. The first two operations are possible both with multiple telemetry ($TI1.Value = TI2.Value + TI3.Value$), and with telemetry and constants ($TI1.Value = TI2.Value + 10$);
- Pause (s.ms). That stops the script to the a specified time;
- Sin (argument), Cos (argument). Returns the value of a sine or cosine of the argument expressed in radians.

The program read and writes parameters of signals and operating scenarios in files with XML format. This format is widely used to create and store files, application settings, and implementation of different databases [2].

Algorithm of work of program is shown in Figure 3.

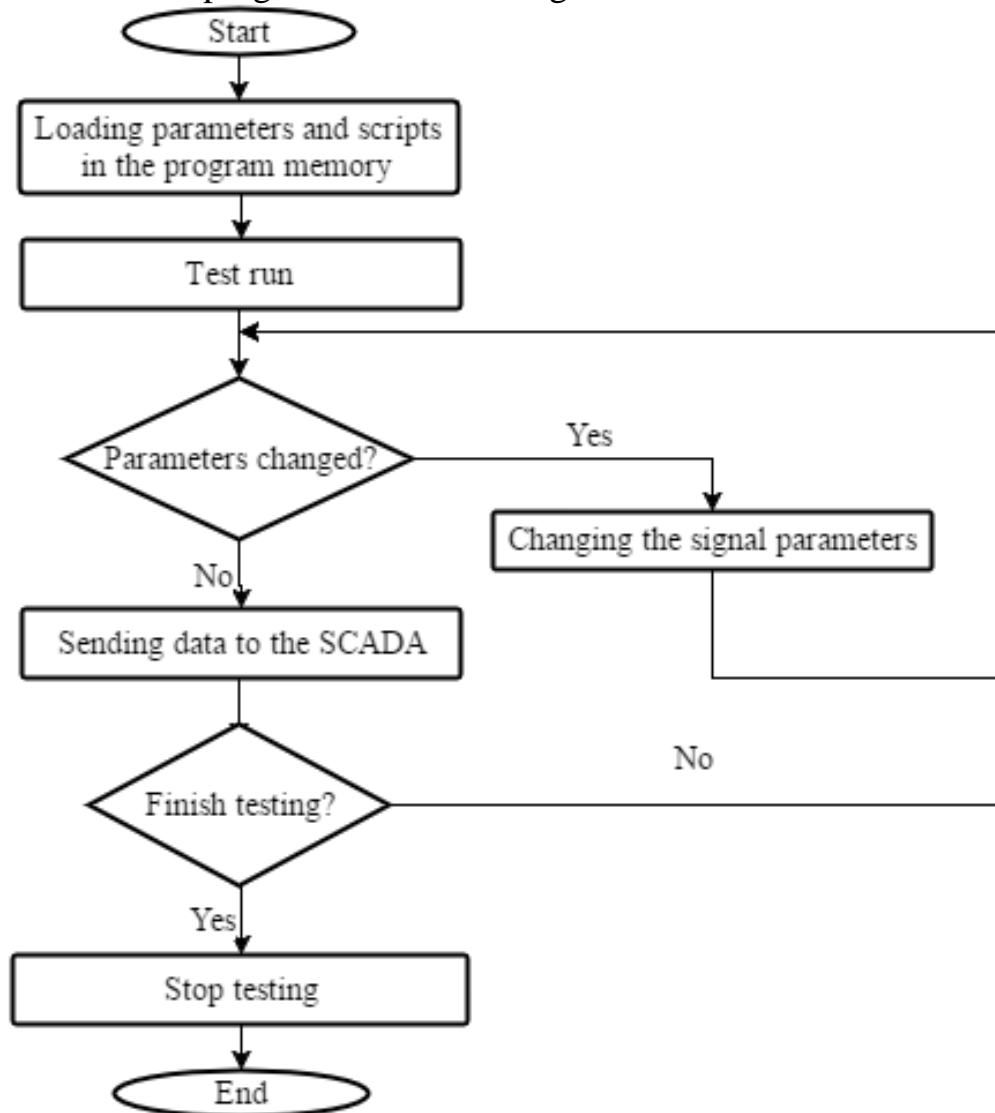


Fig.3. The algorithm of work of test signal generator

When you run the test program with a certain frequency automatically checks the changes in the attributes of the signals produced by the script and sends the data to the SCADA, according to a predetermined transmission rules. If any attribute has been changed, the test signal generator introduces new data in the signal parameters, and sends the updated data. This algorithm of the program is displayed in Figure 3.

For the convenience of the test is possible to run multiple parallel programs with its own set of parameters and scripts of their change. Each window can simulate the behavior of various power facilities.

Program test signal generator can also be used only to send the data to the SCADA-system. Monitoring of occurrence of error situations will be carried by operational staff. But, functions of automatic testing will not be used.

REFERENCES:

1. Gorjunov A.G., Livencov S.N., Chursin Ju.A. Telecontrol and remote control: a course of lectures on the specialty 140306 “Electronics and automation of physical plants” direction 140300 “Nuclear Physics and Technology” – Tomsk: publishing office of Tomsk polytechnic university, 2010. – 161 pp.
2. Garold E., Mins S. XML. Spravochnik. [XML. In a nutshell] –SPb: Simvol-Pljus, 2002. – 576 pp.

Supervisor of studies: S.V. Svechkarev, candidate of engineering sciences, senior lecturer of department of Electric Power Systems, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University.

ПРОЦЕСС ВЫПЛАВКИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОГО ФЕРРОХРОМА С ПРИМЕНЕНИЕМ В ШИХТЕ АГЛОМЕРАТА В УСЛОВИЯХ ЗАВОДА ФЕРРОСПЛАВОВ

А.Т. Халилов

Томский политехнический университет
ЭНИН,ЭПЭО, группа 5АМ65

В последнее время наблюдается тенденция скопления мелкодисперсной фракции руды на металлургическом предприятии, которая не может быть использована непосредственно в производстве. Объем некондиционной руды занимает большие площади предприятия и ухудшает экологическую обстановку. Таким образом, решением утилизации и возврата мелкой фракции является технология окускования, одним из перспективных методов является агломерация. Но для увеличения производительности печи, при этом не увеличивая затраты на электроэнергию, необходимо оптимальное сбалансированное управление технологическим процессом выплавки высокоуглеродистого феррохро-

ма. Достижение этой цели может привести внедрением автоматизированного управления электрическим режимом.

Автоматизированная система управления в цехе №6 Аксуского завода ферросплавов (Республика Казахстан). В плавильном цехе Аксуского завода ферросплавов на печах №№61, 62, 63, 64 на верхнем уровне АСУ ТП была внедрена информационно-измерительная система (ИИС) производства. К функциям ИСС относятся: измерение; архивирование и отображение технологических параметров печи; а так же функции аварийного отключения печи по технологическим защитам, при помощи программируемых логических контроллеров и контрольно-измерительных приборов. В состав ИИС входит автоматизированное рабочее место (АРМ) плавильщика, где отображаются все технологические параметры печи, а так же отображается архив параметров печи за прошедший период. Технологические данные доступны для удаленного просмотра в заводской информационной сети при помощи программы WEB2.0.

Основной задачей, которая ставится перед системой, является – обеспечения эффективного функционирования рудотермических электропечей, для чего необходимо контролировать основные параметры печей цеха №6 и регулирования основных параметров с заданной точностью. Отображение и управление оперативной и архивной информацией в отчетах на мнемосхемах, трендах реального времени и трендах истории, печатных отчетах. Внедренные технические решения обеспечивают надежное функционирование рудотермических электропечей.

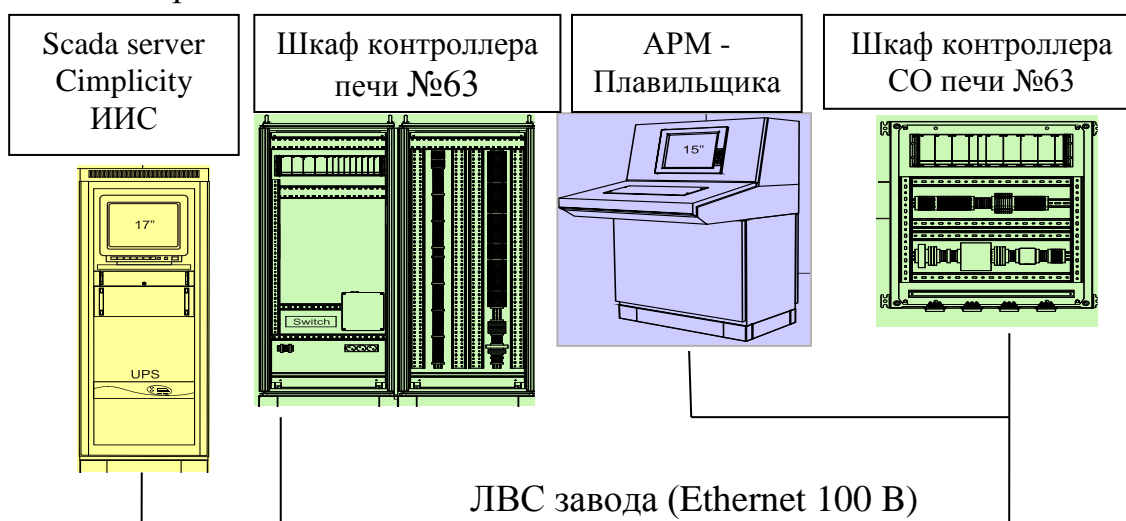


Рис. 1. Структурная схема ИИС печи №63

Автоматизация ферросплавного процесса, в части автоматизации работы печи, включает в себя комплекс программно-технических средств и набор алгоритмов: программируемый логический контроллер (ПЛК), датчики и преобразователи сигналов, коммутационные и релейные элементы внешних электрических схем контроля и управления технологическим оборудованием, устройства связи с объектом; алгоритм управления электрическим режимом («АУЭР»), алгоритм управления режимом перепуска и обдува электродов («АУПОЭ»).

Общие сведения об объекте автоматизации. Технологический объект управления – закрытая электропечь №63 оборудованная тремя однофазными трансформаторами. Трансформаторы оснащены переключателями ступеней

напряжения. Схема включения обмоток трансформаторов – «треугольник-треугольник».

Процесс плавки в электропечи происходит, в основном, у электродов. Под каждым электродом образуется тигель, где протекают реакции восстановления ведущего элемента (марганца, кремния и др.). Свод и стенки тигля непрерывно оплавляются и замещаются новыми порциями шихты. Шихта в тигель печи поступает из печных бункеров самотеком по трубоотечкам, которые выведены на колошник печи под каждый электрод. Электроэнергия, необходимая для поддержания в тигле требуемой мощности, подводится от трансформаторов (соответственно фазы *A*, *B* и *C*) через короткую сеть, токоподводящие щетки (с системой гидроприжима) и три самоспекающихся электрода. Электроды расположены по вершинам равностороннего треугольника. Кожуха электродов заполняются электродной массой и коксовой мелочью.

Для поддержания температуры электродной массы в кожухах электродов установлены шиберы, которые позволяют изменять расход воздуха, поступающего на обдув электрода. При протекании технологического процесса происходит непрерывный угар электродов, которые по мере расходования периодически перепускаются. Для этой цели печь оснащена пружинно-гидравлическим механизмом перепуска электродов.

Для регулирования положения электродов в ванне электропечь снабжена гидравлическим приводом перемещения электрододержателей. Управление положением электродов выполняет плавильщик или автоматизированная система АУПОЭ, контролируя величину токовой нагрузки.

Принципы автоматизации. От средств получения информации (датчики, измерительные приборы), входная информация поступает в программируемый логический контроллер. Программа ПЛК на основе входных данных с помощью алгоритмов АУЭР и АУПОЭ, анализирует поступившую информацию и формирует соответствующие управляющие сигналы для исполнительных механизмов и переключателей.

Данные алгоритмы предназначены для:

- стабилизации активной мощности печи и равномерного ее распределения по фазам в ванне печи;
- стабилизации процесса формирования, спекания и перепуска электродов;
- обеспечения служб плавильного цеха и завода объективной информацией о состоянии оборудования и технологического процесса;
- накопления, обработки и выдачи отчетной информации;
- минимизации человеческого фактора в процессе управления плавкой.

Таким образом, АСУ ТП выполняет следующие управляющее воздействия: осуществляет переключение ступени ПСН1, ПСН2, ПСН3; регулирует положение электродов, с помощью устройства перепуска и перемещения электродов (УПП1, УПП2, УПП3 соответственно); регулирует положение шиберов на обдув электродов.

Также автоматизированная система выводит на щит управления и автоматизированное рабочее место плавильщика полную информацию о состоянии печи.



Рис. 2. АСУ ТП переключения электродов

Выводы:

- Применением АСУТП является создание единой информационной системы контроля с предоставлением информации в режиме реального времени о ходе технологического процесса.
- Система обеспечивает устойчивую работу технологических объектов, повышает оперативность контроля и производительности труда, улучшает условия труда эксплуатационного персонала, предоставление технологической информации (протоколы событий, графики изменения параметров) для анализа ситуации на объекте,
- Срок службы системы – не менее 15 лет.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рожихина И.Д. Теория и технология производства ферросплавов указания / И.Д. Рожихина. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – 258 с.
2. Шевченко В.Ф. Устройство и эксплуатация оборудования ферросплавных заводов. – «Металлургия», Москва, 1992.
3. Куликов И.С, Ростовцев С.Т., Григорьев Э.Н. Физико-химические основы восстановления окислов. М.: Наука, 1998. –
4. Технологическая инструкция ТИ АЗФ-4749-18-2012 Выплавка высокоуглеродистого феррохрома в закрытых печах цеха № 6.
5. Жарковский Б.И, Шапкин В.В. Справочник молодого слесаря по контрольно-измерительным приборам в автоматике. – «Высшая школа», Москва, 1991. – 159 с.

Научный руководитель: О.С. Качин, к.т.н., доцент кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

РАЗРАБОТКА WEB-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТРУКТУРНЫМИ МЕТОДАМИ

Е.В. Михайлова, Д.С. Самохин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Обоснование безопасности АЭС - это обязательная, строго регламентированная процедура, заключающаяся в проведении работ по расчёту и анализу показателей надёжности сложных технических систем с помощью моделей вероятностного анализа безопасности.

В большинстве программных комплексов, используемых для проведения подобных расчетов, применяются логико-вероятностный метод, общий логико-вероятностный метод и метод дерева отказов или событий. Однако для решения некоторых задач анализа надёжности систем существует необходимость применения структурных методов. Применение структурной схемы надёжности регламентировано ГОСТ 27.301-95 [3]. Поэтому, актуальной задачей на данный момент является автоматизация выполняемых расчётов, основываясь на ГОСТ Р 51901.14-2007 [2].

Методы моделирования на основе структурной схемы надёжности имеют определённые условия применения [2]:

- Системы считаются невозстанавливаемыми, порядок появления отказов не важен.
- События (отказы, ремонт оборудования) статистически независимы, элементы системы существуют только в одном из двух состояний: работоспособном и неработоспособном (отказ).

Программный комплекс направлен на решение следующих задач:

- определение количественных оценок показателей безотказности и готовности, на основе данных об элементах и структурной схеме надёжности системы (вероятность безотказной работы, вероятность отказа системы);
- обеспечение интерактивной работы со структурной схемой (добавление, удаление и перемещение элементов и групп элементов системы в рамках схемы);
- определение показателей надёжности простых моделей (последовательных и параллельных структур);
- определение показателей надёжности для системы с логикой k из n элементов;
- анализ смешанных соединений (параллельно-последовательных, последовательно-параллельных соединений, соединений с последовательным и параллельным соединением).

Анализ структурной схемы при моделировании ведётся с помощью объединения элементов в группы по типу соединения. Группа состоит из элементов системы или других подгрупп. Считается, что в группу могут быть объединены

последовательно или параллельно соединенные элементы. Например, на рис.1 элементы e1 и e2 образуют group 1 – последовательная группа, элементы e3 и e4 соединены параллельно и образуют group 2. В свою очередь group 1 и group 2 соединены параллельно и образуют group 3. Группы можно представить как виртуальные элементы системы, которые так же могут объединяться в группы.

Последняя группа, в которую входят все элементы и группы, в рассматриваемом примере group 3, является системой, для которой производился расчет. Для групп, соединение элементов в которых параллельное, возможно задание критерия отказа в виде количества работоспособных элементов, при котором отказ группы еще не наступает. Это позволяет модельно реализовать мажоритарную логику (например, отказ 2 из 3).

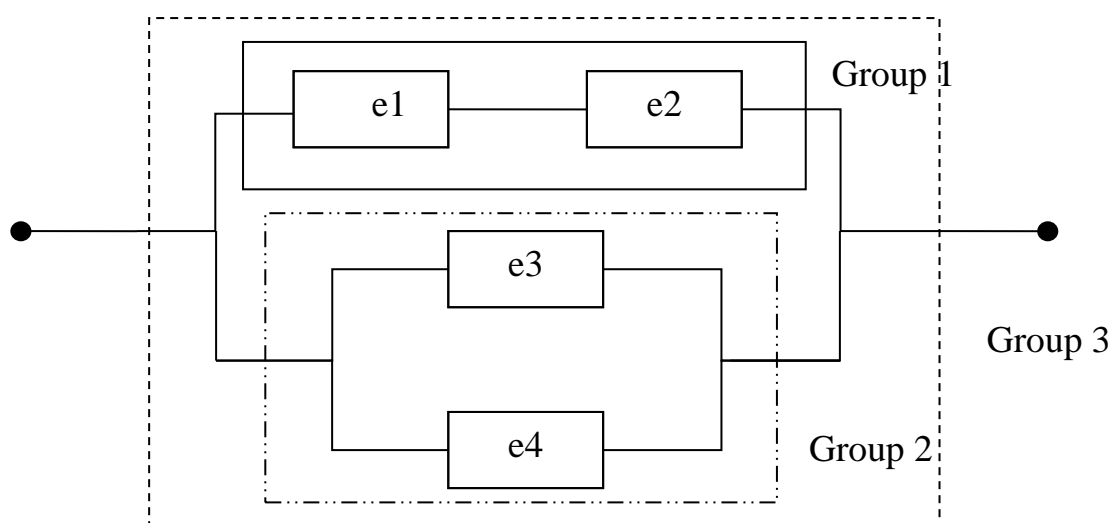


Рис. 1. Пример группировки элементов в структурной схеме модели.

После проведения группировки системы программа составляет структурную функцию. Математические формулы для расчёта вероятности безотказной работы системы [1]:

для последовательной системы:

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1)$$

для параллельной системы:

$$R_S = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (2)$$

где n – число элементов системы, R_i – вероятность безотказной работы i -ого элемента.

Однако существуют более сложные схемы, в которых разделить элементы на группы без повторяющихся элементов не представляется возможным. В этом случае чаще всего используется метод Монте-Карло, но предполагая, что отказы элементов независимы друг от друга, можно воспользоваться методом, основанным на применении формулы полной вероятности, а так же применить булевы выражения и таблицы истинности [2].

Имея структурную функцию системы можно рассчитать вероятность безотказной работы системы или вероятность отказа, присвоив элементам функции определённые характеристики надёжности. В данном программном комплексе используются такие распределения потока отказов как: экспоненциальное и Вейбулла.

Приложение может использоваться для расчёта надёжности оборудования АЭС, нефтегазовой промышленности, установок космического назначения и т.д.

Разработка приложения ведётся на современных языках web-программирования Java Script и PHP с использованием HTML5 и CSS3, а так же базы данных MySQL. Совместное применение объектно-ориентированных языков Java Script и PHP позволяет создать динамические приложения для работы со схемами и данными. Пользователь может заниматься расчётами в любом месте, на любом компьютере через стандартный браузер, без предварительной установки компонентов приложения на персональный компьютер.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надёжности: Учеб. пособие - М.: Абрис, 2012. -390 с.: илл.
2. ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надёжности и булевы методы. – Взамен ГОСТ Р 51901.14-2005; введ. 2008-09-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 23 с.
3. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410-87 (в части п.2); введ. 1997-01-01. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М: Изд-во стандартов, 1996. – 10 с.

Научный руководитель: Д.С. Самохин, к.т.н., зав. каф. «Расчет и конструирование реакторов АЭС», Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ДАВЛЕНИЯ УДАЛЕННОГО ОБЪЕКТА

¹А.Г. Нигай, ²Ю.З. Васильева

^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ¹АТП, группа 5БМ53, ²ЭСиЭ, группа 5АМ6Д

Целью работы является разработка программно-технического комплекса мониторинга давления удаленного объекта.

Распределённая система – система управления процессом сбора показаний датчиков давления, установленных в разных аудиториях, с распределённой системой ввода-вывода информации на промышленных компьютерах, с децен-

трализацией обработки данных и общим местом сбора информации и управления (АРМ).

Каждая установка измерения давления включает в себя гидравлический пресс, преобразователь давления Rosemount 3051. Снятие показаний об измеренном давлении воды, создаваемого гидравлическим прессом ЭЛЕМЕР- PR 1200 производится с автоматизированного рабочего места, визуализированного в программе WinCC в режиме реального времени.

Гидравлический пресс ЭЛЕМЕР-PR 1200 предназначен для создания избыточного давления при проведении поверки (калибровки) механических и электронных преобразователей давления и манометров методом сравнения.

Пресс состоит из насоса предварительной прокачки системы (расширительная емкость для рабочей среды всегда остается доступной для долива, что позволяет прокачивать системы большого объема). Предохранительный вентиль для отсечения предварительного насоса от системы высокого давления. После заполнения магистрали и перекрытия вентиля давление в системе регулируется винтовым поршнем увеличенного диаметра, что исключает утечку рабочей среды через клапаны предварительного насоса. Рабочей средой является вода или масло.

Датчик давления серии Rosemount 3051 относится к интеллектуальным приборам и предназначен для непрерывного измерения и преобразования измеренных значений давления в унифицированный выходной токовый сигнал 4-20 мА, а также в цифровой сигнал, поддерживающий протокол связи "HART" [1].

Интеллектуальный датчик – адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля. Он имеет цифровой выход и может обеспечивать передачу информации о метрологической исправности.

Обладая вычислительными возможностями, интеллектуальный датчик позволяет осуществлять:

- автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия влияющих величин и старения компонентов;
- самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике;
- самообучение.

Под самовосстановлением понимается автоматическая процедура ослабления метрологических последствий возникновения дефекта, т.е. процедура обеспечения отказоустойчивости.

Под отказоустойчивостью понимается способность сохранять метрологические характеристики в допустимых пределах при возникновении единичного дефекта.

Под самообучением понимается способность к автоматической оптимизации параметров и алгоритмов работы. Метрологический диагностический самоконтроль осуществляется без использования встроенных средств более высокой точности. Принятое опорное значение параметра, характеризующего критическую составляющую погрешности, устанавливается на этапе разработки или при калибровке.

Адаптивный датчик – датчик, параметры и алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей. Изменение параметров и алгоритмов работы датчика в процессе эксплуатации осуществляется с целью повышения точности и достоверности результатов измерений.

Перепрограммирование параметров датчика и управление им производится удаленно, используя программное обеспечение Hart-Master с подключенным к персональному компьютеру HART-модему.

Измеряемые диапазоны давлений:

- минимальное измеряемое давление: 0 МПа;
- максимальное измеряемое давление: 27,5 МПа.

Параметры датчика Rosemount 3051:

- основная приведенная погрешность датчика: не более $\pm 0,04$ %;
- температура воздуха в месте установки датчика: от -40 до 85 °С.

Данный датчик используется в комплекте с блоком питания БППС 4090/M11. Блок питания и преобразования сигналов БППС 4090/M11 предназначен для питания первичных преобразователей напряжением 24 В.[1]

HART модем Метран-681 предназначен для связи операторской станции с датчиком давления по HART-протоколу. Основными достоинствами модема является высокая надежность приема/передачи данных, обеспечивает возможность настройки подключенных HART-устройств из любой точки токовой цепи.

HART-протокол – открытый стандарт на метод сетевого обмена. Токовый сигнал 4...20 мА суммируется с цифровым сигналом, и сумма передается по линии связи. Цифровой сигнал позволяет получить информацию о состоянии датчика и осуществить его настройку [2].

В ходе выполнения работы был разработан человеко-машинный интерфейс в программе WinCC для визуализации процесса измерения давления воды в режиме реального времени.

В программном комплексе WinCC значения процесса могут быть распечатаны или сохранены в электронном виде. Это облегчает процесс документирования процесса и позволяет анализировать технологические данные позднее.

Внешние теги получают значения от процесса сбора информации распределенной системы. Теги процесса определяет коммуникационный драйвер, с помощью которого WinCC соединяется с системой мониторинга. Тэги, не получающие значения от процесса, называются внутренними тегами.

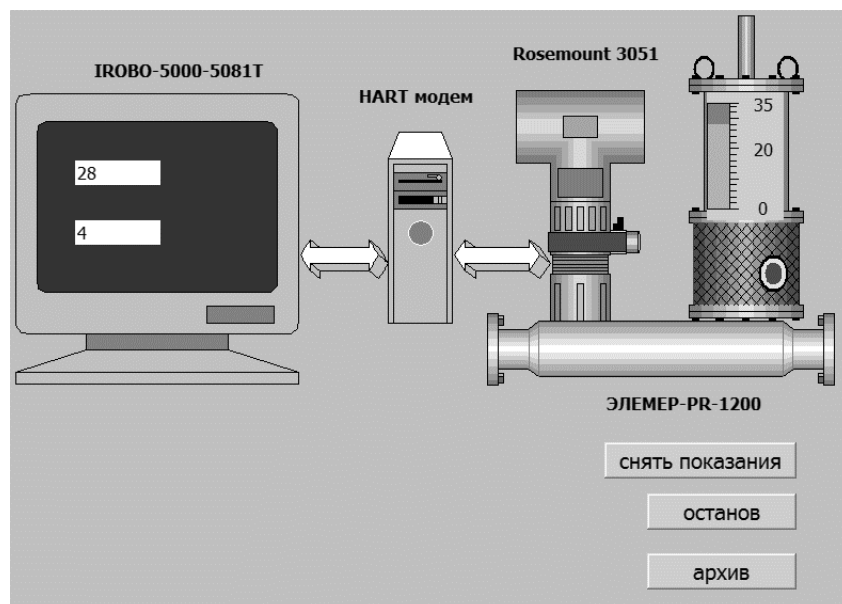


Рис. 1. АРМ оператора, разработанное в программе WinCC

Опция WinCC/WebNavigator обеспечивает функции управления через Internet или локальную сеть. Конфигурация системы с WebNavigator включает в свой состав веб-сервер, устанавливаемый на однопользовательскую станцию, клиент или сервер WinCC, и веб – клиентов, выполняющих функции управления и мониторинга при помощи InternetExplorer или своего приложения WinCCViewerRT. Установка веб-сервера может производиться на мультиклиента распределенной системы. В этом случае веб-клиенты получают доступ к данным нескольких (до 12) WinCC серверов.

Основное программное обеспечение WinCC установлено на промышленный компьютер IROBO-5000-5081T, которое формирует ядро для широкого диапазона различных приложений. SCADA WinCC может выступать в обмене данных как в виде OPC-клиента, так и в виде OPC-сервера. Программа поддерживает распределённую структуру проекта с многопользовательскими решениями. Вложенный WinCCWebNavigator позволяет получить доступ к данным АСУ ТП через Internet. Проекты для верхних и нижних уровней АСУ ТП можно объединять.

Результатом данной работы является разработанный программно-технический комплекс мониторинга давления удаленного объекта.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Преобразователь давления измерительный Rosemount 3051: Техническое описание и инструкция по эксплуатации, – М.: ООО НПП «Метран», 2014 г. – 24 с.
2. HART модем Метран – 681: Техническое описание и инструкция по эксплуатации, – М.: ООО НПП «Метран», 2014 г. – 18 с.
3. Kravchenko E. V., Kuznetsov G. V. Increase resource power electronics module on the physics of failure method. MATEC WebConf. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 10.1051/matecconf/20141901028свободный. – Загл. с экрана.

4. Kravchenko E.V., Ivleva D. Y. The reliability of the power semiconductor module on the operating temperature. MATEC WebConf. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 10.1051/matecconf/20141901002свободный. – Загл. с экрана.

Научный руководитель: Е.В. Кравченко, к. т. н., доцент кафедры Автоматизации теплоэнергетических процессов, ТПУ Энергетический институт.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ АСПО В МАГИСТРАЛЬНОМ НЕФТЕПРОВОДЕ

А.В. Коптева, А.В. Семенюк
Санкт-Петербургский горный университет

В работе предлагается методика измерения АСПО при транспортировке нефти магистральными трубопроводами. В основе системы измерения предлагается использование радиоизотопного излучения, позволяющего без внедрения в поток осуществлять измерение толщины АСПО на внутренней поверхности трубопровода. Представлен основной алгоритм измерения и расчетные формулы.

Трубопроводный транспорт нефти и газа, как в Российской Федерации, так и во многих зарубежных странах занимает одну из лидирующих позиций среди остальных видов транспорта. Это обусловлено многими преимуществами: географическое расположение месторождений нефти и газа разнообразно, и как следствие, трубопроводный транспорт наиболее эффективен благодаря возможности повсеместной его укладки и высокого уровня механизации строительного-монтажных работ; возможность обеспечения равномерной и бесперебойной поставки значительных количеств сырья; возможность внедрения автоматизированных систем управления; экономическая выгода. Общая протяженность трубопроводов в РФ – 217 тыс. км, на долю нефтяных приходится 46.7 тыс. км, газовых – 151 тыс. км. Магистральные трубопроводы транспортируют 100% газа, 99% нефти и больше 50% переработанных соединений. Таким образом, транспортировка нефтепродуктов по трубопроводам является наиболее удобным и распространенным видом транспортирования, однако такой способ имеет ряд недостатков, которые вызывают осложнения в работе трубопроводных коммуникаций, и как следствие, приводит к снижению производительности системы в целом, повышая энергозатраты. К основным недостаткам можно отнести: сложности в процессе транспортировки высоковязкой и высокозастывающей нефти; наличие турбулентности в потоке; нарушение экологической обстановки в местах аварий на трубопроводе; образование асфальто-смолопарафиновых отложений (АСПО) на внутренней поверхности трубопровода. Под влиянием факторов, влияющих на возникновение аварий на трубопроводном транспорте, почти каждая пятая авария возникает вследствие осаждения

парафиновых отложений на внутреннюю поверхность трубопровода (19%) (по данным аналитических исследований ОАО «Лукойл-Коми» на 2015 год).

Для эффективной борьбы с АСПО необходимо знание их состава, свойств и принципов образования. Механизм образования АСПО до сих пор остается недостаточно изученным. Большинство данных, относящихся к процессу парафинизации нефтяного промыслового оборудования и внутренней поверхности трубопроводов, основано на исследовании систем добычи, сбора и транспорта нефти, а также изучении химического состава и физико-химических свойств АСПО.

Под механизмом парафинизации понимают комплекс процессов, обуславливающих накопление твердой фазы на поверхности оборудования при добыче нефти. В настоящий момент имеются несколько теорий, объясняющих общий механизм образования АСПО [1]. Образование отложений может происходить либо за счет возникновения и роста кристаллов непосредственно на поверхности оборудования или в результате сцепления с поверхностью уже готовых, образовавшихся в потоке частиц, твердой фазы.

Детальный анализ процессов добычи, перекачки и транспортирования нефти позволяет определить некоторые факторы, оказывающие влияние на механизм образования АСПО [2]. При транспортировании нефти по трубопроводу протекают следующие процессы: нефть поступает в трубопровод и контактирует с охлажденной металлической поверхностью, при этом возникает градиент температур, направленный перпендикулярно охлажденной поверхности к центру потока. За счет турбулизации потока температура нефти в объеме снижается, при этом параллельно протекают два процесса: выделение кристаллов н-алканов на холодной поверхности; кристаллизация н-алканов в объеме нефти. Практически важным для исследования является не само по себе выделение парафинов, а отложение их на поверхности труб и оборудования по направлению теплопередачи. Для отложения парафинов на поверхности необходимо соблюдение определенных условий: наличие в нефти высокомолекулярных углеводородов, в первую очередь метанового ряда; снижения температуры потока до значений, при которых происходит выпадение твердой фазы; снижение давления до давления насыщения; наличия подложки с пониженной температурой, на которой кристаллизуются углеводороды; обводненность; шероховатость стенок труб и наличие в системе твердых примесей, способствующих выделению парафина; значение скорости потока (с ростом скорости движения нефти интенсивность отложений вначале возрастает, что объясняется увеличением турбулизации потока и при достижении определенной скорости начинает убывать). Также лабораторные исследования показали, что на механизм образования парафиновых отложений оказывает влияние процесс выделения и поведения газовых пузырьков в потоке смеси [3]. Известно, что газовые пузырьки обладают способностью флотировать взвешенные частицы парафина. При контакте пузырька с поверхностью трубы частицы парафина соприкасаются со стенкой и откладываются на ней.

В настоящее время методы борьбы с АСПО ведутся по двум направлениям: профилактика отложений; удаление уже сформировавшихся отложений.

Они включают в себя физические (вибрационные, ультразвуковые, воздействие электрических и электромагнитных полей), химические (смачивающие, модификаторы, депрессаторы, диспергаторы, растворители и удалители), механические (скребки, скребки-центраторы), тепловые методы (промывка горячей нефтью или водой в качестве теплоносителя, острый пар, электропечи, индукционные подогреватели, реагенты). Выбор оптимальных способов борьбы с АСПО и эффективность различных методов зависит от многих факторов, в частности, от способа добычи нефти, термобарического режима течения, состава и свойств добываемой продукции, что часто требует индивидуального подхода и даже разработки новых технологий. Необходимо и важно отметить и тот факт, что эффективность вышеперечисленных методов резко снижается ввиду отсутствия приборов и методов своевременного обнаружения местонахождения и измерения количества АСПО, измерения интервалов возможного парафинообразования и интенсивности отложений на стенках трубопровода.

Исследования показали, что существующие системы мониторинга парафиновых отложений внутри трубопровода при транспортировке нефти не обеспечивают требуемой точности и эффективности (так, например, наиболее распространенные ультразвуковые методы, где различные включения в потоке нефти создают дополнительную погрешность измерений). В Санкт-Петербургском Национальном минерально-сырьевом университете «Горный» и ООО «Комплекс-Ресурс» разработана принципиально новая, не имеющая аналогов в РФ и за рубежом измерительная система на основе волнового излучения, позволяющая с высокой точностью обнаруживать местонахождение и измерять толщину отложений без внедрения в поток, не нарушая процесс транспортировки и целостность трубопровода [2].

Разработанная система измерения, основанная на фотоэлектронном поглощении, состоит из двух составляющих: первичный преобразователь, взаимодействующий с исследуемой средой и выявляющий информативный параметр и вторичный прибор, в котором происходит обработка, градуировка, представление и передача полученного значения. Способ осуществляют следующим образом: участок трубопровода с нефтяным потоком 1 и отложившимся слоем парафинов 3 помещается в автоматическую радиоизотопную измерительную систему РИИС, состоящую из первичного и вторичного измерительных преобразователей 4,5 и 6 соответственно. В состав первичного измерительного преобразователя входят блок гамма-излучения 4, представленный в виде защитного коллимирующего устройства для формирования узкого пучка излучения радионуклида Cs-137 в области энергий 0,2 - 1,0 МэВ, и блок детектирования 5, в основе которого используются сцинтилляционный кристалл NaJ(Tl), фотоэлектронный умножитель, формирователь импульсов (рис.1).

При взаимодействии гамма-излучения с потоком возникают два вида излучений: прямое и рассеянное. Вследствие относительно равномерного распределения парафиновых отложений на стенках трубопровода [4], достаточно контролировать вещество одним узким пучком прямого излучения, при этом вторичное излучение вследствие комптоновского рассеяния нами не применяется. Прямое гамма-излучение 7 при прохождении через контролируемое вещество

претерпевает фотоэлектронное поглощение, и механизм определения его интенсивности является более простой задачей, по сравнению с рассеянным излучением [5].

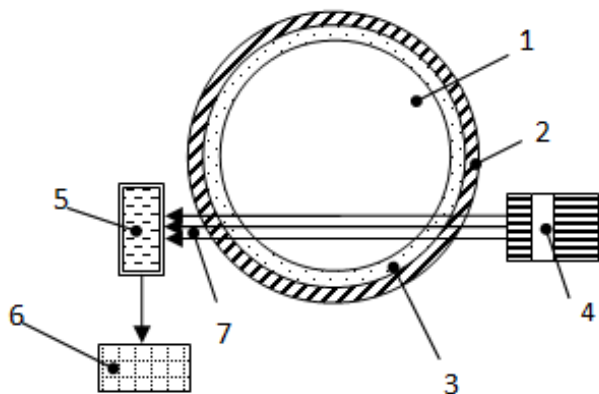


Рис. 1. Способ неразрушающего контроля толщины отложений на внутренней стенке трубопровода на основе радиоизотопного излучения

Способ измерения толщины слоя парафина в трубопроводном транспорте нефти включает облучение потока сырья узким пучком ионизирующего излучения, регистрацию прошедшего через контролируемую среду излучения в различных точках сечения трубопровода и формирование соответствующих информационных сигналов в виде дискретных отсчетов. Затем происходит определение толщины слоя парафина путем обработки результатов измерения прошедшего излучения, которое будет отличаться своей интенсивностью и флуктуационным характером изменения для различных сред – материала трубопровода, слоя парафина, движущейся нефти.

Интенсивность первичного радиоизотопного излучения связана с плотностью ρ вещества и его толщиной δ следующей зависимостью:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu\rho\delta) \quad (1)$$

В нашем случае контролируемую среду можно разделить на 3 участка: стенка трубопровода 3 (1 участок), стенка трубопровода с осажденным на ней парафином 2 (2 участок) и стенка трубопровода с парафином и транспортируемым нефтяным потоком 1 (3 участок). Тогда, интенсивность гамма-излучения для 1 участка:

$$I_1 = I_0 \cdot \exp(-\mu_{cm}\rho_{cm}\delta_{1cm}) \quad (2)$$

Интенсивность гамма-излучения для 2 участка:

$$I_2 = I_0 \cdot \exp[(-\mu_{cm}\rho_{cm}\delta_{2cm} + \mu_n\rho_n\delta_{2n})] \quad (3)$$

Интенсивность гамма-излучения для 3 участка:

$$I_3 = I_0 \cdot \exp[(-\mu_{cm}\rho_{cm}\delta_{3cm} + \mu_n\rho_n\delta_{3n} + \mu_n\rho_n\delta_{3n})]; \quad (4)$$

$$\delta_{1cm} = 2R \sin(\arccos \frac{R-\Delta}{R}); \quad \delta_{2cm} = \delta_{1cm} - 2R \sin(\arccos \frac{R-\Delta}{r}); \quad \delta_{2n} = 2r \sin(\arccos \frac{r-\Delta}{r});$$

$$\delta_{3cm} = \delta_{2cm}; \quad \delta_{3n} = \delta_{2n} - D \sin(\arccos 2 \frac{R-\Delta}{D})$$

Где I_1, I_2, I_3 – интенсивность первичного излучения, регистрируемого детектором в данном объеме в присутствии поглощающего материала соответ-

ственно на 1, 2 и 3 участках поперечного сечения трубопровода; $\rho_{ст}$, $\rho_{п}$, $\rho_{н}$ – плотность стали стенки трубопровода, парафина, и нефти; $\delta_{ст}$, $\delta_{п}$, $\delta_{н}$ – эквивалентная толщина стальной стенки трубопровода, парафина и нефтяной фазы соответственно; $\mu_{ст}$, $\mu_{п}$, $\mu_{н}$ – массовый коэффициент ослабления первичного излучения стальной стенкой трубопровода, парафином и нефтяным потоком соответственно; Δ – расстояние от края трубопровода до точки сканирования в данный момент по направлению перемещения всей измерительной системы; R , r – наружный и внутренний радиусы трубопровода в данном сечении; D – диаметр трубопровода.

На рисунке 2 представлена зависимость интенсивности излучения от глубины проникновения гамма-излучения в контролируемый поток, состоящей из нефтяного потока 1, парафинового слоя 2, стенки трубопровода 3; рисунок 2.а – излом кривой при переходе от парафина к нефти, рисунок 2.б – излом кривой при переходе от стальной стенки к парафину [3]. При этом измеряемая толщина парафиновых отложений определяется по изломам кривой (рис.2.)

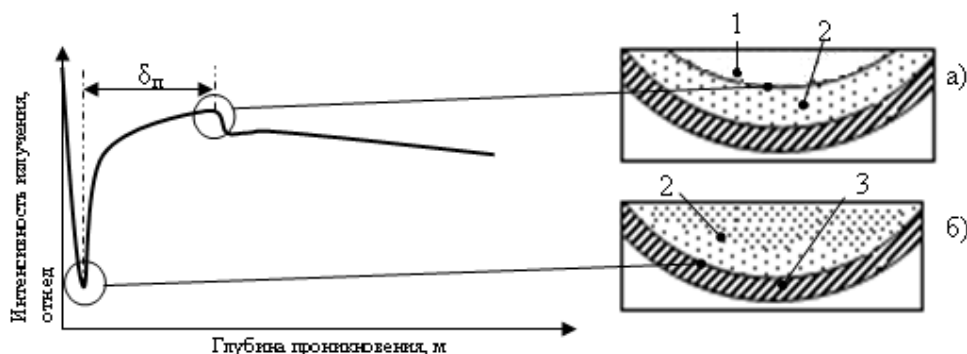


Рис. 2. Зависимость интенсивности гамма излучения от толщины парафинового слоя на внутренней стенке трубопровода; а - излом кривой при переходе от парафинового слоя к нефти; б - излом кривой при переходе от стальной стенки к парафиновому слою.

Принцип действия (БД) основан на регистрации потока гамма-квантов сцинтилляционным детектором с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), формировании спектрометрических сигналов, амплитуда которых пропорциональна энергии зарегистрированных квантов, выделении из общего потока зарегистрированных квантов двух его компонентов, соответствующих энергиям квантов, лежащих в двух непересекающихся энергетических диапазонах, обработке информации микроконтроллером по установленному алгоритму. После включения электропитания БД готов к работе при достижении теплового равновесия внутри корпуса, которое достигается за время не более одного часа.

Поток гамма-излучения от источника, прошедший через контролируемую среду, преобразуется в сцинтилляторе в электрический сигнал в виде потока прямоугольных импульсов положительной полярности с переменной амплитудой и длительностью. С выхода сцинтиллятора сигнал поступает в микроконтроллер, где обрабатывается по специальной программе и передается по интерфейсу RS-485. БД выдает в систему сбора информации усредненные значения отсчетов, пропорционально зарегистрированному количеству гамма-квантов.

Из всех существующих методов измерения радиоизотопные измерительные системы лишены конкурентов, так как жесткое гамма-излучение пронизывает любые толщины полезного ископаемого, транспортируемого трубопроводом любого диаметра. Разработанная методика бесконтактного автоматического измерения толщины осажденного слоя на внутренней поверхности трубопровода, может быть использована как на стадии проектирования и прокладки трубопроводов, так и на действующих трубопроводах нефтяных предприятий различного назначения. Система измерений позволит обеспечить своевременное обнаружение АСПО и предотвращение аварийных ситуаций, надежную и эффективную работу всей транспортной системы. В краткосрочной перспективе, радиоизотопные методы могут найти применение также и для автоматического контроля качества углеводородов, определяя с большой точностью содержание различных примесей, таких как воду и свободный газ. С помощью измерительной системы, основанной на радиоизотопном излучении с использованием только фотоэлектронного эффекта можно измерять толщину парафиновых отложений с абсолютной погрешностью ± 5 мм, что является достаточным условием для обеспечения надежной работы трубопроводной системы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тронов В.П. Механизм образования смоло-парафиновых отложений и борьба с ними. М., 1970 – 192 с.
2. Ибрагимов Г. З. Техника и технология добычи и подготовки нефти и газа. / Г. З. Ибрагимов, В. Н. Артемьев, А. И. Иванов, В. М. Кононов. - М.: Изд-во МГОУ, 2005 – 243 с.
3. Kopteva A.V., Voytyuk I.N. Noncontact measurement method for assessing oil quality and quantity in main pipeline. 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE. 2015 –P.: 1 – 4. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414862.
4. Черников В.И. Перекачка вязких и застывающих нефтей. – М.: Гостоптехиздат, 1958. – 160 с.
5. Bieberle, A., Härting H., Rabha S., Schubert M., Hampel U. Gamma-ray computed tomography for imaging of multiphase flows // Chemie Ingenieur Technik. 2013. Issue 7. pp. 1002–1011.

Научный руководитель: Р.М. Проскуряков, д.техн.наук, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет.

КОНСТРУКЦИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КРУПНОГАБАРИТНОЙ НЕФТЕСБОРНОЙ СИСТЕМЫ

Д.А. Нечаев

Томский политехнический университет
ИПР, ТХНГ, группа 2Б4Б

С увеличением объемов и расширением масштабов добычи, транспортировки, переработки и использованием труднодоступных нефтей и нефтепродуктов возросли проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды. Уже сегодня существует огромное количество устройств, предназначенных для ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов (ЛАРН) [2]. Но большинство используемых на данный момент устройств не универсальны и использование их при процессе ликвидации в разы увеличивает время, отведенное на сам процесс ЛАРН [5].

Проведя исследования основных недостатков, возникла идея в создании функциональной модели (ФМ), которая позволит моделировать устройства, обеспечивающие быстрый и качественный процесс ЛАРН. Данная ФМ представляет собой совокупность энергоресурсов, наиболее распространенных и универсальных технических устройств и основных функций, необходимые для полного процесса ЛАРН: локализация разлива, сбор и извлечение загрязняющего нефтепродукта, транспортировка ликвидированных отходов, хранение отходов, переработка/утилизация отходов, передислокация (рис. 1).

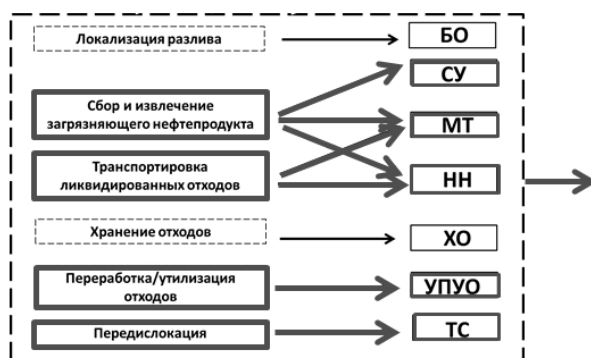


Рис. 1. Применение функциональной модели при создании универсального многофункционального устройства ЛАРН.

Используя данную ФМ, выбирая в совокупности необходимые функции и технические устройства, которые обеспечивают выполнение этих функций, нами была предложена модель универсальной установки, предназначенной для проведения процесса ЛАРН (рис. 2).

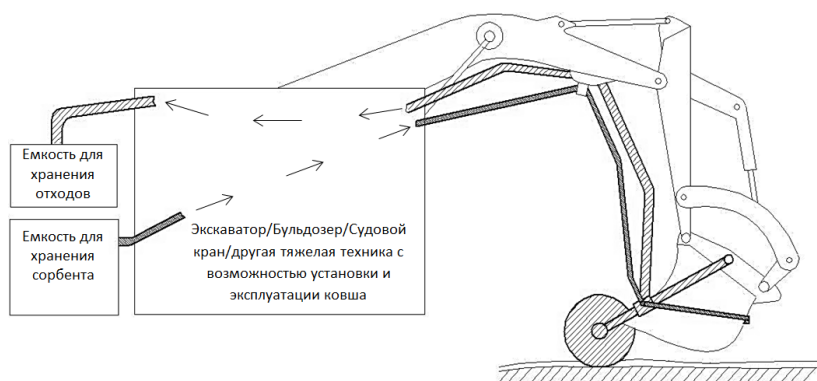


Рис. 2. Схема установки универсального многофункционального устройства ЛАРН на технологическое оборудование, имеющее в своей конструкции

Конструкция данной установки представляет собой систему устройств, устанавливаемых на ковш экскаватора или судового крана. Работа данного устройства представляет совокупность трех последовательных действий:

1. Установка оборудования и его перемещение. Оборудование устанавливается на ковш, после чего происходит его перемещение непосредственно к месту разлива.
2. Механический сбор разлива нефтепродукта (рис. 3). Сбор осуществляется специальным заборным устройством, при этом ковш является емкостью для сбора аварийного нефтепродукта. Погружной насос, который устанавливается во внутренней полости ковша, выполняет откачку собранной нефтеводной смеси, которая в дальнейшем перекачивается по сети магистральных трубопроводов в резервуар для хранения.

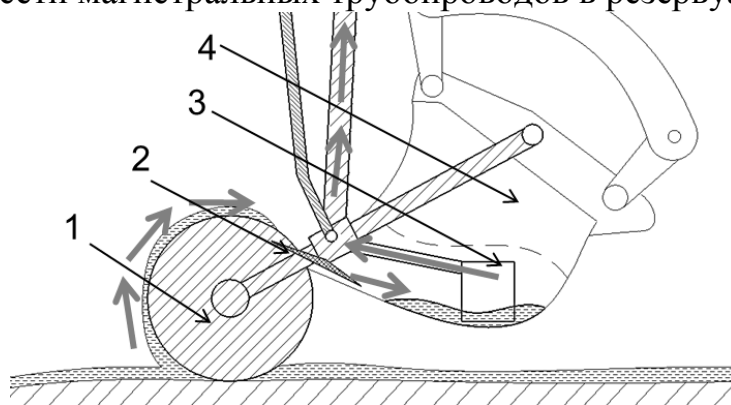


Рис. 3. Механический сбор разлива нефтепродукта. 1 - Щеточный диск, 2 - Пластина для сбора нефтеводной смеси (скребок), 3 - Система всасывающих и перекачивающих насосов, 4 – Ковш.

3. Деактивация и сбор разлива при помощи сорбирующего вещества (рис. 4). При помощи специальной камеры хранения и системы нагнетательных насосов, сорбент по магистральному трубопроводу перемещается к специальному распылительному устройству, после чего происходит непосредственное распыление на пораженный участок.

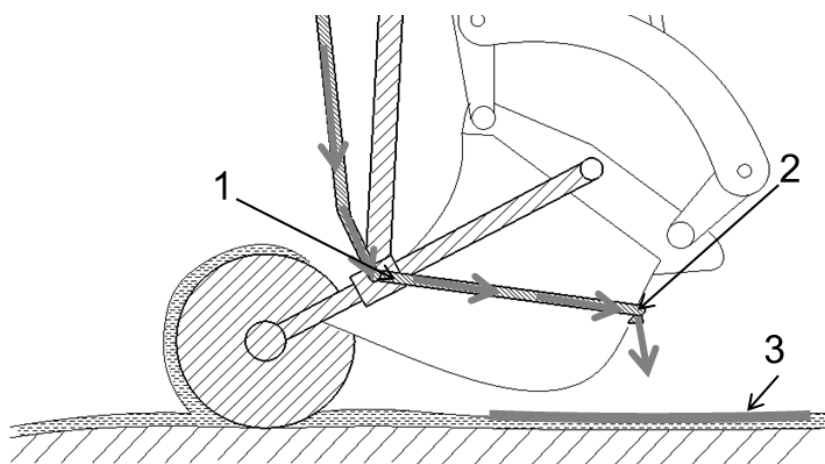


Рис. 4. Дезактивация и сбор разлива при помощи сорбирующего вещества. 1- Система нагнетательных магистралей, 2 - Распылитель-распределитель сорбента, 3 – Сорбент.

Стоит отметить, что данная конструкция установки, совмещающая в себе как механический, так и химический способ ликвидации, позволяет производить более качественный процесс ЛАРН (рис. 4).

Исходя из всего вышеперечисленного, стоит отметить, что данная конструкция позволяет установке быть мобильной, универсальной и более простой в эксплуатации, но при этом не менее эффективной по сравнению с существующими в настоящее время аналогами. Использование ковша в качестве основы конструкции, позволяет производить ЛАРН уже с первого уровня реагирования по Федеральному плану ЛРН [5]. Таким образом, данная установка позволяет значительно уменьшить время ликвидации разлива.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Крец В. Г. Машины и оборудование газонефтепроводов: учебное пособие / В.Г. Крец, А. В. Рудаченко, В.А. Шмурыгин; Томский политехнический университет. - Томск: Изд. ТПУ, 2013.- 376 с.
2. Луценко А.Н., Катин В.Д. Передвижная установка для очистки рабочих поверхностей от разливов нефтесодержащих жидкостей и сбора сыпучих мелкокусковых материалов: Пат. 104197 Российская Федерация: МПК E01P 1/08 (2006.01). Хабаровск, ДВГУПС. № 2010144258/21; заявл. 28.10.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. №13. 3 с.
3. Нечаев Д.А. Оценка технических средств нейтрализации аварийных разливов нефтепродуктов [Электронный ресурс] // ТВОРЧЕСТВО ЮНЫХ – ШАГ В УСПЕШНОЕ БУДУЩЕЕ Материалы VIII Всероссийской научной студенческой конференции с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, 23-27 ноября 2015. – Томск: ТПУ, 2015 – С. 461-463. – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/files/conferences/sbornik-korovin-VIII.pdf>
4. Пашаян, А.А. Проблемы очистки загрязненных нефтью вод и пути их решения / А.А. Пашаян, А.В. Нестеров // Экология и промышленность России - май 2008. - С.32 - 35.

- Продукция компании НД-ЭкоСистем [Электронный ресурс] // ndecosystems.ru - Режим доступа: <http://www.ndecosystems.ru/products/>, свободный. – Загл. с тит. экрана (дата обращения: 20.10.2015).
5. РД 153-39.4-114-01 Правила ликвидации аварий и повреждений на магистральных нефтепроводах [Электронный ресурс] // <http://www.gosthelp.ru> – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/RD15339411401Pravilalikvi.html>, свободный. - Загл. с тит. экрана (дата обращения: 10.04.2016).
 6. Применение диспергентов для обработки нефтяных разливов [Электронный ресурс] // <http://www.itopf.com> - Режим доступа: <http://www.itopf.com/ru/knowledge-resources/documents-guides/document/-40b0e2bd77>, свободный. – Загл. с тит. экрана (дата обращения: 02.02.2016).
 7. Применение скиммеров при ликвидации разливов нефти [Электронный ресурс] // <http://www.itopf.com> - Режим доступа: <http://www.itopf.com/ru/knowledge-resources/documents-guides/document/05-primenenie-skimmerov-pri-likvidacii-razlivov-nefti/>, свободный. – Загл. с тит. экрана (дата обращения: 02.02.2016).
 8. Продукция компании Lamog «Крупногабаритные нефтесборные системы» [Электронный ресурс] // <http://global.lamog.com> - Режим доступа: <http://global.lamog.com/ru/продукция>, свободный. – Загл. с тит. экрана (дата обращения: 15.01.2016).

Научный руководитель: А. В. Шадрина, д. т. н., доцент, каф. ТХНГ ИПР ТПУ.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Д.Ю. Ивлева

Томский политехнический университет
ЭНИН каф. АТП группа 5БМ5Д

Отказы на промысловых трубопроводах нефти и газа наносят большой экономический ущерб не только из-за потерь продукта и нарушения работы нефтедобывающего оборудования, но и сопровождаются затратами на ликвидацию последствий аварии со стороны эксплуатирующего предприятия. Как результат – существенный урон экологии. Это загрязнение окружающей среды, гибель флоры и фауны; возникновение пожаров и даже человеческие жертвы. В современной России нефть и нефтепродукты являются одними из наиболее распространенных загрязнителей.

подавляющее большинство нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих компаний не предоставляют данные о количестве порывов нефтепроводов в материалах компаний, или представляют в форме, не дающей возможности

произвести оценку общего состояния трубопроводов и их порывов, а также провести сравнение с другими компаниями.

По имеющимся данным, [1] количество технологических повреждений нефтегазовых трубопроводов, приводящих к порывам по утвержденным данным за 2010 и 2011 гг. приведены на диаграмме 1.

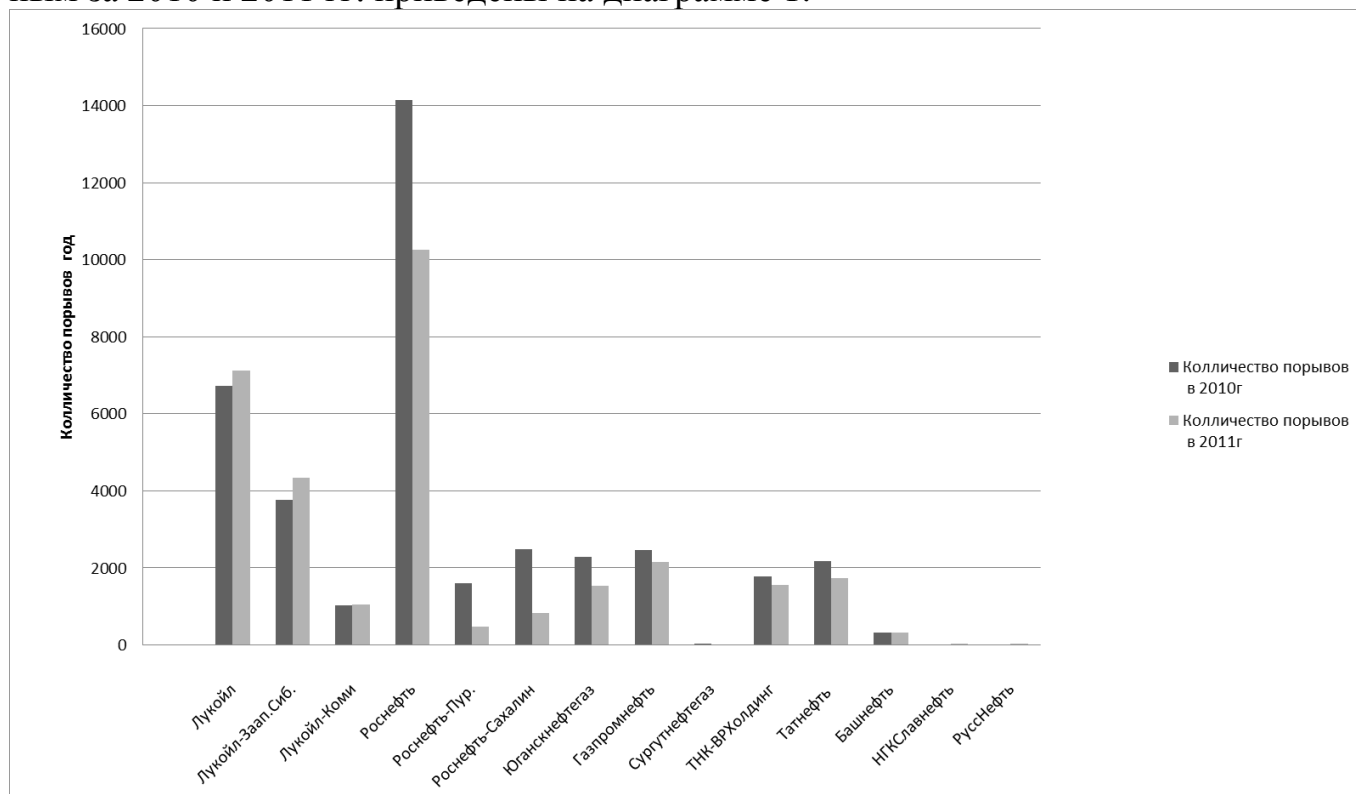


Рис. 1. Статистические данные количества порывов в нефтедобывающих организациях за 2010 и 2011 гг.

Из диаграммы видно, что на большинстве предприятий количество порывов в 2011 году снизилось по сравнению с 2010 гг, либо осталось неизменным. Согласно статистике, проведенной в ОАО «Томскнефть» с 2009 по 2014 года, количество отказов на промышленных трубопроводах стало меньше лишь благодаря вовремя проведенным профилактическим работам – с 20,8 % снизилось до 12,9 %. Но профилактические мероприятия не являются решением проблемы, поскольку сами отказы связаны в первую очередь с коррозионным износом трубопроводов, что вновь повлечет за собой рост порывов.

Старение систем магистральных нефте- и газопроводов (около 40% газопроводов и 60% нефтепроводов в РФ находятся в эксплуатации более двадцати лет) ставит задачу предупреждения серьезных техногенных аварий и катастроф и требует ведения систематического мониторинга и диагностики трубопроводных систем. Диагностика трубопроводов, находящихся в эксплуатации длительное время, предполагает обнаружение коррозии. Это — одна из важнейших проблем, решение которой позволит обеспечить безаварийную эксплуатацию и увеличить срок службы трубопроводов, снизить себестоимость доставки энергоносителей потребителям и способствовать экономии потребляемого топлива.

Одним из путей, позволяющих решить данную проблему, является переход к созданию системы мониторинга и диагностики с последующим формиро-

ванием системы капитального ремонта, т.е. переход на систему автоматизированного контроля за состоянием трубопроводов и технического оборудования.

На данный момент диагностика нефтегазовых сетей осуществляется следующими путями:

Табл. 1. Современные способы диагностики состояния нефтегазовых сетей

Наименование метода диагностики	Основные достоинства метода
Акустико-эмиссионная диагностика	Дистанционная диагностика трубопроводов в реальном времени осуществляется путем их непрерывного прослушивания при помощи специальных пьезодатчиков, электронной техники и компьютеров
Электромагнитно-акустический (ЭМА)	Методом позволяет обнаружить потенциально опасные дефекты на трубах газовой обвязки компрессорных станций без непосредственного контакта с рабочей поверхностью трубы
Опτικο-электронный метод	Используется при внутриволостной диагностике для обнаружения вмятин и забоин на трубе, а также некачественных сварных швов; наружной диагностике состояния трубопроводов, расположенных под водой; обнаружении утечек газа и топлива через микротрещины и раковины.
Применение новых разработок	В г. Киров уже опробован в действии на коллекторе специальный робот, оснащенный видеокамерой, передающей информацию о состоянии трубопровода на экран компьютера.

Из представленных методов диагностики, только один подходит для непрерывной диагностики трубопровода. Данный метод позволяет, путем прослушивания трубопровода, также выявить в металле зарождающиеся развивающиеся дефекты, типа усталостных трещин и тем самым не допустить разрушения металлоконструкции. Недостатком данного метода диагностики является необходимость непосредственного контакта с поверхностью изучаемого объекта.

Систему мониторинга и прогнозирования нефтегазовых сетей можно построить на базе оптоволоконных датчиков. Волоконно-оптический датчик — небольшое по размерам устройство, в котором оптическое волокно используется как в качестве линии передачи данных, так и в качестве чувствительного элемента, способного детектировать изменения различных величин. Благодаря использованию оптического волокна в качестве чувствительного элемента и линии передачи данных, данные датчики идеально подходят для мониторинга состояний трубопроводов различного назначения. В зависимости от принципа ра-

боты, данные датчики подразделяются на 3 основные группы – точечные, распределенные и когерентные. Благодаря этим датчиком, можно с достаточной точностью знать необходимый параметр в каждой точке оптического волокна, а значит, в каждой точке трубопровода на котором установлено оптоволокно.

Для прогнозирования состояния нефтегазовых сетей, необходим мониторинг температуры и деформации трубопровода по всей его длине [2].

Единичная система на основе оптоволоконного датчика может достигать 50 км без потери качества измерения. Время получения сигнала с таких протяженных систем составляет 1-2 минуты. При необходимости, систему можно сделать продолжительнее, но при этом возрастет и время ожидания сигнала.

Оптоволоконные датчики удобно крепить к трубопроводу при его строительстве. Оптоволоконные датчики различных производителей имеют различные технические характеристики. Например, датчики от производителя способны измерять температуру от -100 до 500 °С, а деформацию (перемещение) от 0 до 100 мкм [4].

На базе оптоволоконных датчиков возможно создать распределенную систему, позволяющую производить мониторинг нефтегазовых сетей в режиме реального времени, а также прогнозировать аварийные ситуации. Прогнозирование и мониторинг позволит уменьшить количество аварийных ситуаций, тем самым избежать лишних затрат на ремонт оборудования, устранения последствий аварий, затраты связанные с потерей сырья, снизить ущерб, нанесенный окружающей среде.

ЛИТЕРАТУРА:

1. И.П.Блоков Краткий обзор о порывах нефтепроводов и объемах разливов нефти в России, Гринпис России 2011г., 12 с. (доклад);
2. Ивлева Д.Ю. Разработка нового подхода к неразрушающему контролю ТС/П сборник международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 2014г.;
3. Алиев Р.А., Белоусов В.Д., Немудров А.Г., Юфин В.А., Яковлев Е.И. Трубопроводный транспорт нефти и газа. Учебник для вузов Недр, Москва, 1988 г., 368 стр.;
4. Ю.В. Гуляев, С.А. Никитов, В.Т. Потапов Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы/ Спецвыпуск «Фотон-экспресс» - наука №6 2005г., 13 с. (статья).

Научный руководитель – Е.В. Кравченко, к.т.н., доцент каф. АТП ЭНИН ТПУ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ПРОЦЕССА СТАБИЛИЗАЦИИ КАТАЛИЗАТА

А.М. Джамбеков

Астраханский государственный технический университет

При проведении исследований по модернизации систем автоматического управления (САУ) каталитического риформинга (КР) ставится задача увеличения производительности КР, в т.ч. основных технико-экономических показателей установки КР. Поэтому, одним из способов повышения производительности КР является разработка эффективной САУ КР [1].

На промышленных объектах Астраханского газоконденсатного месторождения (АГКМ), в т.ч. на установке КР, все регулирование технологическими процессами осуществляется с использованием классических инструментов управления, т.е. с помощью промышленных пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Это связано с проработанностью теории для данных регуляторов и широким их применением [2]. Достаточно просто осуществляется настройка ПИД-регулятора при работе с конкретным объектом, и обеспечивается удовлетворительная стабилизация регулируемого параметра при незначительных отклонениях его величины от заданной.

Рассмотрим технологический процесс, протекающий в блоке стабилизации катализата (БСК) установки КР. Это обусловлено тем, что показатели продуктовой смеси БСК (стабильного катализата) определяют качество работы всей цепочки процесса КР. Важной характеристикой стабильного катализата является температура, измеряемая температурным датчиком в нижней части стабилизационной колонны (СК) БСК.

Цель работы – анализ эффективности применения ПИД-регуляторов для разработки системы автоматического регулирования (САР) температуры низа СК при различных режимах.

При исследовании эффективности ПИД-регуляторов рассмотрено возмущение - перепад температуры в СК ΔT . Остальные возмущающие воздействия (изменение качества нестабильного катализата, изменения состояния трубчатой печи) приняты постоянными при заданных условиях протекания процесса в БСК.

САР температуры низа СК разработана на основе типовой схемы, представленной на рис.1. Регулятором P является ПИД-регулятор. Объектом управления ОУ является процесс в СК. В качестве регулируемого параметра рассмотрена температура стабильного катализата на выходе из СК $T_{\text{вых}}$.



Рис. 1. Структурная схема САР температуры низа СК

В пакете *Simulink* системы *MATLAB* ОУ представлен следующей структурной схемой:

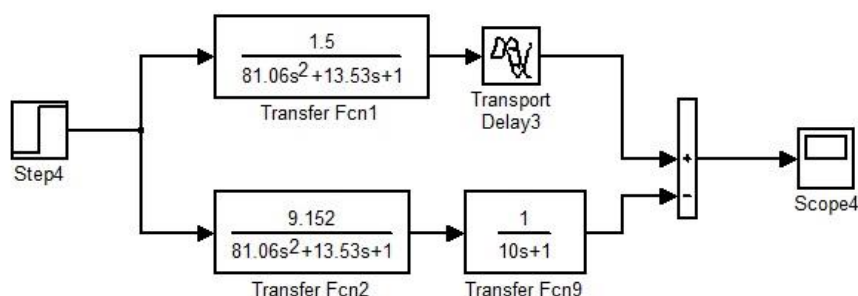


Рис. 2. Структура ОУ в пакете *Simulink MATLAB*

На основании схемы (рис.2) получены переходные процессы в САР температуры низа СК при различных режимах. Сравнительная оценка основных показателей качества переходных процессов приведена в таб.1.

Табл. 1. Оценка показателей качества переходных процессов

№	Перерегулирование, °С	Интегральный критерий качества, [-]
1	8,75	5243
2	7,5	5186
3	7,2	5162
4	4,5	4866
5	8,75	5228

При режиме № 4 (таб.1) переходной процесс обладает наилучшими показателями качества, т.е. ПИД-регулятор наиболее эффективен. На основе полученных результатов возможна разработка подхода к управлению процессом в БСК установки КР на основе сравнительного анализа переходных процессов и выбора оптимального режима процесса.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Джамбеков А.М. Управление процессом каталитического риформинга на основе экспертной информации // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития: сборник материалов Всероссийской молодежной научной конференции. 24-26 июня 2014 г. – Саратов: ООО «Издательский Центр «Наука», 2014. - С. 382-387.

2. Неклассический подход к классической проблеме регулирования / П.А. Агапов, А.А. Андреев, В.В. Бочарников, В.Е. Родованов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2009. - № 1. - С. 78-82.

Научный руководитель: И.А. Щербатов, к.т.н., доцент кафедры «Автоматика и управление», Астраханский государственный технический университет.

ДАТЧИК СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГОЛОЛЕДНО-ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

Д.А. Иванов, О.Г. Савельев, М.Ф. Садыков
Казанский государственный энергетический университет

В результате значительного увеличения массы проводов и воздействующих на них динамических и статических нагрузок происходят опасные и нежелательные явления, особенно при сильном ветре. К их числу относятся обрыв токопроводящих проводов и грозозащитных тросов под тяжестью снега и льда, недопустимо близкое сближение проводов и их сильное раскачивание (так называемая «пляска»), ухудшение защитных свойств изоляторов, разрушение опор [1]. Отложения гололеда, изморози и мокрого снега представляют большую опасность для нормальной эксплуатации воздушных линий электропередачи (ВЛ). Толщина льда на линиях электропередачи может достигать 300 мм и более, существенно утяжеляя их и приводя к разрыву. От гололеда в высоковольтных линиях электропередачи страдают многие страны мира, в том числе Россия, северные европейские страны, Канада. В каждой из названных стран по причине гололеда в энергосистемах происходит в год до 6-8 крупных аварий [2, 3].

Нами разработана система мониторинга гололедообразования (СМГ) на воздушных линиях электропередач, которая состоит из специального набора аппаратно-метрологического средств и соответствующего программного обеспечения. Функциональная схема системы мониторинга показана на рисунке 1.

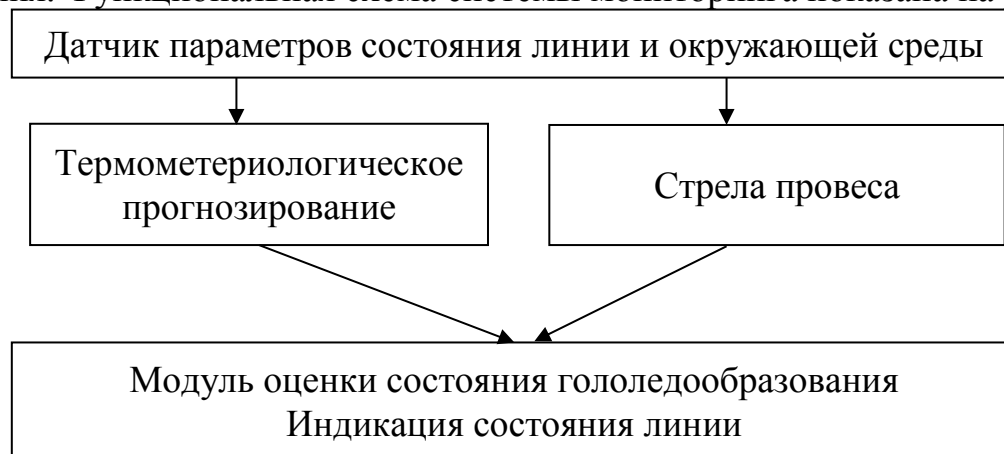


Рис. 1. Функциональная схема системы мониторинга гололедообразования

Внешний корпус измерительного элемента выполнен в разборном эллипсоидальном пластиковом корпусе имеющий специальные пазы для прикрепления к проводу ЛЭП (рис. 2). Внутри внешнего корпуса находится трансформатор тока с разделяемым сердечником.

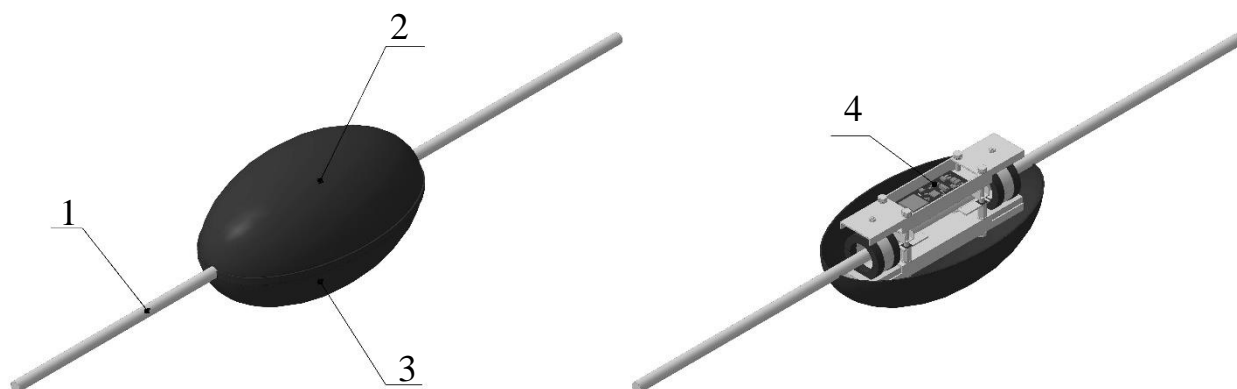


Рис. 2. Конструкция датчика: 1 – повод линии электропередач, 2,3 – внешний пластиковый корпус, 4 – аппаратная часть платформы.

Аппаратная часть платформы включает набор датчиков для измерения параметров состояния проводов линии и окружающей среды, и средства приема и передачи данных. Данные, получаемые от метрологических средств, собираются в коллекторном устройстве и передаются персональный компьютер для дальнейшей обработки в виртуальных моделях.

Модуль оценки состояния гололедообразования – это программное обеспечение, которое состоит из следующих блоков – модуль оценки стрелы провеса, модуль термо-метеорологического прогнозирования, модуля оценки и индикации.

В модуле оценки стрелы провеса выполняется определение стрелы провеса при измеренных значениях соответствующего расчётного режима. Модуль термо-метеорологического прогнозирования выполняет оценку параметров окружающей среды и режимов работы линии электропередачи с целью определения вероятности появления гололедных образований. Далее полученные данные передаются в модуль оценки состояния и индикации, где выполняется их обработка для оценки гололедообразования и индикация состояния линии электропередачи.

Элемент сети – датчик - производит сбор и предварительную обработку данных, полученных с датчиков. Далее он передает данные другому модулю, расположенному ближе к оконечному модулю, осуществляющему передачу в систему сбора и обработки данных. Информационная сеть датчиков способна самоорганизовываться в линейную топологию.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бучинский В.Е. Гололед и борьба с ним. - Л.: Гидрометеиздат, 1990. - 68 с.
2. Каганов В.И. Нагрев проводов электрических сетей с помощью высокочастотной электромагнитной волны для борьбы с гололедом //

- Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. № 3. С. 21-25.
3. Глухов В.Г. Метеорологические условия образования гололеда // Тр. ГТО.-1972.-Вып.311.
 4. Сацук, Е. И. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях [Текст]: дис. ... д-ра тех. наук / Е. И. Сацук. – Новочеркасск, 2011. – 314 с.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РОТОРНЫМ ТРАНШЕЕКОПАТЕЛЕМ

К.М. Лазариди, Т.П. Карташова
Южно-Российский государственный политехнический университет
(НПИ) им. М.И. Платова

Технология разработки траншей связана с применением землеройно-транспортных машин, одним из видов которых являются роторные траншеекопатели, представляющие собой гусеничную машину с рабочим органом в виде многоковшового ротора.

Перед траншеекопателями ставятся задачи обеспечения заданной производительности землеройных работ и повышения качества отрывки траншеи [1, 2].

Под качеством отрывки траншей понимается создание относительно ровной поверхности дна траншеи с учетом неровностей и уклоном местности, по которой передвигается траншеекопатель. Производительность выполнения землеройных работ может определяться степенью загрузки двигателя машины и регулироваться как скоростью передвижения самой машины, так и степенью заглабления ротора при приоритете поддержания заданной глубины траншеи.

Решить проблему выполнения технологических требований к качеству отрывки траншей и одновременным решением задачи повышения производительности землеройных работ можно путем создания системы автоматического управления роторным траншеекопателем (САУ РТ) [3, 4].

Рассмотрим общие принципы построения САУ РТ. Информационным параметром, по которому можно судить о производительности траншеекопателя, является степень загрузки двигателя машины по мощности, которая, исходя из поставленных задач, может меняться как за счет изменения скорости движения самой машины, так и за счет заглабления ее ротора.

Таким образом, система управления траншеекопателем должна содержать, как минимум, два контура управления: контур регулирования скорости движения машины и контур регулирования заданной глубины траншеи (рис. 1).

Регулируемыми параметрами системы управления являются мощность двигателя N_{Σ} и глубина отрывки траншеи h .

Мощность N_{Σ} формируется за счет действия силы сопротивления при горизонтальном перемещении машины $F_{\text{сопр}}^{\text{гор}}$ и силы сопротивления при верти-

ченные отрицательной обратной связью через датчик положения БЦ. Скорость вращения ведущего колеса гусеничного движителя $\omega_M^* \sim Q_{ГМ} \sim \alpha_{БЦ}$, где $\alpha_{БЦ}$ – положение БЦ гидронасоса гидропривода хода, определяющий расход рабочей жидкости гидропривода хода $Q_{ГМ}$ и скорость ведущего колеса гусеничного движителя ω_M^* .

Процесс регулирования положения рабочего органа осуществляется следующим образом. На вход подсистемы регулирования из БУВ подается сигнал $U_h^{зад}$, соответствующий требуемой величине заглабления РО. Так как величина заглабления РО h в данной системе определяется по величине перемещения штока гидроцилиндра привода РО $L_{РО}$, то расчетный блок 1 на основе кинематики привода рабочего органа конкретной модели роторного траншеекопателя формирует сигнал, соответствующий перемещению штока гидроцилиндра привода РО $U_L^{зад} = f(U_h^{зад})$.

В качестве датчика обратной связи в системе используется датчик положения штока гидроцилиндра РО.

В контуре регулирования положения РО использованы две коррекции, связанные с изменением рельефа местности, а именно продольным уклоном местности δ .

Первая коррекция объясняется следующим. При наезде на препятствие или изменении продольного угла наклона местности, характеризующихся углом δ , происходит поворот машины вокруг точки A (рис. 2) и, как следствие этого, дополнительное заглабление РО на величину $h_{\delta 1}$. Для учета этого на основе информации U_{δ} о продольном угле δ , получаемой с датчика продольного угла, в расчетном блоке 2 формируется сигнал коррекции положения штока гидроцилиндра привода РО $U_{L_{\delta 1}} = f(h_{\delta 1})$.

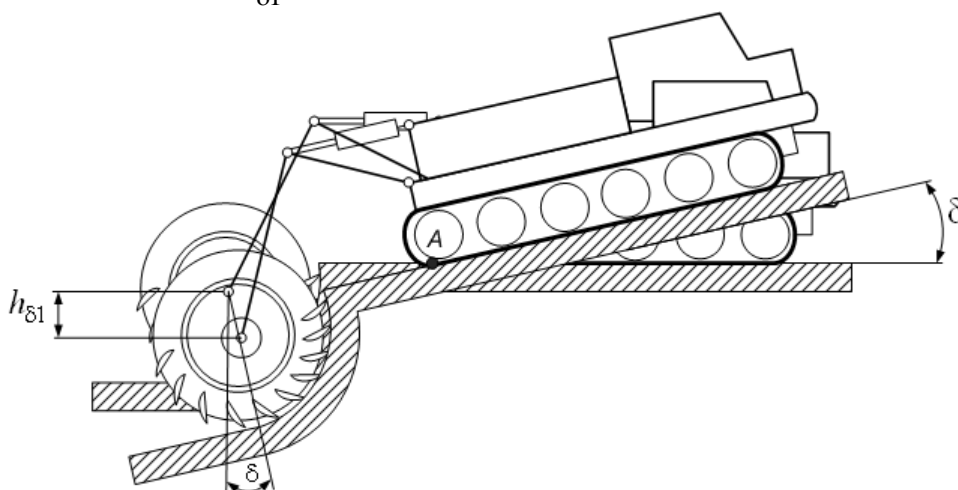


Рис. 2. Схема формирования заглабления РО за счет поворота машины на угол δ

Вторая коррекция основана на следующих положениях. При движении траншеекопателя по местности с продольным углом δ (рис. 3) происходит изменение глубины траншеи на величину $h_{\delta 2}$, которое формируется, исходя из

векторной диаграммы скоростей, как $h_{\delta 2} = \int v_{\text{верт}} dt$, где $v_{\text{верт}} = v_M \sin \delta \approx v_M \delta$ – вертикальная составляющая скорости машины; v_M – скорость траншекопателя с учетом продольного угла δ , причем для малых углов δ можно принять $\sin \delta \approx \delta$.

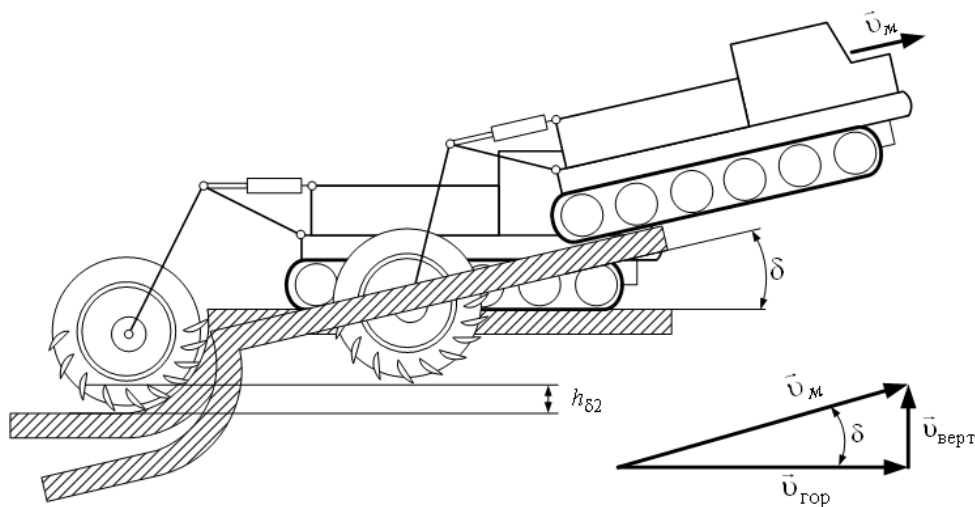


Рис. 3. Схема коррекции глубины траншеи при движении траншекопателя с учетом продольного уклона местности

Полученная величина изменения положения дна траншеи $h_{\delta 2}$ подлежит коррекции за счет изменения положения штока гидроцилиндра привода РО траншекопателя на величину теоретического смещения $U_{L_{\delta 2}}^{\text{теор}} = f(h_{\delta 2})$, а суммарная величина перемещения штока гидроцилиндра привода РО (без учета первой коррекции) примет значение $U_L^{\text{кор}} = U_L^{\text{зад}} + U_{L_{\delta 2}}^{\text{теор}}$.

Представленные принципы построения САУ РТ позволяют выполнять комплекс работ по отрывке траншей заданной глубины в автоматическом режиме, обеспечивая поддержание требуемой производительности машины и качества поверхности дна траншеи за счет регулирования положения рабочего органа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Автоматизация строительных и дорожных машин: учебное пособие /А.Ф. Тихонов, С.Л. Демидов, А.Н. Дроздов. ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». – Москва: МГСУ, 2013. – 256 с.
2. Бухгольц В.П., Снагин В.Т. Автоматическое управление роторными экскаваторами. М.: Недра, 1986.143с.
3. Шошиашвили М.Э., Булгаков А.Г. Автоматизация строительства нефте- и газопроводов// Серия «Технология, механизация и автоматизация строительства»: Обзор. информ./ ВНИИНТПИ.–М., 1999. Вып. 2. – 52 с.

4. Загороднюк В.Т., Шошиашвили М.Э. Робототехническая система для строительства магистральных трубопроводов // Мехатроника. - 2001. - №5. - С. 12- 17.

Научный руководитель: М.Э. Шошиашвили, д.т.н., зав. кафедрой Мехатроника и гидропневмоавтоматика, ЮРГПУ (НПИ).

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Л.А. Кашипова, Д.В. Макаров
Казанский государственный энергетический университет

Промышленные предприятия химической, нефтехимической, пищевой, целлюлозно-бумажной отраслей промышленности относятся к числу наиболее крупных потребителей топливно-энергетических ресурсов. Они характеризуются значительными потерями сбросной энергии. Следовательно, организация оптимальных структур предприятий с учетом возможности производства дополнительной энергии из сбросной является актуальной.

Теплоэнергетические системы промышленных производств представляют собой сложные объединения, состоящие из множества различных взаимозависимых аппаратов, различающихся по назначению, конструкции, по структуре включения в технологическую линию с учетом взаимодействия с системами энергообеспечения. Все аппараты в системе взаимосвязаны связями, каждая из которых несет информацию о давлении, температуре, энтальпии, расходе вещества; данная информация является либо результатом измерений на предприятии, либо результатом расчетов. На крупных объектах многие связи носят обратный характер, то есть направляются в один из предыдущих элементов. Следовательно, работа каждого аппарата схемы может влиять на работу последующих аппаратов, а также на графики энергопотребления и выхода вторичных ресурсов в той технологической линии, в которую включена данная связь [1-2]. Для исключения многочисленных итераций предлагается использовать вариацию системного анализа, включающего соподчиненно связанные друг с другом структурный анализ и расчетную составляющую методики оценки энергоэффективности и оптимизации промышленных технологических схем.

Структурный анализ позволяет представить промышленные теплоэнергетические системы в виде незамкнутой последовательности элементов и позволяет определить оптимальную последовательность расчета систем для анализа эффективности энергопотребления существующей технологии.

При проведении анализа структуры промышленных теплоэнергетических систем используется метод, основанный на анализе матриц смежности [3]. Матрица смежности представляет собой квадратную матрицу, количество строк и столбцов которой равняется количеству элементов-аппаратов в системе. Наличие значения в ячейке матрицы означает наличие потока в системе, иду-

щего из элемента, заданного номером строки в элемент, заданный номером столбца. Отсутствие значения – отсутствие потока.

Так, для известной теплоэнергетической системы, Рис. 1, рассмотренной в [3], матрица смежности будет следующей (табл. 1):

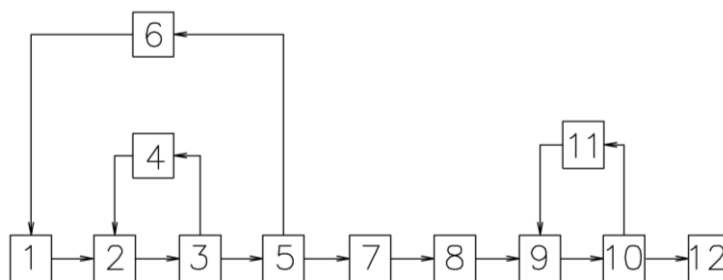


Рис. 1 Пример структуры теплоэнергетической системы

Таблица 1. Матрица смежности для системы

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1		1									
2			2								
3				3	5						
4		4									
5						6	8				
6	7										
7								9			
8									10		
9										11	
10											12
11									13		

Для осуществления структурного анализа была разработана программа на языке C# в среде Microsoft Visual Studio. Программа позволяет осуществлять удобный ввод матрицы в табличном виде, отображать каждое перемножение матрицы; выводить выявленные последовательности элементов, определять условно разрываемые потоки [4, 5].

Интерфейс разработанной программы выглядит следующим образом, Рис. 2.

В верхней части окна программы задается размерность матрицы в соответствии с количеством элементов в системе. Ниже в ячейки матрицы осуществляется ввод значений-номеров потоков, идущих из элементов, заданных номерами строк, в элементы, заданные номерами столбцов. Эти значения-номера используются далее при проведении термодинамического анализа систем, так как числовому значению ячейки соответствуют конкретные потоки с термодинамическими и расходными характеристиками.

В нижней части программы выводятся результаты (Рис. 2). Сначала введенная матрица переводится в булеву форму, содержащую только единицы и нули. Далее выводятся результаты по каждому перемножению матрицы. После некоторых перемножений выводятся выявленные на этом перемножении контуры элементов в системе.

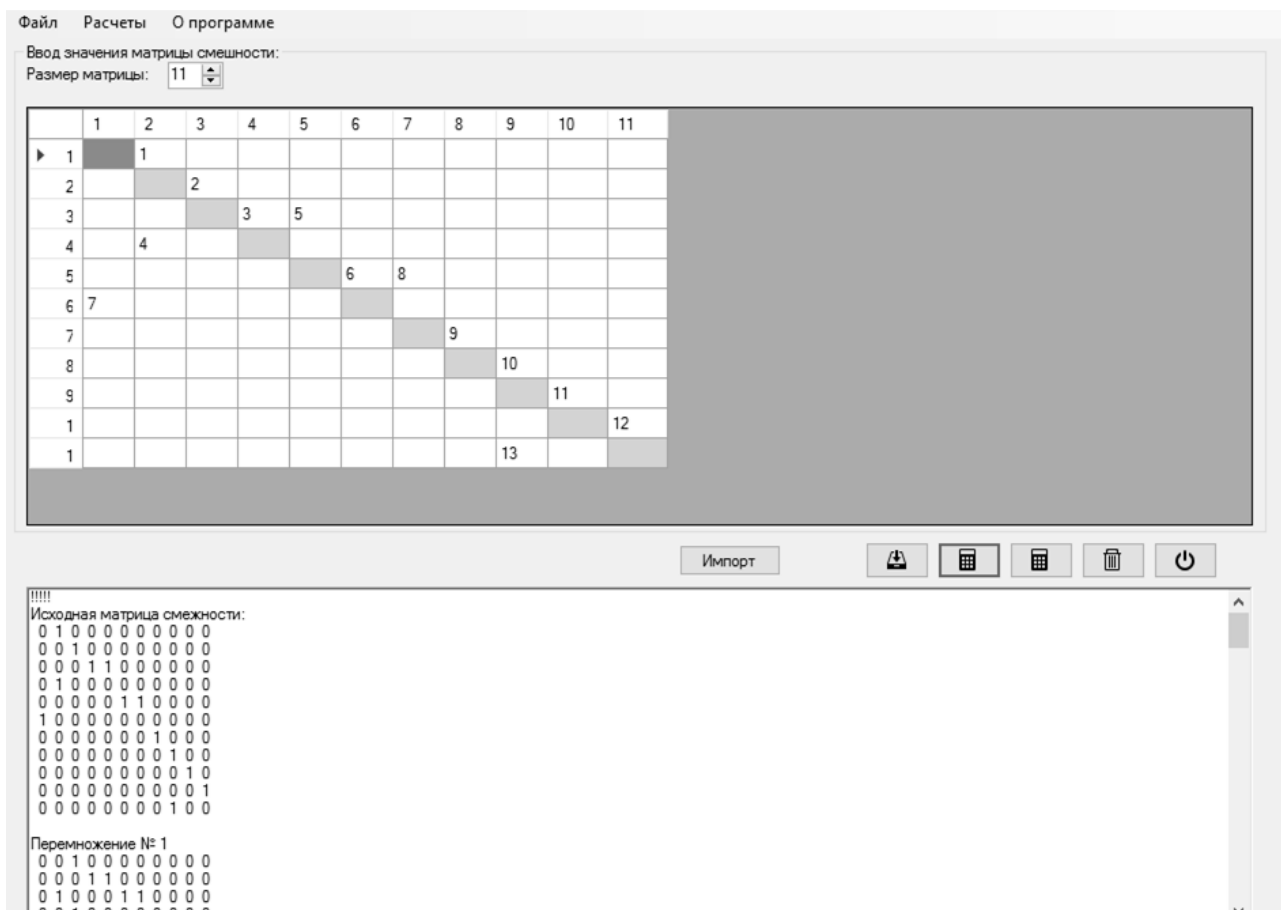


Рис. 2. Интерфейс разработанной программы структурного анализа сложных теплоэнергетических систем

Далее, для того чтобы представить промышленную теплоэнергетическую систему в виде незамкнутой последовательности элементов, то есть определить условно-линейную последовательность расчета, следует разомкнуть контуры, то есть осуществить разрыв потоков. Для определения оптимального, т.е. минимального количества потоков, условный разрыв которых позволит провести расчет системы, применяется метод, использующий матрицу цикла [3]. Минимальное количество разрываемых потоков можно получить, если в первую очередь разорвать поток, имеющий максимальную частоту, а затем потоки, имеющие минимальный ранг и максимальную частоту.

В разработанной программе выявленные контуры выводятся в нижней части окна результатов, Рис. 2. Также показаны разрываемые потоки, в данном случае это потоки, исходящие из элементов 2 и 9.

Таким образом, структурный анализ позволяет провести декомпозицию системы на отдельные группы контуров и свести расчет теплоэнергетической системы к расчету систем балансовых уравнений отдельных контуров.

Так, с использованием разработанной программы был осуществлен поиск оптимальной структуры сложных промышленных систем ряда производств, таких как участок пиролиза на производстве этилена, участок газоразделения на производстве этилена, участок производства бумаги на целлюлозно-бумажном производстве.

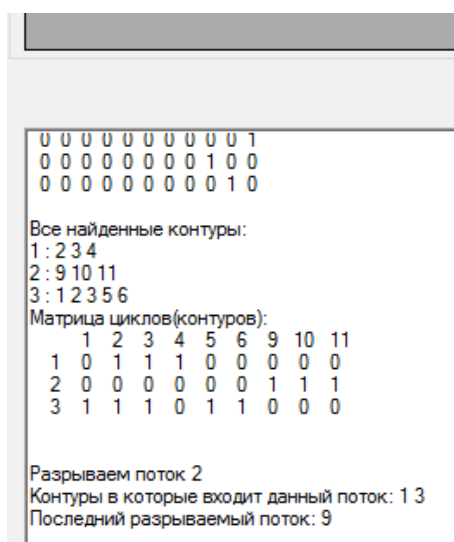


Рис. 2. Матрица циклов из выявленных контуров системы и условно разрывае-
мые потоки

ЛИТЕРАТУРА:

1. Назмеев Ю.Г., Конахина И.А. Теплоэнергетические системы и энерго-балансы промышленных предприятий. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 407 с
2. Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А. Оптимальное управление энерготехнологическими процессами в производственных комплексах // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2008. № 3. С. 51-55.
3. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.
4. Плотникова Л.В., Звегинцев А.А., Кашипова Л.А., Ишмуратов Р.А., Нуриев Н.К. Программная реализация системного анализа сложноструктурированной химико-технологической схемы нефтехимического производства // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 8. С. 198-202.
5. Кашипова Л.А., Фаздалова А.И. Моделирование энергоэффективных промышленных схем рекуперации ВЭР на основе применения программного комплекса // Радиоэлектроника, Электротехника И Энергетика. Тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. – М.: МЭИ, 2016. - С. 345.

Научный руководитель: Л.В. Плотникова, к.т.н., доцент кафедры ИИУС КГЭУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Ахмад Рами Камал, Аль-Джабри Адель Яхья Али

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Представляется автоматическая система управления для деаэрата парогенератора. Моделирование осуществлено в среде MATLAB

Ключевые слова: автоматическая система управления, деаэрация парогенератора, моделирование

В нефтегазовой промышленности основные углеводородные запасы составляют тяжелые, сверхвязкие и высокосернистые нефти, характеризующиеся многофазностью и дисперсностью. Зависимость дисперсных свойств нефти от температуры в климатических условиях определяющим образом влияет на эффективность ее транспортировки и переработки. Это обстоятельство определяет важную проблему при оптимизации режимных параметров, влияющих на экономическую эффективность и себестоимость не только добычи и переработки нефти, но и на себестоимость производства.

В таких условиях при добыче нефти расходуется до 5 тонн пара на одну тонну нефти, что определяет важность правильного выбора и поддержание оптимального режима работы парогенераторов. Качество пара определяется установленными теплофизическими параметрами, а также содержанием остаточного кислорода. При отклонении данного параметра от нормы возможен активный коррозионный процесс, который приводит к снижению ресурса паропроводов.

Рассматривается термический деаэратор модульной котельной, качество работы которой оценивается по остаточному содержанию кислорода. Представляется структурная схема автоматической системы регулирования остаточного содержания кислорода путем изменения выпара с контроллером с традиционной (ПИ, ПИД) и интеллектуальной алгоритмами управления.

Определение динамических характеристик осуществляется по экспериментальным переходным характеристикам, полученным Феткулловым М.Р.

После получения передаточной функции, при помощи средства разработки MATLAB (в исследовании использовалась пробная полнофункциональная версия с ограниченным периодом использования) реализована математическая модель системы автоматического управления в виде алгоблоков [1-3]. Симуляция динамики процесса управления технологическим процессом позволяет получить и анализировать переходные характеристики с целью оптимизации показателей качества. Для системы управления концентрацией остаточного кислорода важными являются быстрдействие системы, статическая и динамическая точность. Данные показатели можно определить по графику переходного процесса.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Теория автоматического управления: Учеб. Для вузов/ С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; Под ред. В.Б. Яковлева.- М.: Высшая школа, 2003.-567 с.: ил.
2. <http://www.mathworks.com>.
3. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. - 400 с: ил.

Научный руководитель: К.Х. Гильфанов д.т.н., профессор КНИТУ.

БЕСПРОВОДНОЙ МОНИТОРИНГ ОСНОВНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А.А. Кабанов

Омский государственный технический университет

Устройства мониторинга, использующие беспроводные технологии передачи измерительной информации, находят все более широкое применение в наше время. Значительную долю параметров мониторинга составляют такие физические величины, как температура и влажность.

На рынке приборостроения имеет место наличие большого количества технических решений данной задачи, но по тем или иным причинам их нельзя считать приемлемыми для мониторинга аппаратуры серверных помещений, без которых не обходится ни одно современное предприятие. Так как происходит полная автоматизация всех технологических процессов [1].

Преимущества именно беспроводного интерфейса для датчиков физических величин очевидны в силу того, что системный администратор или оператор далеко не всегда находится в серверной и не имеет возможности непосредственного отслеживания температуры и влажности [2].

Представленная система удаленного мониторинга основана на программно-аппаратных средствах платформы Arduino с микроконтроллером Atmega 328P. Это 8-битный микроконтроллер, работающий на тактовой частоте до 20МГц, имеющий встроенный АЦП и ЦАП на 8 каналов. Устройство является малогабаритным, при этом условия эксплуатации данных средств вполне удовлетворяют поставленным требованиям.

Анализ существующих первичных измерительных преобразователей выявил перспективность использования в качестве датчика температуры и влажности сенсорной микросхемы SHT21. Это изделие имеет весьма высокие метрологические характеристики: разрешающая способность по влажности 0,7%, по температуре 0,04°C. При этом основная погрешность по температуре и влажности не превышает $\pm 0,3^\circ\text{C}$ и $\pm 2\%$ соответственно.

Передатчик измерительного радиоканала 434МГц реализует принцип кодоимпульсной модуляции, выполнен на типовой схеме и имеет выходную

мощность на эквиваленте нагрузки 50 Ом до 15 мВт при напряжении питания 5В (возможно увеличение напряжения питания до 12 В и как следствие увеличение дальности передачи). Стабильность частоты передачи обеспечивается за счет использования фильтра ПАВ, выполняющего функцию пьезокерамического резонатора, и соответствует требованиям технического регламента для данного радиочастотного диапазона [3]. Принципиальная схема передатчика приведена на рисунке 1.

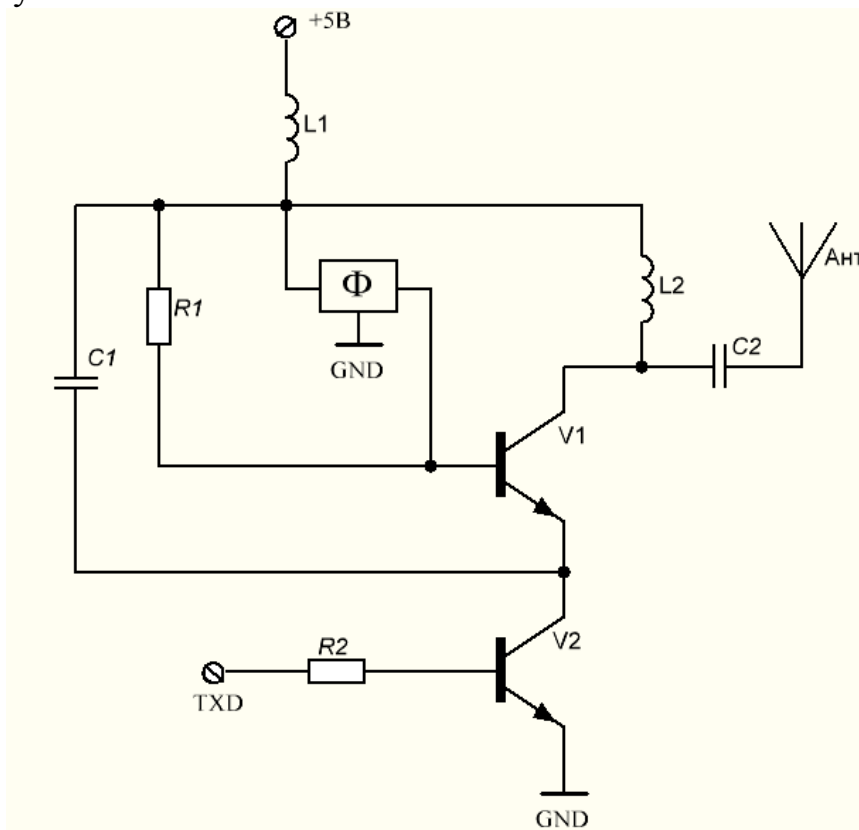


Рис.1. Принципиальная схема передатчика

Функциональная схема приемника кодоимпульсного модулированного сигнала приведена на рисунке 2 [4].

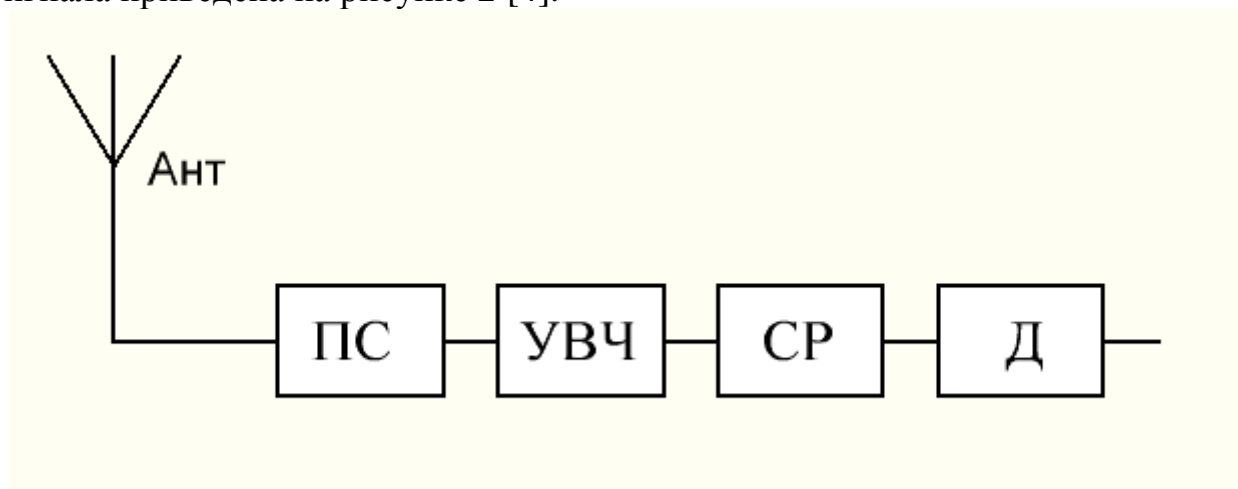


Рис. 2. Функциональная схема приемника

Схема приемника содержит приемную антенну в виде четвертьволнового штыря, преселектор, однокаскадный апериодический УВЧ, сверхрегенератор и блок детектирования кодоимпульсных сигналов.

Система беспроводного мониторинга производит измерения внутри серверной и передает информацию на пульт системного администратора. Микроконтроллер на стороне приема производит обработку полученной информации (масштабирование, коррекция аддитивной и мультипликативной погрешности, линеаризация номинальных статических характеристик и т.д.) с последующим выводом на монитор и регистрирующее устройство, например, флэш-карта стандарта SD [5]. При достижении отслеживаемых параметров критических значений, активируется устройство акустического оповещения и выводится соответствующее сообщение на дисплей [6]. Также возможна установка дополнительных модулей для создания полностью автоматизированной системы мониторинга серверного помещения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Устройства мониторинга серверных комнат и удаленного управления электропитанием [Электронный ресурс] – Режим доступа:
2. <http://www.netping.ru>
3. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский, Киев: Высш. школа, Главное изд-во, 1983. – 455 с.
4. С.И. Баскаков Радиотехнические цепи и сигналы, 1988г.,447с.
5. Ротхаммель К. Антенны 1 том/ К. Ротхаммель, - Москва, 2005г., 409с.
6. Д. Блум Изучаем Arduino инструменты и методы технического волшебства, 2015г.,336с.
7. Хоровиц П. Искусство схемотехники / Хоровиц П., У.Хилл., 3-е издание. – М.:Мир, 1986.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ВИСБРЕКИНГА

М.П. Морозова, Т.А. Гречная
Белорусский государственный технологический университет

Висбрекинг — процесс однократного термического крекинга тяжелого остаточного сырья, проводимый в мягких условиях. Типичное сырье висбрекинга — мазуты, получаемые при атмосферной перегонке нефти, или вакуумные гудроны.

Для висбрекинга гудрона условия процесса такие: температура 460–500 °С; давление 1,4–3,5 МПа. Длительность пребывания сырья в зоне реакции определяется с помощью уравнения скорости реакции первого порядка. Требуемый объем реакционной зоны, т. е. того участка змеевика, где температура сырья превышает 399 °С, составляет 3,6–4,8 м³ на каждые 1000 м³ перерабатываемого жидкого сырья в сутки.

Каталитический крекинг – термокatalитическая переработка нефтяных фракций с целью получения компонента высокооктанового бензина, легкого га-

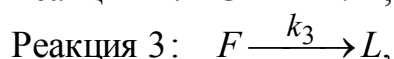
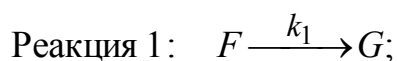
зойля и непредельных жирных газов. Каталитический крекинг – один из важнейших процессов, обеспечивающих глубокую переработку нефти.

Решить их эффективно можно путем установки системы оптимизации печей. Такая система обеспечит точное реагирование температуры на выходе каждой печи. Совместно с этой системой рекомендуется установка специальных контрольно-измерительных приборов, гарантирующих корректное измерение параметров, характеризующих работоспособность оборудования для приближающего отказа. Для моделирования процессов при риформинге приходится учитывать процессы гидродинамики, массообмена и химической кинетики.

Для моделирования реакторов каталитического риформинга используют работы Crane др. (1959), который применял сосредоточенное математическое представление реакции, которые происходят. Эти представления записаны в терминах изомеров одного и того же характера (парафины, нафтены, или ароматические). Оригинальная модель Crane. (1959) включает 53 химические реакции, которые суммируются.

Некоторые авторы идут на упрощение и модификации с целью упрощения и выделения целевых параметров процесса реформинга. Помимо расчета реформинга состав, профили температуры и давления вдоль системы реакторов, модель разработана может быть использован для анализа другие аспекты каталитического реформинга. Turpin (1992) предложил использовать для расчета глобальные и водородные материальных балансы, сравнение экспериментальных и расчетных концентраций [1].

Химические процессы, протекающие в реакторе каталитического крекинга, являются сложными и сопровождаются рядом одновременно протекающих химических реакций. Согласно редуцированной модели реактора, эти реакции можно разделить на три вида:



где F – это сырье (гидроочищенный вакуумный дистиллят, иначе газойль), G –целевой продукт (бензин), L –легкие газовые фракции (в частности кокс). Первая реакция желаемая, так как бензин является целевым продуктом. Реакции 2 и 3 являются побочными, т.е. нежелательными реакциями.

Лифт-реактор считается реактором идеального вытеснения (рис. 1), так как соотношение длины реактора к его диаметру велико, а реакция протекает в течение нескольких секунд.

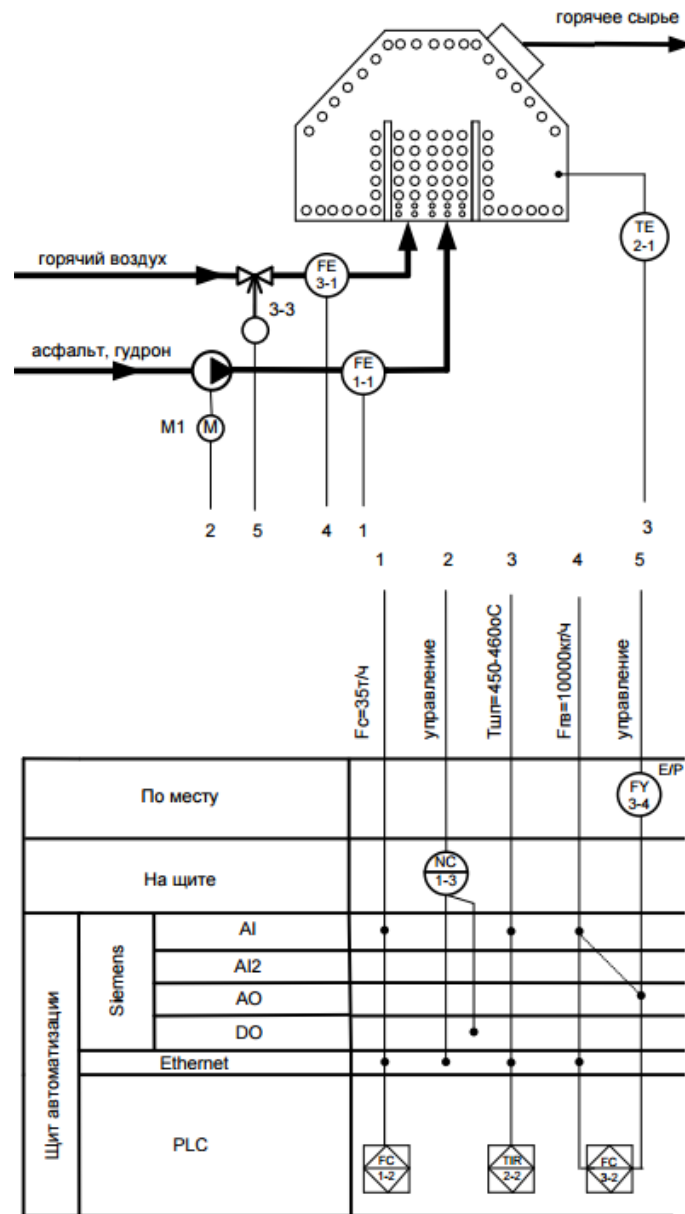


Рис. 1. Фрагмент функциональной схемы автоматизации

Ниже приведена математическая модель реактора на основе материальных и тепловых балансов.

Материальный баланс по сырью:

$$\frac{dy_f}{dz} = -R_1^0 t_c [COR] \Phi_0 (y_f)^2 \exp \frac{-E_f}{RT_0(1+\theta)} \exp(-\alpha t_c z),$$

Материальный баланс по выходному продукту:

$$\frac{dy_g}{dz} = -R_1^1 t_c [COR] \Phi_0 (y_f)^2 \exp \frac{-E_f}{RT_0(1+\theta)} \exp(-\alpha t_c z) -$$

$$-R_2^0 t_c [COR] \Phi_0 (y_g)^2 \exp \frac{-E_g}{RT_0(1+\theta)} \exp(-\alpha t_c z),$$

где y_f – массовая доля газойля в парах в реакторе; z – безразмерная переменная длины; R_1^0 – постоянная скорости реакции образования газойля; R_1^1 – постоянная скорости реакции образования газойля; R_1^2 – постоянная скорости

реакции получения углерода; COR – массовое соотношение катализатора к нефти; Φ_0 – активность катализатора во входе в реактор; E_f – энергия активации для крекинг газойля; T_0 – температура сырья при поступлении в реактор; θ – безразмерная переменная температуры; t_c – время нахождения катализатора в реакторе; α – коэффициент старения катализатора; y_g – массовая доля газойля в парах в реакторе; E_g – энергия активации для крекинг газойля.

Тепловой баланс:

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\lambda \Delta H_f F_0}{T_0 (F_s C_{ps} + \lambda F_0 C_{po} + (1-\lambda) F_D C_{pD})} \frac{dy_f}{dz},$$

где λ – массовая доля газойля в сырье; ΔH_f – теплота реакции крекинга газойля; F_0 – подача сырья (нефть + пар) в реактор; F_s – скорость циркуляции катализатора; C_{ps} – теплоемкость катализатора; C_{po} – теплоемкость газойля; C_{pD} – теплоемкость пара; F_D – скорость подачи пара.

Регенератор можно представить в виде реактора идеального смешения. Ниже представлена модель регенератора:

Материальный баланс по коксу:

$$\frac{d(WC_{RC})}{dt} = F_S (C_{SC} - C_{RC}) - ky_{\infty} C_{RC} W.$$

Материальный баланс по кислороду:

$$\frac{d(W_{\alpha} y_{\infty})}{dt} = R_A (y_i - y_{\infty}) - \frac{1+1,5\sigma}{M_C (1+\sigma)} ky_{\infty} C_{RC} W.$$

Тепловой баланс:

$$\frac{d(T_{rg}(WC_{ps}))}{dt} = T_{ri} F_S C_{ps} + T_{\alpha} F_{\alpha} C_{pa} - T_{rg} (F_S C_{ps} + F_{\alpha} + C_{pa}) - \left(\Delta H_{CO} + \frac{\sigma}{1+\sigma} \Delta H_{CO_2} \right) \frac{ky_{\infty} C_{RC} W}{M_C},$$

где W – масса катализатора в регенераторе; W_{α} – масса воздуха в регенераторе; C_{RC} – массовая доля кокса в восстановленном катализаторе; R_A – подача воздуха в регенератор; k – коэффициент выжигания кокса; C_{SC} – массовая доля кокса в использованном катализаторе; y_{∞} – мольная доля кислорода в регенераторе; σ – соотношение CO_2/CO в дымовых газах; M_C – молярная масса кокса; T_{rg} – температура катализатора на выходе из регенератора; T_{ri} – температура на выходе из реактора; T_{α} – температура воздуха, подаваемого в регенератор; F_{α} – массовый расход воздуха в регенератор; C_{pa} – теплоемкость воздуха; ΔH_{CO} – тепло, выделяемое при образовании CO ; ΔH_{CO_2} – тепло, выделяемое при образовании CO_2 .

Уравнения характеризуются высокой нелинейностью, и решаются в каждом конкретном случае в зависимости от начальных условий. В большинстве случаев передаточную функцию по каналам сводят к апериодическому звену с запаздыванием. Примем, что каждый канал связи может быть охарактеризован апериодическим звеном первого порядка без чистого запаздывания [2]:

$$W(s) = \frac{k_m}{T_s s + 1} \exp(-\tau s),$$

где k_m – коэффициент усиления; T_s – временная постоянная; s – оператор Лапласа; τ – время запаздывания.

С помощью полученные передаточные функции можно определится только с начальными настройками и структурой управления. Сырье характеризуется постоянным изменением состава, изменяются условия эксплуатации и для повышения эффективности автоматизации требуется использование алгоритмов идентификации. Это может позволить обеспечить и завязку на экономические критерии управления всей установкой.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти. – М.: Химия, 2005. – 670с.
2. Гаврилов А.И., Пашаева Б.А. Интеллектуальная система управления каталитическим крекингом нефти// Интеллектуальные системы: Труды девятого международного симпозиума/ Под ред. К.А.Пупков 2010. - С. 637-641.

Научный руководитель: Д.А. Гринюк, к.т.н., доц., кафедра АППиЭ, БГТУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

А.А. Закамалдин, В.С. Андык
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП

1. Введение

Непостоянство скорости ветра - главный недостаток ветроэнергетики, который обязывает уделять огромное внимание проблеме повышения регулировочной способности ветроэнергетических установок (ВЭУ).

Работы по улучшению динамической устойчивости путем применения нечеткой логики были рассмотрены в публикациях [1-4]. Несмотря на заметный прирост в качестве и гибкости процессов управления, у подхода есть существенный недостаток - зависимость от условий (характеристик ветровой нагрузки, технических параметров ВЭУ и др.). Поэтому необходимы априорные знания в достаточно полном объеме. Применение нечеткой логики в других областях [5-8] характеризуется тем же недостатком.

Учитывая нелинейный характер рабочих характеристик ВЭУ, целесообразно провести исследование по оценке применимости теории искусственного интеллекта для синтеза системы управления ВЭУ, а именно технологии ANFIS

– адаптивной нейронной сети прямого распространения с нечетким логическим выводом.

2. Экспериментальная модель

Рабочая модель ВЭУ представлена на рисунке 1. Состоит из следующих основных компонентов:

1. Ветровая турбина (1,5 МВт), работающая с переменной скоростью вращения ротора, в модификации с асинхронным генератором двойного питания представлена блоком «Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)». В блок включены системы управления углом атаки лопастей ветроколеса и скоростью вращения ротора генератора, работающие по классическому принципу с применением П, ПИ регуляторов.
2. Блок «Wind Speed», реализующий динамическую модель продольной составляющей скорости ветра, построен согласно требованиям [9] и методике [10].

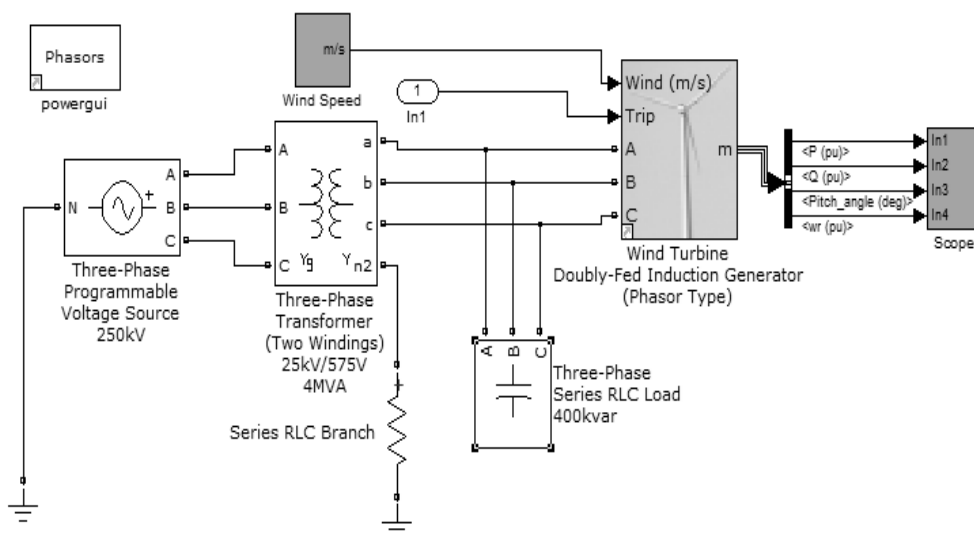


Рис. 1. Модель ВЭУ

3. Методика исследования

Предлагается интегрировать в модель ВЭУ разработанный алгоритм управления ANFIS со структурой (рисунок 2), построенной на совместной архитектуре, предложенной в [8]. Также за основу приняты результаты исследований в области систем нечеткого управления ВЭУ [4, 11].

Типовой регулятор (Pr) обрабатывает в течение формирования первой обучающей выборки данных. Затем ANFIS обучается по полученным данным об объекте управления, и с помощью блока переключения (БП) включается в контур управления.

Нечеткий регулятор организован на алгоритме нечеткого вывода Сугэно первого порядка с треугольными «trimf» функциями принадлежности. В качестве алгоритма обучения ANFIS принят гибридный алгоритм [5, 7], совмещающий метод градиентного спуска и метод наименьших квадратов.

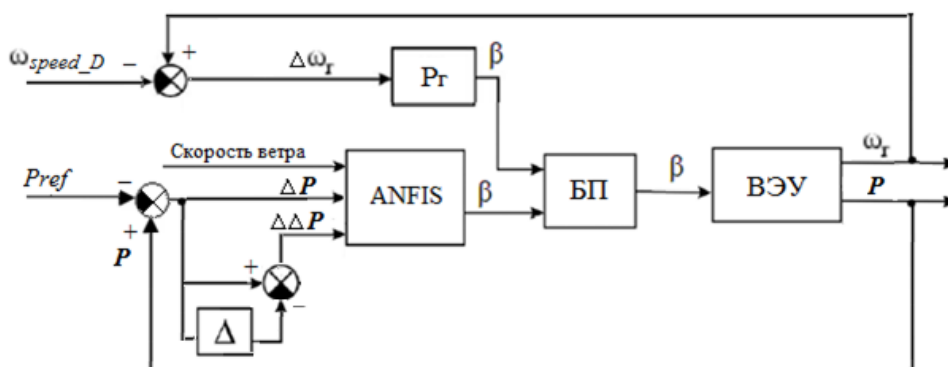


Рисунок 2. Структурная схема системы управления углом атаки: ω_{speed_D} , P_{ref} – уставки; ω_r – угловая скорость вращения ротора генератора; P – активная мощность; β – управляющий сигнал на изменение угла атаки; Δ - блок задержки

Тестируя одновременно классическую систему и ANFIS на временном промежутке моделирования 160 с, получены следующие результаты (рисунок 3).

4. Обсуждение результатов

Система управления углом атаки активна в интервале 56 – 117 с. В этой области классическая САУ углом атаки работает неэффективно, изменяя угол атаки скачкообразно (при этом уменьшая ресурс приводов поворотных лопаток из-за периодических переключений). Также видны флуктуации (скачки) величины вырабатываемой электрической мощности. Скачки начинают появляться при выходе ВЭУ на номинальную мощность. Видно, что стандартная САУ не справляется с инерцией ВЭУ. На всем интервале система ANFIS качественно обрабатывает за исключением области (80 – 88 с), где постоянная составляющая скорости ветра начинает уменьшаться. Это связано с недостаточным обучением нейронной сети, что, возможно, отразилось именно на случае перегиба постоянной скорости ветра. Учитывая преимущества нейронной сети, дополнительные циклы обучения должны восполнить этот недостаток.

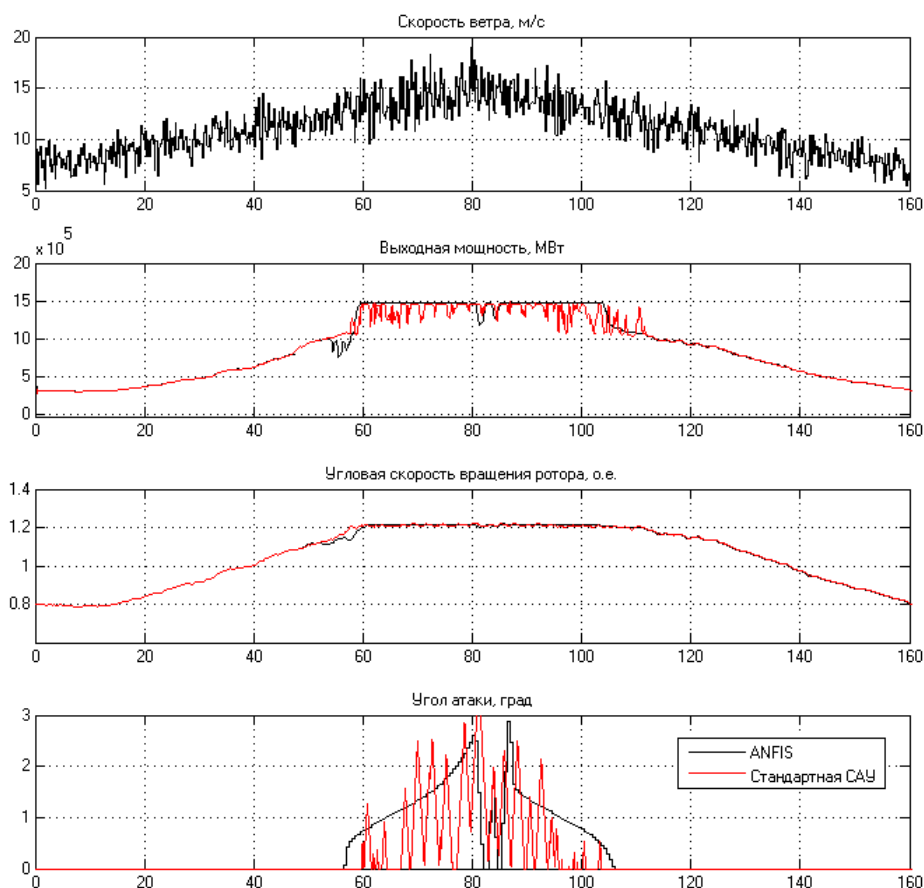


Рисунок 3. Зависимости характеристик ВЭУ и скорости ветра от времени моделирования

4. Выводы

Результаты сравнения показывают, что для разработанной системы управления плавность управляющих сигналов углом атаки намного выше, чем для стандартной, что позволяет снизить колебания (флуктуации) вырабатываемой мощности, а также снизить нагрузку от частых включений/выключений на приводы поворотных лопастей.

При реализации концепции управления только на нечеткой логике необходимы экспертные оценки для составления базы нечетких правил, где имеет место ошибка в оценке данных. Настройка нечеткой системы путем адаптации к объекту продемонстрировала хорошие интегральные показатели. Моделирование ANFIS системы было проведено в условиях только одного полного цикла обучения, что могло повлиять на не оправдывающее себя качество регулирования в некоторых зонах работы ВЭУ. Проведение экспериментов для последующих циклов переобучения, т.е. с системой переобучающейся постоянно в режиме онлайн, должно повысить динамическую точность.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зубова Н.В. Повышение режимной управляемости ветроэнергетических установок с изменяемой геометрией лопастей регуляторами на нечеткой логике: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 – Электрические

- станции и электроэнергетические системы / Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Новосибирск, 2014. – 190 с.
2. Удалов С. Н., Манусов В. З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики. – Новосибирск: Издательство НГТУ. – 2013.
 3. Удалов С. Н. Управление ветроэнергетической установкой с изменяемой геометрией лопасти на основе нечеткого контроллера // науч. Вестн. НГТУ. – 2010. – №1(38). – С. 159-173.
 4. Санкевич С. А., Петренко Ю. Н. Применение контроллера нечеткой логики для управления ветроэлектрической установкой // Информационные технологии и системы 2012: материалы междунар. науч. конф. – Минск: БГУИР. – 2012. – С. 66-67.
 5. Володин А.А. Системный анализ и управление сложными биосистемами на базе нейро-нечетких регуляторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в технике и технологиях) / Северо-Кавказский федеральный ун-т. Ставрополь, 2014. – 214 с.
 6. Омату, С. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 / С. Омату, М. Халид, Р. Юсоф. – М.: Радиотехника, 2000. – 272 с.
 7. Аль Зихери Б. М. Повышение точности краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки потребителей региона с учетом метеофакторов на основе метода опорных векторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы / Южно-Российский гос. политехнический ун-т (НПИ) им. М.И Платова. Новочеркасск, 2015. – 181 с.
 8. Палис Ф. и др. Применение нейрофаззи сетей для управления сложными нелинейными динамическими объектами с переменными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2006. – №. 3. – С. 25-33.
 9. International Electrotechnical Commission et al. IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements // International Electrotechnical Commission. – 2005.
 10. Обухов С. Г., Плотников И. А., Сарсикеев Е. Ж. Динамическая модель продольной составляющей скорости ветра // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5.
 11. Zhang J. et al. Pitch angle control for variable speed wind turbines // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on. – IEEE, 2008. – С. 2691-2696.

ГАРМОНИЧЕСКАЯ И МЕАНДРОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Н.М. Олиферович, А.С. Астапенко

Белорусский государственный технологический университет

На практике для технологических объектов управления, связанных с процессами тепло- и массообмена, с целью поддержания стабильности режимов требуется одновременно с регулированием проводить идентификацию параметров объекта управления. Это обусловлено следующими факторами: распределенностью параметров температуры и концентрации; нелинейными свойствами этих процессов. Особенно это касается объектов с широким диапазоном регулирования. При этом, организация периодических активных экспериментов сопряжена с большими экономическими затратами, а пассивные эксперименты на основании корреляционного анализа не всегда позволяют обеспечить приемлемое точность определения передаточных функция объекта ввиду влияния метрологических свойств каналов информации.

С целью определения динамических характеристик технологических процессов предлагается воздействовать на объект смесью гармонических сигналов, выбранных таким образом, чтобы они находились в области значительных изменений амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), и, в то же время, вторичные гармоники, которые образуются при прохождении сигнала через выходной цифро-аналоговый и входной аналогово-цифровой преобразователи, по минимуму попадали в спектр других гармонических сигналов. Выделение сигнала предполагается производить путем квадратурной демодуляции [1].

Пропустив гармонический сигнал через квантователь по уровню, можно получить следующие зависимости вторичных гармоник 3, 5, 7, 9, 11, 21, 31 отнесенных к амплитуде первой гармоники от количества разрядов N , которые преподают на размах полезного сигнала (рис. 1).

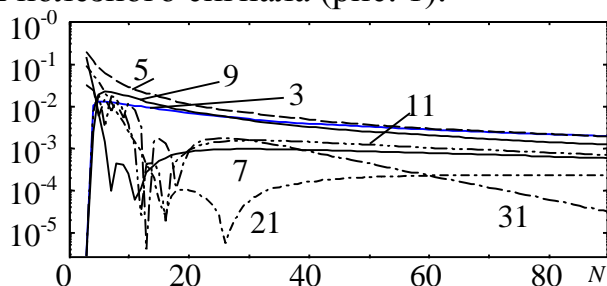


Рис. 1. Отношение амплитуды 3, 5, 7, 9, 11, 21, 31 гармоники к амплитуде первой гармоники в зависимости от количества разрядов припадающем на размах гармонического сигнала

С целью сравнения возможностей определения в реальном времени динамики технологических объектов в условиях ограничения на количество разрядов на выходе, для апериодического объекта третьего порядка с постоянными временами 150 с; 50 с; 16,7 с было проведено математическое моделирование в Matlab гармонической (ГИ) и меандровой (МИ) идентификации. Настройки пропорционально-интегрального регулятора были выбраны с использованием

минимизации критерия [2] с расчетом на отсутствие колебательности переходного процесса.

Далее были выбраны контрольные гармоники (КГ), при этом руководствовались таким диапазоном частотной характеристики, который обеспечит максимальное изменение коэффициента передачи частотной характеристики объекта (рис. 2).

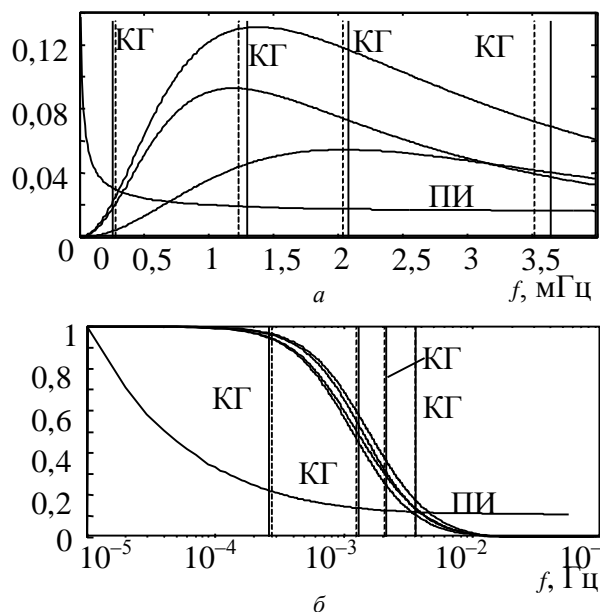


Рис. 2. Относительные изменения АЧХ - а; АЧХ объекта - б при вариации его постоянных и положения выбранных КГ для ГИ (сплошные) и МИ (штрихпунктирные) и АЧХ ПИ-регулятора

Первоначально выбиралась самая высокочастотная КГ1, затем более низкочастотная, такая, чтобы высокочастотная КГ находилась между вторичными гармониками низкочастотной. Далее выбиралась еще более низкочастотная, опять же с условием отдаления ее спектра от уже выбранных, в частности, в эксперименте использовались КГ с частотами 0,274; 1,23; 2,03; 3,52 мГц.

Частота меандрового сигнала была выбрана из условия выхода объекта на стационарное состояние с погрешностью не выше 0,5 % и составила 0,2604 мГц. В ходе эксперимента определяемые гармоники меандрового сигнала (МС) выбирали исходя из близости к КГ гармонической идентификации, в частности 1, 5, 8 и 14 (рис. 2). Амплитуда МС ± 1 .

Амплитуды КГ подбирались таким образом, чтобы на выходе путем перерасчета получались одинаковые значения, исходя из коэффициентов передачи по АЧХ объекта. Суммарная мощность четырех КГ регулировалась общим коэффициентом так, чтобы она была равна мощности МС. Отдельно проводилось моделирование при уменьшении общего коэффициента на 0,5 (ГИ05). Фрагмент тестовых сигналов при дискретизации по уровню 0,5 и без дискретизации показан на рис.3.

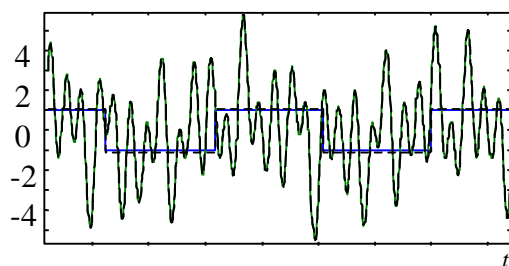


Рис. 3. Фрагмент тестовых сигналов

Далее производился отдельный анализ возможности идентификации объекта при отсутствии обратной связи и с обратной связью, при добавлении тестового сигнала (ТС) после регулятора либо по каналу задания (SP) (рис. 4).

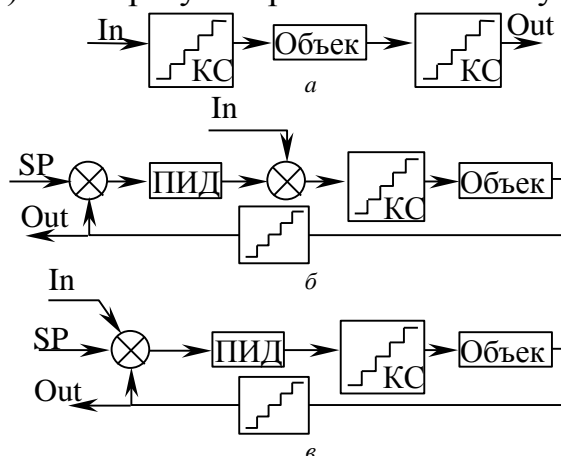


Рис. 4. Структуры моделирования: при отсутствии обратной связи (S1) – а; с обратной связью, при подаче ТС после регулятора (S2) – б; с обратной связью, при подаче ТС по каналу задания (S3) – в. In – точка приложения ТС; Out – выходной сигнал для анализа

Уровень квантователя (разница между соседними значениями) менялся синхронно на входе и на выходе с выбором точек по логорифмической зависимости от минимальных значений до 0,514, т.е. немного больше уровня половины МС. Моделирование ГИ и МИ производилось при одном уровне квантователя в рамках одной модели Simulink для обеспечения одинаковой точности. Моделирование проводилось на промежутке достаточном для выхода сигналов квадратурных демодуляторов на стационарное значение. Амплитуда и фаза сигналов определялись как среднее значение последних 1000 точек. Также производилась оценка дисперсии значений.

Анализ результатов показал, что предложенный способ ГИ имеет большую точность в определении динамики в режиме реального времени. Из всех структур наилучшую точность показывает вариант идентификации без обратной связи S1. Наихудшие показатели – в случае воздействия на объект по каналу задания. Наличие обратной связи существенно влияет на форму сигналов, которые поступает на вход контроллера для анализа. Если для структуры S1 выход мало отличается от фрагмента показанного на рис. 3 (только высокочастотные составляющие теряют амплитуду больше чем низкочастотные), то S2 вносит значительные изменения в форму сигнала и затрудняет анализ. Наибольшее уменьшение мощности отклонения выходного сигнала происходит в S2, вследствие его подавления обратной связью с регулятором.

Дальнейшая процедура предполагает восстановление всей АЧХ с помощью интерполяции. Один из лучших вариантов функции $\sin(x)/x$. Однако в большинстве технологических задач можно корректировать настройки регулятора непосредственно по колебаниям амплитуд и фаз КГ.

Для МИ можно увеличить точность идентификации путем увеличения количества определяемых гармоник. МИ показывает лучшие результаты при работе по структуре S3. Наибольшие проблемы МИ проявляются в определении высокочастотной АЧХ объекта. В зависимости от особенностей объекта и настроек регулятора результаты могут изменяться. Следует отметить, что погрешность в определении гармоник во втором знаке начинается с уровня 0,05 квантования при МИ, что может быть приемлемо для ряда прикладных задач.

Результаты эксперимента показали, что ГИ обладает большим потенциалом по сравнению с МИ. Использование узкополосных фильтров квадратурной демодуляции позволяет существенно уменьшить погрешности, которые вносит квантование. Раздельная генерация гармоник с индивидуальным изменением амплитуды позволяет обеспечить точность определения частотной характеристики объекта на более широком диапазоне регулирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х т. Том. 2. М.: Мир, 1983. 256 с.
 2. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости // Труды БГТУ. - 2012. - № 6: Физ.-мат. науки и информатика. - С. 118-121.
1. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти. – М.: Химия, 2005. – 670с.

Научный руководитель: Д.А. Гринюк, к.т.н., доц., кафедра АППиЭ, БГТУ; И.О. Оробей. к.т.н., доц., кафедра АППиЭ, БГТУ.

СЕКЦИЯ 3.
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ
ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

РОЛЬ КОГЕНЕРАЦИИ В СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

А.К. Бородин

Казанский государственный энергетический университет

Задачей, на решение которой направлены многие изобретения последних лет в сфере энергетики, является создание надежного энергоэффективного оборудования, позволяющего обеспечить качественный рост генерирующих мощностей различных энергогенерирующих источников в условиях интеграции рынка электрической и тепловой энергий. В связи с этим актуальным стали разработка и использование когенерационной установки, в основу функционирования которой положен процесс когенерации – комбинированной (одновременной) генерации электрической и тепловой энергии.

Технологические основы когенерации были заложены еще в 1895 году в Гамбурге: в ходе реконструкции электростанции «Центральная» паровые машины были переведены в режим комбинированной выработки электрической и тепловой энергии за счет подачи отработанного пара в здание Новой ратуши на нужды отопления [1]. В промышленных масштабах технология когенерации стала применяться лишь в XX веке.

В России большая когенерация представляет собой хорошо развитый сектор, однако сегмент малой когенерации, несмотря на все предпосылки (высокая стоимость топлива, изношенность основных фондов в электроэнергетике, значительные потери при передаче энергии на дальние расстояния и т.д.), находится на этапе своего становления.

Рассмотрим положительные стороны малой когенерации.

Сильной стороной когенераторных установок является тот факт, что они мобильны, легко монтируются, хорошо вписываются в электрические сети города (при параллельной работе с сетью), покрывают недостаток генерирующих мощностей. Очевидно, что с точки зрения бесперебойности энергоснабжения когенерационную установку можно назвать надежной формой обеспечения объектов качественной электрической и тепловой энергией без реконструкции сетей – потребитель застрахован от перебоев и потерь, имеющих место при централизованном электро- и теплоснабжении.

В рамках малой когенерации проблему сезонного спада тепловых нагрузок и неравномерного суточного потребления электроэнергии можно решить путем секционирования (пакетирования) когенераторных установок. Действительно, линейная зависимость потребления топлива для когенератора важна, начиная с 15-20% номинальной мощности. Секционируя общую мощность на 4-8 блоков, работающих параллельно, появляется возможность работы с 1,5-4% до 100% номинальной нагрузки при расчетном удельном потреблении топлива. При отсутствии нагрузки неостребованные когенераторы останавливаются,

что позволяет в значительной степени экономить моторесурс первичных двигателей. Нужно сказать, что секционирование когенераторов стало возможным лишь в последнее время, когда появились надежные системы управления, основанные на достижениях микропроцессорной техники и компьютерных технологий. С помощью пакетирования стало возможным построение больших когенераторных установок, экономическая эффективность которых не хуже единичного блока, работающего при номинальной нагрузке [2]. Очевидно, что наличие высокоточных систем управления также является положительной характеристикой исследуемых установок.

Помимо перечисленного, когенерация позволяет значительно повысить энергетический (коэффициент использования теплоты сгорания топлива у современных когенерационных установок достигает 90%) и экологический (первичное топливо используется максимально эффективно, в связи с чем минимизируются выбросы в атмосферу различных токсичных веществ) КПД энергогенерирующих источников.

В связи с тем, что в процессе когенерации топливо используется для одновременного получения двух форм энергии, экономические затраты на их выработку уменьшаются, а это в дальнейшем приводит к снижению себестоимости основной продукции предприятий.

Конкурентным преимуществом комбинированного производства электрической и тепловой энергии является возможность использования различных видов топлива: газ, биогаз, уголь, торф, промышленные отходы и др.

Подводя итоги, можно утверждать, что широкое применение когенераторов в мире является доказательством того, что комбинированная генерация является экономически и экологически эффективным направлением развития локальной энергетики, позволяющим обеспечивать беспрепятственное и бесперебойное электро- и теплоснабжение отечественных потребителей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. <http://nnhpe.spbstu.ru/kratkaya-istoriya-teploenergetiki/> [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный. – Проверено 20.09.2016
2. <http://dom-en.ru> // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: свободный. – Проверено 20.09.2016

Научный руководитель: Р.Р. Тактамышева, доцент кафедры Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений Казанского государственного энергетического университета.

БИОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПТИЦЕВОДЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Е.И. Третьякова
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПП, группа 5АМ5Е

В настоящее время птицеводческая отрасль развивается очень быстрыми темпами. Это объясняется тем, что цена на мясо птицы более низкая, по сравнению с говядиной и свининой, также мясо птицы обладает высокими диетическими свойствами. Дальнейшее увеличение производства яиц и мяса птицы будет сопровождаться увеличением органических отходов: птичьего помёта, сточных вод, непищевых продуктов технической переработки птицы. Неправильная их утилизация является значимым фактором воздействия на окружающую среду: загрязнение рельефа почвы, водоемов, подземных вод, распространение неприятного запаха, развитие яиц гельминтов и мух и множества других микроорганизмов.[7] В случае создания технологий для переработки и полного использования отходов можно будет решить проблему нанесения вреда окружающей среде, а так же создать условия для получения дополнительного дохода от побочной продукции полученной при переработке отходов. Такой технологией может быть создание биогазовых установок, в которых произведенный биогаз из отходов с помощью генератора преобразуется в электроэнергию.

Биогаз это продукт разложения органического субстрата, в следствии обмена веществ бактерий. Бактерии перерабатывают вещества только в растворенном виде, поэтому расщепление субстрата и превращение его в метан может происходить только во влажной среде. А это значит, что для твердых субстратов существует потребность в воде, поэтому изначально не важно был ли субстрат влажным или стал таковым путем орошения или смешивания[5]. Так же количество выработанного газа зависит от температуры, чем она выше тем выше скорость и степень ферментации органического вещества. Желательно что бы среда была без веществ мешающих действию бактерий, например моющих средств, антибиотиков и мыла[6].

Рассмотрим характеристики куриного помета как субстрата для переработки и получения биогаза.

Помет представляет собой вещество вязкой консистенции влажностью 64–82%. В помете содержатся неорганические и органические соединения. Органические соединения такие как углеродные соединения (глицерины, липиды, углеводы, жирные кислоты, летучие кислоты, клетчатка, сахар, спирты), азотистые соединения (пептиды, аминокислоты, белки), сернистые соединения(сульфиды). Неорганические соединения это воду, некоторые соединения азота, аммиак, нитраты, соединения меди, фосфора, калия, цинка, кальция, марганца[2]. При выращивании и содержании птицы к помету могут добавляться другие органические и минеральные компоненты, вода, или наоборот, он может подсушиваться. В зависимости от этого, помет, как сырье для переработки, можно разделить на следующие основные разновидности:

1. Подстилочный помет. Получают при содержании птицы на полу, на глубокой подстилке. Представляет собой смесь натурального помета с органическими подстилочными материалами. Влажность подстилочного помета обычно составляет 15–40%.
2. Помет натуральной влажности. Получают при содержании птицы в клеточных батареях со скребковой или ленточной уборкой помета без системы подсушки, на сетчатых или планчатых полах при условии ежедневной уборки и исключения попадания воды из поилок или в процессе уборки.
3. Жидкий помет влажностью 85–98%. Является основным видом пометного сырья при содержании птицы в клеточных батареях со скребковой уборкой помета.
4. Подсушенный помет. Получают чаще всего при содержании птицы в клеточных батареях с ленточной системой пометоудаления. При использовании клеточных батарей без встроенных воздухопроводов системы подсушки и кратности уборки один раз в 5–7 дней влажность помета обычно составляет 55–70%. При использовании клеточных батарей со встроенными воздухопроводами и такой же кратности уборки получают помет влажностью 50–25%. Подсушенный помет получают также при его хранении в специальных вентилируемых пометохранилищах.

Рассмотрим технологию преобразования субстрата.

Существует большое количество разных методов получения метана. Принципиальное различие в способах работы разных установок состоит в следующем:

- способы подачи субстрата (методы порционной и проточной подачи)
- способ смешивания субстрата (полное смешивание или пробочное проталкивание)
- одно-или многоступенчатая система
- консистенция субстрата (твердое сырье или метод переработки в текущем виде)

Самые распространенные методы.

Метод по которому происходит брожение твердого субстрата с высоким содержанием сухого вещества часто неправильно называют сухой ферментацией, важно еще раз упомянуть, что при любой форме брожения главным условием является наличие влаги. Поэтому установками по брожению твердых субстратов являются такие установки в которых субстрат подается в штабелированном виде в резервуар, порционным методом, для него характерно наполнение бродильной камеры за один прием без последующих добавлений субстрата. Затем субстрат пропитывается бродильной жижой и по окончанию процесса брожения в таком же виде вынимается из резервуара. Преимуществом такого метода является надежный гигиенизирующий эффект, но при таком методе происходит неравномерная выработка газа.

Метод по которому происходит брожение жидкого субстрата является проточный метод в чистом виде либо в комбинации с накопительным. В не-

большой резервуар вносится жидкий свежий субстрат, затем многократно в течение дня в бродильную камеру при помощи специальных устройств поступает твердый субстрат, в то же время автоматически на переливе резервуара точно такое же количество перебродившего субстрата переходит в резервуар-склад. Преимуществом такого метода является равномерное производство газа, а недостатком смешивание свежего субстрата с уже перебродившим, что ухудшает эффект гигиенизации. [1]

Существует множество тонкостей при получении метана, но принцип действия большинства биогазовых установок одинаков, рассмотрим современную биогазовую установку.

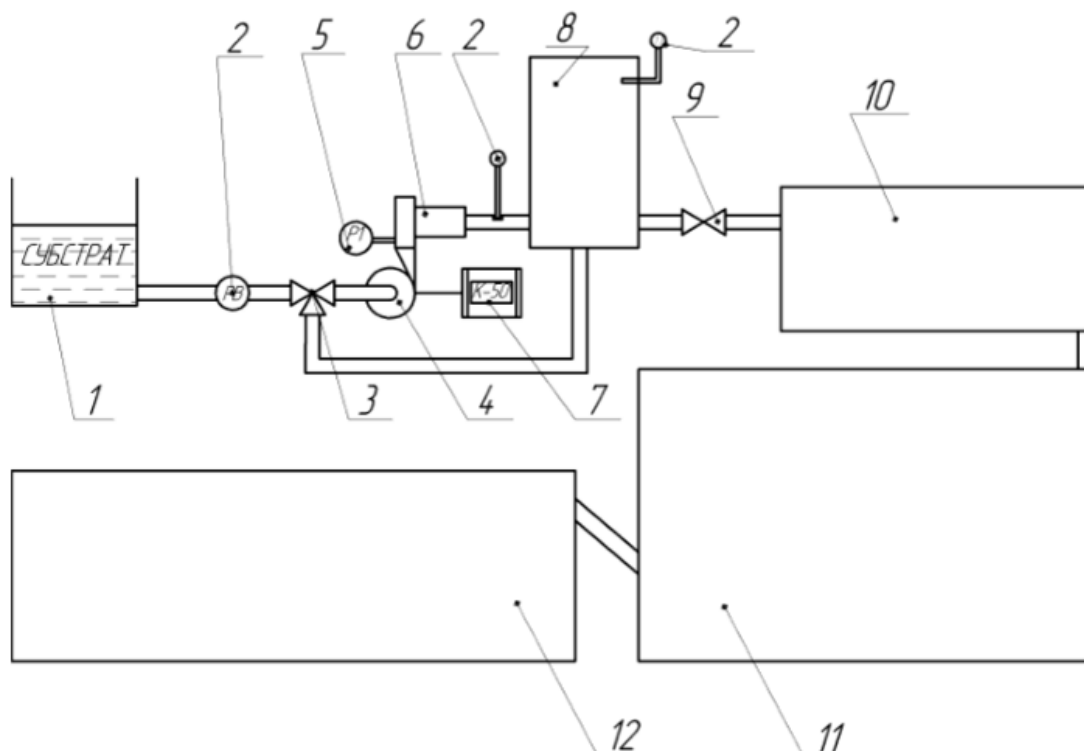


Рис. 1. Схема установки для выработки биогаза: 1—загрузочный бункер; 2 — расходомер, 3 — трехходовой кран, 4 — центробежный насос; 5 — манометр; 6 — гидродинамический деструктор; 7 — измерительный комплект; 8 — резервуар; 9 — вентиль; 10 — биореактор; 11 — метантенк; 12 — емкость для выгрузки;

Работает установка следующим образом. Субстрат поступает в загрузочный бункер, где смешивается и измельчается. Далее биомасса прокачивается насосом 4 через гидродинамический деструктор 6 в резервуар 8, из него масса попадает в биореактор 10, где происходит ее перемешивание и перемещение в метантенк 11. Кроме газа на выходе реактора получается еще и биоудобрение, оно подается в хранилище и используется для удобрения сельскохозяйственных культур[3]. Полученный во время брожения биогаз сжигается в модульной теплоэлектроустановке, в качестве нее рассмотрим газотурбинную установку.

Газотурбинная установка — это газовая турбина и электрический генератор, объединенные в одном корпусе.

5. Биогазовые установки: Основы биогазовой технологии [Электронный ресурс]: режим доступа.: <http://referatdb.ru/geografiya/16470/index.html?page=3>, свободный.
6. Реферат: Биогаз: и греет и варит [Электронный ресурс]: режим доступа.: <http://www.bestreferat.ru/referat-96613.html>, свободный.
7. Утилизация птичьего помета на птицефабриках [Электронный ресурс]: режим доступа.: <http://webpticeprom.ru/ru/articles-processing-waste.html>, свободный.
8. Получение биогаза для биогазовых генераторов [Электронный ресурс]: режим доступа.: <http://genport.ru/article/poluchenie-biogaza-dlya-biogazovyh-generatorov>, свободный.

Научный руководитель: Л.П. Сумарокова, к.т.н., доцент кафедры ЭПП, ЭНИН ТПУ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ЛЕСОПРЕРАБОТКИ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЛОВ

Д.В. Савченков, В.Ю. Плиско, С.А. Павлов, А.Ю. Долгих
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5В31

Введение

Рост цен на классические энергоносители, такие как газ, дизельное топливо или электричество, вынуждает многих из нас искать альтернативные, более выгодные виды топлива. И одним из вариантов такого перефилирования является отопление на КДО (Коро-древесных отходах). Идея использования для обогрева различных отходов не нова, однако без правильного подхода эффективность работы установки по сжиганию древесного мусора будет крайне низкой. Если же учесть все особенности материала, то можно добиться существенной экономии денежных средств, при этом получить нужную мощность агрегата.

Отходы лесопереработки как топливо

КДО – это, по сути, отходы деревообрабатывающей промышленности, и они, как известно, сильного пламени дать не могут. По этой причине через теплообменник проходят разогретые газы, дополнительно нагревающие его поверхность. Для лучшего эффекта теплообменники делают преимущественно спиралевидной формы, но могут встречаться и несколько трубок, которые соединены между собой. Материал, из которого делают теплообменники, должен быть устойчивым к образованию ржавчины, а также к высоким температурам; более того, он должен отлично проводить тепло. Разогретые газы, передав тепловую энергию в обменник, уходят в дымоход, будучи полностью охлажденными.

Дабы получить КПД с высоким показателем, котлы на опилках используют не только ту тепловую энергию, которая образовалась при горении древесины, но также и побочный продукт данного процесса – пиролизный газ.

Следует помнить, что далеко не всякие опилки можно использовать как топливо. Главные параметры, которые следует учитывать – это влажность материала и его плотность. Именно от этих показателей зависит, насколько эффективна будет работа котла.

Технологии сжигания твердого биотоплива в виде древесных отходов, таких как щепа, опил, твердые кусковые отходы, в первую очередь можно разделить на сжигание сухого биотоплива (влажностью до 30%) и сжигание влажного биотоплива (влажностью до 50-65%).

Помимо влажности, большое значение для горения имеет размер частиц биотоплива. Мелкофракционное топливо, такое как шлифовальная пыль и стружка, могут сжигаться в виде суспензии (во взвешенном состоянии). Для горения более крупного по размеру топлива, такого как щепа и дробленые кусковые отходы, требуется больше времени, и его обычно сжигают в слоевых топках.

Специалисты приводят такие цифры: Мелкие непросушенные опилки от ленточной пилорамы обладают плотностью около 250 кг/м³. Расход их на 1кВт мощности котла составит около 0,5 кг/час при непрерывной работе. Пористая сухая стружка от фрезерного станка имеет плотность 100 до 150 кг/м³ и расходуется со скоростью 0,25 кг в час на 1кВт.

Для крупных предприятий, в особенности целлюлозно-бумажной промышленности, возможна модернизация имеющихся и строительство новых котлов паропроизводительностью 50-100 т/ч.

Можно сделать вывод, что для эффективной работы устройства необходимо стремиться закладывать в него максимально сухой материал – тогда его потребуется значительно меньше.

Для лесной и деревообрабатывающей промышленности Бийский котельный завод поставлял паровые котлы типа ДКВр в которых сжигались КДО, с топками НПО ЦКТИ системы В. В. Померанцева, которые эксплуатируются и будут еще длительное время использоваться в отрасли. Устройство котлоагрегата ДКВр-6,5-13 с такой топкой показано на рисунке 1 [3].

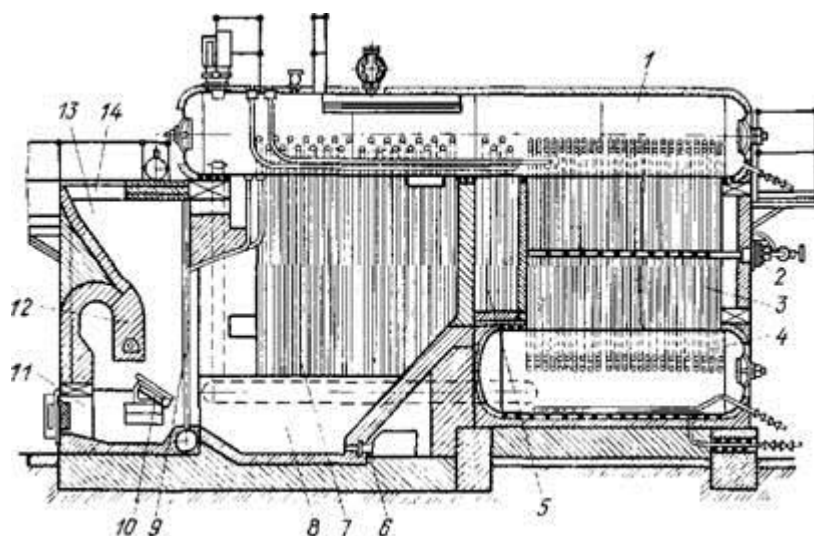


Рис. 1. Паровой котел ДКВр-6,5-13 с топкой НПО ЦКТИ: 1 – верхний барабан; 2 – обдувочное устройство; 3 – конвективная поверхность нагрева; 4 – нижний барабан; 5 – камера догорания; 6 – сопла подвода вторичного воздуха; 7 – радиационная поверхность нагрева; 8 – топочная камера; 9 – трубная зажимающая решетка; 10 – нижний подвижный пережим; 11 – зольниковый люк; 12 – неподвижный пережим; 13 – предтопок; 14 – окно для подачи мелкого древесного топлива

Котлы для сжигания органического твердого топлива в «зажатом» слое. Топка скоростного горения ЦКТИ-ЛПИ (топка Померанцева), рис.2.

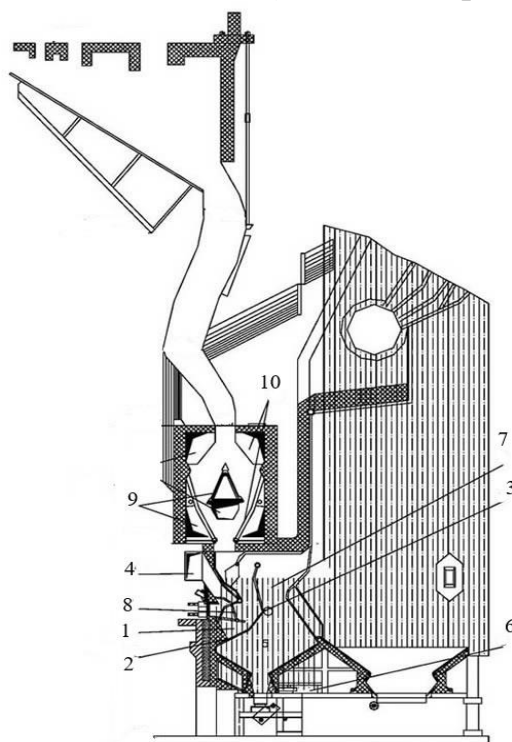


Рис. 2. Котел №2 Архбумкомбината: 1 – нижняя часть предтопка; 2 – решетчатое дно; 3 – фронтной экран; 4 – подача воздуха; 5 – топочный объем; 6 – подача вторичного воздуха; 7 – выход продуктов сгорания; 8 – экранная труба; 9 – подача сушильного агента; 10 – ступень сушилки.

Наиболее оптимальным для сжигания КДО являются многотопливные котлы, типа КМ-75-40 производимый на Белгородском котельном заводе

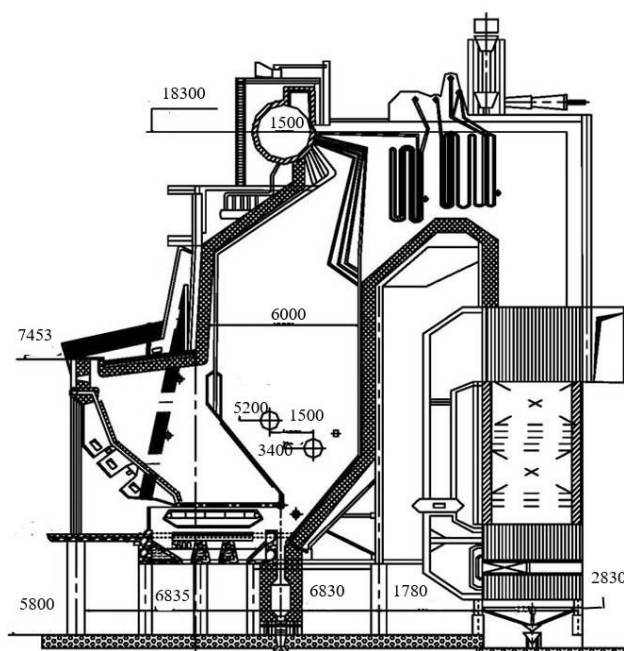


Рис. 3. Котлоагрегат КМ-75-40

Табл. 1. Расчетные характеристики котла БелКЗ КМ-75

Топливо	Паропроизводительность, т/ч	Давление перегретого пара, ата	Температура, °С				Теплонапряжение топочного объема, ккал/м ³	Расчетный КПД brutto	Расход топлива, т/ч
			Питательной воды	Перегретого пара	Горячего воздуха	Уходящих газов			
Отжатая кора при рабочей влажности 57%	50	40	145	440	398	197	64*10 ³	80,2	25,8
Интинский каменный уголь марки «Д»	60	40	145	440	316	140	99.6*10 ³	90,1	9,8
Мазут марки «100»	75	40	145	440	334	171	125*10 ³	90,0	5,73
Ухтинский природный газ	75	40	145	440	342	151	123*10 ³	90,4	6720

Плюсы и минусы

В первую очередь, топить отходами древесины – дешево. Если в непосредственной близости от места вашего проживания есть деревообрабатывающие предприятия, то приобретать опилки по бросовой цене вы сможете без труда.

Во-вторых, применение натурального сырья является более экологичным, поскольку в воздух попадает минимум токсинов.

В-третьих, котлы на опилках полностью автоматизированы, благодаря чему контролируются все рабочие процессы.

Говоря о недостатках, стоит отметить уже упоминавшиеся сложности с хранением горючего материала. Прессование щепы и стружек частично решает эту проблему, но все равно для хранения запаса необходимо довольно просторное помещение.

Вывод

Хоть КДО и не являются классическим энергоносителем, они могут являться альтернативным решением многих предприятий занимающихся деревообрабатывающей отраслью, ведь по сути таким путём образуется практически безотходное производство, если не брать в учёт золу и сажу. И даже золу можно использовать в виде удобрений. Такое решение может стать огромным шагом вперёд на пути к полному использованию ресурсов предприятия, нивелируя затраты и повышая продуктивность производства. Использование КДО как вторичного ресурса позволяет экономить первичные ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Статья журнала ЛесПромИнформ. ЛесПромИнформ №1 (83) Биоэнергетика. Твердотопливные котлы на щепе. 2012г.
2. Котлы отопительные, промышленные и коммунальные : отраслевой каталог : 02-05 / Институт промышленных каталогов; ООО "Инпромкаталог"; сост. Н. Н. Бакланова; Н. А. Ванюков; Т. В. Сергеева. — Москва: Инпромкаталог, 2006. — 120 с.: ил.. — Каталог.
3. Головков С. И., Коперин И. Ф., Найденов В, И. Энергетическое использование древесных отходов.—М.: Леси, пром-сть, 1987–224с.
4. Глейзер, Илья Шулимович. Котлы энерготехнологических и тепловых электростанций / И. Ш. Глейзер. — Москва: Энергосервис, 2010. — 248 с.: ил.. — Библиогр.: с. 241-243.
5. Котлы-утилизаторы и котлы энерготехнологические : каталог / Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по тяжелому и транспортному машиностроению (ЦНИИТЭИТЯЖМАШ). — Москва: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1998. — 104 с.: ил..

Научный руководитель: А.Ю.Долгих, старший преподаватель каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБЦИОННЫХ ХЛОРИСТО-ЛИТИЕВЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Н.В. Миронова, С.Л. Елистратов
Новосибирский государственный технический университет

На территории крупных городов России располагаются значительные по своим масштабам источники низкопотенциального тепла, которые не используются в традиционных технологиях теплоснабжения. Так на тепловых электростанциях теплота конденсации паровых турбин в огромном количестве (около 50%) бесполезно отводится в окружающую среду через градирни, а неочищенные сточные воды объемом в сотни тысяч кубометров и с температурой 20...25 °С ежедневно поступают на городские очистные сооружения. Все это тепло может быть утилизировано в тепловых насосах (ТН) абсорбционного типа, как для повышения эффективности работы ТЭС и АЭС, так и для целей теплоснабжения строящихся коттеджных поселков, объектов малоэтажного домостроения, объектов малого и среднего бизнеса.

В абсорбционных тепловых насосах вместо электроэнергии используются тепло пара, воды и продуктов горения жидких и газообразных топлив, что является существенным преимуществом, по сравнению с парокompрессионными тепловыми насосами, и значительно расширяет возможности их применения на практике.

Принцип работы абсорбционного ТН заключается в совмещении прямого и обратного циклов. Обратный цикл осуществляется с помощью однокомпонентного рабочего вещества (растворителя), а прямой – с помощью раствора (абсорбента) (Рис. 1). ТН выполняются как с паровым или водяным обогревом генератора, так и с генератором, обогреваемым продуктами сгорания газообразного или жидкого топлива. Процесс охлаждения низкопотенциального теплоносителя происходит за счет кипения (испарения) воды в вакууме, стекающей в виде пленки по межтрубному пространству испарителя. Образовавшийся при этом пар поглощается (абсорбируется) высококонцентрированным раствором абсорбента, стекающим по межтрубному пространству абсорбера. В процессе абсорбции образуется тепло, которое для сохранения абсорбирующей способности рабочего раствора отводится охлаждающей водой, протекающей внутри труб абсорбера. Поглощая водяной пар, раствор становится слабым – концентрация его снижается. Для регенерации слабый раствор подается в генератор, где концентрируется за счет тепла греющего источника с температурой выше 70 °С. Выделившийся в генераторе пар конденсируется, и поступает в испаритель. Нагреваемая вода последовательно подается в абсорбер и конденсатор, где нагревается до необходимой температуры и отпускается потребителю. При утилизации низкопотенциального тепла (охлаждаемая вода до 40 °С) тепловые насосы позволяют осуществить комбинированную выработку тепла и искусственного холода, без дополнительных затрат топлива, кроме небольшого расхода электроэнергии на приводы циркуляционных насосов.

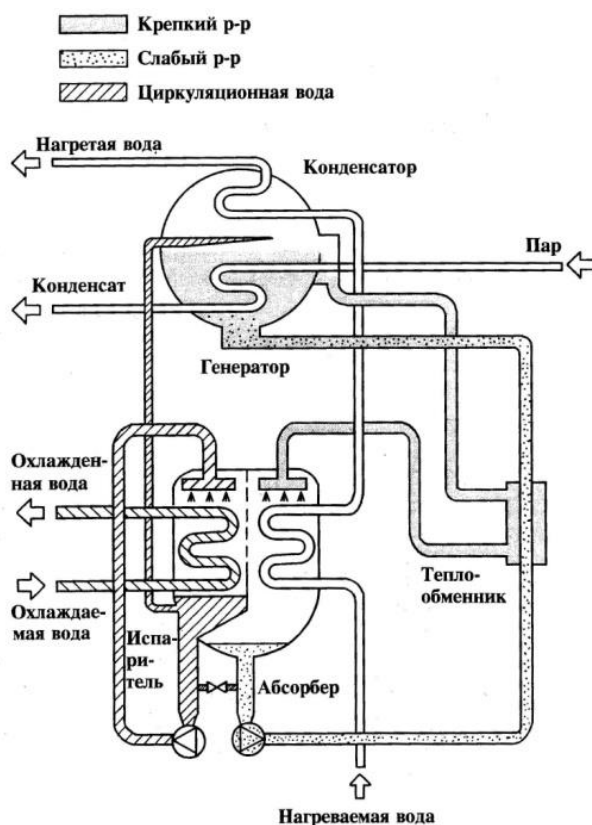


Рис. 2. Схема одноступенчатого абсорбционного теплового насоса с паровым обогревом

Применение тепловых насосов в жилищно-коммунальном хозяйстве в городских условиях может дать ощутимый социальный эффект. Так, например, за счет охлаждения 800 тыс. м³ сточных вод в теплонасосной установке (ТНУ) на 5 °С можно получить около 170 Гкал/ч тепла для целей отопления и горячего водоснабжения. Аналогичный эффект может быть получен, при охлаждении оборотной воды ТЭС в абсорбционных ТН. Поскольку, при отсутствии подвода тепла от низкопотенциального источника, эффективность абсорбционного теплового насоса не отличается от газового котла [1], такие машины могут стать реальной альтернативой квартальным газовым котельным, если допустить, что тепловые насосы также будут использовать природный газ в качестве источника высокопотенциального тепла. В этом случае эффективность использования химической энергии горения топлива находится в прямой зависимости от температуры подвода тепла для десорбции раствора в генераторе. При многоступенчатой десорбции раствора подвод тепла в цикл производится при температурах свыше 200 °С, что позволяет повысить термодинамическую эффективность абсорбционных циклов за счет снижения потребления греющей среды и термодинамических потерь (с трехступенчатой генерацией раствора эффективность будет на 30% выше, чем с двухступенчатой) [6]. Так за счет полезного использования низкопотенциального тепла городских сточных вод или оборотной воды систем охлаждения ТЭС можно обеспечить, в зависимости от типа рабочего цикла, экономию газа без потери теплопроизводительности в размере 70...200 % от потребляемого количества природного газа.

Наиболее распространены ТН использующие в качестве абсорбента водный раствор бромида лития, который позволяет получить наилучшие характе-

ристики абсорбционных тепловых насосов, а также делает их экологически чистыми источниками тепла и более экономичными.

Хлористый литий, производимый Новосибирским заводом химконцентратов, так же ранее рассматривался как рабочее тело для тепловых насосов и холодильных машин [2], однако из-за более низких показателей растворимости, по сравнению с бромидом лития, распространения не получил. Сегодня бромид лития на территории России не производится и соответственно имеет высокую стоимость (примерно в три раза дороже, чем хлорид лития), поэтому замена дорогого импортируемого LiBr на растворы LiCl может привести к снижению капитальных затрат. В связи с этим химиками проведены работы по изучению и созданию новых рабочих веществ, близких по растворимости к LiBr, на основе хлорида лития, выпускаемого в России [1-4]. Так, например, сложные хлористо-литиевые растворы с добавлением нитрата лития, кроме улучшенных показателей растворимости, обладают меньшей коррозионной активностью, в сравнении с бромисто-литиевыми, что значительно увеличит срок службы абсорбционных машин и уменьшит их весогабаритные характеристики. Превысить значения растворимости бромида лития возможно при добавлении в водный раствор LiCl хлорида цезия. Сложные растворы потенциально позволяют по аналогии с опытными образцами зарубежной техники производить охлаждение до минусовых температур и обеспечивать выработку тепла почти до 100 °С. Однако реализуемость таких процессов научно не доказана, научно-технической литературы, посвященной применению хлористого лития в абсорбционных термотрансформаторах, крайне мало, и это направление все еще остается недостаточно изученным, что является предметом дальнейших исследований.

Таким образом, замена квартальных газовых котельных на абсорбционные тепловые насосы, утилизирующие городские тепловые стоки и использующие в качестве абсорбента новые импортозамещающие рабочие растворы на основе хлорида лития является важным направлением развития энергосберегающих технологий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Абсорбционные преобразователи теплоты: монография / А.В. Бараненко, Л.С. Тимофеевский, А.Г. Долотов, А.В. Попов. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 338 с.
2. Пинчук О.А. Теплофизические свойства новых рабочих растворов абсорбционных холодильных машин: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ленинград, 1964. – 30 с.
3. Лезина Н.М. Исследование растворов хлорида лития как экологически чистого компонента низкотемпературных жидкостей – носителей тепла и холода: Автореф. дис. канд. хим. наук. – Москва, 1997. – 29 с.
4. Водные растворы абсорбционных термотрансформаторов: моногр. А.В. Бараненко, С.В. Караван, О.А. Пинчук, Д.В. Караван. – М.: Изд-во «Перо», 2014. - 393 с.

5. Абсорбционные бромисто-литиевые машины для нагрева и охлаждения воды // В монографии «Исследования и разработки СО РАН в области энергоэффективных технологий» / под общ. ред. чл.-корр. РАН С.В. Алексеенко. – Новосибирск: Наука, 2009. – С. 148-160.
6. Оценка эффективности абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с трехступенчатой генерацией пара / Бараненко А.В., Долотов А.Г., Тимофеевский Л.С. и др. // Известия СПбГУНиПТ, 2000. № 1. С. 21-26.

Научный руководитель: С.Л. Елистратов, д.т.н., проф., зав. каф. ТЭС НГТУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ТОРФА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К БРИКЕТИРОВАНИЮ

А.В. Астафьев, К.Т. Ибраева, В.Е. Суздальцев
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ

Проблема обеспечения топливом ресурсодефицитных регионов актуальна по настоящее время. Эти регионы, как правило, не имеют собственных запасов энергетически ценных топлив (каменного угля, нефти или природного газа), или разработка расположенных здесь месторождений экономически нецелесообразна. В результате энергообеспечение осуществляется за счет привозного топлива, в стоимость которого включены транспортные издержки. Это приводит к существенному удорожанию топлива и отражается на тарифах тепло- и электроэнергетики.

В связи с этим необходимо стремиться к вовлечению местных ресурсов сырья, пригодных для сжигания и не требующих огромных капиталовложений на его добычу. В качестве одного из возможных вариантов такого сырья может рассматриваться торф. Торф является возобновляемым ресурсом, расположенным на поверхности земли и присутствующим практически на всех материках (за исключением Антарктиды). Мировые запасы торфа насчитывают около 500 млрд тонн, однако объемы его добычи в настоящее время не превышают 25 млн тонн в год [1, 2]. Основная доля добываемого торфа направлена на топливное использование (70%), остальная часть – на сельское хозяйство, фармацевтическую и химическую промышленности [2]. Так, например, в 2011 году в Ирландии доля энергии, вырабатываемой на торфе, по отношению к общему количеству выработки составила 5,30%, в Финляндии – 4,54%, в Беларуси – 1,85%. Однако в общемировом масштабе доля энергии, производимая при сжигании торфа, на данный момент не превышает 0,028% [1].

Главными сдерживающими факторами использования торфа в качестве топлива являются малая теплотворная способность, сезонностью добычи и сложности транспортировки даже на небольшие расстояния: торф имеет низкую насыпную плотность, слеживается, крошится, а также смерзается при низ-

ких температурах воздуха. Поэтому его перевозка на расстояния более чем 25-30 км экономически нецелесообразна [3]. В связи с этим необходимо повышение калорийности и транспортабельности торфа.

При изучении вопроса повышения энергетических свойств торфа для последующего сжигания авторами выделена теплотехнологическая переработка, как одно из наиболее часто публикуемых направлений исследований. Это направление подразумевает получение энергетических топлив из торфа путем термического воздействия. Применительно к твердым органическим видам сырья, к которым и относится торф, авторами выделено два варианта теплотехнологической переработки: торрефикация топливных брикетов [4] и получение твердого композитного топлива [5]. В связи с тем, что механизм поведения органического сырья при теплотехнологической переработке до конца не изучен и зависит от множества факторов, как внешних (температура, давление, скорость нагрева), так и внутренних (состава топлива, минеральной части, влажности и др.), то в каждом конкретном случае необходимо проведение экспериментальных исследований для получения полной картины переработки (материальных и тепловых балансов, характеристик продуктов, тепловых эффектов). Целью работы ставится исследование теплового эффекта пиролиза торфа применительно к его теплотехнологической переработке.

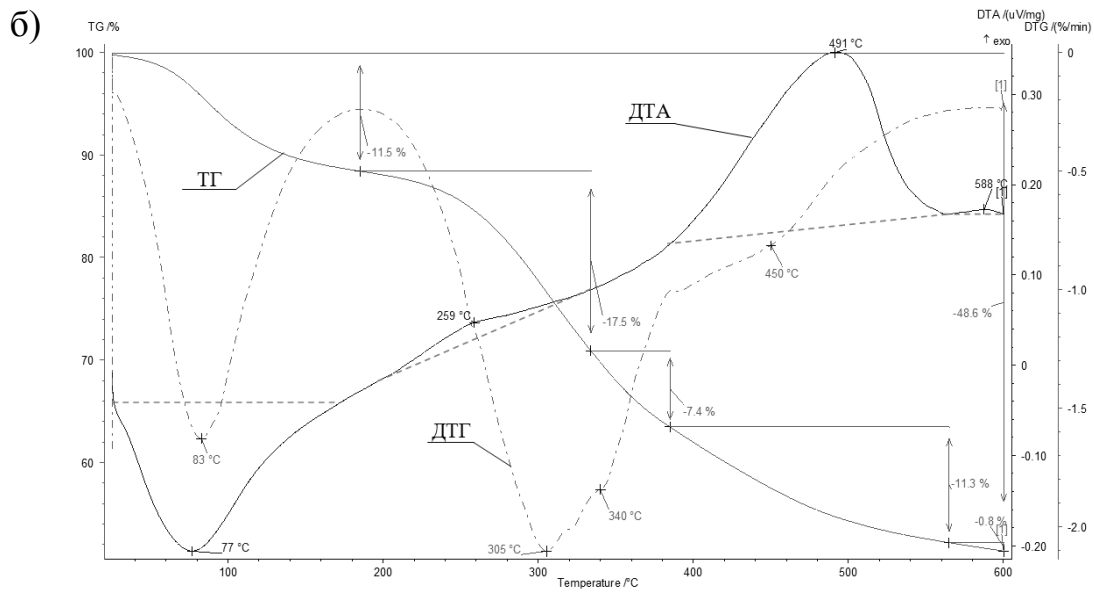
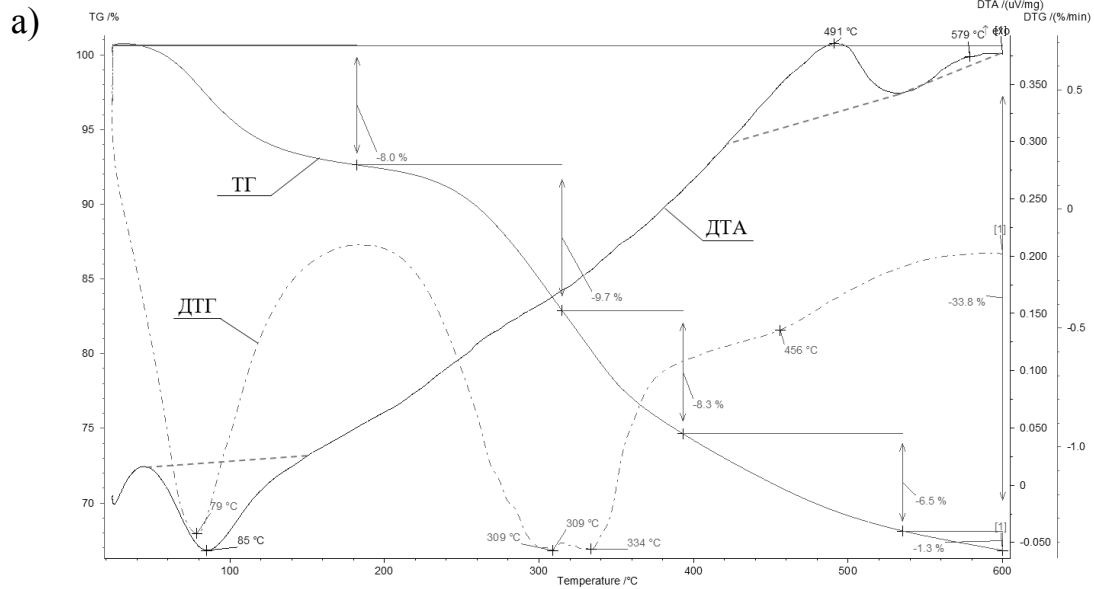
В работе исследованы пробы торфа, доставленных с трех месторождений Томской области и выдержанные до воздушно-сухого состояния. Для оценки теплового эффекта переработки торфа были проведены термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный термический (ДТА) анализы на микротермоанализаторе STA 449C (Netzsch, Германия). Скорость нагрева выбрана согласно [6] равной 10 °С в минуту. Анализы выполнены в инертной среде (гелий) с целью исключения влияния кислорода на точность результатов исследования.

Дифференциально термический анализ (рис. 1) показал, что при температуре торфа порядка 400 °С в нём начинают протекать реакции, сопровождающиеся экзотермическим эффектом. Выделение тепла продолжается до температуры ~550 °С, затем снова наблюдаются экзотермические процессы меньшей интенсивности.

В интервале температур 150-400 °С также наблюдаются экзотермические реакции. Однако для торфа № 1 их величина настолько мала, что можно говорить об отсутствии каких-либо тепловых превращений в этом диапазоне температур. При нагреве образцов торфа № 2 и № 3 в интервале температур 220–330 °С наблюдались экзотермические тепловые эффекты, равные 100 и 60 кДж/кг соответственно.

Эти особенности необходимо учитывать в случае термического брикетирования или торрефикации торфа. Нагрев некоторых видов торфа свыше 220 °С может привести к возникновению экзотермических реакций и последующему самовозгоранию торфа. Упоминание о подобных эффектах, встречающихся при торрефикации древесных пеллет с целью повышения потребительских свойств, приведено в работе [7], согласно которой нагрев пеллет до температуры 220–250 °С приводил к повышению их температуры до 700-800 °С.

В целом же результаты ДТА-анализа позволяют сделать вывод, что нагрев всех исследованных образцов торфа сопровождался суммарным экзотермическим эффектом, который для торфа № 1 составил – 250 кДж/кг, торфа № 2 – 1535 кДж/кг, торфа № 3 – 791 кДж/кг. Это показывает возможность авто-термического протекания теплотехнологической переработки при температурах свыше 400 °С.



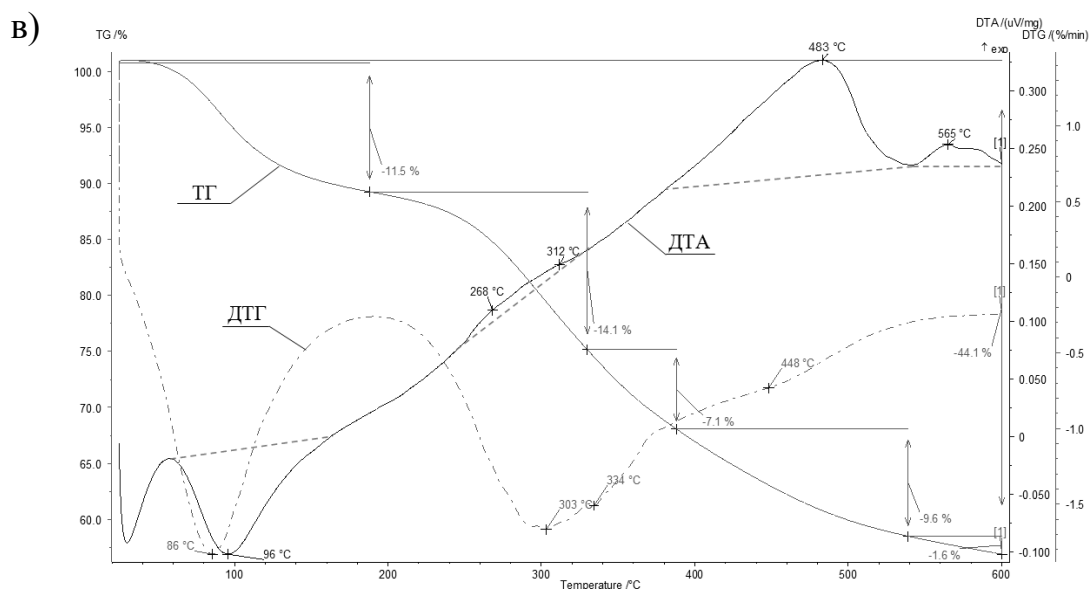


Рис. 1. Результаты дифференциального термического анализа торфа: а) – образец торфа №1; б) – образец торфа № 2; в) – образец торфа № 3.

Результаты термогравиметрического анализа показывают, преобладание твердого остатка среди всех продуктов, получаемых при переработке (выход твердого остатка составляет более 52%), что позволяет прийти к выводу о целесообразности переработки торфа в твердые продукты. Прочие (жидкие и газообразные) продукты имеют небольшой выход и потребуют большого расхода исходного сырья при переработке.

Выводы

Результаты исследования тепловых эффектов, возникающих при нагреве торфа, показали, что термическая переработка исследуемых образцов сопровождалась протеканием экзотермических реакций при температуре свыше 400 °С. Отмечено, что термическое прессование или торрефикацию торфа необходимо проводить при температурах ниже 220 °С, так как в некоторых видах торфа уже при данной температуре возможно протекание экзотермических реакций, способных привести к самовозгоранию торфа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50124 (мол_нр).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Боярко Г.Ю., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Торфяная промышленность России и мира. Анализ состояния и перспективы развития // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2014. – № 6. – С.56–61.
2. Хорошавин Л.Б., Медведев О.А., Беляков В.А., Михеева Е.В., Руднов В.С., Байтимилова Е.А. Торф: возгорание торфа, тушение торфяников и торфокомпозиты. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС, 2013. – 256 с.

3. Марков В.И., Волкова Н.И. Торф – возобновляемый ресурс у нас под ногами // Экология и промышленность России. – 2014. – № 1. – С. 58–60.
4. Fagnäs L., Kuoppala E., Arpiainen V. Composition, utilization and economic assessment of torrefaction condensates // Energy & Fuels. – Vol. 29. – 2015. – P. 3134–3142.
5. Табакаев Р.Б., Казаков А.В., Заворин А.С. Термическое обогащение низкосортного твердого топлива // Химия твердого топлива. – 2015. – № 5. – С. 3–9.
6. Табакаев Р.Б. Теплотехнология получения твёрдого композитного топлива из низкосортного органического сырья: Автореферат ... дис. канд. техн. наук. – Красноярск: СФУ, 2015. – 20 с.
7. Зайченко В.М. Повышение потребительских свойств твердого топлива из биомассы // Энергосбережение. – 2014. – № 3. – С. 66–68.

Научный руководитель: Р.Б. Табакаев, к.т.н., инженер-исследователь, кафедры ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РАСТОПКИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

¹А.А. Лебедев, ²А.И. Артамонцев
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, ¹группа 5ВМ5А.

В настоящее время одной из актуальных проблем мировой энергетики является снижение доли мазута и газа, используемых для растопки пылеугольных котлов. А также применение низкосортных углей в качестве топлива [1]. Совместное сжигание угля и обладающего более высокой реакционной способностью мазута с различными избытками воздуха ухудшает эколого-экономические показатели котлов: на 10-15 % повышается мехнедожог топлива и на 2 – 5 % снижается КПД-брутто, возрастает скорость высокотемпературной коррозии экранных поверхностей и снижается надежность эксплуатации котельного оборудования; на 30 – 40 % увеличивается выход оксидов азота и серы; появляются выбросы канцерогенной пятиокиси ванадия [2].

Известные методы по снижению расхода мазута при сжигании углей (реконструкция горелочных устройств, отдельное и смешанное сжигание угля и подсветочного топлива (мазута), высокий подогрев воздуха и пылевоздушной смеси, утонение помола и др.) не решают проблему сокращения высокорекреационного топлива, особенно на стадии растопки котла [2].

Отсюда и появляется весьма актуальная проблема тепловой энергетики: снижение доли мазута в топливном балансе пылеугольных тепловых электростанций (ТЭС). Решение данной проблемы невозможно на базе традиционных технологий топливоиспользования, которые в основном исчерпали себя как в техническом, так и в эколого-экономическом аспектах [3].

Для повышения эффективности использования твердых топлив, а также снижения доли мазута и природного газа в топливном балансе тепловых электростанций и снижения вредных пылегазовых выбросов были разработаны плазменно-топливные системы (ПТС), которые используются для безмазутной растопки котлов, подхвата и стабилизации горения пылеугольного топлива. К тому же актуальность данной технологии в последнее время только возрастает, в связи с тем, что цены на газ и мазут значительно выше цен на уголь [4].

Работа системы безмазутной растопки котла основана на нагреве и воспламенении угольной пыли низкотемпературной плазмой – нагретым ионизированным газом с температурой 3000 – 5000 °С. В основе технологии плазменного безмазутного розжига лежит плазменная термохимическая подготовка топлива к сжиганию. В результате такой подготовки часть потока пылеугольной аэросмеси, поступающей в горелку, взаимодействуя с плазмой, воспламеняется, и, окисляясь в первичном воздухе, нагревает остальную аэросмесь до температуры выхода летучих. Дефицит окислителя в первичном воздухе обеспечивает окисление углерода коксового остатка угля по реакции $2C+O_2=2CO$. В результате в топку котла поступает топливная смесь (горючий газ + коксовый остаток) с температурой 1200 К и выше, горение которой продолжается при взаимодействии с кислородом вторичного воздуха без использования растопочного топлива (мазута).

Низкотемпературную плазму получают в генераторах плазмы – плазмотронах. В плазменной системе безмазутной растопки котла используются плазмотроны постоянного тока двухкамерной схемы, в которых плазмообразующим газом является сжатый воздух. Такой плазмотрон имеет два электрода – анод и катод, разделенные изолятором. В плазмотроне имеются два завихрителя плазмообразующего воздуха. Первый поток воздуха, проходящий через катодный завихритель движется в сторону анода. Вторым поток воздуха, проходящий через анодный завихритель, поступает в межэлектродный зазор, и в дальнейшем движется вдоль стенки катода навстречу первому потоку. В зоне встречи потоков происходит привязка дуги к поверхности катода. Направление закрутки потоков воздуха совпадают. После подачи напряжения с тиристорного преобразователя на электроды плазмотрона, в зазоре между электродами с помощью устройства запуска зажигается электрическая дуга. Вторым потоком воздуха дуга выдувается из межэлектродного зазора в разрядную камеру плазмотрона. Закрутка потоков воздуха обеспечивает быстрое движение приэлектродных участков дуги по окружности. В сочетании с интенсивным охлаждением внешней поверхности электродов водой это обеспечивает работоспособность электродов, несмотря на то что температура дуги может достигать 5000– 7000 К [5].

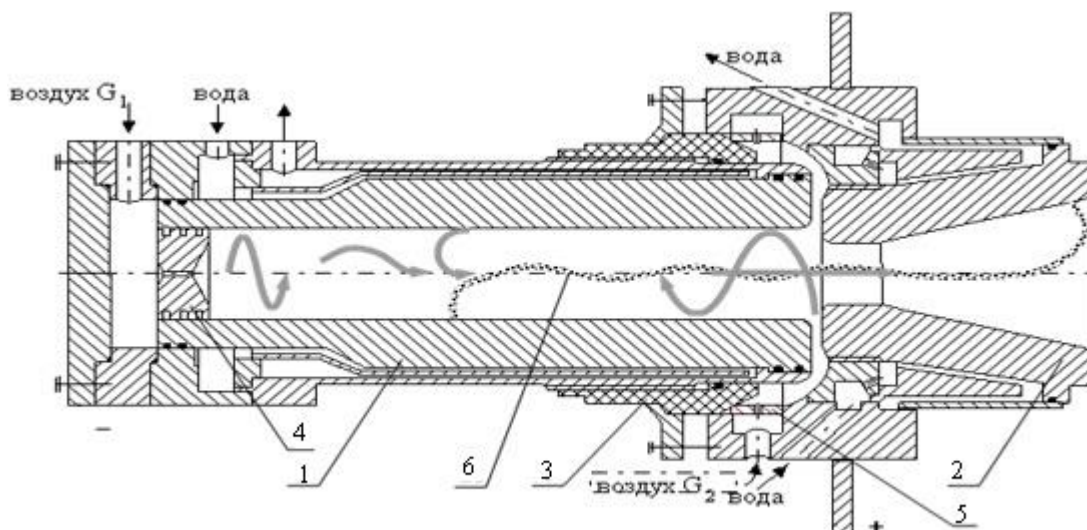


Рис. 3. Схема плазмотрона: 1 – катод плазмотрона; 2 – анод; 3 – изолятор; 4 – завихритель катодный; 5 – завихритель анодный; 6 – электрическая дуга.

Простота конструкции плазмотронов продолжает привлекать к себе внимание исследователей. Для создания высокоэффективных плазмотронов различного технологического назначения требуется тщательное изучение основных физических процессов в электроразрядной камере, которые и определяют ресурс работы, стабильность горения дуги, высокий электрический и тепловой КПД. Разнообразные конструктивные решения позволяют создавать плазмотроны мощностью от нескольких киловатт до многих сотен киловатт, обеспечивающие нагрев любых газов и смесей [5].

Промышленные испытания плазменной стабилизации горения донецкого антрацитового штыба (АШ) проведены на котле ТП-230 Мироновской ГРЭС [6]. Выход летучих достигал 3 – 5 %. В двух вихревых горелках нижнего яруса были установлены коаксиальные плазмотроны с расходуемым графитовым катодом мощностью 400 кВт с камерами термохимической подготовки топлива (ТХПТ), куда подавалось 20 % аэросмеси от ее расхода на горелку. Температура пылеугольной смеси на выходе из обеих горелок была 1200 – 1300 К. Относительные затраты энергии на плазмотрон равнялись 1,5 – 2 %. Экономия мазута на подсветку составила 55 % [6].

Накопленный в ряде стран (США, Канада, Австралия, Китай, Северная Корея, Монголия, Россия, Казахстан, Украина) опыт промышленной эксплуатации плазмотронов, используемых на ТЭС для безмазутной растопки котлов, стабилизации горения пылеугольного факела и выхода жидкого шлака, подтвердили высокую энергетическую и эколого-экономическую эффективность плазменных технологий, в основе которых лежит применения низкотемпературной плазмы для ТХПТ [6].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменные методы повышения эффективности использования твердых топлив. Вестник ВСГУТУ, 2014 г. №1, с. 31 – 43.

2. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела // М.Ф. Жуков, Е.И. Карпенко, В.С. Перегудов и др.; Под ред. В.Е. Мессерле, В.С. Перегудова. – Новосибирск: Наука. Сиб. Изд. Фирма РАН, 1996. – 304 с.
3. Мессерле В.Е. Состояние и перспективы освоения плазменных технологий безмазутного воспламенения углей в энергетике // Труды II Междунар. симпоз. По теоретической и прикладной плазмохимии. – Плес, 1995. – с. 192-195.
4. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Нагибина Н.Б., Матвеев В.А. Использование плазменно-топливных систем на пылеугольных тепловых электростанциях Казахстана. VIII всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива», Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13-16 ноября 2012 г., с. 61.2 – 62.6.
5. Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС // Е.И. Карпенко, М.Ф. Жуков, В.Е. Мессерле и др.; Под ред. В.Е. Мессерле, В.С. Перегудова. – Новосибирск: Наука. Сиб. Изд. Фирма РАН, 1998. – 133 с.
6. Введение в плазменно-энергетические технологии использования твердых топлив / Е.И. Карпенко, В.Е. Мессерле. – Новосибирск: Наука. Сиб. Предприятие РАН, 1997. – 119 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

¹Е.В. Биятто, ¹К.К. Привалихина, ²А.Я. Пак

^{1,2}Томский политехнический университет

¹ЭНИН, ЭСиЭ, группа 5АМ62

²ЭНИН, ЭПП

Введение

Для утилизации промышленных отходов и создания новых материалов с заданными свойствами, широкое распространение в мире получили плазменные электро-технологические установки [1,2,3]. Стремительно развиваются электроискровые и электродуговые системы поджигания топлива и стабилизации горения [4], проводятся экспериментальные и теоретические исследования электроразрядных явлений [5,6].

Установки постоянного тока, доля которых в мире составляет порядка 87% [7] в классификации схожих систем по типу электропитания являются одной из основных разновидностей систем для генерации плазмы. В то же время, существует ряд недостатков современных электродуговых установок, а именно: влияние полярности подключения источника питания на процесс осуществления переноса массы с одного электрода на другой, сложность реализации равномерного распределения параметров плазмы, сложность в распространении и удержании плазменного факела в значительном объеме части объема реактора,

необходимость контроля состава и давления газовой среды реактора [8], относительно высокое энергопотребление [9].

Возможным подходом, позволяющим решить рассматриваемые затруднения, может быть генерация плазмы в воздушной атмосфере [10] с использованием графитовых электродов. Это позволит повысить значения температур в плазменном факеле (10-12 тыс. градусов) при сравнительно небольших значениях тока (100-200 А) [11]. Поэтому проведение экспериментальных исследований электрической дуги постоянного тока в воздушной атмосфере между графитовыми электродами является актуальной задачей.

Эксперимент

С целью исследования процесса генерации углеродной плазмы в воздушной атмосфере была собрана простейшая экспериментальная установка. Графитовые электроды марки «ESAB OK Carbon» подключались к источнику электропитания постоянного тока со встроенным преобразователем частоты (Condor Colt 200) и максимальным рабочим током до 200 А. Напряжение холостого хода данного источника составляет 62 В. Источник позволяет осуществлять плавное регулирование уровня тока в диапазоне от 20 А до 200 А.

Один из электродов закреплялся неподвижно и подключался к минусовой клемме источника питания, второй электрод был подвижным и подключался к положительной клемме. Для инициирования дугового разряда подвижный электрод подносился к неподвижному, вплоть до соприкосновения вдоль продольной оси обоих электродов, обеспечивая электрический контакт. После зажигания дуги подвижный электрод отводился по продольной оси электродов со скоростью 2 мм/с, тем самым реализуя удлинение дуги, до момента погасания разряда. Эксперимент повторялся несколько раз для различных уровней тока от 20 А до 200 А. Уровни тока и напряжения на дуговом разряде контролировались встроенной системой измерения тока в источнике питания, а также цифровым мультиметром, работающем в режиме вольтметра; при помощи миллиметровой шкалы, расположенной вблизи электродов визуально оценивалась длина дугового разряда; для защиты органов зрения применялся светофильтр для сварочных работ. Напряжение фиксировалось в момент погасания дугового разряда, т.е. при наибольшей длине дуги. По величине напряжения и тока рассчитывалась электрическая мощность дугового разряда. Схематически экспериментальная установка представлена на рисунке 1.

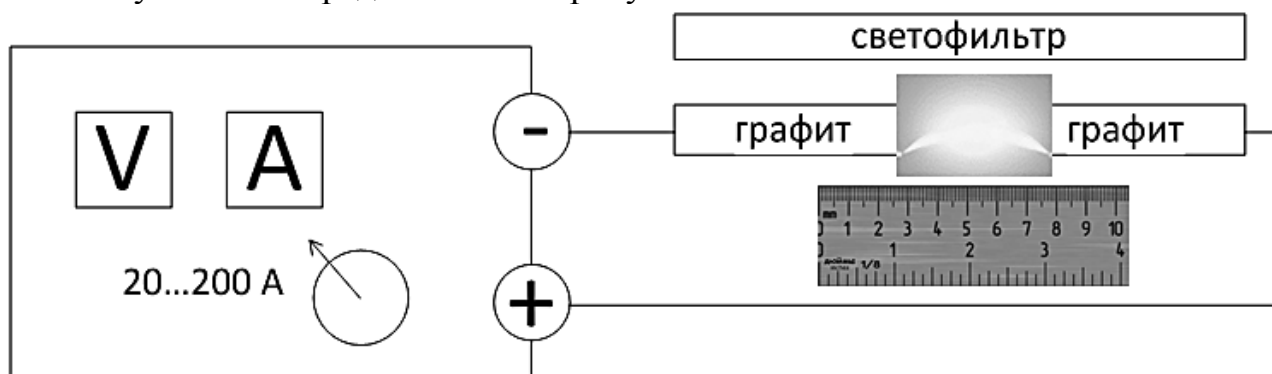


Рис. 1. Устройство экспериментальной установки

Результаты и обсуждение.

Усредненные экспериментальные данные приведены в таблице 1.

Табл. 1. Усредненные экспериментальные данные

Ток, А	Напряжение, В	Мощность, Вт	Длина дуги, мм
20	45	900	12
55	50	2750	25
90	50	4500	25
130	52	6760	15
165	54	8910	12
200	52	10400	10

Согласно расчетным данным видно, что мощность дугового разряда менялась от 0,9 кВт до почти 10,5 кВт в зависимости от уровня тока. Максимальное напряжение на дуговом разряде непосредственно перед его погасанием является приблизительно на одном уровне – около 50 В. Уровень напряжения погасания дуги, скорее всего, связано с уровнем напряжения холостого хода источника электропитания: при достижении напряжения близкого к напряжению источника питания скорость ввода энергии в дуговой разряд снижается, и происходит погасание дуги.

При рассматриваемых уровнях тока температура плазмы при использовании графитовых электродов может достигать 10-12 тыс. К [11]. Основной интерес представляет изменение максимальной длины дуги, которую удалось получить в серии экспериментов. Наибольшая длина дуги составила 25 мм при мощности дугового разряда в диапазоне около 3,0-4,5 кВт и токах 60...90 А. Это может быть объяснено тем, что при низких уровнях тока, поступающая в разряд электрическая мощность не обеспечивает устойчивое горение дуги при ее удлинении в рассматриваемых экспериментах более 10-12 мм. С другой стороны при более высоких уровнях токах максимальная длина полученного разряда, вероятно, ограничена падением напряжения на дуговом разряде, которое становится близким к напряжению источника при токах около 160...200 А уже при величине разрядного промежутка около 10-12 мм.

В ходе проведения эксперимента замечено влияние полярности подключения электродов: на электроде, подключенном к минусовой клемме питания, происходит осаждение порошкового материала из плазмы разряда, в то время как электрод, подключенный к положительному потенциалу источника заметно «выгорает». Результаты этого наблюдения показаны на рисунке 2. Данное явление укладывается в современные представления об электродуговых явлениях постоянного тока в присутствии в плазме разряда углерода [12]. А осаждаемый материал может представлять собой ультрадисперсный продукт, например, углеродные нанотрубки [12], что может быть предметом отдельного исследования.



Рис. 2. Внешний вид электродов.

Таким образом, в рассматриваемой работе установлены параметры электропитания, которые позволяют получить наибольший размер дугового разряда, горящего между графитовыми электродами в воздушной атмосфере. В рассматриваемых условиях наиболее подходящим уровнем тока для питания электродуговой установки являются значения тока в диапазоне 60...90 А, обеспечивающих электрическую мощность разряда около 3,0-4,5 кВт. Осуществление процесса стабильного горения дугового разряда в промежутке между графитовыми электродами в воздушной атмосфере при обозначенных уровнях мощности позволяют полагать возможность бытового применения электродуговых устройств для различных целей: инициирование и стабилизация процессов горения топлива, очистка окружающей среды от углеводородных загрязнений и бактерий и других, известных согласно современной литературе, областей. Практическая ценность результата подчеркивается простотой реализации эксперимента и использованием промышленно производимых компонентов экспериментальной установки (в том числе источника питания), что позволяет полагать легкость применения на практике полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. E. Gomez et al. / *Journal of Hazardous Materials* 161 (2009) 614–626; P. Zhao et al. / *Journal of Hazardous Materials* 181 (2010) 580–585;
2. А.Г. Каренгин, О.Д. Шахматова/Вестник науки Сибири. 2012. № 2 (3). с.22-26;
3. K. Reineke et al. / *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 30 (2015) 112–118;
4. A. Starikovskiy, N. Aleksandrov / *Progress in Energy and Combustion Science* 39 (2013) 61-110;
5. A.S.DeFilippo, J.Chen / *Combustion and Flame* 172 (2016) 38-48;
6. S.Merola, L.Marchitto et al. / *Applied Thermal Engineering* 69 (2014) 177–187;

7. N. Arora, N.N. Sharma / *Diamond & Related Materials* 50 (2014) 135–150;
8. D.Sun, R. Hong et al. / *Chemical Engineering Journal* 303 (2016) 217–230;
9. F X. Lu et al. / *Diamond am/Related Materials* 7 (1998) 737 – 741;
10. C. Tendero et al. / *Spectrochimica Acta Part B* 61 (2006) 2 – 30;
11. D.V. Schur et al. / *Carbon* 45 (2007) p.1322–1329 ;
12. N. Arora, N.N. Sharma / *Diamond & Related Materials* 50 (2014) 135–150.

Научный руководитель: А.Я. Пак, к.т.н., доцент каф. ЭПП ЭНИН ТПУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЖИГАНИЯ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ГОРЯЧЕЙ ЧАСТИЦЕЙ

А.Г. Нигай, Д.С. Сивков
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ53

Исследование характеристик зажигания перспективных для энергетики органоводоугольных топлив (ОВУТ) весьма актуально. Т.к. в состав таких топливных композиций входят низкосортные угли (как правило, бурые), отходы углеобогащения (КЕК), отработанные горючие жидкости (моторные, трансмиссионные, трансформаторные, турбинные масла), то их сжигание наряду с выработкой энергии позволит утилизировать твердые и жидкие горючие отходы.

ОВУТ имеют некоторые преимущества по сравнению с традиционными для энергетики топливами (уголь, мазут): более высокие экологические характеристики, меньшая пожарная опасность на стадиях подготовки к сжиганию, экономичность эксплуатации энергоустановок и другие. Изучение процессов зажигания и горения ОВУТ позволит разработать теоретические основы технологии утилизации горючих отходов для выработки энергии.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование предельных условий зажигания ОВУТ горячими частицами и установление влияния параметров локального источника энергии на основную характеристику процесса – время задержки зажигания.

Исследование закономерностей зажигания топлива одиночными горячими частицами выполнено с использованием экспериментального стенда, схема которого приведена на рисунке 1. Основные характеристики индукционного процесса установлены в рамках методики [1].

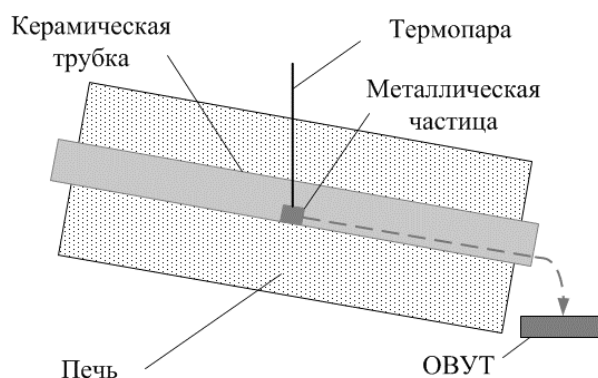


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для изучения зажигания ОВУТ горячей частицей

В каждом эксперименте керамическая трубка муфельной печи прогревалась до заданной температуры. Контроль температуры осуществлялся интегрированной в печь платина-платинородиевой термопарой (диапазон измеряемых температур 273–1873 К, систематическая погрешность ± 1 К, инерционность не более 1 с). При стабилизации температуры в печи металлическая частица помещалась в центр керамической трубки (рисунок 1). Контроль температуры частицы осуществлялся хромель-алюмелевой термопарой (диаметр спая 2 мм, диапазон измеряемых температур 273–1373 К, систематическая погрешность ± 3 К). После равномерного прогрева металлической частицы она сбрасывалась с высоты не более 50 мм на поверхность ОВУТ. Площадь поверхности топлива составляла около 20 см^2 , толщина слоя – около 10 мм. Процессы, протекающие в течение индукционного периода, регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom v411 (скорость съемки 4 200 кадров в секунду при полном разрешении 1280x800).

В качестве источников зажигания использовались стальные частицы в форме диска размерами: $r_p=5$ мм, $z_p=4$ мм; $r_p=5$ мм, $z_p=6$ мм; $r_p=6$ мм, $z_p=5$ мм; $r_p=6$ мм, $z_p=8$ мм. Начальная температура частиц T_p варьировалась в диапазоне 1223–1373 К. В состав ОВУТ входили два компонента: КЕК каменного угля марки Г (обогащительная фабрика шахты имени Кирова, Кемеровская область) и отработанное автомобильное моторное масло. Основные характеристики КЕК-Ка представлены в таблице 1. Средний размер частиц угля в КЕКе около 100 мкм, массовая доля угля – 47 %.

Табл. 1. Результаты технического и элементного анализа сухого КЕКа Г

Технический анализ			Элементный состав				
A^d , %	V^{daf} , %	Q_s^r , МДж/кг	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %
33.82	43.11	22.16	75.12	4.64	0.02	0.23	19.98

Отработанное автомобильное моторное масло имеет следующие характеристики: плотность 871 кг/м^3 (при 293 К); влажность 0.28 % масс; зольность 0.78 % масс; температура вспышки 405 К; температура воспламенения 491 К; теплота сгорания 43.98 МДж/кг.

Смешивание компонентов ОВУТ (в пропорции 85 % КЕК Г и 15 % отработанное автомобильное моторное масло) выполнялось в течение 10 минут гомогенизатором MPW-324.

Основная характеристика исследуемого процесса – время задержки зажигания t_d определялось по результатам анализа видеозаписей. Значение этого параметра соответствовало промежутку времени от установления контакта локального источника нагрева с поверхностью ОВУТ до момента появления пламени в окрестности металлической частицы. Для оценки случайных погрешностей результатов измерений t_d эксперименты проводились не менее 5 раз при идентичных условиях.

Систематические погрешности измерения начальной температуры частицы и времени задержки зажигания, обусловленные погрешностями используемых средств измерений, составляли не более 2 %. Случайные ошибки определения значений t_d не превышали 15–20 %.

На рисунке 2 представлены типичные кадры видеोगраммы процесса взаимодействия горячей стальной частицы с ОВУТ.

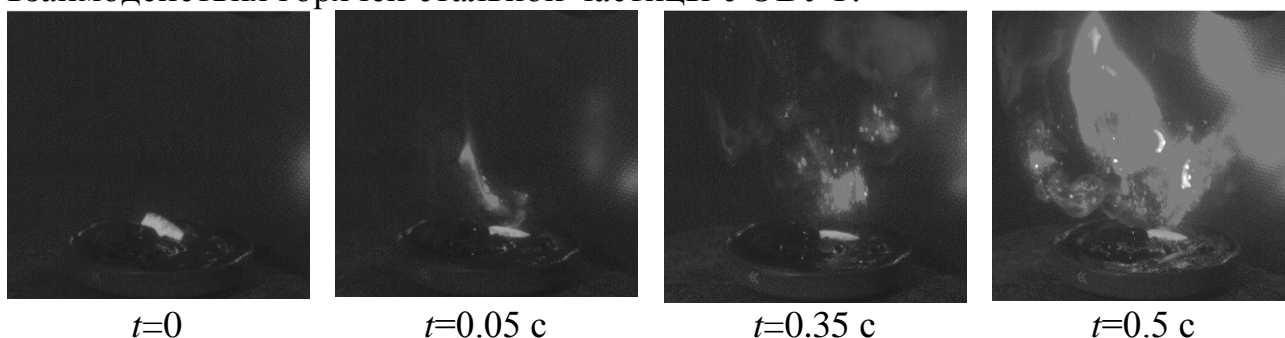


Рис. 2. Кадры видеोगраммы зажигания ОВУТ горячей стальной частицей при $T_p \approx 1300$ К, $r_p = 6$ мм, $z_p = 8$ мм

Для анализа закономерностей зажигания топлива регистрировались характеристики только устойчивых процессов инициирования, переходящих в стационарное горение ОВУТ. Считалось, что зажигание суспензионного топлива устойчиво, если длительность горения составляла не менее 5 с [2].

Видно (рисунок 2), что в начальный момент взаимодействия локального источника энергии с топливом происходит интенсивный прогрев приповерхностного слоя, сопровождающийся испарением жидкого горючего компонента и термическим разложением органической части угля. В окрестности разогретой частицы формируется горючая парогазовая смесь. При движении в результате диффузионно-конвективного теплопереноса вдоль боковых граней частицы парогазовая смесь прогревается до температуры зажигания, происходит воспламенение. Стоит отметить, что при интенсификации испарения горючей жидкости в результате прогрева приповерхностного слоя топлива мелкодисперсные частицы угля уносятся потоком газов в среду окислителя. При прохождении зоны пламенного горения парогазовой смеси происходит зажигание частиц угля (рисунок 2).

На рисунке 3 приведены зависимости времени задержки зажигания ОВУТ от начальной температуры локального источника энергии при варьировании размеров последнего.

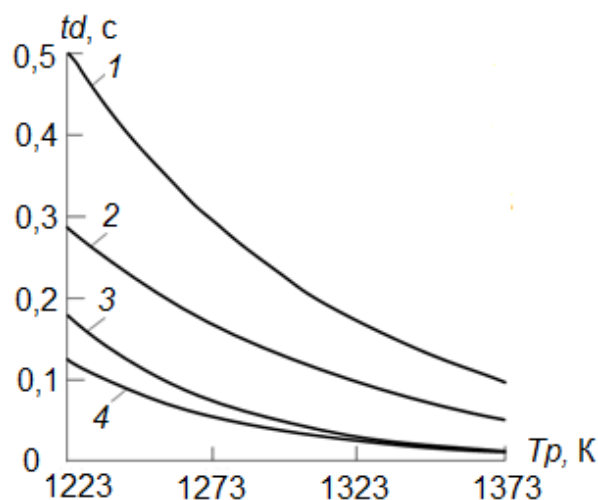


Рис. 3. Зависимость времени задержки зажигания ОВУТ от начальной температуры горячей стальной частицы при: 1 – $r_p=5$ мм, $z_p=4$ мм; 2 – $r_p=5$ мм, $z_p=6$ мм; 3 – $r_p=6$ мм, $z_p=5$ мм; 4 – $r_p=6$ мм, $z_p=8$ мм

Зависимости $t_d=f(T_p)$ имеют нелинейный характер при варьировании начальной температуры горячей частицы в достаточно широком диапазоне. В соответствии с теорией зажигания конденсированных веществ [3–6] интенсивность переходного процесса возрастает с увеличением теплосодержания источника, характеризующегося его размерами и начальной температурой. При увеличении же последней влияние размеров частицы на времена задержки зажигания становится менее масштабным (рисунок 3).

Анализ результатов экспериментальных исследований также позволил установить минимальную начальную температуру частицы $T_p \approx 1200$ К, при которой в системе «горячая частица – ОВУТ – воздух» происходит зажигание. Относительно высокое значение T_p можно объяснить следующим. При тепловом контакте локального источника энергии с ОВУТ его зажиганию предшествуют стадии инертного прогрева, испарения горючей жидкости, термического разложения угля. При прогреве приповерхностного слоя суспензионного топлива в окрестности границы контакта с частицей, а также протекании эндотермических фазовых переходов и термического разложения происходит достаточно существенное охлаждение источника. В условиях $T_p < 1200$ К оставшейся энергии недостаточно для прогрева и инициирования горения парогазовой смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-6491.2016.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Захаревич А.В., Кузнецов В.Т., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. – 2008. – № 5. – С. 54–57.

2. Wang S., Chen H., Liu N. Ignition of expandable polystyrene foam by a hot particle: An experimental and numerical study // Journal of Hazardous Materials. – 2015. – V. 283. – P. 536–543.
3. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 1971. – 615 с.
4. Вилунов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. – Новосибирск: Наука, 1984. – 190 с.
5. Зельдович Я.Б. и др. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
6. Vilyunov V.N., Zarko V.E. Ignition of solids. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. – 442 p.

Научный руководитель: Д.О. Глушков, к.ф.-м.н., инженер-исследователь, каф. АТП ЭНИН ТПУ.

ЗАЖИГАНИЕ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОДЫ РАЗНОГО КАЧЕСТВА

К.Ю. Вершинина
Томский политехнический университет
ЭНИН АТП

Одним из перспективных направлений развития теплоэнергетики является разработка и использование различных водоугольных (ВУТ) [1], а также органоводоугольных (ОВУТ) [2] топлив. Сжигание суспензионных топлив представляет значительный интерес, в первую очередь, в целях снижения образования оксидов азота и серы [3, 4], а также расширения сырьевой базы энергопредприятий, поскольку в качестве компонентов ВУТ и ОВУТ возможно эффективно использовать не только качественные угли, но также отходы углеобогащения.

Массовая доля воды в угольных суспензионных топливах значительна и в среднем составляет 40–50%. Это является одним из факторов, сдерживающих промышленное использование ВУТ и ОВУТ, особенно для предприятий, имеющих ограниченный доступ к водным ресурсам. В настоящее время отсутствуют сведения о влиянии качества воды в составе ВУТ и ОВУТ на процесс инициирования их горения, а также оценки возможности использования воды с типичными для энергетики примесями (например, технической воды с тепловой электрической станции) для приготовления ВУТ.

Целью данной работы является определение характеристик зажигания капель водоугольных топлив, приготовленных с использованием воды разной степени очистки.

Компоненты суспензий. Исследовались характеристики зажигания трех топливных составов:

- ВУТ № 1: 50% каменный уголь марки Д, 49,5% вода техническая, 0,5% пластификатор;
- ВУТ № 2: 50% каменный уголь марки Д, 49,5% вода водопроводная, 0,5% пластификатор;
- ВУТ № 3: 50% каменный уголь марки Д, 49,5% вода дистиллированная, 0,5% пластификатор.

Используемая в экспериментах техническая вода получена с ТЭЦ–3 г. Томска. Дистиллированная вода соответствует ГОСТ 6709–72, а водопроводная – нормативным требованиям СанПиН.

Экспериментальный стенд для исследования процессов зажигания и горения одиночных капель ВУТ аналогичен применяемому в опытах [5]. Используемая в исследовании экспериментальная методика [5] основана на помещении одиночной капли ОВУТ, закрепленной на спае термоэлектрического преобразователя (диапазон измеряемых температур 273–1273 К, систематическая погрешность ± 10 К, инерционность 1 с, диаметр спая около 0,1 мм), в поток разогретого окислителя (рис. 1). Процессы нагрева, зажигания и горения одиночных капель топлив исследованы с применением средств высокоскоростной видеорегистрации, программного обеспечения Tema Automotive.

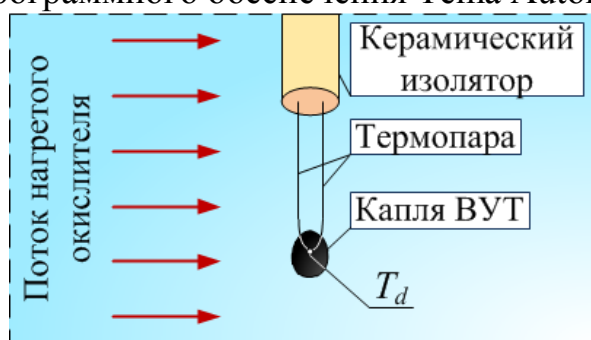


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Регистрировались значения следующих параметров: температура (T_g) и скорость движения (V_g) потока окислителя; размер (начальный радиус R_d) капли; температура на границе «спай термопары – топливная композиция» (T_d); время задержки зажигания (τ_d), горения (τ_b) и полного сгорания ($\tau_c = \tau_d + \tau_b$) капли ВУТ. Критерии зажигания и погрешности вычисления основных характеристик зажигания аналогичны экспериментам [5].

Результаты. На рис. 2 приведены зависимости времен задержки зажигания от температуры окислителя для трех исследуемых составов ВУТ. Видно, что с увеличением T_g инерционность зажигания существенно снижается за счет интенсификации всех стадий инициирования горения одиночной капли суспензионного топлива, включающих инертный прогрев, испарение влаги, выход летучих и их газофазное горение, прогрев и зажигание коксового остатка. Следует отметить, что для капель ВУТ на основе технической воды характерны наименьшие значения τ_d (рис. 2), а также более быстрый рост и большие значения температуры в зоне горения (рис. 3) по сравнению с аналогичными характеристиками для ВУТ на основе водопроводной и дистиллированной воды, что, вероятнее всего, обусловлено наличием в технической воде горючих примесей и стоков, испарение и горение которых ускоряет прогрев и зажигание углерода.

Несмотря на это, отличие значений τ_d для ВУТ на основе разной по качеству воды составило не более 8 %; отличие значений T_d – не более 6 % (данные отклонения не являются значительными).

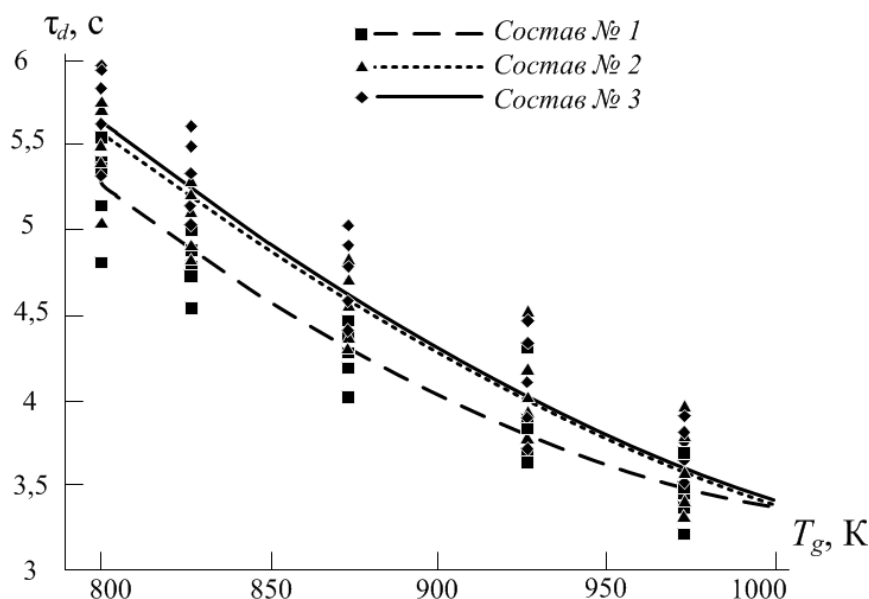


Рис. 2. Времена задержки зажигания каплей ВУТ в зависимости от температуры окислителя ($R_d \approx 1$ мм и $V_g \approx 3,5$ м/с)

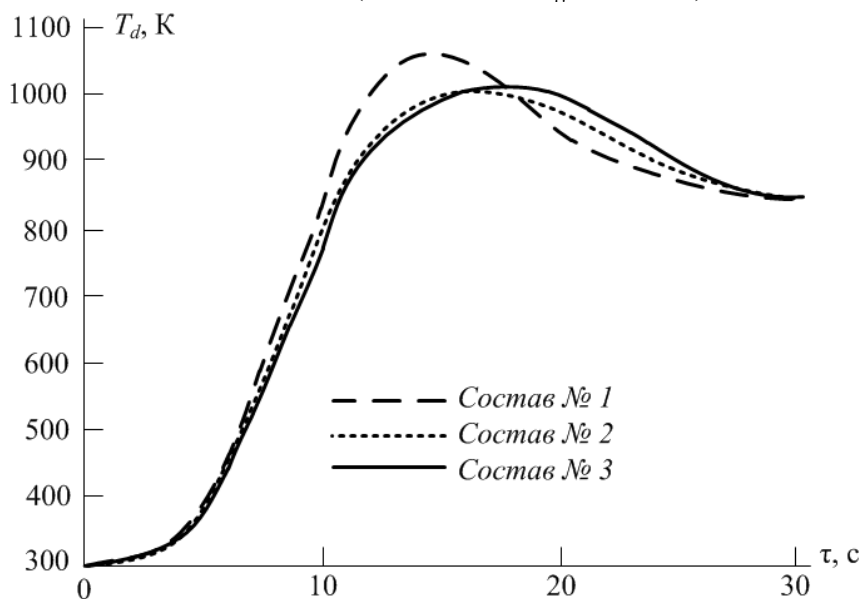


Рис. 3. Тренды изменения температуры капли ВУТ ($T_g \approx 870$ К, $R_d \approx 1$ мм и $V_g \approx 3,5$ м/с)

На рис. 4 представлены результаты определения инерционности зажигания каплей ВУТ разных размеров. Для крупных каплей необходимы более длительные времена инертного прогрева для инициирования устойчивого горения. Кривые на рис. 3 иллюстрируют существенно нелинейный характер зависимости $\tau_d(R_d)$, обусловленный нелинейными зависимостями скоростей прогрева каплей, испарения компонентов и выхода летучих от площади поверхности капли.

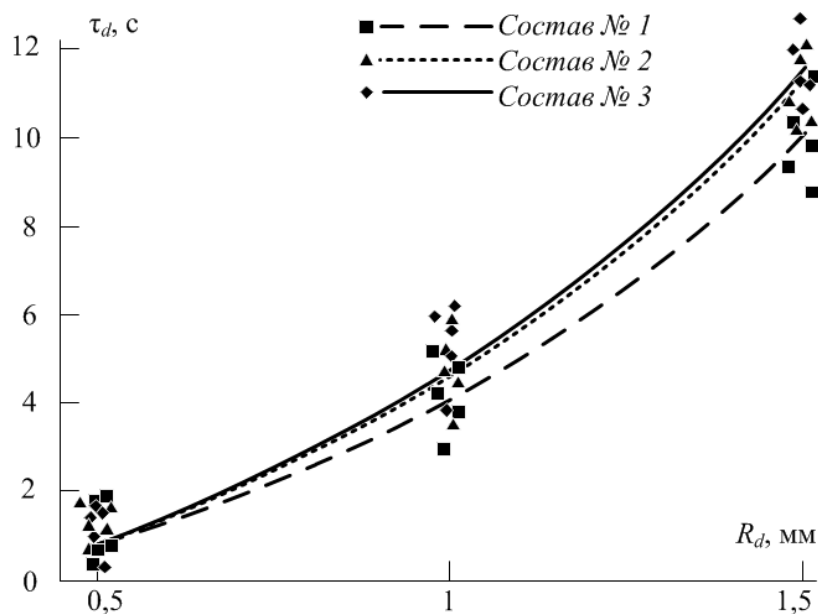


Рис. 4. Времена задержки зажигания капель ВУТ в зависимости от размеров капель (при $T_g \approx 916$ К и $V_g \approx 3,5$ м/с)

При варьировании начальных размеров капель ВУТ на основе технической воды также наблюдались меньшая инерционность зажигания, чем для ВУТ на основе водопроводной и дистиллированной воды (рис. 4). Максимальное отличие значений τ_d капель ВУТ при варьировании их начальных размеров для составов на основе воды разного качества не превышало 15 %.

Как при уменьшении начального размера капли ВУТ, так и при росте температуры окислителя влияние фактора очистки воды на инерционность зажигания одиночных капель суспензионного топлива ослабевает. Для малых капель с повышением температуры окислителя существенно интенсифицируется процесс инициирования горения. Эксперименты показали, что возможные отличия компонентного состава воды не могут оказывать существенное влияние на инерционность процессов зажигания (особенно при температурах (более 1000 К) окислителя и размерах (менее 0,5 мм) капель топлива, соответствующих установкам большой и малой энергетики).

Таким образом, можно сделать вывод о незначительном влиянии степени очистки воды, используемой для приготовления суспензионных угольных топлив на характеристики их зажигания. В то же время, выполненные эксперименты иллюстрируют возможность использования воды разного качества (в том числе технической) для приготовления суспензий ВУТ и ОВУТ.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 15-19-10003).

ЛИТЕРАТУРА:

1. He Q., Xie D., Xu R., Wang T., Hu B. The utilization of sewage sludge by blending with coal water slurry // Fuel. – 2015. – V. 159. – P. 40–44.

2. Svoboda K., Pohořelý M., Jeremiáš M., Kameníková P., Hartman M., Skoblja S., Šyc M. Fluidized bed gasification of coal–oil and coal–water–oil slurries by oxygen–steam and oxygen–CO₂ mixtures // Fuel Processing Technology. – 2012. – V. 95. – P. 16–26.
3. Осинцев К.В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов // Теплоэнергетика. – 2012. – № 6. – С. 21–27.
4. Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М. Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей // Теплоэнергетика. – 2014. – № 7. – С. 36–41.
5. Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Отличия характеристик зажигания водоугольных суспензий и композиционного жидкого топлива // Химия твердого топлива. – 2016. – № 2. – С. 21–33.

Научный руководитель: П.А. Стрижак, д.ф.-м.н., профессор каф. АТП ЭНИН ТПУ.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТОПОЧНОЙ СРЕДЫ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СЖИГАНИЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ И ИХ СМЕСИ

О.М. Кокшарев

Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5ВМ5А

В настоящее время в сфере развития энергетики все большее предпочтение отдается установкам с минимальным влиянием на окружающую среду, поскольку повышаются тарифы за выбросы вредных веществ и вводятся законодательные процедуры по закрытию энергетического предприятия вследствие невозможности обеспечения регламентированного объема выбросов.

Актуальность данной работы обусловлена, как увеличением экологических параметров ТЭЦ, так и повышением надежности работы котельных агрегатов при переходе на смесь каменных топлив. В частности, рассматривается возможность замещения экибастузского каменного угля, кузнецким марки Т и/или их смесью [1, 2]. Поскольку в районах сжигания экибастузского угля на электростанциях Урала (Рефтинская, Троицкая, Нижнетуринская, Верхнетагильская, Серовская, Курганская, Красногорская), Западной Сибири (Омская ТЭЦ-4 и ТЭЦ-5), Центрального района Европейской части (Черепетская ГРЭС) только ежегодный прирост золоотвалов и выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от сжигания в этих районах экибастузских углей превышает 10 млн т.

Таким образом объектом исследования является котел БКЗ-420-140 запроектированный на сжигание высокозольных экибастузских углей по Т-образной компоновке с пережимом в верхней части топки. Характеристики исследуемых топлив представлены в таблице 1 [3]. При этом для смеси углей

принято следующее процентное соотношение: 70 % – уголь Экибастузского бассейна, 30% – уголь Кузнецкого бассейна.

Табл. 1. Основные характеристики исследуемых углей

Характеристики топлив	Экибастузский 1СС	Кузнецкий Д	Смесь Экиба- стузского и Куз- нецкого Д
Влажность, %	6,5	11,5	7,97
Зольность, %	36,9	15,9	30,0
Содержание серы, %	0,7	0,4	0,43
Содержание углерода, %	44,8	56,4	48,28
Содержание водорода, %	3,0	4,0	3,3
Содержание азота, %	0,8	1,9	1,13
Содержание кислорода, %	7,3	9,9	8,08
Низшая теплота сгора- ния, МДж/кг	17,38	21,9	18,736
Выход летучих, %	25	40,5	29,65

Исследование топочных процессов проведено с использованием пакета прикладных программ FIRE 3D [4, 5]. В данном программном продукте теплообмен и горение в газовой фазе представляются на основе Эйлера способа описания, т.е. используются стационарные пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Для описания движения и теплообмена одиночных частиц топлива и золы вдоль их траекторий с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду применяется Лагранжев подход. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «k-ε» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник.

На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования температурного уровня в объеме топочной камеры при организации сжигания проектного (экибастузского угля), непроектного (кузнецкого угля) и их смеси.

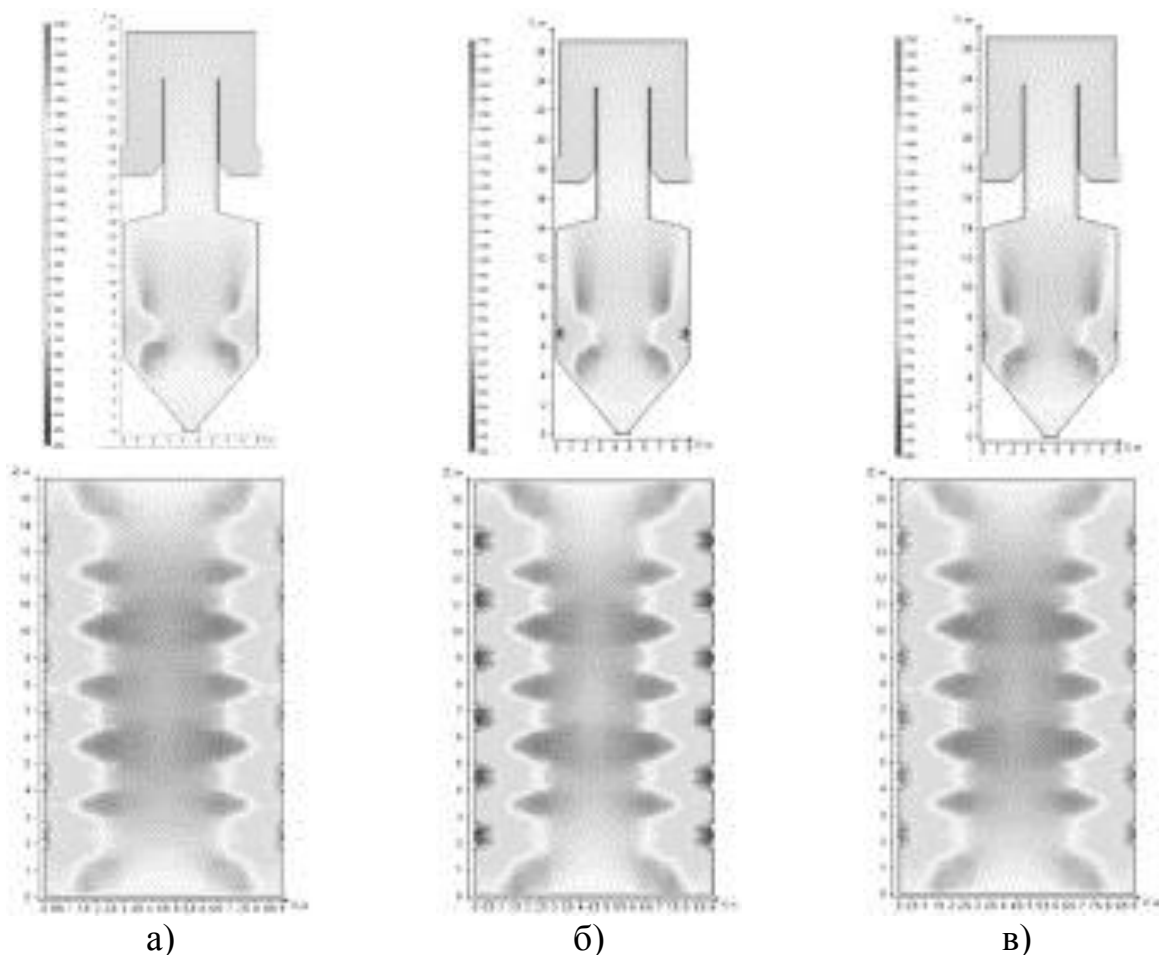


Рис. 1. Температурные поля при сжигании исследуемых топлив: а) экибастузский уголь; б) кузнецкий уголь в) смесь кузнецкого и экибастузского угля

Во всех вариантных исследованиях на уровне горелочных устройств наблюдается отчетливое ядро горения с температурными полями 1600–1950 К (рис. 1). Уровень расположения ядра горения соответствует организации сжигания с использованием вихревых горелок. На уровне пережима топочной камеры температура дымовых газов в среднем составляет 1450 К и к выходу из топки снижается до 1300-1350 К. Наибольшие изменения по температурному уровню в топочной камере наблюдаются при организации сжигания кузнецкого угля марки Д. Так в области фронтальной и тыльной стен присутствует непосредственный контакт высокотемпературного ядра горения с испарительными экранами и наброс факела на поверхности образующие пережим, что может свидетельствовать о нарушении циркуляции в отдельных контурах и пережога труб формирующих пережим (рис. 1, б).

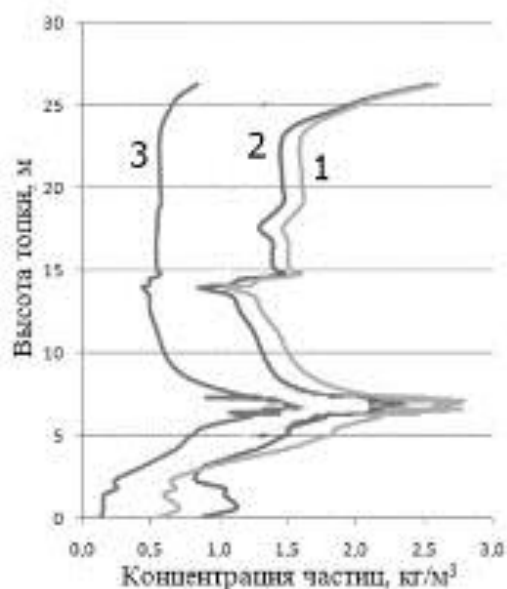


Рис. 2. Изменение концентрации частиц ($\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-2}$) по высоте топочной камеры при сжигании различных топлив: 1 – экибастузский уголь; 2 – кузнецкий уголь; 3 – смесь кузнецкого и экибастузского угля

Согласно полученным результатам моделирования концентрации твердых частиц по высоте топочной камеры (рис. 2), можно наблюдать максимальные значения при сжигании экибастузского угля (рис. 2, кривая 1) 250 г/м^3 , а минимальные значения при сжигании кузнецкого угля марки Д (рис. 2, кривая 3) 50 г/м^3 . При этом при сжигании смеси углей концентрация твердых частиц на выходе из топки аналогична концентрации при сжигании высокозольного твердого топлива. Следовательно, необходимо провести варианты исследования организации сжигания смеси топлив при более высокой доле кузнецкого угля.

На основании проведенного численного исследования можно констатировать, что возможна организация сжигания кузнецкого угля при оптимизации параметра крутки и его смеси с экибастузским с увеличением доли кузнецкого угля в смеси. В особенности наиболее проблемным является организация кузнецкого угля вследствие существенного увеличения значения температуры продуктов сгорания на выходе из топки и в ядре горения. При организации сжигания смеси в процентном содержании 70/30 температурный уровень выше чем при сжигании проектного топлива, но при этом относительно равномерен по объему топочной камеры и в среднем отличается на $100 \text{ }^\circ\text{C}$, но при этом качественного снижения концентрации золовых частиц не наблюдается.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гиль А.В., Обухов С.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Численное исследование влияния параметра крутки горелочных устройств на термодинамические процессы в топке котла БКЗ-420-140 // Известия Томского политехнического университета, 2013. – т. 323. – № 4.
2. Гиль А.В., Заворин А.С., Обухов С.В., Старченко А.В. Численный анализ сжигания пылеугольного топлива с различными теплотехнически-

- ми свойствами в камерной топке котла БКЗ-420-140-2 // Электрические станции. – 2010. – № 11 с. 2–9.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
 4. Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика, 2012. – том 19, № 5.
 5. Гиль А.В. Предпроектный численный анализ перевода пылеугольных котлов на непроектное топливо // Теплофизические основы энергетических технологий : Материалы региональной научно-практической конференции - Томск: Изд. ТПУ, 2009, с. 133-138.

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ НИЖНЕГО ДУТЬЯ НА ПРОЦЕССЫ В НТВ ТОПКЕ

¹А.А. Худеев, ²Е.В. Шутова, ³К.Ю. Орлова
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группы ¹5ВМ5А, ²5В41, ³А5-43

Низкотемпературное вихревое сжигание является современной эффективной технологией использования твердых органических топлив. Такой способ сжигания и топочное устройство для его осуществления разработаны выдающимся советским ученым-теплоэнергетиком Виктором Владимировичем Померанцевым.

В основе технологии лежит принцип организации низкотемпературного вихревого (НТВ) сжигания твердого топлива угрубленного помола в условиях многократной циркуляции частиц в камерной топке.

В НТВ-топке две зоны горения. Вихревая зона занимает объём нижней части топки от устья топочной камеры до горелок. Прямоточная зона горения располагается над вихревой зоной в верхней части топки.

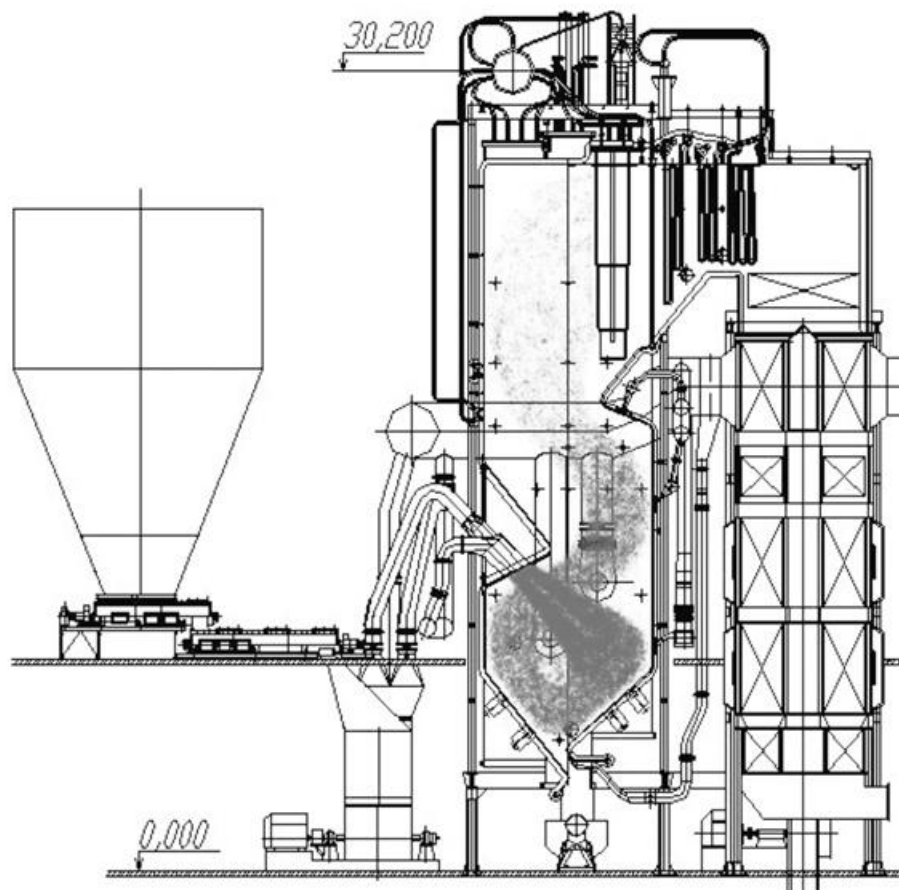


Рис. 1. Общий вид котла с НТВ топкой

За счет взаимодействия двух организованных потоков создается аэродинамика вихревой зоны. Первый поток сформирован из топливовоздушной смеси; второй поток состоит из горячего воздуха, подаваемого в топку через систему нижнего дутья. Потоки направлены навстречу друг другу и образуют пару сил, создающих вихревое движение в нижней части топки.

Для исследования влияния скорости нижнего дутья (СНД) был произведен расчет трех различных воздушных режимов с фиксированными значениями первичного (горелочного) дутья и вторичного дутья – 50 м/с для каждого. Для расчетов взята выполненная ранее математическая модель котла с НТВ топкой [2].

В таблице 1 приведена скорость в системе нижнего дутья и воздушные режимы моделей.

Табл. 1. Воздушные режимы для оценки влияния скоростей в СНД

Наименование параметра	Обозначение режима		
	а	б	в
Первичное дутье, ω_1 , м/с	50,00	50,00	50,00
Вторичное дутье, ω_2 , м/с	50,00	50,00	50,00
Нижнее дутье, ω_3 , м/с	30,00	40,00	50,00
Избыток воздуха, α	1,22	1,20	1,20

В результате проведенного моделирования установлено что: во всех трех режимах наблюдается отведение горелочного дутья нижним. Происходит образование восходящего потока в средней части топки. При взаимодействии с аэродинамическим выступом, поток затормаживается и со сниженными скоростями восходит в верхнюю часть топки, удаляясь через выходное окно конвективной шахты.

Высокая концентрация кислорода соответствует местам подвода воздуха в топку. Кислород практически отсутствует в области ниже надгорелочноого козырька.

По данным полученным при проведении моделирования были построены графики, на которых представлены средние значения температур и содержание кислорода по высоте топки, и как они меняются при изменении скорости нижнего дутья.

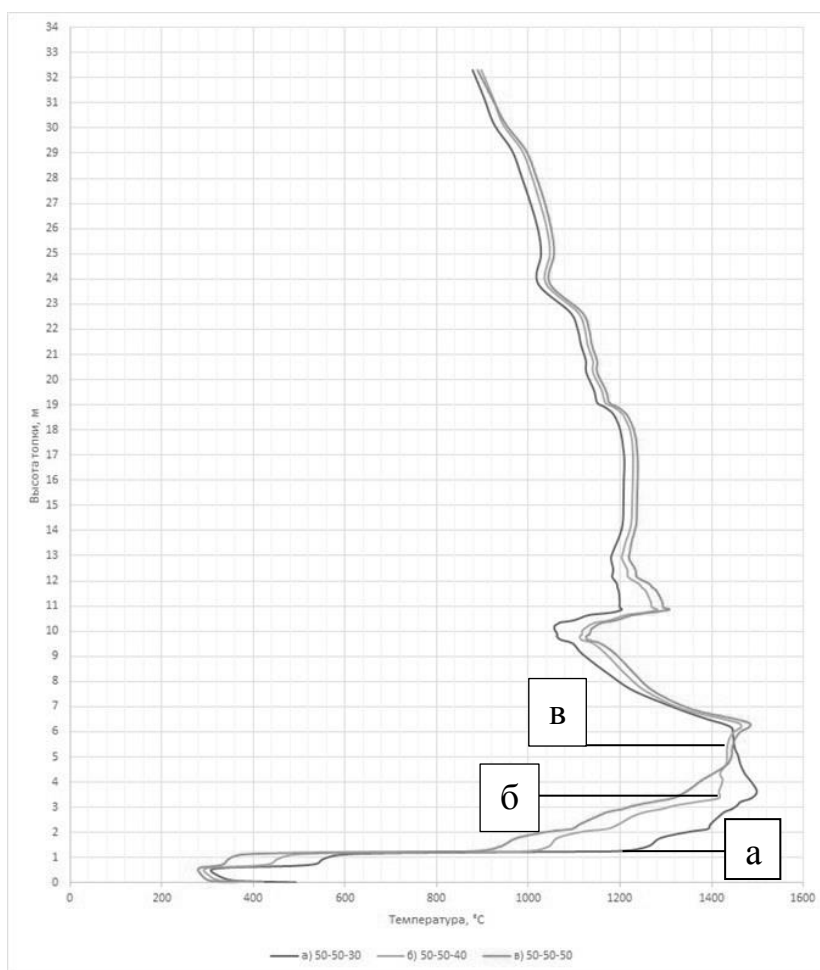


Рис. 2. Средние значения температур по высоте топки

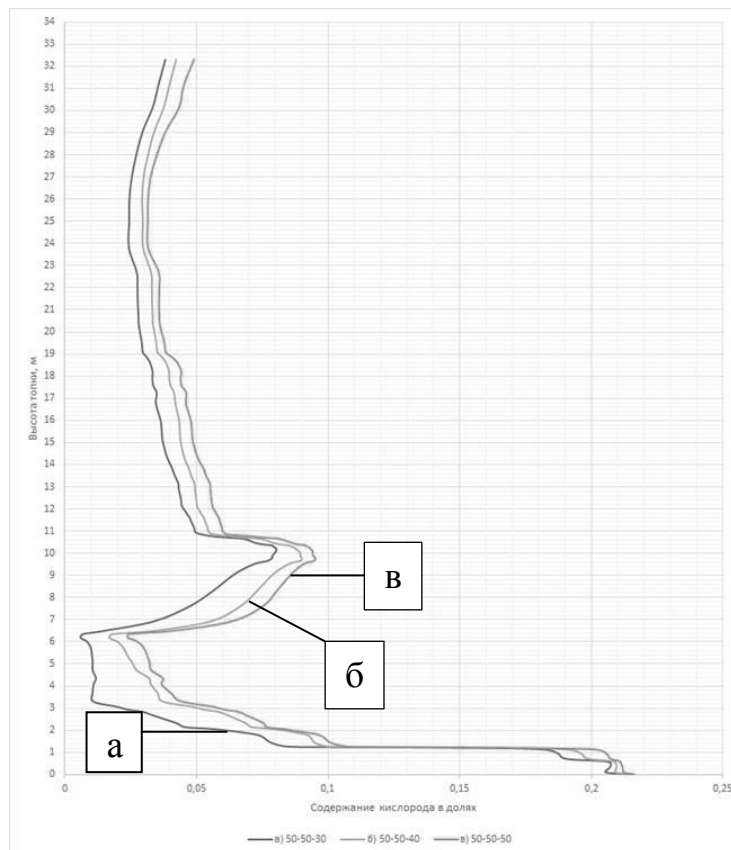


Рис. 3. Средние значения концентрации кислорода по высоте топки
Выводы:

С увеличением скорости нижнего дутья увеличивается температура выше козырька за счет выгорания частиц, которые выносятся из вихря с увеличением скорости нижнего дутья, а в нижней части, температура газов ниже за счет охлаждения газов потоком относительно холодного воздуха подаваемого через устье холодной воронки.

Содержание кислорода по высоте топки, от скорости зависит следующим образом: чем больше скорость нижнего дутья, тем больше концентрация кислорода, так как присутствует избыточный воздух, который не принимает участия в реакции горения, при условии того что в режимах принимался одинаковый избыток воздуха.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Математическое моделирование топочных процессов при сжигании грубоизмельченного топлива Лебедев Б.В., Заворин А.С., Старченко А.В. и др. // Горение и плазмохимия. 2006. Т. 4.4.М, С.255-259
2. Gergelizhiu P. S., Scherbakova K. Y., Lebedev B. V. Simulation data of combustion in P-49 boiler with low-temperature vortex combustion technology //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2015. – Т. 23. – С. 01013.

Научный руководитель: Б.В. Лебедев, к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИИ И РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ МОДЕЛИ НТВ ТОПКИ

¹ Е.Р. Цибизов, ² А.А. Худеев, ³ К.Ю. Орлова
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группы ¹5ВМ61, ²5ВМ5А, ³А5-43

В настоящее время перевод энергетических котлов на низкосортное твердое топливо является актуальной задачей энергетической отрасли. Для проектирования новых топочных камер необходимо исследование процессов, протекающих при сжигании твердого топлива. Решить данную задачу помогает математическое моделирование. Оно позволяет резко удешевить процесс исследования с необходимой достоверностью, так как используются апробированные технологии.

Технология низкотемпературного сжигания (НТВ-сжигание) является одним из перспективных, но все еще малоизученных направлений. Данный метод сжигания интересен тем, что при его исследовании был выявлен ряд преимуществ: стабилизация воспламенения и горения, повышения коэффициента тепловой эффективности, снижение шлакования и загрязнения рабочих поверхностей нагрева, снижение выбросов оксидов азота и серы [1].

Задачей данной работы является создание модели НТВ топки с учетом ее геометрических характеристик.

Математическая модель НТВ топки была создана при помощи пакета прикладных программ FIRE-3D, в основу которого заложены современные подходы и методы математического описания сложных физико-химических процессов.

Для расчета был выбран котел П-49, установленный на Назаровской ГРЭС. Котел П-49 (Пп-1600-25-545/545) конструировался для получения перегретого пара, при сжигании сушонки Назаровского бурого угля с жидким шлакоудалением. Котел предназначен для работы в блоке с турбиной К-500-240 мощностью 500 МВт. Котел П-49 – прямоточный, состоит из двух корпусов с трехходовой компоновкой, работающих независимо друг от друга [2].

Первые расчеты были выполнены на полной сетке котла П-49: 12 горелочных устройств, система нижнего дутья (СНД) разбитая на пять щелей по ширине топки котла, третичное дутье нижнего яруса (НЯ) в количестве 36 шт., средний ярус (СЯ) в количестве 16 шт [2]. Продольный и поперечный разрезы, а также модель топки в изометрии представлены на рисунке 1.

Размер расчетной сетки такой модели 79x45x192 ячеек. На основе данной модели проводились первые расчеты. Модель оказалась слишком громоздкой: полный расчет занимал от 3 до 4 суток, что не позволяло быстро оценить влияние исходных данных на результат. Кроме того, в данной модели не учтен аэродинамический выступ на тыльной стене топки котла. Для решения данных проблем было принято решение о создании новой модели, учитывающей все изъяны первой.

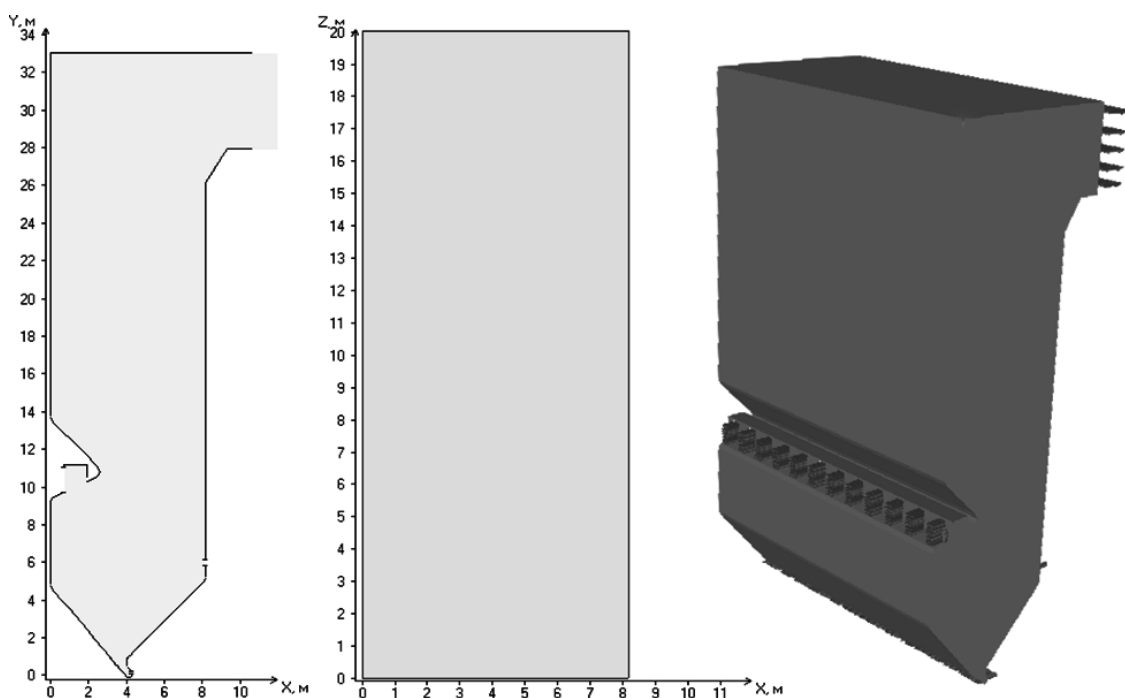


Рис. 1. Геометрическая модель исследуемого котла

Топка исследуемого котла симметрична по ширине, все горелки и устройства подачи воздуха располагаются в продольной плоскости топки, следовательно, аэродинамика является плоской (параллельно боковой стене), следовательно, целесообразно использовать для моделирования не весь топочный объем, а только его часть. На рисунке 2 показаны продольный и поперечный разрезы полученной модели.

Полученная расчетная сетка имеет размер 96x53x61 ячеек. Фундаментальными отличиями от первой модели являются:

- уменьшение объема модели;
- уменьшение количества горелочных устройств и устройств подачи воздуха – четыре горелки, СНД представляет собой щель вдоль всей ширины топки котла, НЯ включает в себя восемь устройств, СЯ включает в себя 4 устройства;
- модель учитывает оба аэродинамических выступа.

С помощью полученной модели возможно проводить расчет за небольшой промежуток времени (12-20 часов), при этом точность расчета остается достаточно высокой.

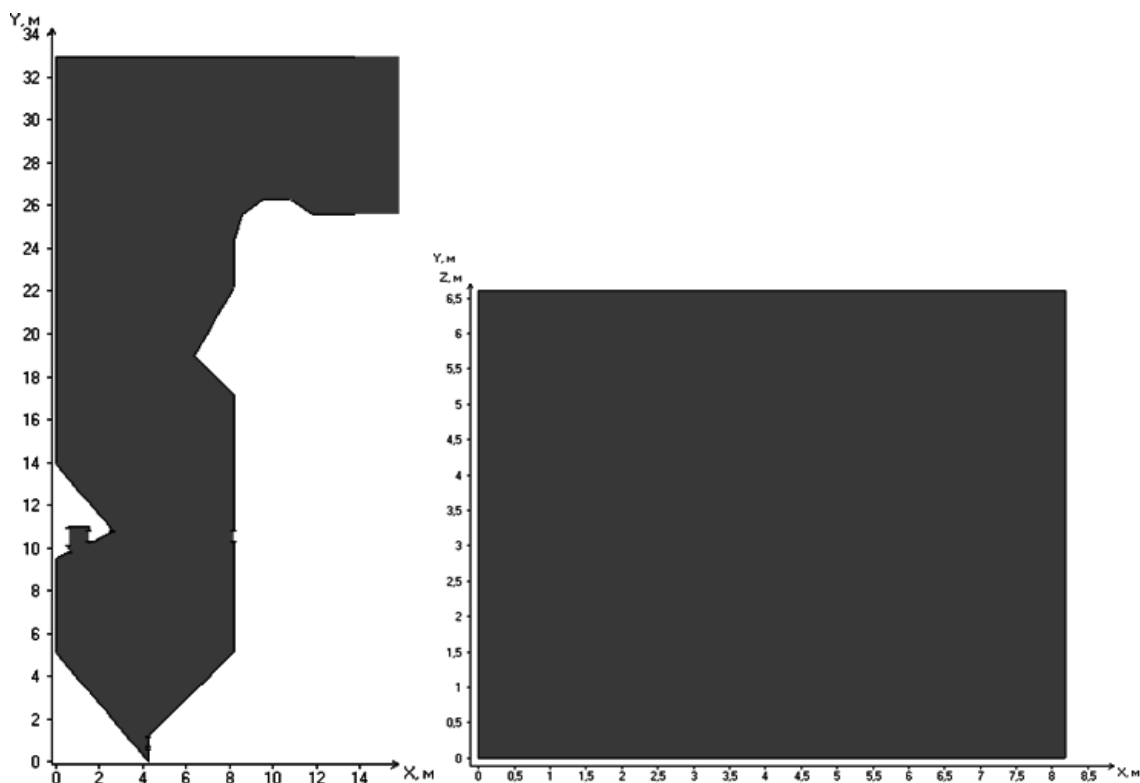


Рис. 2. Продольный (XY) и поперечный (XZ) разрез уменьшенной топки исследуемого котла

Полученная модель была опробована на буром угле Назаровского месторождения, характеристики которого представлены в таблице 1.

Табл. 1. Характеристики бурого угля Назаровского месторождения

Наименование	Обозначение	Размерность	Значение
Углерод	C^r	%	46,22
Водород	H^r		3,20
Кислород	O^r		15,60
Сера	S^r		0,49
Влага	W^r		24,00
Зола	A^r		10,00
Азот	N^r		0,49
Низшая теплота сгорания	Q_i^r	ккал/кг	5326,00
		кДж/кг	22380,00

В результате расчетов были получены следующие результаты:

- распределение скоростей в сечении по горелкам – рисунок 3;
- концентрация частиц между горелками – рисунок 4.

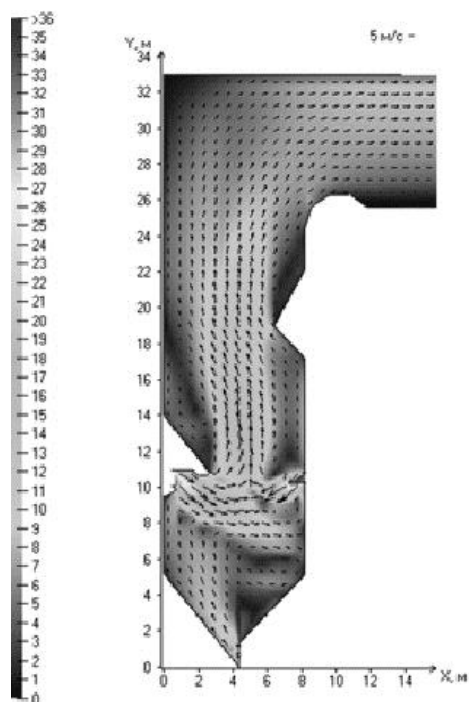


Рис. 3. Распределение скоростей

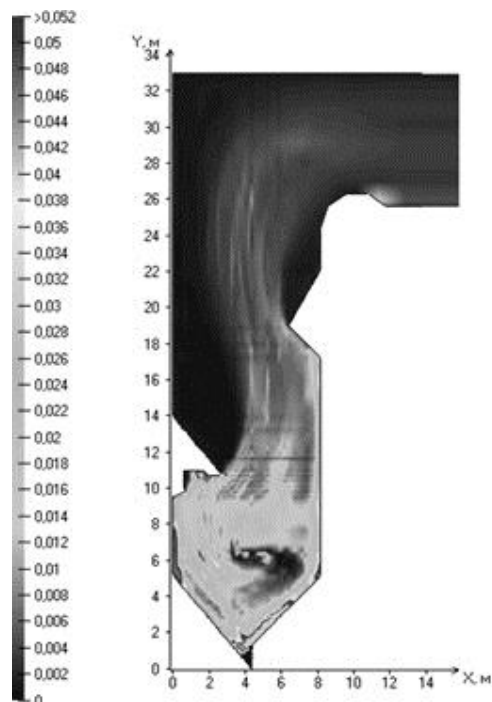


Рис. 4. Распределение концентрации частиц

Вывод: в ходе работы создана математическая модель НТВ-топки котла П-49 для проведения расчетов в пакете прикладных программ FIRE 3D. Полученные поля скоростей и концентрации частиц показали работоспособность модели. Требуется дальнейшая работа по поиску наиболее оптимальных параметров (скорости дутья, температуры дутья, фракционного состава топливовоздушной смеси) для исследования НТВ-сжигания на примере котла П-49.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Математическое моделирование топочных процессов при сжигании грубоизмельченного топлива Лебедев Б.В., Заворин А.С., Старченко А.В. и др. // Горение и плазмохимия. 2006. Т. 4.4.М, С.255-259.
2. Гургелижиу П.С. Численное моделирование аэротермохимических процессов в топочной камере котла блока 500 МВт при сжигании назаровского угля / П.С. Гургелижиу, К.Ю. Щербакова; науч. рук. Б.В. Лебедев // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — Т. 1. — [С. 37-39].

Научный руководитель: Б.В. Лебедев, к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Е.А. Зуева

Томский политехнический университет

ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5В31

Защита атмосферного воздуха от загрязнений является одной из наиболее острых проблем современности. Быстрый рост потребления энергии сопровождается, как известно, увеличением вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду.

Тепловые электростанции и котельные, потребляя огромное количество органического топлива, выбрасывают в атмосферу продукты сгорания, содержащие твердые частицы, оксиды серы, азота и углерода. Наиболее опасными из ранее перечисленных выбросов, являются выбросы оксидов азота, которые пагубно влияют на здоровье людей и являются толчком для протекания необратимых процессов изменения природы, которые могут стать причиной экологических катастроф.

Ежегодно требования к экологической безопасности ужесточаются. Согласно ГОСТ Р 50831-95 [1] выбросы оксидов азота для ТЭС, которые будут работать после 2016 года должны составлять не более 200 мг/м^3 для твердых топлив (при мощности $> 300 \text{ МВт}$). В связи с этим одной из основных проблем для проектировщиков становится обеспечение установленных санитарными органами предельно допустимых концентраций газообразных примесей (в первую очередь - оксидов азота) в атмосферном воздухе как для новых, так уже и для работающих станций.

В настоящее время известны разные способы борьбы с выбросами оксидов азота: сжигание топлива с малым коэффициентом избытка воздуха, рециркуляция дымовых газов, многоступенчатое сжигание, впрыск воды, исключение из работы одной или нескольких горелок (снижение паропроизводительности) и др. [2].

Для оптимизации процесса проектирования и уменьшения стоимости исследования использование численного моделирования является малозатратным решением рассматриваемой проблемы с возможностью проработать несколько вариантов. Это позволит проанализировать выбросы азота уже на этапе проектирования.

В последнее время на рынке программных обеспечений появилось множество продуктов, позволяющих смоделировать и оценить вредные выбросы. Пакеты прикладных программ отличаются по стоимости и по точности конечного результата.

Целью данной работы является сравнение программных продуктов при численной оценке генерации оксидов азота при сжигании угольной пыли. Для сравнения были выбраны следующие программные продукты: NO_2 и FIRE 3D- NO_x .

Программа для расчета выбросов оксидов азота NO_x основана на методике [3]. Данная программа представляет собой математическую модель. В качестве исходных данных в данной программе могут быть использованы результаты поверочного расчета котельного агрегата.

Пакет прикладных программ FIRE-3D- NO_x , представляет собой одномерную математическую модель, физическая постановка задачи и кинетическая схема которой представлены в [4, 5].

Объектом исследования выбрана топочная камера парового котла марки БКЗ-320-140-ПТ, в которой сжигается Ирша-бородинский уголь Канско-Ачинского месторождения. Паровой котел БКЗ-320-140-ПТ вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, П-образной компоновки. Топка котельного агрегата полуоткрытая с жидким шлакоудалением, состоит из двух сообщающихся восьмигранных предтопок. Каждый из предтопок оборудован четырьмя прямоточными двухъярусными горелками. В «пережиме» расположены сбросные горелки. (рис 1.)

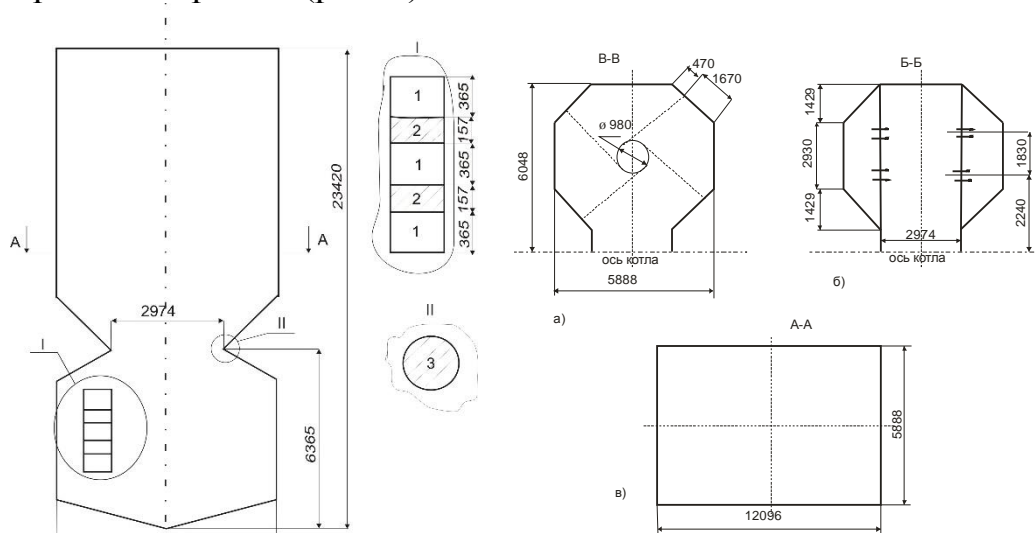


Рис. 1. Геометрические характеристики топки котла БКЗ– 320– 140 [6]: а) горизонтальное сечение камеры горения на уровне горелок; б) горизонтальное сечение пережима топочной камеры; в) горизонтальное сечение камеры охлаждения 1 – подача вторичного воздуха, 2 – подача топливной аэросмеси, 3 – подача сушильного агента

При работе с программными продуктами были выбраны следующие методы борьбы с выбросами азота: изменение паропроизводительности котельного агрегата и ступенчатое сжигание твердого топлива.

В ППП FIRE 3D- NO_x варьирование избытком воздуха в топке достигалось за счет изменения скорости подачи вторичного воздуха с фиксированным расходом топлива на котел, изменение нагрузки – изменением расхода топлива на котел с постоянным избытком воздуха, ступенчатое сжигание – перераспределением количества топлива по ярусам горелок при постоянных расходе топлива на котел и избытке воздуха. В качестве показателя организации ступенчатого сжигания принято отношение $\delta = V_1/V_p$, где V_1 – расход топлива на нижний ярус, V_p – расход топлива на котел.

При изменении нагрузки котла в диапазоне 220–320 т/ч концентрация оксидов азота возрастает на 120 мг/м^3 (рис. 2) за счет повышения температурного уровня в топочной камере (температура на выходе из топки изменялась от $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ до $1217 \text{ }^\circ\text{C}$).

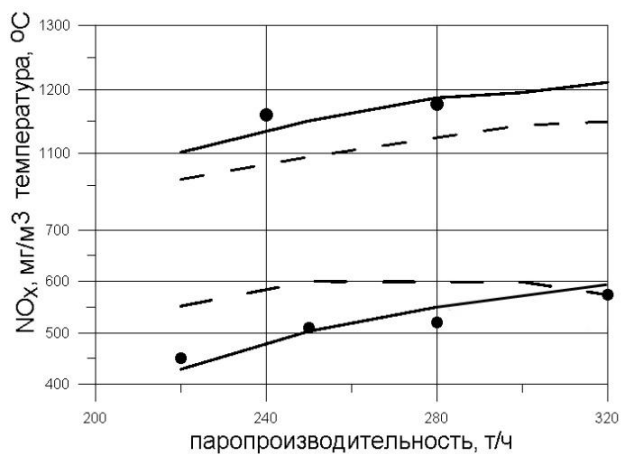


Рис. 2. Изменение температуры на выходе из топки и концентрации NO_x от паропроизводительности: ● — измерения [7], — — — расчет с помощью ППП FIRE 3D- NO_x , — — — расчет по методу [3]

Исследуемый диапазон изменения нагрузки, как у всякого котла с жидким шлакоудалением ограничен температурным уровнем, который обеспечивает надежный выход жидкого шлака, показывает эффективное влияние задействованных средств подавления образования оксидов азота и дает базу для сравнения с другими варьируемыми параметрами топочного процесса.

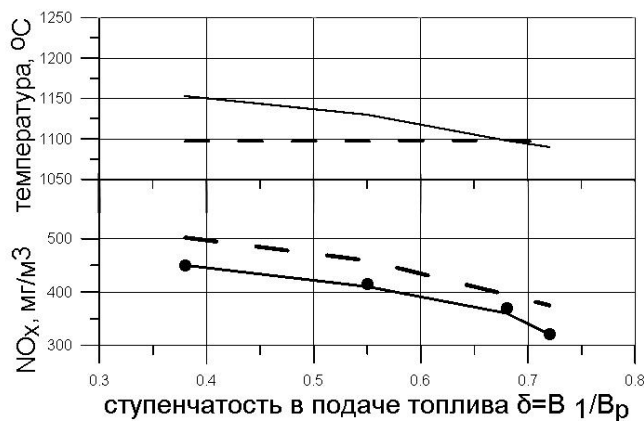


Рис. 3. Изменение температуры на выходе из топки и концентрации оксидов азота от ступенчатости подачи топлива: ● — измерения [7], — — — расчет с помощью ППП FIRE 3D- NO_x , — — — расчет по методу [3]

При изменении показателя распределения топлива при ступенчатом сжигании от 0,38 до 0,72 результаты численного исследования и натурных измерений имеют достаточно близкие значения (рис. 3). Увеличение подачи топлива на нижний ярус для данного котлоагрегата является оптимальным средством подавления оксидов азота в топке: NO_x уменьшается на 20% ($100\text{--}150 \text{ мг/м}^3$).

Подход, основанный на ступенчатой организации сжигания, обеспечивает температуру в зоне горения на достаточном высоком уровне и тем самым нормальное жидкое шлакоудаление. Поэтому в отличие от других способов он может использоваться для стабилизации выбросов в сочетании с изменением

нагрузки котла, компенсируя, например, таким образом образование NO_x при ее увеличении.

Выводы.

Применение ППП FIRE 3D- NO_x является эффективным инструментом для прогнозирования генерации оксидов азота в пылеугольных топках котлов по сравнению с ППП NO_x , что подтверждено результатами тестовых числительных экспериментов, показавших хорошую сходимость с данными натуральных измерений. Так как ППП FIRE 3D- NO_x учитывает информацию о протекании процессов выхода и горения летучих топлива, догорания коксового остатка, учитывать неизотермичность, турбулентную диффузию и перенос компонентов топочной среды осредненным движением.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р 50831-95 «Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования».
2. Котлер В.Р. и др. Оксиды азота в дымовых газах котлов / Котлер В.Р., Липов Ю.М., Шлейфер Б.М – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 144 с., ил.
3. Безгрешнов А.Н. Расчет паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
4. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during coal combustion // American Institute of Chemical Engineers Journal. – 1982. – V. 28. – № 2. – P. 302–310.
5. Визгавлюст, Н.В. Моделирование образования оксидов азота в пылеугольных топках при сжигании органического топлива / Н.В. Визгавлюст // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 57–61.
6. Будилов О.И., Заворин А.С. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции. – Томск.: Изд-во «Красное знамя», 1994. – 100с.
7. Исследование топочного процесса на котле ПК-39-2 блока 300МВт Ермаковской ГРЭС при сжигании экибастузских углей по схеме прямого вдувания. – Отчет о НИР ОРГРЭС. Сибирское отделение; науч. рук. Серант Ф.А. – Новосибирск, 1975. – 264с.

Научный руководитель: Н.В. Визгавлюст, к.т.н. старший преподаватель каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА РАБОТУ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ПРИМЕРЕ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ

Е.С. Попова

Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5ВМ5Б

Несмотря на огромное количество исследований в области поведения минеральной части твердого топлива в процессе горения, нельзя гарантировать отсутствие проблем с загрязнением поверхностей нагрева топочной камеры котельной установки. Большинство котлоагрегатов тепловых электростанций запроектированы на сжигание угля высокого качества, но по факту в настоящее время используется топливо с пониженными характеристиками. Данная ситуация будет способствовать возникновению риска нарушения работы топочной камеры.

Под шлакованием понимается налипание шлаковых частиц, обладающих клейкостной способностью, за счет нахождения в жидкой фазе. Шлакование происходит вследствие трех процессов: транспорта частиц к экранам топочной камеры, удара частиц об экранные трубы и закрепления их на поверхности [1].

В настоящее время в качестве исследования процесса шлакования является идея пристеночного термического слоя. С развитием вычислительной техники стало возможным с помощью математического моделирования рассчитать многочисленные параметры исследуемого объекта. Данными методами в том числе, возможно, рассмотреть вероятность шлакования поверхностей нагрева в топочной камере. Однако, как правило, влияние самого загрязнения на работу экранов в топке не учитывается.

Целью работы является изучение влияния слоя загрязнения на работу поверхностей нагрева топочной камеры на примере плоской стенки.

Объектом исследования является стенка трубы.

На основе задачи о теплопроводности [2] через плоскую стенку рассмотрим однородную стенку в качестве чистой поверхности, а многослойную – со слоем загрязнения (рисунок 1).

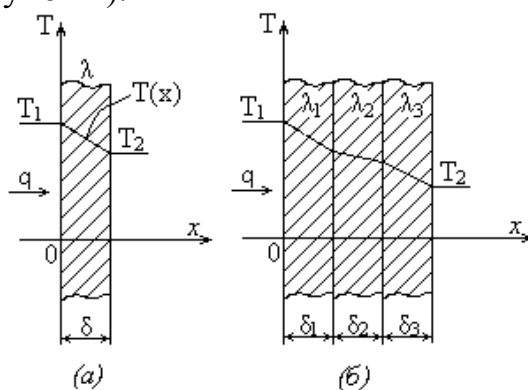


Рис. 1. Теплопроводность плоской стенки: а) однородная (чистая поверхность); б) многослойная (загрязненная поверхность)

Процесс стационарный, вследствие незначительного изменения коэффициента теплопроводности углеродистой стали от температуры в исследуемом диапазоне [3], принято считать данный коэффициент постоянным.

Задача рассматривается для объекта, выполненного из углеродистой стали марки 20 со слоем котельного шлака. Исходные данные приведены в таблице 1.

Табл. 1. Исходные данные [3]

Температура факела, К	Плотность теплового потока, КВт/м ²	Коэффициент теплового излучения факела	Коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м ² ·К ⁴)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Толщина стенки, м	Коэффициент теплопроводности загрязнения, Вт/(м·К)	Толщина загрязнения, м
2000	700	0,75	5,67	50	0,006	5	0-0,0013

Требуется оценить зависимость изменения температур внешней и внутренней поверхностей объекта от толщины загрязняющего слоя.

Найдем температуру на внешней и внутренней поверхности плоской стенки T_1 и T_2 .

При лучистом теплообмене между ядром горения и поверхностью нагрева плотность потока выражается как:

$$q_l = \varepsilon c_0 \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right), \quad (1)$$

где ε - степень черноты излучающего тела, $\varepsilon = 0,78$; c_0 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴). Следовательно, температура T_1 :

$$T_1 = 100 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \frac{q_l}{\varepsilon c_0}}. \quad (2)$$

По закону Фурье плотность теплового потока, проходящего через стенку, запишется в виде:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2). \quad (3)$$

Условием протекания процесса является $q_l = q$, тогда формула температуры поверхности стенки T_2 запишется как:

$$T_2 = T_1 - \frac{q_l}{\lambda} \cdot \delta. \quad (4)$$

При загрязненной поверхности формула (4) примет вид:

$$T_i = T_1 - q_{л} \left(\frac{\delta}{\lambda} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i^3}{\lambda_i^3} \right), \quad (5)$$

где T_i – температура i -го слоя, δ_i^3 – слои загрязнения, λ_i^3 – коэффициент теплопроводности загрязнений.

Необходимо отметить, что коэффициент теплопроводности выбирался исходя из значения температуры наружной поверхности стенки (рабочий диапазон углеродистой стали $T_1=200-400$ °С [4]). Полученные результаты отображены на рис. 2.

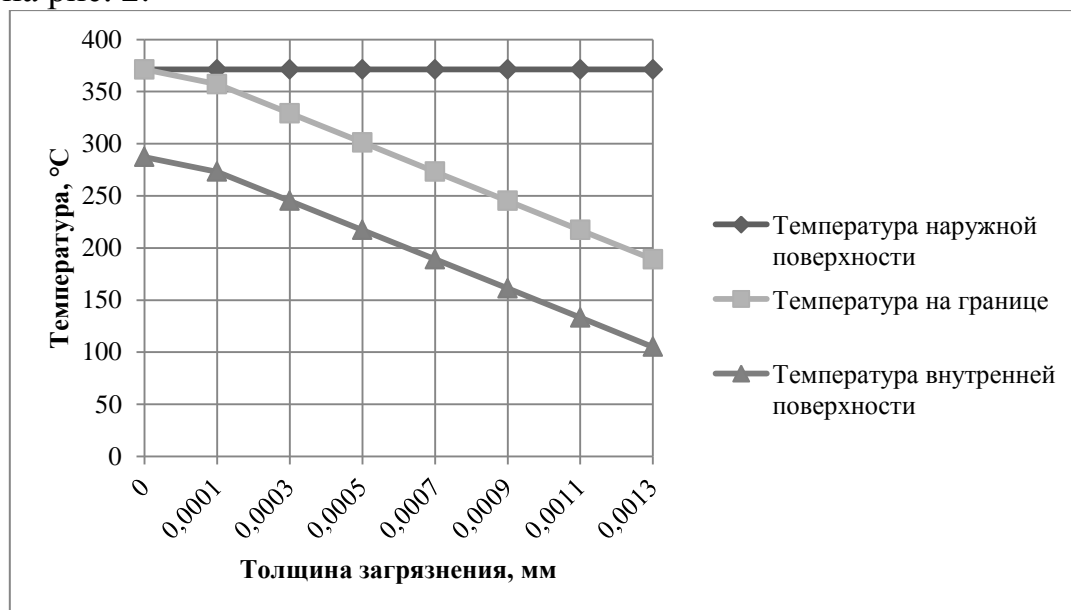


Рис. 2. Зависимость температуры от состояния поверхности

Полученные результаты показывают, что при росте слоя загрязнения температура внутренней стенки металла падает из-за увеличения термического сопротивления. Утолщение слоя шлака вызывает рост тепловых потерь, так как часть тепла тратится на прогрев отложения. Вследствие этого, на практике для обеспечения необходимых параметров рабочего тела, требуется увеличивать тепловой поток, а значит увеличивать температуру факела. Это приводит к дополнительному расходу топлива, и при этом следует помнить, что у углеродистой стали рабочий температурный диапазон ограничен (200-400 °С). Данная оценка служит для определения практических вариантов обеспечения нормальной работы поверхностей нагрева, одним из которых может являться своевременная очистка от загрязнений в виде паровой или водяной обдувки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вдовенко М.И., Баяхунов А.Я., Чурсина Н.Я. Загрязнение и износ поверхностей нагрева парогенераторов /М.И. Вдовенко, А.Я. Баяхунов, Н.Я. Чурсина. – Алма-Ата, «Наука» КазССР, 1978. – 134 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – Е.: Издательство АТП, 2015, – 320 с.

3. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512 с., ил.
4. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ., 1959.- 356 с

Научный руководитель: А.Ю. Долгих, ст. преподаватель каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЫРЬЯ НАКОПЛЕННОГО В ЗОЛОШЛАКООТВАЛАХ ТЭС СЖИГАЮЩИХ УГЛИ ОСНОВНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СИБИРИ

С.А. Лихач, А.С. Ильясова
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ

Непрерывно развивающиеся технологии современного мира и растущие города требуют постоянного увеличения ресурсов электрической и тепловой энергии. Энергетические предприятия способны производить необходимое их количество, работая при этом на высоких нагрузках. С годами теплоэлектростанции увеличивают свою мощность, пропорционально растут необходимые объемы топлива и, как следствие, объемы отходов.

Ежегодно российская энергетика производит не только электроэнергию и тепло, но и 27–30 млн. тонн золошлаковых отходов (ЗШО) а накоплено уже в общей сложности более 1,5 млрд. тонн. При этом у 115 станций из 172, работающих на угле, емкость золошлакоотвалов практически исчерпана [1]. К примеру, за годы работы ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» на территории приблизительно 70 га накоплено около 6 млн. т ЗШО [2].

Отходы представляют собой смесь шлака и золы, которые образуются при сжигании топлива в паровых котлах теплоэлектростанции и прохождении дымовых газов через золоуловители, а также воды, необходимой для смывания данной смеси в общие каналы гидроудаления. Из этих каналов получившаяся пульпа при помощи насосов попадает по трубопроводу на золошлакоотвал. Золошлакоотвал представляет собой довольно большую, в несколько десятков гектар, площадь земли с чашеобразным углублением и наращенными бортами по периметру – дамбой. Дно золошлакоотвала и дамба состоят обычно из смеси гравийного грунта с песчаным наполнителем.

Продолжение поступления золошлаковой смеси на золошлакоотвал после его заполнения (с образованием насыпи) крайне нежелательно, так как существует большая вероятность пыления в процессе высыхания золошлаков, что может произвести неблагоприятное воздействие на объекты, находящиеся вблизи санитарно-защитной зоны золошлакоотвала: жилые комплексы, водоемы и прочее, фильтрация высокоминерализованной воды через грунты основания приводит к ее смешению с поверхностными и грунтовыми водами [3, 4]. Выделение земель для оборудования новых золошлакоотвалов практически не

поддерживается городскими администрациями в связи с существующим распределением большинства земельных участков (под строительство жилых комплексов, для сельскохозяйственного использования и т.д.), а также в связи с расположением там водных объектов. При размещении на таких участках золошлакоотвалов будет невозможно выдержать границы санитарно-защитной зоны, т.е. минимально возможное расстояние от дамбы золоотвала до природных и жилых объектов. Данное расстояние строго регламентируется Земельным кодексом РФ. Поэтому проблема реализации смеси золы и шлака в настоящее время особенно актуальна для российских теплоэлектростанций.

В настоящее время лишь малая часть ЗШО, менее 15 процентов, перерабатывается в других отраслях [5]. Основная же масса годами хранится в золошлакоотвалах, занимая ценные земли и ухудшая экологию. Золошлакоотвалы многих станций, учитывая их возраст, работают сверх проектного срока, что требует постоянного наращивания их емкостей. Таким образом, станции постоянно несут затраты на возведение или модернизацию подобных объектов. На некоторых станциях существует по два и даже по три золошлакоотвала. Естественно, станциям в этом случае приходится платить огромный налог на использование земельных ресурсов. В настоящее время ситуация усугубляется повсеместным переходом энергетики на угольное топливо.

Занимаясь решением проблемы утилизации, сначала необходимо классифицировать известные способы утилизации. Проанализировав литературные источники можно выделить следующие её направления:

- выемка ЗШО из золошлакоотвала с последующей перевозкой и заполнением выработанных угольных карьеров, либо использование в ландшафтных работах;
- использование ЗШО в строительстве (использование ЗШО в данной отрасли хорошо изучено и находит наибольшее применение);
- использование ЗШО в сельском хозяйстве в качестве раскислителя почвы и др;
- извлечение из ЗШО отдельных элементов;
- современные подходы к утилизации ЗШО, в большинстве своем находящиеся в стадии разработки.

Для определения приемлемых способов утилизации необходимо проведение исследований ЗШО, накопленных в золошлакоотвалах каждой отдельной станции. В первую очередь интересен химический состав данного вида отходов и его равномерность по чаше золошлакоотвала, затем необходимо определить физические характеристики (такие как плавкостные свойства, плотность, гранулометрический состав, удельная поверхность и пр.).

Прежде всего, превращение ЗШО в продукцию тепловой электростанции связано с составлением и утверждением в соответствующих экологических инстанциях паспорта на данный материал. Паспорт содержит в себе сведения о химическом составе, физико-химических и прочих свойствах. При составлении паспорта необходимо учитывать зависимость характеристик продукции от многих факторов, таких как: вид сжигаемого угля, способ сжигания, топочный ре-

жим, нагрузка котлоагрегата, тип золоулавливающих устройств и пр. Таким образом, в паспорте ЗШМ должны быть представлены диапазоны возможного разброса требуемых параметров продукта.

Таким образом, необходимо производить крупномасштабные исследования, результатом которых станет составление зависимости характеристик продукции от вышеперечисленных условий и различных их сочетаний [3].

С целью оценки пригодности ЗШО как техногенного сырья проведено обследование золошлакоотвала и изучение проб углей и ЗШО электростанций, сжигающих канско-ачинские и кузнецкие угли. Результаты сравнительных тестов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение углей Кузнецкого и Канско-Ачинского бассейна

№ п/п	Характеристика		Кузнецкий бассейн	Канско-Ачинский бас- сейн, Ирша- Бородинское месторождение
				Угли
	1		2	3
1	Марка топлива		1СС	Б2
2	Рабочая масса топлива	W^p , %	9,0	33,0
3		A^p , %	18,2	6,0
4		$S^p_{к+ор}$, %	0,3	0,2
5		C^p , %	61,5	43,7
6		H^p , %	3,7	3,0
7		N^p , %	1,5	0,6
8		O^p , %	5,8	13,5
9	Низшая теплота сгорания, ккал/кг		5 700	3 740
10	Зольность на сухую массу, %		20,0	9,0
11	Максимальная влажность, %		--	36,0
12	Максимальная зольность, %		25,0	15,0
13	Максимальное содержание серы, %		--	0,5
14	Влажность гигроскопическая, %		1,6	12,0
15	Приведенная влажность, $\% * 10^3$ кг/ккал		1,58	8,82
16	Приведенная зольность, $\% * 10^3$ кг/ккал		3,20	1,61
17	Выход летучих на горючую массу, %		30,0	48,0
			Зола	
18	Темпера- тура плавл- кости зо- лы, °С	начало деформации	1100-1500	1 180
19		начало размягчения	1240-1500	1 210
20		начало жидкоплав- кого состояния	1280-1500	1 230

21	Химический состав золы на бессульфатную массу	SiO ₂ , %	60,0	47,0
22		Al ₂ O ₃ , %	20,8	13,0
23		TiO ₂ , %	0,83	--
24		Fe ₂ O ₃ , %	10,4	8,0
25		CaO, %	2,9	26,0
26		MgO, %	1,4	5,0
27		K ₂ O, %	2,61	0,5
28		Na ₂ O, %	0,6	0,5

Полученные данные коррелируют с опубликованными в [6]. При анализе таблицы 1 можно заключить, что исследуемая зола в основном идентична природным материалам, применяемым в строительстве (например, песок), основой которого является SiO₂, с низким содержанием оксида кальция, обогащенная оксидами алюминия. Состав золы делает ее перспективной также с точки зрения производства сульфата алюминия и глинозема, используемых при очистке сточных вод и в различных областях химической промышленности. Кроме того, в исследуемой золе содержится большое количество алюмосиликатных микросфер, используемых в нефтегазовой, химической промышленности, строительной отрасли и машиностроении [7, 8].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кожуховский И.С., Целыковский Ю.К. Угольные ТЭС без золошлакоотвала: реальность и перспективы // Энергетик. 2011. №6. С. 20-32.
2. Козлов М.М., Ильин В.Д., Целыковский Ю.К. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ-22 в народном хозяйстве // Электрические станции. – 2005. – №11.
3. Yoo, S.-W., Cho, Y.K., Jung, S.-H., Lee, K.-M., Kwon, S.-J. Quality control for coal combustion products in South Korea through assessed pozzolanic-activity index with long-term property tests. Journal of material cycles and waste management. January 2016, Pages 1-18.
4. Середин В.В., Шпирт М.Я. Редкоземельные элементы в гуминовом веществе металлоносных углей // Литология и полезные ископаемые. 1999. – №3. – с. 281-286.
5. Hot, J., Sow, M., Tribout, C., Cyr, M. An investigation of the leaching behavior of trace elements from Spreader Stoker Coal Fly Ashes-based systems. Construction and Building Materials. Volume 110, 1 May 2016, Pages. 218-226.
6. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Полые микросферы – эффективный заполнитель для высокопрочных легких бетонов // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №10. с. 80-83.
7. Ismagilov, Z.R., Shikina, N.V., Zhuravleva, N.V., Potokina, R.R., Rudina, N.A., Ushakov, V.A., Teryaeva, T.N. Aluminosilicate microspheres from the fly ash of kuzbass coal-burning power stations. Solid Fuel Chemistry. Volume 49, Issue 4, 17 July 2015, Pages 245-253.

8. Кузьмина Т.И. Эколого-экономическая эффективность использования твердых угольных отходов (угольной золы) при производстве глинозема – сырья алюминиевой промышленности // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. №7. С. 54-55.

Научный руководитель: Р.Н. Кулеш к.т.н., доцент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА НА ОБМЕННУЮ СПОСОБНОСТЬ КАТИОНИТА КУ-2-8

Е.В. Козлова
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5В51

Вода является доступным и сравнительно дешевым теплоносителем, однако в энергетике может представлять угрозу для водонагревательного оборудования и паровых котлов. Без надлежащей очистки примеси, содержащиеся в воде, могут образовывать отложения на стенках энергетического оборудования, интенсифицировать коррозию, способствовать вспениванию воды и уносить растворенные соли вместе с паром.

Для природных вод характерны следующие примеси:

1. Грубодисперсные примеси (песок, глина, остатки растительности)
2. Коллоидно-дисперсные примеси (соединения кремния, железа, органики)
3. Молекулярно-дисперсные примеси (соли, кислоты)

Грубодисперсные и коллоидно-дисперсные примеси удаляются на предочистке путем отстаивания дальнейшей коагуляции и фильтрации на механических фильтрах. Ионно-дисперсные примеси удаляются методом ионного обмена с применением синтетических смол. При использовании данного метода, часто возникает проблема, связанная с негативным влиянием различных форм железа на ионитный материал. Примеси железа в воде могут находиться в ионном, коллоидно-дисперсном виде, органических комплексов в коллоидном состоянии.

Данный факт является весомой проблемой, так как происходит отравление катионитов соединениями железа, что приводит к уменьшению основной характеристики катионита – обменной емкости.[1] Также железо способствует развитию железобактерий, которые получают энергию при окислении Fe^{+2} в Fe^{+3} , в результате в загрузке катионита может образоваться слизь.

Соединения Fe^{+2} находясь в ионном виде, вступают в обмен в первую очередь с ионами натрия и не наносят большой ущерб катионитам. Однако весомый удар на обменную емкость наносят соединения железа в коллоидном состоянии, из-за чего увеличивает расход регенерационного раствора.

Если примеси железа в ионном состоянии способны участвовать в обычных реакциях обмена, уменьшая тем самым рабочую обменную емкость катио-

нита относительно ионов жесткости, то железо в коллоидном состоянии может обволакивать зерна катионита, выводя из работы, а также внедряться в структуру ионита. В результате уменьшается обменная способность катионита, а также, увеличивается расход регенерационного раствора.

В таблице №1 представлены результаты анализов отдельных артезианских скважин, расположенных в Томской области. [2]

Табл. 1. Химический состав скважинной воды.

№	Определяемый элемент	с. Курлек	п. Бактин	п. Тимерязево	с. Мельниково	п. Калтай	ПДК
		Содержание элементов, мг/л					
1	pH	7,3	7,5	7,0	7,8	7,1	6-9
2	Жесткость общая	1,50	1,30	1,65	3,25	3,00	7
3	Железо общее, мг/л	6,18	2,20	14,50	7,50	0,94	0,3
4	Марганец (II), мг/л	0,49	0,25	1,80	0,76	0,28	0,1

Из таблицы видно, что железо варьируется от 0,94 мг/л до 14,5 мг/л особенно остро стоит проблема загрязнения катионов ионами железа, на малых котельных, которые устанавливают в рамках добычи полезных ископаемых, где отсутствует предочистка артезианских вод от соединений железа, марганца из-за трудности доставки реагентов.

Цель данной работы является исследование влияния различных концентраций железа в 2-х 3-х валентном состоянии на процесс ионного обмена.

Объект исследования – катионит КУ-2-8 в Na-форме. В работе использовали модельные растворы, содержащие ионы жесткости (Ca и Mg) с концентрацией 10 мг-экв/дм³. В растворы вводились добавки железа с различными концентрациями. Раствор подкислялся соляной кислотой из расчета на 1 метр раствора 4 мл соляной концентрированной кислоты. Кислота добавлялась для исключения гидролиза соединений железа и перевода его в коллоидное состояние.

Установка ионного обмена состояла из колонки с $d = 2$ мм и высотой 40 см. Объем катионита составлял 0,1 м³

Для регенерации ионита использовался 8% раствор NaCl.

Результаты представлены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты исследования.

Концентрация общего желе- за	Концентрация суммы Са, Mg	Жесткость фильтрата до проскока	Рабочая обменная емкость,	Полная об- менная ем- кость,
$\frac{\text{мг} \cdot \text{ЭКВ}}{\text{дм}^3}$	$\frac{\text{мг} \cdot \text{ЭКВ}}{\text{дм}^3}$	$\frac{\text{мг} \cdot \text{ЭКВ}}{\text{дм}^3}$	$E_p, \text{г-ЭКВ/м}^3$	$E_n, \text{г-ЭКВ/м}^3$
8	1	10	424,7	514,5
8	1,2	10	359,3	457,3
8	1,4	10	392,0	481,8
8	1,6	10	343,0	441,0
8	1,8	10	359,3	441,0
8	2	10	326,7	416,5
8	2,2	10	294,0	383,8
8	2,4	10	310,3	400,2
8	2,6	10	294,0	367,5
8	2,8	10	277,7	367,5
8	3	10	261,3	375,7

По результатам проведенных опытов был построен график зависимости обменной емкости от содержания железа в исходной воде. Из рисунка 1 видно, что критической концентрацией железа является 3 мг · эк/дм³. При такой концентрации время фильтроцикла значительно сократится, в связи, с чем возрастет потребление регенерационного раствора, NaCl.

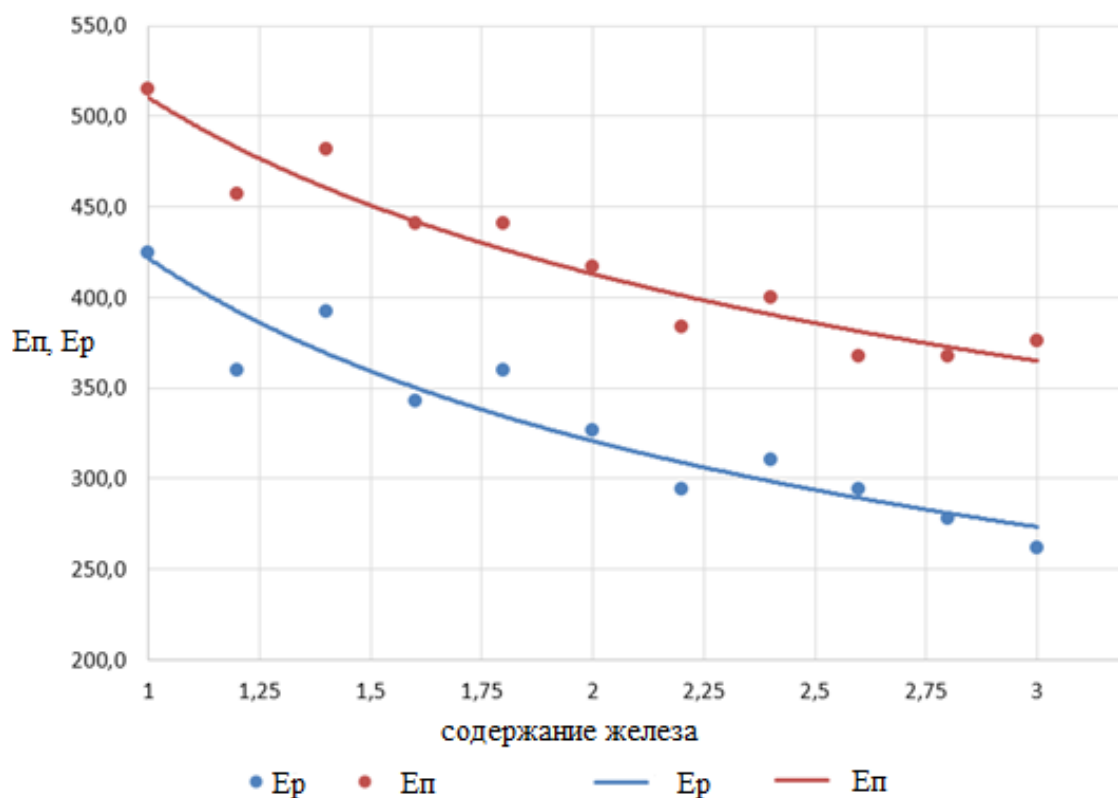


Рис. 1. Изменение обменной емкости в зависимости от концентрации железа в исходной воде

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ковылов А. С., Лавыгин В. М., Очков В. Ф., Водоподготовка в энергетике: Учебное пособие для вузов, - 2-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 309 с.
2. Черкашин В.И., Труды томских ученых по системам водоснабжения//Цхай и К – 2005. - 648с

Научный руководитель: Г.А. Черкашина, ассистент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

СЕКЦИЯ 4. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

ВРЕМЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА ТУРБОУСТАНОВКИ

Я.В. Базыкин, Л.В. Савостьянова
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Аннотация

В результате изучения ремонтной документации турбоустановок мощностью 25-150 МВт и находящихся в эксплуатации не менее 20 лет получены статистические данные о временных показателях производственного цикла турбин. Введённые показатели отличаются от тех, что применяются для выбора продолжительности межремонтного периода в настоящее время. Излагаемый подход позволяет прогнозировать индивидуальный ресурс турбоустановок на анализе расчетов, проведённых с использованием ремонтной документации.

Ключевые слова: турбоустановка, производственный цикл, наработка, надежность.

Цель работы заключается в создании методики прогнозирования индивидуальных ресурсов турбоустановок, отработавших значительные периоды времени и обосновании рекомендаций по объёмам и срокам ремонтно-эксплуатационного обслуживания турбоустановок, сохраняющих определённое количество дефектов в тех или иных узлах, и которые накапливаются из-за значительных сроков эксплуатации и количества пусков турбоустановок [1].

Сведения о ремонтно-эксплуатационных характеристиках извлечены из документов, представленных электростанциями, на которых работают конденсационные, теплофикационные и противодавленческие турбоустановки мощностью от 25 до 180 МВт. В работе представлены материалы проведённых исследований влияния характеристик производственного цикла на индивидуальный ресурс турбоустановки Т-100-130 ТМЗ.

Изучение индивидуального ресурса, т. е. суммарной наработки объекта от момента контроля его технического состояния до перехода объекта в предельное состояние, исследуемых турбоустановок представляет значительный интерес, поскольку обновление парка идёт очень медленно. Действующие турбоустановки имеют значительный износ, а периодические плановые ремонты не обеспечивают полную замену изношенных узлов и продолжают нести нагрузку.

Производственным циклом турбоустановки принято называть календарную продолжительность эксплуатационного периода, от момента пуска в работу и после окончания предыдущего капитального ремонта до момента окончания последующего планового капитального ремонта. На рисунке 1 представлен период производственного цикла турбоустановки, который показывает, что она может находиться в состоянии планового ремонта, несения нагрузки и резерва.

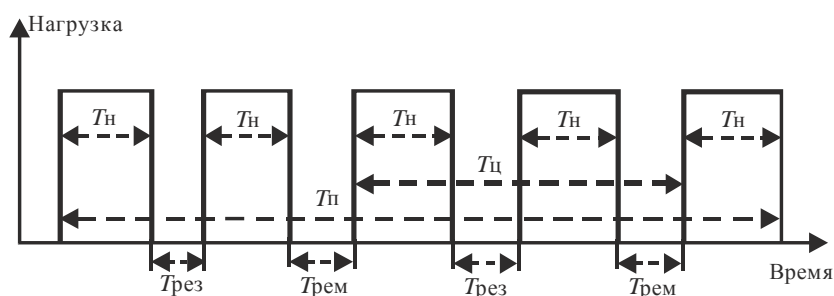


Рис. 1. Производственный цикл турбоустановки: T_n – время несения нагрузки; $T_{рез}$ – время нахождения в резерве; $T_{рем}$ – время нахождения в ремонте; $T_{ц}$ – производственный цикл установки; T_p – производственный период

Время, в течение которого турбоустановка несет нагрузку, является основным технологическим процессом и, независимо от величины нагрузки, далее будет именоваться – наработка. Режим «резерв» турбоустановки предусмотрен для случаев, когда турбоустановка по диспетчерскому графику находится в состоянии ожидания и готова к приёму нагрузки (после проведения пусковых операций). Режим «ремонт» предусматривает выполнение плановых и внеплановых ремонтных работ.

Для турбоустановки Т-100-130 средняя продолжительность производственного цикла составила 20761 ч (865 суток), а структура представлена на рисунке 2.

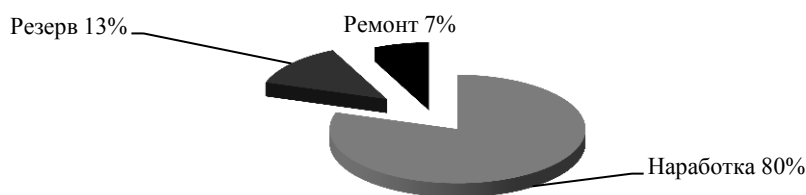


Рис. 2. Структура производственного цикла турбоустановки Т-100-130 ТМЗ

Структура производственного цикла турбоустановок, работающих на разных электростанциях, практически не отличается друг от друга. Это связано с единством ремонтно-эксплуатационной политики и совпадением подходов диспетчерского управления [2].

Интерес к изучению структуры производственного цикла паротурбинного оборудования основывается на том, что соотношение наработки, продолжительности ремонта и резерва определяют основные характеристики надёжности – вероятность безотказной работы, время безотказной работы, наработка на отказ, назначенный ресурс, коэффициент готовности и др.

В связи с этим важно знать, в какой мере параметры производственного цикла изменяются в течение всего срока эксплуатации турбоустановки [3]. Так турбоустановка Т-100-130 ТМЗ, пущенная в эксплуатацию в 1967 г., в течение двух разных десятилетий показала разные характеристики производственного цикла по отношению к календарной средней продолжительности цикла (таблица 1).

Табл. 1. Характеристики производственных циклов турбины Т-100-130 в течение двух разных десятилетий

Показатель	Период с 1968 по 1978 гг.		Период с 1989 по 1999 гг.	
	Кол-во часов	%	Кол-во часов	%
Наработка, всего	84089	–	71344	–
Средняя наработка на цикл	28029	85	14268	74
Средняя продолжительность ремонта	2337	7	2356	12
Средняя продолжительность резерва	2549	8	2652	14

Разумеется, эти изменения вызваны не столько состоянием работоспособности турбоустановки, сколько известными изменениями в управлении и рыночными преобразованиями в энергетике.

Средняя продолжительность циклов турбоустановки 20761 ч, а ремонтных простоев – 1495 ч. Это означает, что индивидуальные особенности турбоустановки – дефектуемые узлы, темпы нарастания дефектов, продолжительности межремонтного периода, программы ремонтного обслуживания и т.д. играют более существенную роль в обеспечении работоспособности, чем парковые. Обнаруживается и подтверждается тот факт, что дефекты возникают и нарастают в узлах турбоустановки по-разному [3]. Это означает, что срок нарастания дефекта равен межремонтному периоду.

Поэтому на электростанциях целесообразно сформировать информационные базы данных по ремонтному и эксплуатационному обслуживанию – аналог «диагностической карты» и ремонтному формуляру. Такой электронный документ позволит более обоснованно принимать решения о продлении эксплуатации турбоустановки.

На продолжительность межремонтного пробега турбоустановок, кроме прочих причин, серьёзно влияет количество пусков-остановов [4]. На рисунке 3 показано распределение числа пусков турбоустановки Т-100-130 с 1978 по 2011 г.

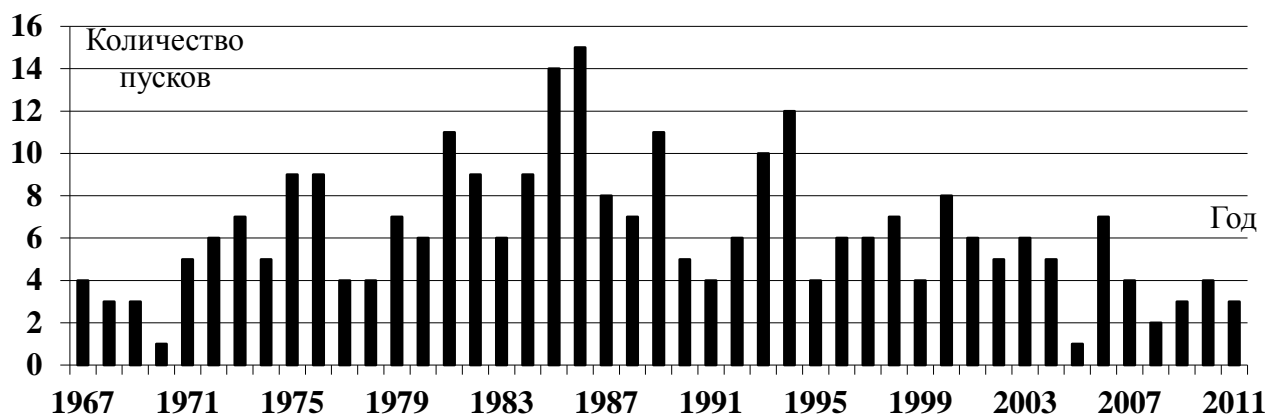


Рис. 3. Распределение пусков турбины Т-100-130, имеющей наработку 316478 ч

Среднее число пусков в год этой турбоустановки за период эксплуатации составило 6. При средней продолжительности цикла 20761 ч среднее число пусков на цикл равно 13.

В оценке индивидуальных характеристик надёжности турбоустановки следует учитывать не только наработку, но и количество пусков. Индивидуальные статистические характеристики могут быть легко преобразованы в характеристики надёжности, в данном случае рассчитаны показатели надёжности для периода 1 год [1]:

- вероятность безотказной работы 0,6;
- коэффициент готовности 0,91;
- вероятная продолжительность безотказной работы после очередного ремонта 13302 ч.

На основе информации о ремонтно-эксплуатационной истории для каждой турбоустановки может быть создана «диагностическая карта» в форме электронной базы данных, по которой можно восстановить подлинный индивидуальный ремонтно-эксплуатационный портрет. Это даёт возможность формировать поток данных по узлам турбоустановки, видам дефектов, темпам нарастания дефектов, временным и другим технологическим признакам. Соответственно и характеристики надёжности можно рассчитывать для отдельных узлов и блоков турбоустановки. В первую очередь – вероятное время безотказной работы каждого узла.

Ремонтная история каждой турбоустановки может быть воссоздана на каждой электростанции по материалам ремонтных формуляров, дефектных ведомостей, заказной документации и т. п. в виде информационной базы.

Выводы:

1. В данной работе рассмотрены характеристики производственного цикла турбоустановки, которые очень сильно зависят от качества и количества ремонтов, а также от потребности потребителя в тепловой и электрической энергии в течение календарного года.
2. Экспериментально установлено, что средний межремонтный ресурс турбоустановки составил 15369 ч, в то время как нормативный межремонтный ресурс для рассматриваемой турбоустановки составляет 34000 ч [5].
3. Сокращение располагаемого ресурса турбоустановки, связанное с длительными сроками эксплуатации и приближением к предельному состоянию отдельных узлов, требует перехода к индивидуальному планированию ремонтных процедур. Это можно осуществить только с учетом ремонтной истории за весь период эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Савостьянова Л.В., Литвак В.В. Анализ ресурсов паровых турбин на основе производственных циклов. // Известия Томского политехнического университета. - 2012 - Т. 321 - №. 4 - С. 11-15.

2. Литвак В.В., Панин В.Ф. Надёжность теплоэнергетического оборудования и экологическая обстановка вокруг ТЭС. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 280 с.
3. Родин В.Н., Шарапов А.Г., Мурманский Б.Е. и др. Ремонт паровых турбин / под общ. ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. – 211 с.
4. Резинских В.Ф., Гладштейн В.И., Авруцкий Г.Д. Увеличение ресурса длительно работающих турбин. – М: Издательский дом МЭИ, 2007. – 296 с.
5. СО 34.04.181-2003. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования, зданий и сооружений электростанций и сетей. – М., 2004.

Научный руководитель: В.В. Литвак д.т.н., профессор каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПОВЕРХНОСТНОГО ТИПА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ С ПОДОГРЕВОМ ВОЗДУХА

В.В. Беспалов, Л.А. Беляев, Л.С. Кучман
Томский политехнический университет
ЭНИН, каф. АТЭС

Введение. Повышенный интерес энергетических и промышленных предприятий к энергосбережению определяет разработку и внедрение новых технологий. Утилизация тепла дымовых газов от сжигания природного газа может дать дополнительно 15÷20% тепловой мощности котла [1] или соответственно уменьшить расход сжигаемого газа. Научная разработка технологий утилизации соседствует с постоянным совершенствованием учеными методик расчета процесса теплообмена при конденсации водяных паров, содержащихся в дымовых газах [1,2,3]. Разработанная технология позволяет существенно повысить глубину утилизации тепла дымовых газов за счет применения воздуха в качестве нагреваемой среды [4,5]. Для конструирования установок, реализующих эту технологию, необходима математическая модель, позволяющая проводить тепловые, конструкторские и поверочные расчеты всей установки, включая составляющие компоненты. Математическая модель должна включать как расчеты тепловых балансов элементов, так и расчеты теплопередачи через поверхности теплообмена. Балансовые уравнения при совместном решении позволяют найти тепловые мощности элементов и температуры потоков. Решение уравнений теплопередачи связывают тепловую мощность каждого элемента с его площадью теплообмена. Рассмотрим предложенную [4] схему установки (рис. 1), которая состоит из газо-газового поверхностного пластинчатого рекуперативного теплообменника ТО, осуществляющего предварительное охлаждение исходных дымовых газов и одновременный нагрев охлажденных и осушенных

дымовых газов для предотвращения возможной конденсации остаточных водяных паров в газоходах и дымовой трубе. Теплоутилизатор – газо-воздушный поверхностный пластинчатый теплообменник – конструктивно единое устройство, условно разделено на две части: охладитель ОХ (сухая зона) и собственно конденсатор К. Воздух подается в конденсатор блоком вентиляторов В. Дополнительный дымосос Д компенсирует аэродинамическое сопротивление газового тракта теплообменника и конденсатора.

Математическая модель. Модель предусматривает предварительное задание геометрии теплообменных аппаратов. Теплообменник ТО и теплоутилизатор состоят из пластинчатых теплообменных модулей – пакетов. Для пакета задаются: длина, ширина, толщина листа, коэффициент теплопроводности, число листов и зазор между ними. Для каждого теплообменника задается число пакетов и число ходов теплоносителя. Геометрия пакетов теплообменника ТО и теплоутилизатора может различаться, однако для установок большой мощности (более 1 *MВт*) целесообразно применять унифицированные пакеты. Так, для установки мощностью 10 *MВт* (расход дымовых газов 33 m^3/c) нами был разработан [4] унифицированный пакет из 72 листов размером 2500 × 1250 мм и весом 1,2 тонны. Для такого расхода дымовых газов число пакетов составило: 16 для теплообменника и 24 для теплоутилизатора.

Исходными данными для математической модели являются температура холодного воздуха $t_{хв}$ и массовый расход дымовых газов с температурой t_0 , состоящий из сухих дымовых газов G_s и водяных паров G_w . Так же считаем известной температуру дымовых газов на выходе из охладителя ОХ t_2 , равную температуре насыщения водяных паров при исходной влажности. Остальные параметры вычисляются методами последовательных приближений. Блок-схема структуры модели показана на рис. 1.

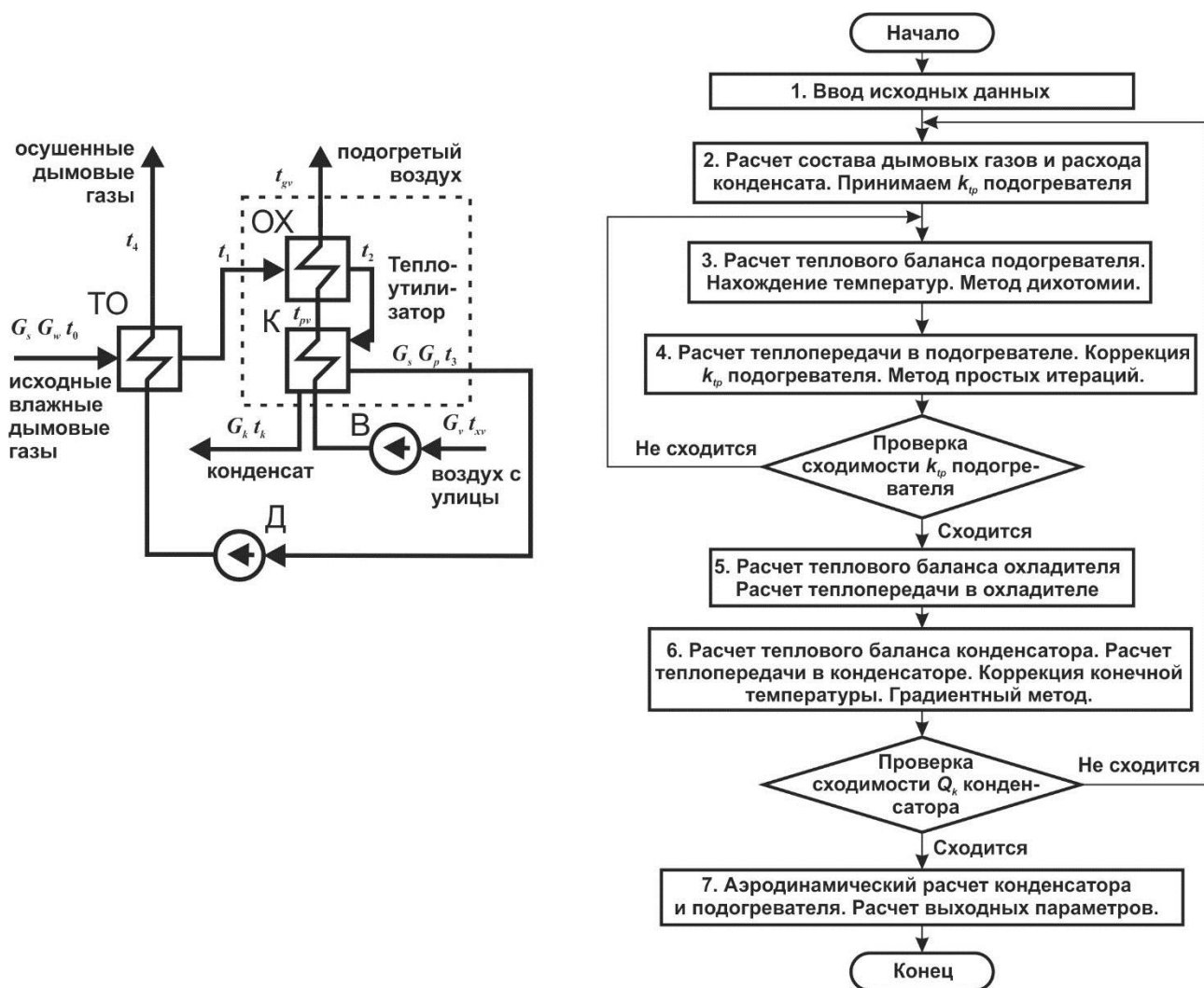


Рис. 1. Технология глубокой утилизации тепла дымовых газов и блок-схема математической модели установки.

Блок 1 содержит задание исходных параметров и начальных значений искомых величин в первом приближении. В этом же блоке происходит вычисление площадей поверхности теплообмена всех элементов F_p , F_t и расчет эквивалентных диаметров проходных сечений теплообменников. В первом приближении задается максимально низкая конечная температура дымовых газов на выходе из конденсатора t_3 (близкая к 0°C для отрицательных температур воздуха).

Блок 2 предназначен для расчета состава дымовых газов G_s , G_w и определения ожидаемого расхода конденсата G_k . Для проведения дальнейших расчетов, исходя из скоростей газовых потоков, задается значение коэффициента теплопередачи k_{tp} подогревателя ТО в первом приближении, которое далее будет уточняться методом простых итераций. В блоке 3 рассчитывается тепловой баланс подогревателя. Температурный напор задается в первом приближении и сводится методом половинного деления (дихотомии). В блоке 4 проводится расчет теплопередачи подогревателя и вычисляется уточненное значение (очередное приближение) коэффициента теплопередачи k_{tp} . Если относительная погрешность очередного приближения превышает $0,1\%$, то происходит возврат к блоку 3. В противном случае считается, что подогреватель условно рассчитан при заданной конечной температуре дымовых газов на выходе из конденсато-

ра t_3 . Блок 5 производит расчет теплового баланса охладителя и конденсатора для определения температур воздуха t_{gv} и t_{pv} . Далее из уравнений теплопередачи находится коэффициент теплопередачи охладителя k_{tox} и вычисляется площадь сухой зоны.

В блоке 6 проводится расчет теплопередачи конденсационной зоны. Со стороны потока воздуха коэффициент теплоотдачи зависит от числа Рейнольдса. Основную сложность представляет определение коэффициента теплоотдачи от влажных дымовых газов к стенке поверхности теплообмена α_1 при конденсации находящихся в них водяных паров. Большинство известных методов основываются на обработке результатов экспериментальных данных и предлагают зависимости в довольно узких пределах изменения физических параметров сред. Применимость того или иного метода расчета для функционально схожих теплоутилизаторов требует анализа и обоснования [6]. Рассматриваемая модель позволяет выбирать разные методики для вычисления коэффициента теплоотдачи от влажных дымовых газов к стенке поверхности теплообмена.

По результатам расчета уравнений теплообмена находится тепловая мощность конденсатора Q_k . Если она меньше той же мощности, вычисленной из балансовых уравнений, то конечная температура дымовых газов на выходе из конденсатора t_3 корректируется в сторону увеличения на $0,01^\circ\text{C}$, иначе в сторону уменьшения на ту же величину. Далее происходит возврат к блоку 2. При этом отсекается переход в отрицательные температуры с выводом сообщения о возможности замерзания конденсата при заданных параметрах. Внешний цикл заканчивается при достижении сходимости тепловой мощности в 1%. Таким образом реализуется градиентный метод, сводящий цикл. Применение других методов не позволило получить устойчивое решение из-за большой чувствительности вычисляемых значений к изменяемым параметрам.

Блок 7 завершает необходимые вычисления. Проводятся расчеты потерь давления воздуха и дымовых газов в теплообменнике и теплоутилизаторе.

Результаты. Разработанная математическая модель реализована в виде программного продукта (приложения), который позволяет подобрать оптимальные геометрические параметры установок различной производительности и провести поверочные расчеты их работы. В результате таких расчетов были спроектированы ряд установок [7]. Расчеты выполнены для средней температуры зимних месяцев Сибирского региона. При более низких температурах глубина утилизации будет выше и конечная температура дымовых газов после конденсатора снизится до 20°C . Начальная температура дымовых газов достаточно высока, что приводит к образованию большой сухой зоны в теплоутилизаторе, достигающей до 45% его площади. Это уменьшает зону конденсации и снижает глубину утилизации. При установке теплоутилизатора целесообразно снизить температуру дымовых газов на выходе из котла до 100°C , встроив дополнительные поверхности нагрева воды в концевые дымоходы котла, что резко повысит глубину утилизации и снизит конечную температуру дымовых газов ниже 20°C .

Выводы. Математическая модель поверхностного пластинчатого конденсационного теплоутилизатора, использующего воздух в качестве нагреваемой

среды, содержит необходимые балансовые уравнения и уравнения теплопередачи с возможностью выбора различных методик расчета. Решения систем уравнений сводятся различными численными методами, обеспечивающими приемлемую точность результата.

Программный продукт, реализующий математическую модель, позволяет проектировать установки на различную производительность, проводить поверочные расчеты и подбирать оптимальную конструкцию. Приложение будет полезно проектным организациям энергетической отрасли.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.: ил.
2. Кузма-Кичта Ю.А., Бухонов Д.Ю., Борисов Ю.В. Интенсификация теплообмена при конденсации водяных паров из уходящих дымовых газов // Теплоэнергетика. – 2007. – №3. – С. 39–42.
3. А.В. Ефимов, А.Л. Гончаренко, Л.В. Гончаренко. Разработка пластинчатого воздухоподогревателя конденсационного типа для теплоутилизационной системы // ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія. – 2012. – №2(31). – С. 83–90.
4. В.В. Беспалов. Технологии глубокой утилизации тепла дымовых газов // Энергетика Татарстана. – 2015. – №2(38). – С.32–36.
5. Bespalov V.V., Beljaev L.A., Melnikov D.V. Using Air for Increasing the Depth of the Flue Gas Heat Recovery // МАТЕС Web of Conferences. – 2015. – №37. – 01009.
6. Bespalov V.V., Bepalov V.I., Melnikov D.V. Evaluation of Heat Transfer Coefficients During the Water Vapor Condensation Contained in the Flue Gas // EPJ Web of Conferences. – 2016. – №110. – 01007.
7. В.В. Беспалов. Технологии глубокой утилизации тепла дымовых газов // Энергетика Татарстана. – 2016. – №2(42). – С.39–44.

Научный руководитель: Л.А. Беляев, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ГРАФИТОВОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ РЕАКТОРА РБМК

В.О. Дмитриев, И.Г. Ткаченко
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5012

Одним из факторов, определяющих надежность и безопасность работы АЭС с водографитовыми реакторами, является надежность графитового замедлителя (кладки), рассчитанного на весь срок эксплуатации реактора.

Графитовая кладка реактора РБМК-1000 имеет форму цилиндра диаметром 11,8 м и высотой 7 м, составленного из 2488 колонн. В отверстиях колонн установлены трубы технологических каналов (ТК) и каналов СУЗ. Тепловыделяющие сборки, расположенные внутри каналов, охлаждаются водой с температурой 250...280 °С.

При работе реактора часть (5...6%) полной тепловой мощности реактора выделяется в графите кладки. Это тепло также отводится к трубам ТК. Для обеспечения теплового контакта с блоками на трубы каналов надеты разрезные графитовые кольца (рис. 1), а в зазоры между трубами и блоками подается продувочный газ (штатный состав 10% азота и 90% гелия, по объёму).

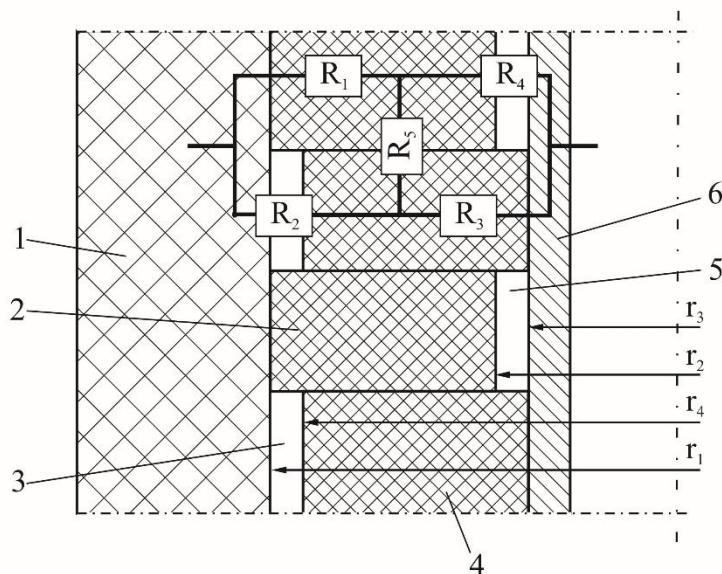


Рис. 1. Схема установки трубы ТК в графитовой кладке: 1 – графитовый блок; 2 – наружное графитовое кольцо (втулка); 3, 5 – газовые зазоры; 4 - внутреннее графитовое кольцо (втулка); R_i - термическое сопротивление; r_i - радиус

Конструктивные и схемные решения реакторных установок РБМК позволяют осуществлять изменение состава продувочного газа [1].

Температурное поле в графитовой кладке определяется в первую очередь мощностью реактора. Влияет на температуру графита и содержания азота X_N в азотно-гелиевой смеси (далее состав продувочного газа).

Температура графита кладки является одним из основных параметров, лимитирующих работу реактора РБМК. В практике принято, что на всех режимах работы реактора максимальная температура графита не должна превышать значения пороговой температуры 750...800 °С [1, 2]. Кроме того, колебания средней температуры графита кладки (замедлителя) ведут к соответствующим изменениям реактивности реактора, так как аппараты типа РБМК обладают существенным по величине положительным эффектом реактивности по температуре замедлителя [1].

Следовательно, определение температурного состояния графитовой кладки реактора РБМК является актуальной задачей.

Поле температур кладки водографитового реактора является трехмерным. Программы численных расчетов двухмерных и трехмерных температурных по-

лей очень сложны. Поэтому для оценочных расчетов максимальной температуры графита приходится прибегать к различным упрощениям и допущениям.

В известной методике расчета максимальной температуры замедлителя реактора РБМК [3] термические сопротивления втулок и газовых зазоров уподобляются электрическим сопротивлениям. Составив и упростив цепь этих сопротивлений, можно определить значение эквивалентного электрического, а значит, и термического сопротивления зазора графитовый блок – труба технологического канала (рис. 1).

Результаты вариантных расчетов температуры отдельного графитового блока по рассмотренной методике приведены на рис. 2.

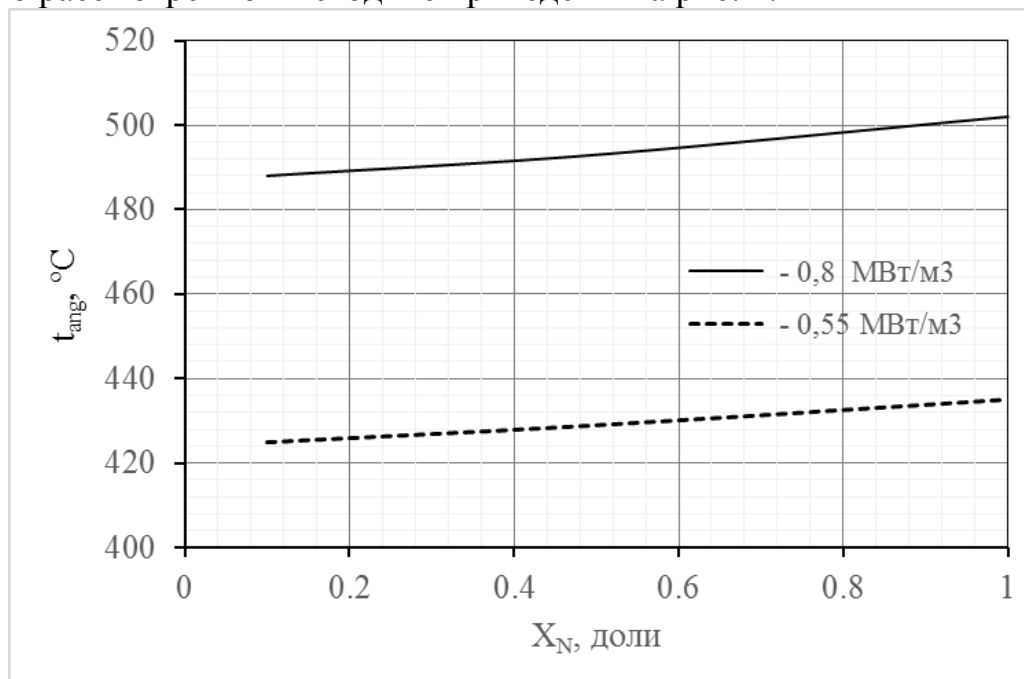


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры графитового блока (в углу графитового блока) от состава продувочной смеси без учета контактных термических сопротивлений

Анализ содержимого рис. 2 показывает, что максимальная (угловая) температура графитового блока t_{ang} при увеличении содержания азота в продувочной смеси от 10 до 100 % возрастает на 10...15 °C. Эти цифры существенно отличаются от экспериментальных данных, приведенных в [2], где среднее значение коэффициента влияния состава смеси на температуру графита оценивается в диапазоне 0,9...1,2 °C/%.

Причинами такого расхождения могут являться неучтенные термические сопротивления в местах контакта графитовый блок – наружное кольцо, наружное кольцо-внутреннее кольцо, внутреннее кольцо – труба ТК (рис. 1).

С целью выяснения источника расхождения расчетных и экспериментальных данных по температуре графита описанная выше методика была уточнена посредством включения дополнительных контактных термических сопротивлений. Для расчета последних использовалось критериальное уравнение из работы [4]

$$\alpha_k = \frac{\lambda_{см} \cdot Y}{h_0} + 8 \cdot 10^3 \cdot \lambda_{м} \cdot \left(\frac{P_k}{3 \cdot \sigma_B} \cdot K \right)^{0,86}, \quad (2)$$

где $\lambda_{см}$ - теплопроводность газовой смеси; $Y = 3,33$ - относительная величины зазора; h_0 - суммарная шероховатость контактирующих поверхностей; K - коэффициент, зависящий от величины h_0 ; P_k - контактное давление; σ - предел прочности более пластичного из контактирующих материалов.

По уточненной методике были проведены расчеты температуры отдельного графитового блока при варьировании состава продувочной смеси и величины контактного давления. Результаты расчета представлены на рис. 3.

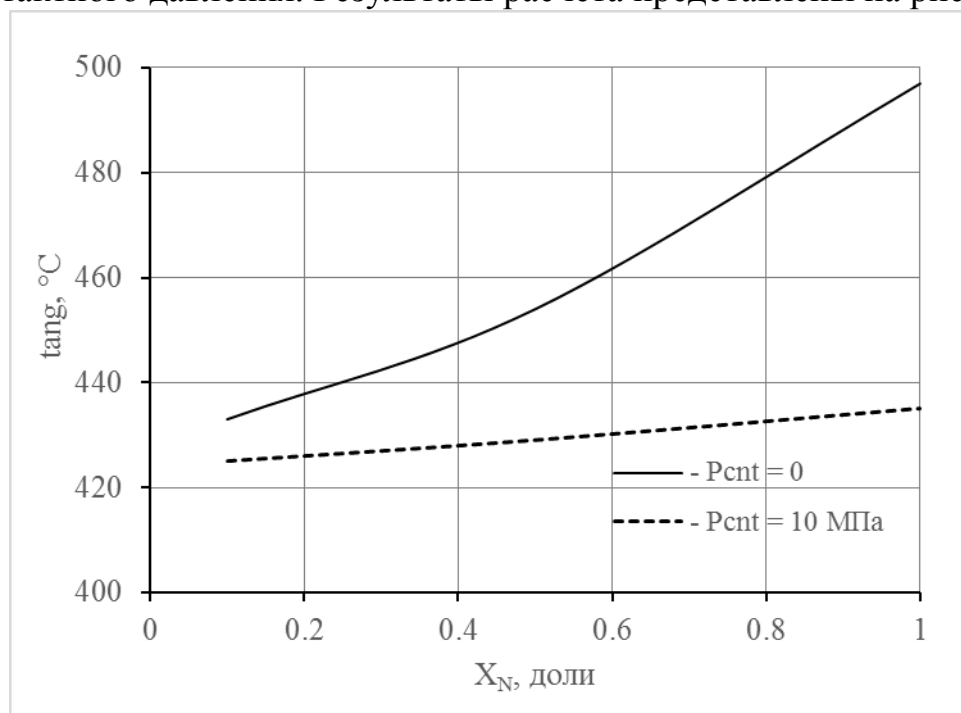


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры графитового блока (в угду графитового блока) от состава продувочной смеси при разных значениях контактного давления

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что контактные термические сопротивления существенно (в 1,05...1,2 раза) увеличивают температуру графитового замедлителя. При этом также существенно возрастает степень влияния содержания азота в смеси на уровень температур блока.

Заключение

Был разработан уточненный алгоритм и составлена программа расчета температурного состояния графитового замедлителя реактора РБМК, учитывающая термические сопротивления в местах контакта элементов графитовой кладки и ТК.

Использование данной программы позволяет существенно повысить точность инженерной методики расчета температуры графитового замедлителя реактора РБМК.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Доллежалъ Н. А. Канальный ядерный энергетический реактор.-М: Атомиздат, 1980.-208 с.
2. Воробьев А.В., Антонова А.М. Повышение эффективности установки с водографитовым реактором при частичных нагрузках// Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 182–186.
3. Скачек М.А. Теплогидравлический расчет реактора РБМК-1000: Учебное пособие.- М. : Изд. МЭИ, 1982. - 68 с.
4. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. - М.: Энергия, 1977. - 328 с.

Научный руководитель: А.В. Воробьев, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

SUPERCRITICAL WATER COOLED REACTORS

Sameh Helmy

Scientific supervisor: Prof. Alexander Korotkikh

Tomsk Polytechnic University

1. Introduction:

As the demand for electric power is increasing as well as the issues related to climate change, there's a need to develop new sustainable environmentally friendly energy systems. Research activities are currently underway worldwide to develop Generation IV nuclear reactor concepts with the objective of improving thermal efficiency and increasing economic competitiveness of (NPPs) compared to modern thermal power plants. There is a great interest in many countries in the research and development (R&D) and conceptual design of SCWRs (one of the six reactor technologies selected for research and development under the Generation IV program). The supercritical water cooled reactor (SCWR) uses supercritical water as the working fluid. SCWRs resemble light water reactors (LWRs) but operate above the thermodynamic critical point of water (374C, 22.1MPa), with a direct once-through cycle like a supercritical boiler. This helps improve the thermal efficiencies (i.e., about 45% vs. about 33% efficiency for current LWRs) and a simplified reactor system (i.e., the need for a pressurizer, steam generators, steam separators, and dryers is eliminated), and is hence expected to help improve its economic competitiveness as the main mission of the SCWR is generation of low-cost electricity. [1][2]

2.Supercritical operation and general considerations:

The feedwater is pressurized to a pressure beyond its critical pressure. The change in the thermo-physical properties of water at critical and supercritical pressures is dramatic, but continuous (As shown in Fig-2). [3] . Such heating can be made to be closer to the heat source temperature than a subcritical cycle with the same steam temperature that shows an abrupt change in temperature within the two phase

region, so the cycle receives more of its heat at higher temperatures than a subcritical cycle with the same turbine inlet steam temperature resulting in decreasing the external irreversibilities of the cycle. A disadvantage of the supercritical-pressure cycle, however is that expansion from point 1 to the condenser pressure would result in very wet vapor in the latter stages of the turbine which decreases the turbine efficiency ,hence, supercritical pressure cycles invariably use reheat and often double reheat with separators.

- At supercritical pressures, there's no liquid-vapor phase transition (Boiling), so the coolant remains single-phase throughout the system, therefore, there's no such a thing as Critical Heat Flux or burn out, only in a certain range of operation a Deteriorated Heat Transfer may occur. (Piro and Duffy 2003).

- Working near the pseudo critical point allows working with higher rates of enthalpy content which results in significant decrease in the mass flow rate of the coolant and thus a reduction in the size of the system and the reactor coolant pumping power.

- The large temperature difference inside the core leads to a significant density decrease and poor moderation in the upper part of the core, this can be eliminated by the use of water rods in which the cold coolant flows down or a solid moderator (as shown in Fig-3) [4].

- Conventional fuels like UO₂ are not suitable for supercritical operation, due to the decrease in their thermal conductivity at high temperatures, which leads to a rise in their centerline temperature above the industry accepted limit affecting the fuel integrity (1850°C).

- The SCWR structural and cladding systems are challenging aspects, as water properties change rapidly around the pseudo-critical point and the effects on materials are less known. However, recent studies showed that Zirconium-based alloys, common in water-cooled reactors, may not be a viable as zirconium would corrode rapidly at very high temperatures, and hence the enrichment of the fuel will have to be higher to compensate for the neutron absorption by the cladding, which can't be made from the zirconium customary in LWRs. Stainless steel or nickel alloys may be used.

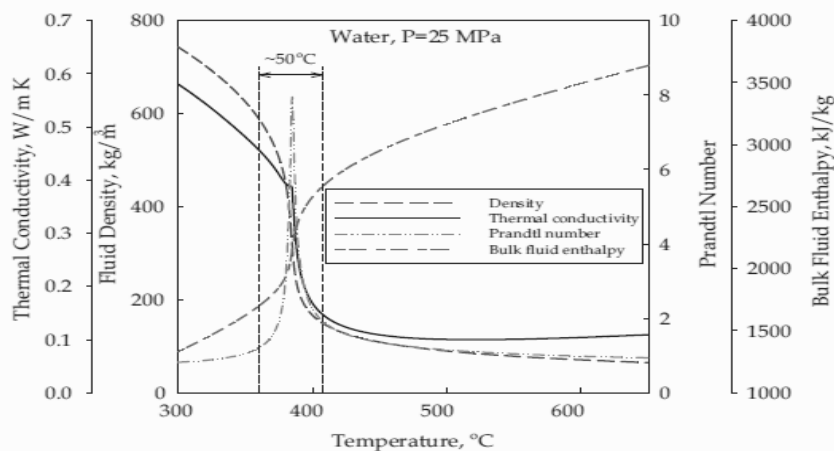


Fig.2. Variation in selected thermo- physical properties of water near the Pseudo-critical point.

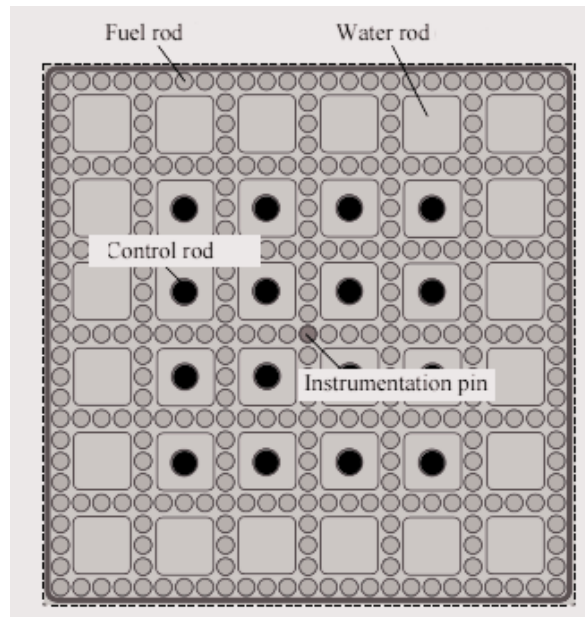


Fig.3. Typical reference core design with water rods

3. Typical supercritical water reactor design: Different design concepts are under study but they are divided into two main groups:

- Pressure Tube system (Derived by the CANDU experience)
- Pressure Vessel system (Derived by LWRs experience)

A typical design of a PV-SCWR (is shown in Fig-12) is a direct cycle, thermal neutrons, ordinary water cooled and moderated with an operating pressure of 25MPa and inlet/outlet coolant temperature of 280/500 C, low enriched fuel with a thermal efficiency of about 45%. [4]

A typical SCWR design parameters are contained in Table4.1

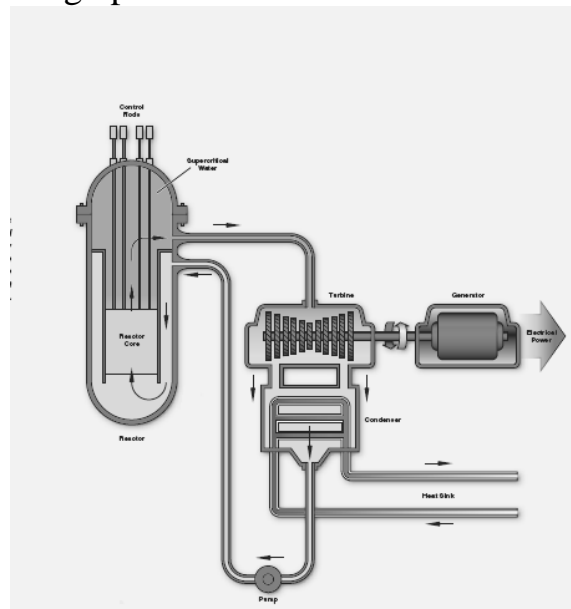


Fig.12. Pressure Vessel SCWR schematic (Courtesy of USDOE)

Parameter	Value
Thermal power	3575 MWt
Net electric power	1600 MWe
Net thermal efficiency	44.8%
Operating pressure	25 MPa
Reactor inlet temperature	280°C
Reactor outlet temperature	500°C
Reactor flow rate	1843 kg/s
Plant lifetime	60 years

Table4.1 Typical SCWR Design Parameters

Summary:

•Using NPPs with supercritical water reactors can lead to considerable economic advantages such as:

-Increase in the efficiency up to 44 -45%,

-Decrease in the metal intensity of equipment and reduction of construction and assembling

•We still need to develop suitable materials for structures and cladding that can withstand high pressures and temperatures in a severe aggressive medium like supercritical water along with heat transfer correlations at supercritical flow conditions.

References:

1. Generation iv international forum gif a technology roadmap for the generation IV Nuclear Energy Systems. Issued by the USDOE.Nuclear research advisory committee. December 2002.
2. Duffey, R.B., Pioro, I., Zhou, T., Zirn, U., Kuran, S., Khartabil, H. and Naidin, M., 2008. Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactors (SCWRs): Current and Future Concepts - Steam-Cycle Options.
3. Pioro, I. & Duffey, R., 2007. Heat Transfer and Hydraulic Resistance at Supercritical Pressures in Power Engineering Applications, ASME Press, New York, NY, USA.
4. [J.Buongiorno and P Macdonald feasibility study of supercritical light water cooled reactors. Idaho national engineering and environmental laboratory, January 2005.

Research supervisor: А.Г. Коротких, профессор каф.АТЭС ЭНИИ ТПУ.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ УТИЛИЗАЦИОННЫХ ПГУ

И.А. Асанов, Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский
Томский политехнический университет
ЭНИН, каф. АТЭС

Парогазовые установки (ПГУ) утилизационного типа в обозримой перспективе будут являться основными электрогенерирующими установками при работе на природном газе. Это обусловлено: высоким КПД, который уже достигнут выше 60%; низкими затратами в строительство и небольшим сроком ввода в работу, примерно в 1,5–2 раза ниже чем для паротурбинных энергоблоков сверхкритического давления; невысоким потреблением технологической воды, которое в три раза ниже на единицу вырабатываемой мощности, чем на паротурбинных ТЭС; меньшим влиянием на экологию, из-за более низких выбросов вредных веществ и теплоты в атмосферу и воду; более высокой маневренностью по сравнению с паротурбинными установками.

Особенно актуально внедрение ПГУ на Российских ТЭС в связи с тем, что для генерации электроэнергии на них используется в настоящее время до 70% природного газа и в перспективе 20–30 лет доля сжигаемого газа для производства электроэнергии если и снизится в результате замещения углем, то весьма незначительно. В связи с этим актуальным является вопрос поиска путей совершенствования этих установок.

Наиболее полно технологические вопросы работы ПГУ утилизационного типа описаны в [1, 2].

В утилизационных ПГУ газотурбинный и паротурбинный циклы связаны между собой через котел-утилизатор (КУ) и если в нем нет дополнительного сжигания топлива, то КПД ПГУ определяется по формуле [2]

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \eta_{\text{ГТУ}})\eta_{\text{КУ}}\eta_{\text{ПТУ}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ГТУ}}$ – КПД газотурбинной установки (ГТУ); $\eta_{\text{КУ}}$ – КПД КУ; $\eta_{\text{ПТУ}}$ – КПД паротурбинной установки (ПТУ).

Поскольку в основе работы таких ПГУ лежат газотурбинный и паротурбинный цикл можно выделить следующие способы повышения их экономичности:

1. Совершенствование цикла и оборудования газотурбинной установки;
2. Совершенствование цикла и оборудования паротурбинной установки;
3. Совершенствование процессов в КУ;
4. Снижение затрат электроэнергии на собственные нужды.

На основе анализа зарубежной и российской научной литературы рассмотрим наиболее перспективные пути повышения экономичности ПГУ.

Совершенствование цикла и оборудования газотурбинной установки

Электрический КПД газотурбинной установки определяется произведением термического, внутреннего относительного и электромеханического КПД. При этом внутренний относительный и электромеханический КПД определяются совершенством изготовления газовой турбины, компрессора и электроге-

нератора и в настоящее время близки к своему пределу. Поэтому основным путем совершенствования ГТУ является увеличение термического КПД.

В современных ПГУ используется газотурбинный цикл Брайтона с подводом и отводом теплоты при постоянном давлении. Термический КПД этого цикла определяется температурами подвода и отвода теплоты, при этом температура отвода теплоты взаимосвязана с температурой подвода и при ее росте также возрастает. Основным путем увеличения термического КПД является повышение температуры подвода теплоты. Температура подвода теплоты определяется материалами, из которых изготовлена камера сгорания и газовая турбина, а также способом их охлаждения. В настоящее время надежно освоена температура подвода теплоты 1500 °С, при этом на мощных ГТУ фирм General Electric, Siemens, Alstom получен электрический КПД ГТУ 40% [3, 4], экспериментальные установки уже успешно работают при температуре 1600 °С при этом ожидается электрический КПД ГТУ до 43%, ведутся разработки ГТУ с температурой подвода теплоты 1700 °С, что позволит получить КПД до 45% [3]. Современные ГТУ для надежного охлаждения элементов турбины работают с высоким коэффициентом избытка воздуха, что приводит к большим затратам мощности на компрессоре. Ведутся работы по улучшению системы охлаждения элементов газовой турбины и снижению коэффициентом избытка воздуха, что позволит повысить КПД на 1–2%.

Совершенствование цикла и оборудования паротурбинной установки

Паротурбинная установка работает на основе цикла Ренкина. Основными способами совершенствования ПГУ являются: увеличение начальных параметров; промежуточный перегрев пара; регенеративный подогрев питательной воды; снижение температуры отвода теплоты в конденсаторе; совершенствование проточной части турбины.

В настоящее время для проектирования проточной части турбины применяется 3-D моделирование, что позволило довести их КПД до верхнего предела [5].

Начальная температура цикла ПГУ определяются температурой на выходе газовой турбины, которая в зависимости от типа турбины находится в пределах 450–640 °С, что определяет начальную температуру пара на уровне 420–610 °С. Повышение начального давления слабо сказывается на повышении КПД, поэтому для снижения капитальных вложений и повышения маневренности в ПГУ применяется давление не выше 16 МПа.

Промежуточный перегрев пара в основном применяется для обеспечения допустимой влажности пара на выходе турбины.

Регенеративный подогрев питательной воды в ПГУ не повышает КПД, поэтому не применяется.

Единственным способом увеличения КПД ПГУ является снижение температуры отвода теплоты в конденсаторе, но при применении водоохлаждаемых конденсаторов понизить температуру конденсации ниже 20 °С экономически невыгодно, поэтому в районах с низкими температурами наружного воздуха применяют воздухоохлаждаемые конденсаторы (ВК), которые позволяют в

зимнее время понизить температуру отвода теплоты практически до 0 °С и ниже. Но при использовании воды в качестве рабочего тела цикла возможно ее замерзание и разрушение конденсатора. Поэтому в [6] предложено в ПТУ применять бинарный цикл, где верхний цикл работает на воде, а нижний – Органический цикл Ренкина на низкокипящем веществе (НКВ), что позволяет надежно отводить теплоту в нижнем цикле при температуре ниже 0 °С. Проведенные в [7–10] исследования по работе ВК и ПГУ на различных НКВ показали, что в зимнее время можно на 2–3 % повысить КПД ПГУ.

Совершенствование процессов в КУ

Котел-утилизатор является связующим звеном между газотурбинным и паротурбинным циклом. В уравнении (1) видим, что КПД КУ существенно влияет на вторую часть, которая определяет роль ПТУ в КПД ПГУ. КПД КУ определяется температурами входа и выхода дымовых газов. Температура газов на входе КУ определяется газовой турбиной и находится в пределах 450–640 °С. Температура газов на выходе КУ, для предотвращения конденсации влаги и коррозии металла газового тракта, поддерживается не ниже 100 °С. В результате КПД КУ не превышает 86 %. Поэтому главным путем увеличения КПД КУ является применение технологии работы котлов с понижением температуры газов ниже точки россы и конденсацией водяных паров из уходящих газов. Как показано в работе [11] применение этой технологии позволяет на 10–12% повысить КПД КУ, в результате чего на 2–3% увеличить КПД ПГУ. При этом полученный из газов конденсат может быть полезно использован на ТЭС. Кроме того в утилизаторах влаги из дымовых газов улавливается значительная часть вредных веществ, что снижает загрязнение окружающей среды.

Снижение затрат электроэнергии на собственные нужды

Затраты электроэнергии на собственные нужды у ПГУ составляют 1,5–2,5%, при этом основную долю составляют затраты на перекачку воды электронасосами. Путем замены электропривода насосов газотурбинным двигателем (ГТД) [12] можно сократить затраты электроэнергии на собственные нужды на 0,5–1,5%. При этом теплота уходящих газов ГТД может быть полезно использована в КУ, что позволит увеличить мощность и КПД ПТУ.

Выводы:

1. Основными способами увеличения КПД ГТУ являются повышение начальной температуры и снижение расхода воздуха на охлаждение. В результате чего в обозримой перспективе КПД ГТУ может достигнуть 45–47%.
2. Основными способами увеличения КПД ПТУ являются повышение начальной температура пара, что может быть достигнуто только при применении ГТУ с повышенными температурами подвода и отвода теплоты, а также снижение температуры отвода теплоты в результате применения ВК и бинарного цикла с ОЦР в нижней ступени. Это позволит в зимнее время повысить КПД ПГУ на 2–3%.

3. Для увеличения КПД КУ необходимо снижение температуры уходящих газов ниже точки росы, что позволит повысить КПД КУ на 10–12%, а КПД ПГУ на 2–3%.
4. Замена электропривода насосов ПТУ газотурбинным двигателем позволяет сократить затраты электроэнергии на собственные нужды ПГУ на 0,5–1,5%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kehlofer R., Rukes B., Hannemann F., Stirnimann F. Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants. PennWell Corporation, 2009. – 434 p.
2. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 648 с.
3. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. 2013. № 2. – С. 3–12.
4. Robb D. Combined cycles of the future // Turbomachinery Intern. – 2011. – Jan.-Febr. – P. 24–25.
5. Паровые турбины SST-200 — SST-900 Siemens в России / В.Ф. Касилов // Теплоэнергетика. 2015. №4. С. 10-16.
6. Galashov N. Thermal Efficiency of Three-Cycle Utilization-Type Steam-Gas Units / N. N. Galashov, S. A. Tsibulskii // Power Technology and Engineering: Scientific Journal. – 2015. – Vol. 48, iss. 6. – [P. 459-463].
7. Galashov N., Tsibulskiy S., Gubin V., Serova T. Numerical Study of the Characteristics of the Air Condenser Section. MATEC Web of Conferences, 37 (2015) 01021. Investigation of Power Engineering Processes. <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20153701021>. 22 December 2015.
8. Galashov N., Tsibul'ski S. Numerical Analysis of the Condensation Characteristics of Different Heat-Transfer Media in an Air-Cooled Condenser. // Power Technology and Engineering : Scientific Journal. – 2016. – Vol. 49, iss. 6. – [P. 365-371].
9. Galashov N., Tsibulskii S., Matveev A., Masjuk V. Numerical Research of Steam and Gas Plant Efficiency of Triple Cycle for Extreme North Regions. 23 February 2016. <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611001019>.
10. Galashov N., Tsibulskiy S., Serova T. Analysis of the Properties of Working Substances for the Organic Rankine Cycle based Database “REFPROP”. 23 February 2016 <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/2011068>
11. Galashov N., Tsibulskiy S., Kiselev A. Application of Evaporative Cooling for the Condensation of Water Vapors from a Flue Gas Waste Heat Boilers CCP. 09 August 2016. <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20167201029>.
12. Galashov N. Efficiency of Gas Turbine Engines for Drive of Mechanisms for In-House Needs of Thermal Power Plants. Power Technology and Engineering. October 2013.

Научный руководитель: Н.Н. Галашов, к.т.н., доцент, каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ВЛИЯНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК NaNO_3 И CuSO_4 НА КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ УГЛЯ

К.Б. Ларионов, И.В. Мишаков, А.А. Громов, В.Е. Губин, А.В. Зенков
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Согласно статистическим данным [1], в современной топливно-энергетической структуре производства уголь занимает лидирующие позиции наряду с такими традиционными видами топлива, как газ и нефть. В свою очередь, прямое сжигание угля в бытовых и энергетических котлах сопровождается большим количеством выбросов вредных веществ [2]. Сегодня наиболее экологически эффективной технологией использования угля является его газификация, в результате которой образуется генераторный газ [3]. В рамках данного технологического процесса в мире ведутся активные работы по разработке различных способов, направленных на улучшение показателей надежности и экономичности работы газогенераторных установок [4]. Одно из возможных решений заключается в использовании каталитических агентов, позволяющих улучшить кинетические характеристики процесса и повысить эффективность использования топлива [5].

Большинство существующих работ по изучению каталитической газификации направлены на использование оксидов щелочных, переходных и редкоземельных металлов [6]. Основным эффектом при использовании подобных каталитических добавок является снижение температуры, при которой начинается процесс окисления топлива. При этом известно [7], что включение каталитических добавок на основе оксидов различных видов металлов в процессе газификации наиболее эффективно проявляется исключительно при высоких температурах (свыше $500\text{ }^\circ\text{C}$).

Известно [8], что предшественники оксидов металлов, такие как нитраты и сульфаты, обладают сильными окислительными свойствами, низкой температурой плавления (разложения) и хорошей растворимостью в воде, что упрощает процесс их смешения с углем и улучшает взаимодействие системы «уголь-катализатор» за счет заполнения свободных пор твердого топлива [9].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований окисления угля, при введении каталитических добавок разной природы: NaNO_3 и CuSO_4 . В том числе дана оценка изменения кинетических параметров.

В качестве исходных образцов твердого топлива в данном исследовании рассматривались: каменный уголь Осинниковского разреза и бурый уголь Бородинского месторождения. Данные угли отличаются своей морфологией и степенью метаморфизма [10].

Крупнодисперсные образцы измельчались в шаровой барабанной мельнице в идентичных условиях, после чего просеивались с помощью сита, размер ячеек которого составляет менее $80\text{ }\mu\text{m}$.

Далее полученные образцы смешивались методом капиллярной пропитки с каталитическими добавками NaNO_3 и CuSO_4 , предварительно растворенными в водно-спиртовой среде в объемном соотношении 1:1. Массовое содержание каталитической добавки составляло 5% от общей массы изученного образца (5 мас.% каталитической добавки и 95 мас.% угля).

Полученную густую суспензию высушивали в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 20 часов. После сушки агломерированные образцы перемешивались в ступке в течение 7 минут для получения порошкообразного состояния. Также необходимо добавить, что для проведения сравнительного анализа влияния каталитических добавок были подготовлены образцы сравнения, с которыми выполнялись идентичные процедуры подготовки, но при этом не вносились указанные выше добавки.

С целью упрощения проведения последующих экспериментальных работ и анализа их результатов, каждому образцу был присвоен свой порядковый номер. Список приготовленных образцов представлен в таблице 1.

Табл. 1. Перечень синтезированных образцов

Наименование образца	Порядковый номер образца
<i>Каменный уголь</i>	
Образец сравнения каменного угля	1
Каменный уголь + 5% NaNO_3	2
Каменный уголь + 5% CuSO_4	3
<i>Бурый уголь</i>	
Образец сравнения бурого угля	4
Бурый уголь + 5% NaNO_3	5
Бурый уголь + 5% CuSO_4	6

Определение кинетики процесса окисления приготовленных образцов углей осуществлялось при помощи термогравиметрического анализатора Netzsch STA 449 C Jupiter (Germany). Все эксперименты проводились в однотипных условиях, при скорости нагрева $2,5^\circ\text{C}/\text{мин}$ в корундовом тигле (масса образца около 7 мг) в интервале температур $50\text{-}600^\circ\text{C}$. В качестве окислительной среды была использована смесь воздуха (60 мл/мин) и азота (10 мл/мин).

Результаты термического анализа рассматриваемых образцов, представлены в виде ТГ и ДТГ кривых на рисунках 1 и 2, соответственно.

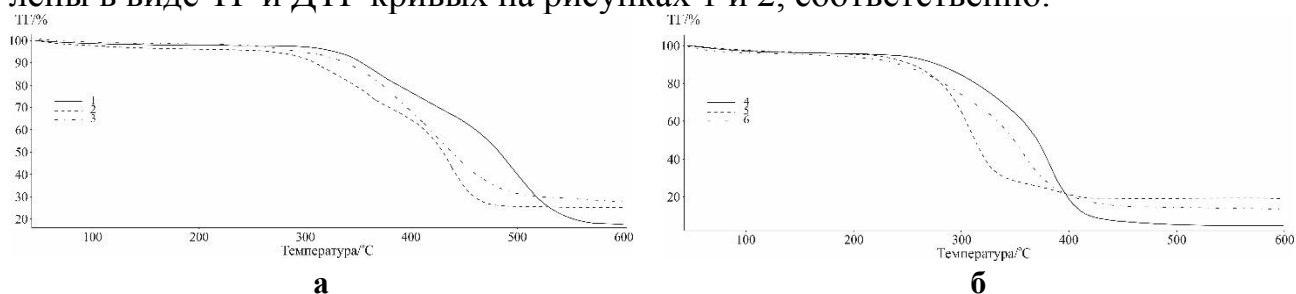


Рис. 1. Термогравиметрические кривые (ТГ) окисления образцов углей (а – образцы каменных углей, б – образцы бурых углей)

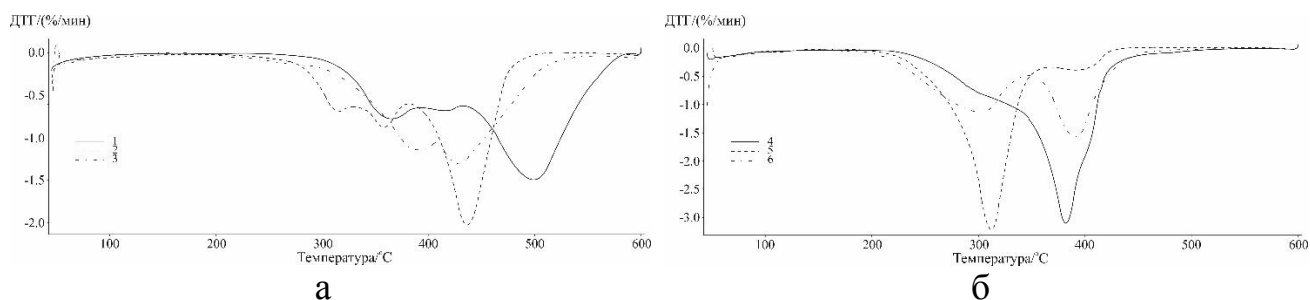


Рис. 2. Дифференциальные кривые (ДТГ) окисления образцов углей (а – образцы каменных углей, б – образцы бурых углей)

Согласно рисунку 1, температура, соответствующая при 10%-ной потере массы для исходных образцов 1 и 4, составила 356°C и 278°C, соответственно. Для углей с добавкой NaNO_3 (образцы 2 и 5) данная температура равна 338°C и 244°C (образец 5), а с добавкой CuSO_4 (образцы 3 и 6) – 310°C и 255°C. Таким образом, наибольший сдвиг в сторону уменьшения температуры начала окисления наблюдается у образцов 3 и 5, для которых изменение составило 44°C и 34°C, соответственно. Несмотря на то, что добавка NaNO_3 оказывает значительный каталитический эффект на начальной стадии процесса окисления бурого угля, общее время протекания реакции относительно исходного образца увеличилось на 15%, т.к. окисление остаточного углерода для обоих образцов заканчивается в одинаковой области температур (около 480°C).

В свою очередь, наибольшее значение максимальной скорости протекания реакции, определенное из данных ДТГ (рисунок 2), соответствует образцам, модифицированным добавкой CuSO_4 . Для каменного угля этот показатель возрастает на 37%, а для бурого угля – на 7%.

Эффект увеличения скорости реакции окисления углей (снижение температуры начала процесса) для образцов с различными каталитическими добавками напрямую связан с разложением солей, которое наблюдается в низкотемпературной области, по отношению к процессу высвобождения летучих веществ. В результате внутреннего отвода тепла происходит термическое разрушение структуры углей, состоящей из большого числа микро- и макропор. К тому же, повышение интенсивности термического разрушения способствует снижению прочности молекулярных связей, особенно кислородосодержащих функциональных групп.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что введение каталитической добавки минеральных солей NaNO_3 и CuSO_4 способствует заметному ускорению процесса окисления углей в результате их внутренней термодеструкции. Высвобождаемые на более ранних стадиях процесса летучие вещества расщепляются на легкие газы и обогащённые углеродом тонкодисперсные частицы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58114X0001.

ЛИТЕРАТУРА:

1. British Petroleum statistical review of world energy 2014. London, 2014.
2. Тайлашева Т.С., Красильникова Л.Г., Воронцова Е.С. Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области // Известия Томского политехнического университета, 2013, т.322 №4
3. Jankovskiy S., Luzhkovoj D., Larionov K., Matveeva A. Research of heating rates influence on layer coal gasification of Krasnogorsky and Borodinsky coal deposit // MATEC Web of Conferences 37, 01026.
4. Цибульский С.А. Современные технологии газификации угля в промышленной энергетике // XX Международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» 2013, 189-190.
5. Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения взрыва, 2015, т.51, №2.
6. Yaman S, Kucukbayrak S (1997) Effect of oxydesulphurization on the combustion characteristics of coal. Thermochim Acta 293(2):109–115
7. Catalytic effects of metals on peat combustion Aho, M.J., Hämäläinen, J.P., Tumnavuori, J.L.
8. Завьялова У.Ф., Барбашова П.С., Лермонтов А.С. и др. Самораспространяющийся синтез блочных катализаторов нейтрализации выхлопных газов Pd-CeO₂/Al₂O₃ // Кинетика и катализ, 2007, Том 48 №1. – с. 171-176.
9. Токарева И.В., Мишаков И.В., Ведягин А.А. и др. Модифицирование углеволокон для армирования трубного полиэтилена ПЭ80Б / Композиты и наноструктуры. – 2014. – Том 6 №3. – с. 158-167.
10. Slyusarskiy K.V., Bejsekov M.K., Marysheva J.V., Rakov Y.Ja. Dependence of pyrolysis rate of coal on temperature // MATEC Web of Conferences, Volume 37, 01053.

АТОМНО-ВОДОРОДНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

¹А.Р. Дягель, ²К.В. Слюсарский
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, ¹группа 5022

Значительным образом снизить затраты на электроэнергию при электрохимическом методе производства водорода сможет создание атомно-водородного энергетического комплекса, вместе с тем решив еще одну немаловажную проблему.

В связи с программой развития атомной энергетики, особо актуальными являются вопросы повышения безопасности и эффективности работы АЭС по условиям обеспечения базисной электрической нагрузкой, а также эффективно-го аккумулирования внепиковой электроэнергии. В часы ночного минимума

электропотребления будет осуществляться выработка водорода и кислорода посредством электролиза воды и их аккумуляирование в системе хранения для дальнейшей реализации, как товарной продукции, тем самым став эффективной технологией по выравниванию загрузки АЭС.

Проведем сравнение себестоимости водорода (рисунок 1) для вариантов, когда водородный энергетический комплекс находится в составе АЭС с потреблением электроэнергии по её себестоимости, для случая отдельной производственной энерготехнологической станции с потреблением электроэнергии из энергосистемы (степень очистки водорода – 99,7-99,9%), а также себестоимость водорода, полученного методом паровой конверсии метана с учетом очистки конвертируемого газа до уровня содержания водорода 97 % с учетом затрат (в виде штрафов) на выбросы CO₂ при Российской внутренней цене газа порядка 190 долл./1000 м³ (2014г.).

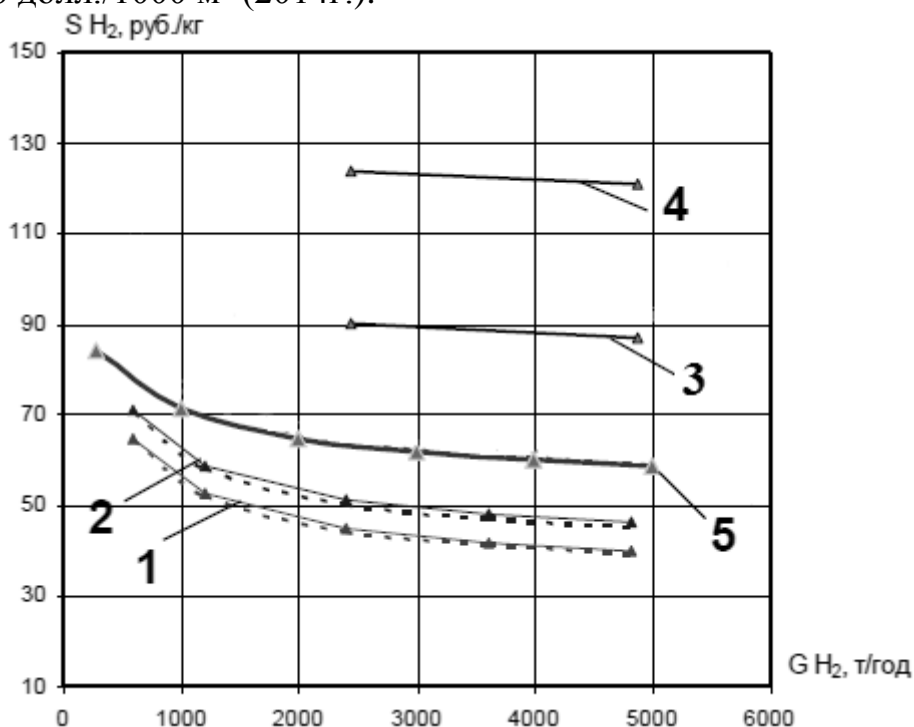


Рис. 1 себестоимость получения водорода (при КПД электролиза 80%): 1,2 – при цене на потребляемую электроэнергию от АЭС в циклическом режиме 0,3, 0,45 руб./кВт·ч соответственно; 3, 4 – при цене на потребляемую электроэнергию от энергосистемы в стационарном режиме 1,83 и 2,64 руб./кВт·ч соответственно (средневзвешенный тариф с учетом НДС, 2014г.); 5 – себестоимость получения водорода методом паровой конверсии метана при внутренней Российской цене на газ порядка 190 долл./1000 м³ (2014г.).

Из рисунка 1 видно, что при потреблении электроэнергии по себестоимости от АЭС затраты на производство водорода заметно ниже по сравнению со значениями при потреблении электроэнергии из энергосистемы.

Также очевидно, что при КПД электролиза порядка 80% водород, производимый электролизом воды в циклическом режиме за счет электроэнергии от АЭС по её себестоимости в интервале 0,3 – 0,45 руб./кВт·ч оказывается конкурентоспособным с методом паровой конверсии природного газа при Россий-

ской внутренней цене на газ, в отличие от производимого при потреблении электроэнергии из энергосистемы. [5]

Убедившись в рентабельности и высокой эффективности совместного производства электроэнергии и водорода на АЭС в предыдущих пунктах, перейдем к конкретным примерам.

В настоящее время в промышленности эксплуатируются или разрабатываются опытно-промышленные образцы трех основных типов электролизеров для производства водорода: водно-щелочные электролизеры типовой конструкции, электролизёры с твердополимерным электролитом (ТПЭ) и высокотемпературные твердо-оксидные электролизеры.

Основным достоинством водно-щелочных электролизеров является низкая стоимость материалов и отработанная технология производства, но водород получается низкого качества из-за примесей кислорода, щелочей и водяного пара, следовательно, требуется дополнительная очистка. Кроме того, данный тип имеет наибольшие энергозатраты.

Наиболее эффективным и безопасным является электролизер с ТПЭ, у него низкое энергопотребление, а получаемый водород высокой степени чистоты. Однако, материалы электродов, включающие металлы платиновой группы, а также высокая стоимость мембран (200\$ на 1 м²) заметно повышают стоимость установки. Но, не смотря на это, данный тип является одним из самых перспективных для эксплуатации, в том числе и на АЭС.

Высокотемпературный твердо-оксидный электролизер имеет самые низкие энергозатраты, однако для его работы необходим дополнительный подвод высокопотенциальной теплоты. Его установка возможна на высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, с температурой теплоносителя 900-950°C, создав дополнительный контур для отвода тепла. [3]

Отдельного внимания заслуживают водородные генераторы РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем, разрабатываемые в ГНЦ РФ-ФЭИ.

Один из типов основан на разложении водяного пара в расплаве Рb-Vi при температуре $t = 400-1000^\circ\text{C}$, когда протекает реакция:



Температура теплоносителя составляет 520°C, следовательно, осуществление реакции (1) возможно, создав дополнительный контур отвода тепла. Интенсифицировать процесс может использование специального кислородного насоса. [1,2,4]

Проведем сравнение основных характеристик электролизеров и водородного генератора с разложением воды (таблица 1):

Табл. 1. Характеристики основных типов электролизеров [2,3]

	Водно-щелочной	ТПЭ	Высокотемпературный	С разложением воды в Pb-Bi	
Реагент	NaOH/КОН	Деионизированная вода	Водяной пар	Водяной пар + расплав Pb-Bi	
Рабочая температура, °C	70-95	90-110	800-1000	525	810
Рабочее давление, МПа	1	до 3	н/д	н/д	
Материал электродов	Стальные сетки	RuO_2 (30%), IrO_2 (32%), SnO_2 (38%),	ZrO_2 + оксиды Yb и Sc	Электроды отсутствуют	
Энергозатраты, кВт·ч/м ³ H ₂	5,0-5,3 (электроэнергия)	3,9-4,1 (электроэнергия)	2,8-3,0 (электроэнергия)	от 3,6 (тепловая энергия)	
Чистота H ₂ , %	99	99,99	99,99	0,02	15,21
Стоимость	низкая	на 30-40% выше, чем у водно-щелочных	н/д	н/д	
Распространенность в промышленности	высокая	средняя, набирающая обороты	на стадии НИР	на стадии НИР	

Водородный генератор на РУ БРЕСТ имеет ряд преимуществ перед электролизерами – практически полное отсутствие затрат электроэнергии (кроме питания кислородного насоса), а также электродов и мембран, изготавливаемых из дорогостоящих материалов.

Вместо электроэнергии в данной установке потребляется тепловая энергия, передаваемая теплоносителем реактора. Зная, что для осуществления реакции разложения воды необходимо подвести 286 кДж/моль, и что согласно формуле (1) при разложении 1 моля воды выделяется 1 моль водорода, путем некоторых вычислений получаем энергозатраты, приблизительно равные 3,6 кВт·ч/м³H₂ при чистоте водорода 100%, что сопоставимо с энергозатратами электролизеров (таблица 1). Иными словами, без количественных изменений один вид подводимой энергии заменяется на другой, более дешевый.

Однако, если учесть низкие концентрации полученного водорода, то при температуре 810°C с чистотой водорода 15,21% энергозатраты составят порядка 24 кВт·ч/м³H₂, а при 525°C с чистотой 0,02% - 18000 кВт·ч/м³H₂. Столь низкое содержание водорода объясняется использованием несовершенного кислородного насоса, следовательно, экспериментальный образец требует доработки.

Подведем итоги. Атомно-водородный энергокомплекс, работающий за счет внепиковой электроэнергии, во-первых, конкурентоспособен с традицион-

ными методами добычи водорода, а, во-вторых, позволит обеспечить АЭС базисной нагрузкой. В то же время наиболее выгодными могут оказаться водородные генераторы, разрабатываемые для реакторов нового поколения типа БРЕСТ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Adamov E.O., Orlov V.V. NATURALLY SAFE LEAD-COOLED FAST REACTOR FOR LARGE-SCALE NUCLEAR POWER, Moscow. 2001 – 268 pp.
2. Рачков В.И., Мартынов П.Н. Инновационные технологии, развиваемые в ГНЦ РФ-ФЭИ// Известия вузов, ядерная энергетика. 2014. №1. С 16-38.
3. Семенова И.В. Производство электролитического водорода. Физико-химические закономерности, современное состояние и перспективы развития// Энергосбережение и водоподготовка. 2010. №3 (65). С 15-21.
4. Адамов Е.О., Габарев Б.А., Орлов В.В., Филин А.И. Опытномонстрационный реактор БРЕСТ// Энергия: экономика, техника, экология. 2003. №8. С. 25-30.
5. Байрамов А.Н. Исследование эффективности атомно-водородного энергетического комплекса// Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития, выпуск II, сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции (10 октября 2015 г.)

Научный руководитель: К.В. Слюсарский, ассистент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АБСОРБИЦИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ

¹Д.С. Лужковой, ²О.Ю. Ромашова
^{1,2}Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, ¹группа 5БМ61

Повышение эффективности использования энергоресурсов является общемировой проблемой, поскольку возрастающий с каждым годом спрос на них неизбежно приводит к сложностям экономического, экологического и технического характера. Для российской энергосистемы, в которой преобладает значительная доля когенерации, особо актуальна проблема повышения эффективности работы существующих теплоэлектроцентралей.

Одной из наиболее перспективных технологий для внедрения на ТЭЦ является преобразование низкопотенциальной теплоты в высокопотенциальную с помощью абсорбционных тепловых насосов (АТН).

Положительный эффект от внедрения тепловых насосов в схему ТЭЦ зависит от режима её работы. При работе станции в конденсационном режиме АТН могут использоваться для нагрева основного конденсата, а в теплофикационном – для нагрева основного конденсата, сетевой воды и сырой воды на нужды станции после химической очистки (в том числе и на подпитку теплосети).

Эффект экономии топлива при использовании АТН на ТЭЦ проявляется, если при заданном расходе пара на турбину увеличивается работа, совершаемая всем потоком пара в турбине. Это возможно в двух случаях:

- если недовыработка потоком пара, отбираемым на теплонасосную установку, будет меньше, чем дополнительная работа, полученная в результате сокращения расхода пара на регенеративные, сетевые или другие (например общестанционные) теплообменники;
- если за счёт охлаждения циркуляционной воды удаётся снизить давление в конденсаторе, тем самым увеличив располагаемый теплоперепад.

Первый случай соответствует режиму работы турбоустановки, когда на один из теплообменников подаётся пар более высокого потенциала, чем требуется по условиям теплообмена. На большинстве промышленно-отопительных ТЭЦ на общестанционные теплообменники низкого потенциала (подогреватели химически обессоленной, химически очищенной, сырой воды, атмосферные деаэраторы) пар подается из общестанционного коллектора, питаемого через РОУ из производственного отбора турбин.

Целью работы является сравнительный анализ результатов расчёта вариантов включения абсорбционных тепловых насосов в схему теплофикационной турбоустановки типа ПТ- с учетом режимов ее работы.

В качестве модели, на которой исследовалась эффективность интеграции тепловых насосов, была взята турбоустановка ПТ-80/100-130/13. Её принципиальная схема представлена в [1]. Исходные данные для режимов работы турбоустановки были взяты из [2]. Моделями абсорбционных тепловых насосов послужили АБТН компании ООО «ОКБ Теплосибмаш» [3].

Для анализа выбраны характерные режимы работы турбоустановки с регулируемым отопительным и производственным отборами: теплофикационный по тепловому графику с номинальными нагрузками регулируемых отборов, конденсационный режим, теплофикационный с общестанционной тепловой нагрузкой ГВС, обеспечиваемой из П-отбора.

В конденсационном режиме с помощью АТН нагревался основной конденсат перед первым ПНД, в теплофикационных – сырая вода после прохождения химической очистки за общестанционным подогревателем. Циркуляционная вода охлаждалась во всех случаях.

На рисунках 1 и 2 показаны расчётные схемы подготовки химически очищенной воды для подпитки теплосети до и после введения тепловых насосов.

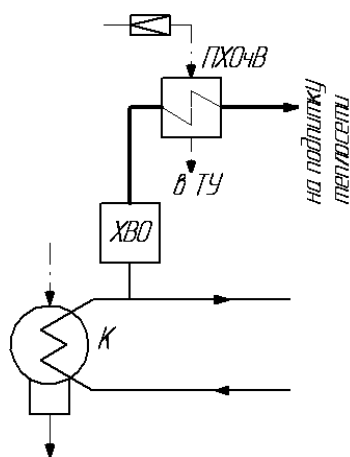


Рис. 1. схема подготовки подпиточной воды до внедрения тепловых насосов

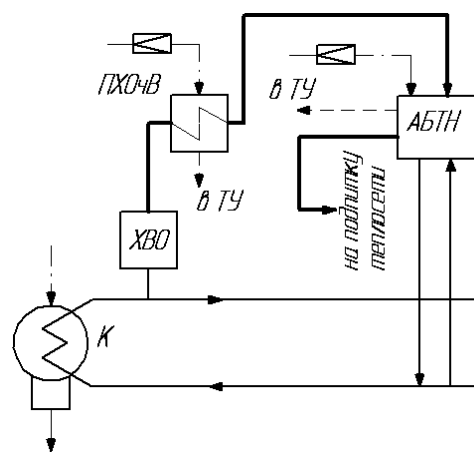


Рис. 2. схема подготовки подпиточной воды после внедрения тепловых насосов

где К – конденсатор; ХВО – цех химической очистки воды; ПХОчВ – подогреватель химически очищенной воды; АБТН – абсорбционные бромистолитиевые тепловые насосы

В таблице 1 и на рисунках 1, 2 представлены результаты расчётов турбоустановки в теплофикационном режиме при отпуске теплоты на подпитку теплосети в летний период работы ТЭЦ. Расход острого пара принят равным $G_0 = 80$ кг/с.

Табл. 1. Сравнение результатов расчёта турбоустановки ПТ-80/100-130/13 в теплофикационном режиме при различных значениях подпитки теплосети

Показатель	подпитка 125 кг/с		подпитка 250 кг/с		подпитка 500 кг/с	
	без АБТН	с АБТН	без АБТН	с АБТН	без АБТН	с АБТН
Расход пара на турбину, кг/с	80					
Вырабатываемая электр. мощность, МВт	70,916	72,423	66,752	68,491	53,29	59,794
Расход пара в конд-р, кг/с	48,61	50,54	40,65	44,76	22,43	30,08
Давление в конд-ре, кПа	9,2	9,1	8,4	8,3	6,7	6,5
Температура цирк. воды на входе в конденсатор, °С	20	19,3	20	18,9	20	17,7
Температура цирк. воды на выходе из конденсатора, °С	31,1	30,8	29,3	29,1	25,1	24,5
Расход цирк. воды, кг/с	2222					
Расход пара из П-отбора на ПХОчВ, кг/с	7,6	1,72	15,91	4,06	35,1	11,57
Суммарный расход пара из П-отбора на ПХОчВ и АБТН, кг/с	7,6	5,92	15,91	12,31	35,1	28,07
Тепло, переданное подпиточной воде, МВт	26,19	26,19	52,4	52,4	104,7	104,7

Температура подпитки теплосети, °С	70					
Тепло, отнятое у холодного источника, МВт	-	5,72	-	11,79	-	23,57
Электр. КПД блока брутто	0,3956	0,404	0,4296	0,4505	0,5292	0,5936
Удельный расход условного топлива по отпуску эл. Энергии b , г.у.т./кВт*ч	388,1	380,1	357,5	340,8	290,2	258,7

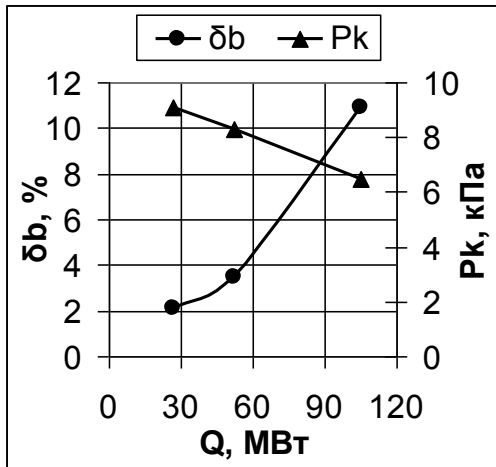


Рис. 1. Зависимости относительного изменения экономии топлива на турбоустановку ПТ-80/100-130/13 и давления в конденсаторе от тепловой нагрузки внешнего потребителя ($G_0 = 80$ кг/с)

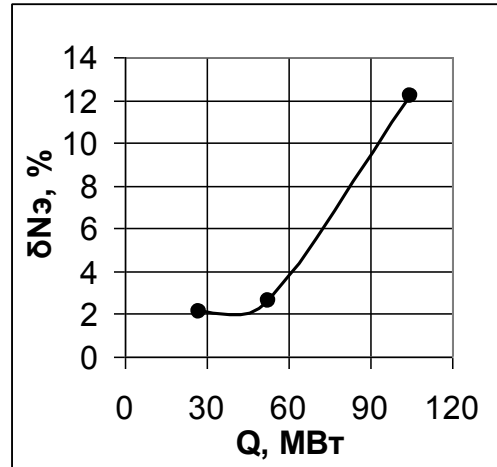


Рис. 2. Зависимость относительного увеличения вырабатываемой электрической мощности турбоустановкой ПТ-80/100-130/13 ($G_0 = 80$ кг/с)

По результатам расчетного исследования сделаны следующие выводы:

- использование абсорбционных тепловых насосов в конденсационном режиме не даёт ощутимого эффекта экономии топлива, так как положительный результат от снижения давления в конденсаторе и, соответственно, увеличении располагаемого теплоперепада на турбину уравновешивается отрицательным от вытеснения пара, идущего на регенерацию. Однако применение АТН позволяет снизить давление в конденсаторе путём охлаждения циркуляционной воды на входе в конденсатор при возникновении ситуации, когда приходится ограничивать расход пара на турбину для поддержания необходимого вакуума в конденсаторе (например, летнее ограничение на выработку электроэнергии);
- применение АТН в теплофикационном режиме по тепловому графику с номинальными нагрузками регулируемых отборов также не приводит к уменьшению удельного расхода топлива. В этом случае не удастся задействовать эффект понижения давления в конденсаторе за счёт АТН, поскольку в холодное время года температура охлаждающей воды достаточно низкая, проблем с созданием необходимого вакуума в конденсаторе не возникает, и, соответственно, понижать давление в нём с помощью АТН становится экономически нецелесообразно;

- наиболее эффективный способ применения АТН в составе турбоустановки ПТ-80/100-130/13 – при ее работе в теплофикационном режиме в неотапительный период с нагрузкой горячего водоснабжения. В этом случае положительного эффекта удаётся добиться как от снижения давления в конденсаторе, так и от сокращения расхода пара на подогрев подпиточной воды;
- проанализировано влияние внешней тепловой нагрузки $Q_{\text{подп}}$ на эффективность применения тепловых насосов. Увеличение $Q_{\text{подп}}$ от 26 МВт до 105 МВт при расходе пара на турбину, равном $G_0 = 80$ кг/с, даёт снижение удельного расхода условного топлива с 2,1 % до 10,9 %;
- Таким образом, внедрение абсорбционных тепловых насосов в состав теплофикационной турбоустановки оказывается действенным средством повышения эффективности работы ТЭЦ, однако для получения максимальной выгоды от него необходимо учитывать режимы работы турбоустановки, определяющие эффективность работы теплонасосной установки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бойко Е. А. Тепловые электрические станции (паротурбинные энергетические установки ТЭС): Справочное пособие / Е. А. Бойко, К. В. Баженов, П. А. Грачёв. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 152 с.
2. Цанев С. В., Тамбиева И. Н. Тепловые схемы и показатели теплофикационных установок ТЭС и АЭС: Учебное пособие. Под ред. В.Ф. Жидких. М.: МЭИ. 1987. 76 с.
3. Официальный сайт компании ООО «ОКБ Теплосибмаш» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplosibmash.ru>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 08.08.2016 г.

Научный руководитель: О.Ю. Ромашова, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ Р-12-90/18

А.Г. Рабский

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 3-6101

Модернизация паровой турбины по истечению её срока службы важный выбор для руководства станции. В связи со строительством объектов и расширением жилой зоны города, для ТЭЦ просто необходимо увеличивать мощность и объёмы для турбин с отработавшим сроком службы. При выборе установки более мощной турбины другой комплектации, очень резко встает финансовый вопрос. Для установки новой турбины нужно будет проводить демонтаж как и в случае модернизации, но самое главное под новый агрегат потребуется

удаление старого фундамента и заливка нового, а это очень дорогостоящие операции.

Я предлагаю модернизацию проточной части паровой турбины. По проекту предполагается что при увеличении объёмов подачи, мы увеличим объем поставляемого тепла потребителю. Так же увеличится мощность выдаваемую турбоагрегатом. Затраты будут меньше потому, что модернизация будет проводиться с оставлением габаритных размеров части высокого давления. Это позволит после демонтажа пропустить работы с фундаментом. На тот же фундамент будет установлен новый цилиндр высокого давления. Трубопроводы подачи пара в цилиндр высокого давления, а так же трубопровод для подачи на потребителя останутся прежние.

Естественно увеличить мощность турбоагрегата простым увеличением объёмов невозможно, тогда турбины были бы универсальным источником питания. Турбины данного типа были спроектированы давно и не соответствуют времени, работа на данном оборудовании выгодна только из – за того что они уже окупались. Увеличиваться мощность будет за счет более современного подхода.

Модернизация будет заключаться в совершенствовании проточной части. В работе будет пересчитан лопаточный аппарат с увеличением ступеней и изменением движения потока пара в лопастях. Рассчитываться будет каждая ступень отдельно и сама необходимость такого количества ступеней. Изменение лопаточного аппарата нужно как для увеличения мощности, так и для увеличения КПД турбоустановки в целом.

Еще незначительными но немаловажными улучшениями данной установки будет замена устаревших диафрагменных и концевых уплотнений цилиндра высокого давления на более современные уплотнения «Соты». При установке сотовых уплотнений, за счет уменьшения радиальных зазоров в проточной части до минимально возможных значений, достигается повышение относительного внутреннего КПД цилиндра без ухудшения вибрационного состояния валопровода турбины [1]. Уплотнения старого образца после капитального ремонта по сравнению с начальным периодом могут уменьшать внутренний КПД цилиндра до 3-4%.

Еще один важный аспект модернизации замена регулирующих клапанов. Установка регулирующих клапанов четвертого поколения, это решение которое повысит не только безопасность работы цилиндра высокого давления. Но и продолжительность их эксплуатации, повышение виброустойчивости, исключение отсосов протечек пара от штоков клапанов и улучшение ремонтпригодности. Так же увеличение мощности турбины на 0.02-0.11 МВт при повышении КПД цилиндра высокого давления на 0,12%.

Повсеместно кончается срок эксплуатации турбин и изготовление новых, демонтаж и монтаж это безусловно дорогой и самое главное очень долгий процесс, на который уйдут десятки лет чтобы обновить парк паровых турбин. Что в конечном итоге приведет к тому что турбины вновь устарели и так по кругу. Наиболее коротким и сравнительно недорогим путем восстановления работо-

способности паровых турбин является их модернизация, включающая в себя повышение мощности и экономичности каждого турбоагрегата[2].

ЛИТЕРАТУРА:

1. <http://www.armstech.ru>
2. <http://www.combienergy.ru>

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, старший преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ АЭС ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНДЕНСАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

И.С. Дергачёв
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5012

Цель работы: рассмотреть способы модернизации конденсационной установки на существующей атомной станции.

В данной работе мною будет рассмотрена уже существующая модернизация конденсационной установки, а в частности, замена медно-никелевых труб и трубных досок конденсатора, на титановый сплав ВТ1-0

В настоящее время на атомных станциях концерна ведутся большие работы по замене трубок теплообменного оборудования второго контура из медесодержащих сплавов на нержавеющую сталь или на титановые сплавы. Связано это с тем, что при ведении технологического процесса медь, содержащаяся в теплообменных поверхностях, вымывается, а также разъедается рабочей средой второго контура, в которую дозируется гидразин.

Дозировка гидразина в рабочую среду ведется для защиты внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов, так как гидразин, реагируя с железом образует стойкую окисную пленку, называемую магнетит (Fe_3O_4) и нейтрализует кислород, попавший в контур.

Но при этом гидразин под воздействием высокой температуры (более 100 °С) разлагается на аммиак, который растворяет медь, содержащуюся в медно-никелевых сплавах (МНЖ-5).

В результате растворенная медь попадает в воду второго контура и вызывает коррозию трубок теплообменного оборудования.

Эти обстоятельства вынуждают проектные организации искать новые материалы для поверхностей теплообмена оборудования и, на строящихся блоках, все теплообменное оборудование (ПВД, ПНД, теплообменники эжекторов и т.д.) выполнено из нержавеющей стали, а трубки конденсаторов из титановых сплавов.

После успешной модернизации конденсатора на четвертом блоке Балаковской АЭС, а в частности замены медесодержащих трубок на титановый

сплав ВТ1-0, а также замены медных трубных досок на биметаллический сплав «сталь 09Г2С-13 – титан ВТ 1-0», было принято решение, по модернизации соответствующего оборудования на первом блоке РоАЭС в период ППР 2015 года.

Были получены заключения от РосТехНадзора и Центрального научно-исследовательского института исследования конструкционных материалов «Прометей», что использование данных материалов не ухудшит работу конденсационного оборудования.[1]

Площадь теплообменной поверхности была подобрана таким образом, чтобы параметры воды на выходе из конденсатора не изменились, что позволит произвести модернизацию без изменений параметра блока.

Замена трубок, сперва, может показаться дорогостоящей, но если учесть затраты на ремонт теплообменного оборудования второго контура каждый год, то приходим к выводу, что данная модернизация просто необходима.

Общая стоимость трубок из титанового сплава составила: 4,76 млрд. рублей. Стоимость трубок из МНЖ5-1: около 3 млрд. рублей. Во - время ППР на РоАЭС в 2016 году трубки теплообменного оборудования второго контура не были заменены, из этого следует, что затраты на ремонт трубок теплообменного оборудования второго контура после модернизации можно не учитывать. В предыдущие года, на ремонт трубок ПВД-1 и ПВД-2 во - время ППР уходило около 200 млн. рублей. Отсюда следует, что время окупаемости будет:

$$t = \frac{4,76 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^9}{200 \cdot 10^6} = 8,8 \text{ лет} \quad (1)$$

Стоит отметить, что в формуле не учтены многие факторы, например: стоимость перевозки или затраты на работу персонала, которые могли бы существенно сократить срок окупаемости данной модернизации.

Так же, хотелось бы отметить, что целью данной модернизации может служить не только сокращение шлама, и в следствии сокращения издержек во время ППР. Данная модернизация может и служить для увеличения термического КПД турбинной установки, так как титан имеет неплохие теплофизические параметры. Во второй части данной работы я хотел бы рассмотреть модернизацию конденсатора не на уже существующем блоке, а на условно проектируемом, в котором размеры трубок не регламентированы проектом.

Одним из основных способов достижения высокого термического КПД паротурбинной установки является понижение параметров пара за турбиной. С понижением давления и температуры отработавшего в турбине пара уменьшается количество теплоты, передаваемой холодному источнику, что, как известно из термодинамики, при неизменных параметрах свежего пара повышает мощность турбины (за счет увеличения теплоперепада на нее) и экономичность цикла в целом. [2]

В основе расчета будут лежать уравнения теплового баланса и теплопередачи конденсатора.

$$Q_k = D_k \cdot (h_n - h_e) = G_e \cdot c_p \cdot (t_{2e} - t_{1e}) \quad (2)$$

$$Q_k = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (3)$$

Изменив длину труб, мы добьемся увеличения площади теплообмена, а так же увеличения коэффициента теплопередачи. Расчёт будем вести итерационно, так как необходимо задаться температурой конденсата.

При вычислении коэффициента теплопередачи, воспользуемся двумя методами: классическим и методикой ВТИ. При вычислении стандартным методом, возникает сложность в виде вычисления коэффициента теплоотдачи от пара к трубкам, так как приходится учитывать конденсат, скопившийся на внешней стенке трубки. В методике ВТИ же, полученной по опытным данным, данный коэффициент необязателен к расчету.

Табл. 1. Параметры конденсатора

	МНЖ 5-1	ВТ 1-0 (оригинальный)	ВТ 1-0 (модернизированный)
$L_{тр}, м$	14060	14300	16000
$d_{тр}, мм$	28x2	28x1	28x1
$t_k, ^\circ C$	28,96	28,96	26,69
$p_k, МПа$	0,004	0,004	0,035

Из таблицы видно, что конечное давление конденсатора уменьшилось, что должно привести к повышению мощности.

Так как, меняется только конечное давление, можно рассчитать изменение тепловой мощности на ЦНД ныне существующего блока и модернизированного, а затем, найдя разность и умножив на КПД ТУ, получим изменение мощности за счет изменения конечного давления: 6,5 МВт.

Кроме этого, существуют номограммы, показывающие изменение мощности от конечного давления, как для каждой турбины, так и универсальные по расходу.

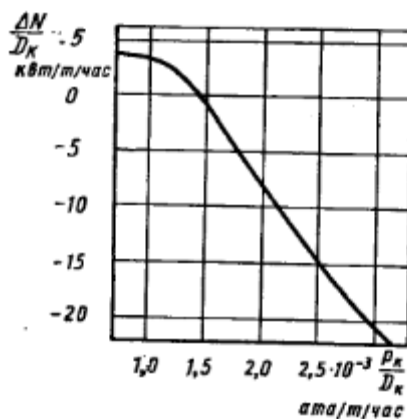


Рис. 1. Универсальная зависимость мощности турбины от давления в конденсаторе

Расчёт по данной номограмме показывает, что изменение конечного давления увеличит мощность на 8 МВт.

Подводя итог, можно сказать, что замена медно-никелевых трубок теплообменных аппаратов может не только сократить количество шлама во втором контуре ТУ, и в следствии сократить затраты на ремонт теплообменного оборудо-

дования, но и дать существенный прирост мощности при изменении площади теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Заключение №8/185 «О возможности применения сварных труб АЭ титана ВТ1-0» - Санкт-Петербург 2014. -3 с.
2. Бродов Ю.М., Ниренштейн М.А. Расчет теплообменных аппаратов паротурбинных установок. Екатеринбург, УГТУ, 2001. – 373 с.
3. Бродов Ю.М., Савельев Р.З. Конденсационные установки паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1994.
4. Тепловые и атомные электростанции. Справочник / Под общ. ред. Чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М.Зорина. М.: Издательство МЭИ, 2003. – 648 с.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, старший преподаватель каф АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЗОТУРБИНОЙ НАДСТРОЙКИ ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА НА ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБОУСТАНОВКАХ

О.Ю. Ромашова, Л.А. Беляев, Е.А. Скребатун, А.А. Туболев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

На современном этапе развития энергетики наиболее эффективным способом повышению экономичности паротурбинных ТЭС является замена паросилового цикла на парогазовый (ПГ). Парогазовые технологии имеют КПД цикла порядка (60 – 63) % и позволяют сэкономить до 10% топлива.

В данной работе рассматривается возможность повышения эффективности работы традиционных ТЭЦ за счет газотурбинной надстройки схемы с целью использования теплоты отработавших газов для промежуточного перегрева пара (ПП) в котле-утилизаторе. Целью исследования является оценка тепловой экономичности ввода ПП в основной цикл ПТУ для разных режимов работы теплофикационной турбины.

Известно, что использование традиционного промперегрева в схемах ТЭЦ приводит к повышению вентиляционного пропуска пара в части низкого давления (ЧНД) и потере тепловой экономичности при работе по тепловому графику, поэтому все теплофикационные турбины с докритическими параметрами острого пара выполняются без промежуточного перегрева. Однако отказ от ПП ведет к снижению их тепловой экономичности в конденсационном режиме на (3-4) % из-за падения удельной работы пара в турбине и не позволяет турбинам типа Т-110-130, Т-175-130 в летний период конкурировать с конденсационными блоками таких же начальных параметров (К-210-130, К-160-130).

Расчетные исследования выполнены для паротурбинного энергоблока с турбиной Т-110/120-130, включенного в состав ПГУ утилизационного типа. Принципиальная схема ПГУ приведена на рисунке 1. Отработавший в цилиндре высокого давления (ЦВД) турбины Т-110 пар направляется в котел-утилизатор (КУ) газовой турбины. Оставшаяся часть теплоты газов утилизируется в системе регенерации высокого и низкого давления паровой турбины (ГППВ – газовый подогреватель питательной воды, ГПК – газовый подогреватель конденсата). Т, Q-диаграмма КУ представлена на рисунке 2.

Расчеты выполнены для нескольких режимов работы турбины Т-110-130: конденсационного при максимально-возможном объемном расходе пара в конденсатор (режим I); по тепловому графику с номинальным отпуском теплоты из отборов турбины (режим II); теплофикационного с одноступенчатым подогревом сетевой воды при минимальном давлении пара в регулируемом отборе и ограниченном расходе пара в голову (режим III).

Параметры работы газотурбинной части определены из конденсационного режима и остаются неизменными в теплофикационных режимах. Температурные напоры для отдельных поверхностей КУ оценивались по [1]; температура уходящих газов принята $\theta_{yx}^{KY} = 100$ °С. Во всех режимах начальные и конечные параметры пара оставались неизменными $P_0 = 12,8$ МПа, $t_0 = 555$ °С, $P_k = 0,0057$ МПа. В качестве расчетного для турбины Т-110 взят конденсационный режим, гарантированный заводом-изготовителем [2].

В процессе исследования учитывались следующие ограничения [2, 3]:

- объемный пропуск пара в конденсатор $G_k \cdot v_k$ не должен превышать максимально-возможного, определяющего геометрические размеры последней ступени турбины. Ввод промперегрева обуславливает увеличение удельного объема пара после ПП, что требует снижения массового расхода пара по проточной части;
- понижение давления в камерах регулируемых отборов приводит к ограничению электрической мощности (и расхода острого пара) из-за увеличения изгибных напряжений в лопатках предотборных ступеней;
- вентиляционный расход пара для охлаждения ЧНД турбины при её работе по тепловому графику зависит от температуры охлаждающего пара. Введение ПП приводит к росту температуры пара в камере нижнего теплофикационного отбора и при прочих равных условиях требует повышения вентиляционного расхода.

Кроме того, для обеспечения надежности турбины при введении промперегрева требуется расчёт части среднего давления на прочность и замена материала (стали) элементов проточной части. В данной работе этот вопрос не решается.

Расчет схемы на конденсационный режим выполнен при изменении температуры пара в горячей нитке промперегрева. Основным ограничением в этом режиме принят постоянный объемный пропуск пара в конденсатор $G_k \cdot v_k = const$. Максимальный массовый расход пара на выходе из турбины в исходной схеме принят равным $G_k = 301$ т/ч. Результаты расчета конденсационного ре-

жима представлены на рисунке 3. Наиболее эффективным является газотурбинная надстройка с температурой промежуточного перегрева, равной температуре острого пара $t_{пп} = 555$ °С. Поэтому в исследованиях теплофикационных режимов расход и температура газов на входе в КУ принимаются из этого варианта. Промежуточный перегрев пара до температуры 555 °С приводит к снижению удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии на 14,3 %. При этом суммарная мощность ПГУ увеличивается на 20 % по сравнению с исходной схемой, несмотря на значительное (около 25 %) снижение электрической мощности паровой турбины.

Влияние промперегрева на показатели работы станции в теплофикационных режимах зависит от параметров теплосети и нагрузки потребителя. Для режима II расчеты выполнены при тепловой нагрузке отборов $Q_T = 203$ МВт и в диапазоне изменения давления пара в верхнем регулируемом отборе от 0,098 МПа до 0,25 МПа. Температура пара после ПП рассчитывается в итерационном цикле в зависимости от расхода и температуры пара на выходе из ЦВД и находится на уровне (450-470) °С. Из-за пониженной температуры промперегрева по сравнению с конденсационным режимом и меньшей доли традиционной регенерации питательной воды в ПВД и ПНД в этих режимах объемный расход пара по проточной части ЦСД ниже максимально возможных значений. Исследования показывают, что при работе турбины Т-110-130 по тепловому графику ПП пара снижает электрическую мощность паровой турбины на (11-13) % по сравнению с ее исходным значением из-за сокращения расхода пара в регенеративные отборы при росте суммарной мощности ПГУ на (39-44) % и практически неизменной тепловой экономичности.

Для режима III согласно [3] при снижении давления в нижнем теплофикационном отборе до минимального значения 0,03 МПа электрическая мощность паровой турбины ограничена величиной $N_э = 80$ МВт, тепловая нагрузка принята $Q_T = 100$ МВт. Расход пара на турбину рассчитан для исходной схемы без ПП при и остается постоянным после введения промперегрева (100 кг /с). Так как расход острого пара значительно меньше максимального на турбину, температура пара после промперегрева достигает номинального значения, а газовый подогрев питательной воды полностью вытесняет систему регенерации высокого давления (ПВД отключены) при повышении температуры питательной воды. В этом режиме получен наибольший прирост электрической мощности станции по сравнению с исходным вариантом. Мощность паровой турбины растет от 80 МВт до 100 МВт, удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии снижается почти на 25% даже не смотря на увеличение пропуски пара в конденсатор.

На рисунках 4 и 5 представлены основные результаты расчетов рассмотренных режимов.

Выводы:

- В летнее время при работе турбины Т-110-130 в конденсационном режиме, надстройка ГТУ для ПП в КУ обеспечивает снижение удельного расхода условного топлива почти на 15 % при одновременном увели-

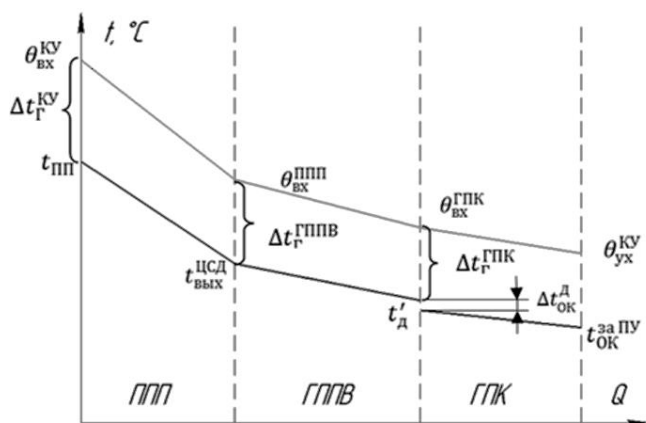


Рис. 2. t, Q -диаграмма КУ

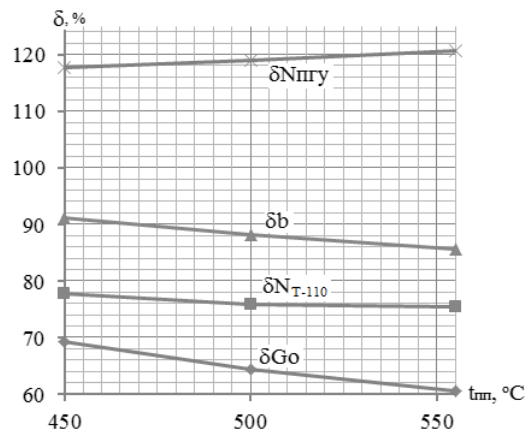


Рис. 3. Результаты расчета конденсационного режима турбины Т-110-130 в конденсационном режиме

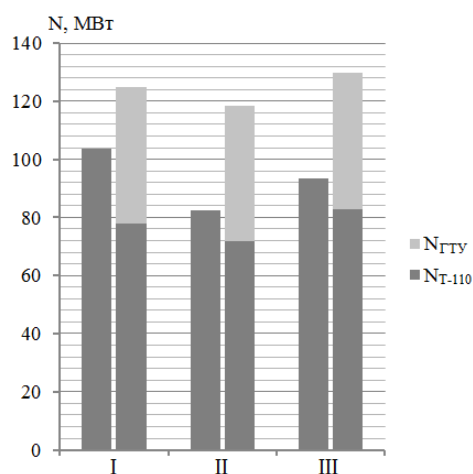


Рис. 4. Изменение мощности турбины Т-110-130 и ПГУ относительно исходных режимов паровой турбины

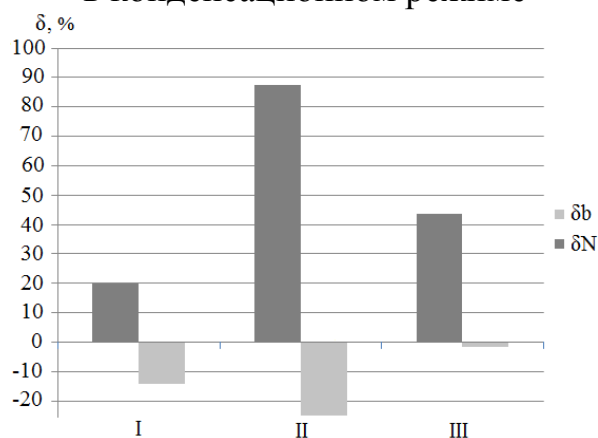


Рис. 5. Графики приростов электрической мощности и экономии топлива для ПГУ относительно исходных режимов Т-110-130

ЛИТЕРАТУРА:

1. Цанев С.В. и др. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов / С.В. Цанева, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов.– М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 584 с.
2. Трухний А.Д. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки : [учеб. пособие для вузов] / А.Д. Трухний, Б.В. Ломакин.– М.: Издательский дом МЭИ, 2006.– 539 с.
3. Инструкция по эксплуатации теплофикационной установки ТГ-8 Томской ГРЭС-2.

Научный руководитель: О.Ю. Ромашова, к.т.н., доцент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

СОЗДАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.С. Бычок, Д.С. Самохин

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

В мире уже снято с эксплуатации и демонтировано более 10 АЭС, и их площадки возвращены в состояние “зеленой лужайки”, однако, этот процесс носил больше экспериментальный характер и происходил в условиях возможного выделения ресурсов для единичных блоков. В настоящее время в мире более 130 исследовательских, демонстрационных и промышленных ядерных реакторов выработали свой ресурс, а в период до 2020 г. во всем мире будет снято с эксплуатации более 200 энергоблоков [1].

По мнению авторов, кроме ядерных энергетических реакторов и экспериментального оборудования различного назначения, весьма полезно включить в область рассмотрения объекты ядерной медицины. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) около 15% отходов, образующиеся в результате медицинской деятельности, считаются опасными материалами, которые могут быть токсичны или радиоактивны [2]. Риски для здоровья, связанные с отходами, включают радиационные ожоги и долгосрочные опасные воздействия на здоровье человека. Отходы могут оказать негативное воздействие на окружающую среду.

Далее, объекты содержащие ядерно-опасные вещества, будем называть объектами ядерных технологий (ЯТ).

Для минимизации материальных затрат связанных с детальной разработкой мероприятий по выводу из эксплуатации объектов ЯТ предлагается объединить усилия всех стран в работе над единой интерактивной информационной системой (ИИС) по выводу из эксплуатации объектов ЯТ.

По мнению авторов работы, неотъемлемой составляющей часть ИИС должны стать 3D модели объектов ЯТ, прошедших процедуру вывода из эксплуатации с подробной информацией об объекте и пошаговым описанием технических решений способствовавших успешному решению задач вывода из эксплуатации. Помимо 3D моделей самого объекта ЯТ и его составных частей, ИИС должна включать презентационные материалы с элементами технической мультипликации, наглядно демонстрирующими основные подходы к решению задач вывода из эксплуатации конкретного объекта ЯТ.

Подобная работа ведется в настоящий момент для упрощенной модели реакторной установки ВВЭР-1000. В разработке описательной части интерактивной модели реакторной установки ВВЭР-1000 принимают участие специалисты трех стран (Россия, США и Вьетнам). Соответственно на выходе мы получим идентичный материал, оформленный в трех язычном исполнении. Представленный материал будет содержать текстовую часть, 3D модели стенда реакторной установки ВВЭР-1000 при этом каждая из моделей будет снабжена не

только текстовой частью, но и голосовым аудиофайлом с оригинальной звуковой дорожкой (русский английский и вьетнамский языки).

Непосредственным конкурентом представляемого проекта являются IT разработки компании НЕОЛАНТ, а именно проект «База данных по выводу из эксплуатации блоков АЭС», получивший диплом международного конкурса VE Awards 2008 [5]. Образец разработанной 3D модели машинного зала Ленинградской АЭС (рис. 1) отличается значительными трудозатратами и отсутствием многоязычной компоненты.

В качестве среды разработки интерактивной информационной системы был выбран конструктор программ Алгоритм 2.7.1 [3].

Разработка 3D моделей ведется с применением программного комплекса системы автоматического проектирования SolidWorks [4].

Обзор выполненных за последнее десять лет технических программ по выводу из эксплуатации объектов ЯТ может быть структурирован и представлен в виде визуальных моделей с использованием предлагаемого подхода. При переводе очередного объекта ЯТ из состояния промышленной эксплуатации в состояние вывода из эксплуатации, управляющая организация может обратиться к опыту вывода из эксплуатации аналогичных объектов ЯТ и найти для себя лучшее техническое решение.



Рис. 1. Трехмерная модель оборудования машинного зала Ленинградской АЭС [5].

Подобные интерактивные модели будут крайне полезны с точки зрения сохранения опыта и знаний в области вывода из эксплуатации объектов ядерных технологий.

Наличие в ИИС многоязыковой составляющей будет способствовать развитию международного сотрудничества в предметной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.М. Вывод из эксплуатации объектов атомной энергетики / Москва: Российский Зеленый Крест. Дирекция программы по ядерной и радиационной безопасности. 2003. – 137 с.
2. Всемирная организация здравоохранения [<http://www.who.int/ru/>]
3. Описание программного комплекса Алгоритм. Версия 2.7.1. [<http://www.algorithm2.ru/index.php/ru/>]
4. Solidworks Russia [<http://www.solidworks.ru/>]
5. Компания «НЕОЛАН», проект «База данных по выводу из эксплуатации блоков АЭС» [http://www.neolant.ru/projects/news_detail.php?ID=1539]

Научный руководитель: Д.С. Самохин, к.т.н., заведующий кафедрой РКР АЭС, ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

СПОСОБЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОБЫЧИ УРАНА ИЗ МОРСКОЙ ВОДЫ

Р.Р. Назаров
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, группа 5022

На сегодняшний день мировая потребность урана для 450 энергоблоков оценивается в 65000 тонн природного урана в год. Уран, как и любой другой металл, добывается на рудниках карьерным или шахтным способом, либо методом подземного выщелачивания. Но залежи, которые подходят для промышленности, большая редкость.

В огромном океаническом объеме концентрация урана сохраняется постоянной. Это достигается за счет стоков рек, которые содержат растворенные соединения урана, и их отложением на морском дне. Таким образом добыча урана из морской воды в умеренных количествах может принять возобновляемый характер, т.к. при его ограниченной добыче концентрация урана будет сохраняться почти постоянной.

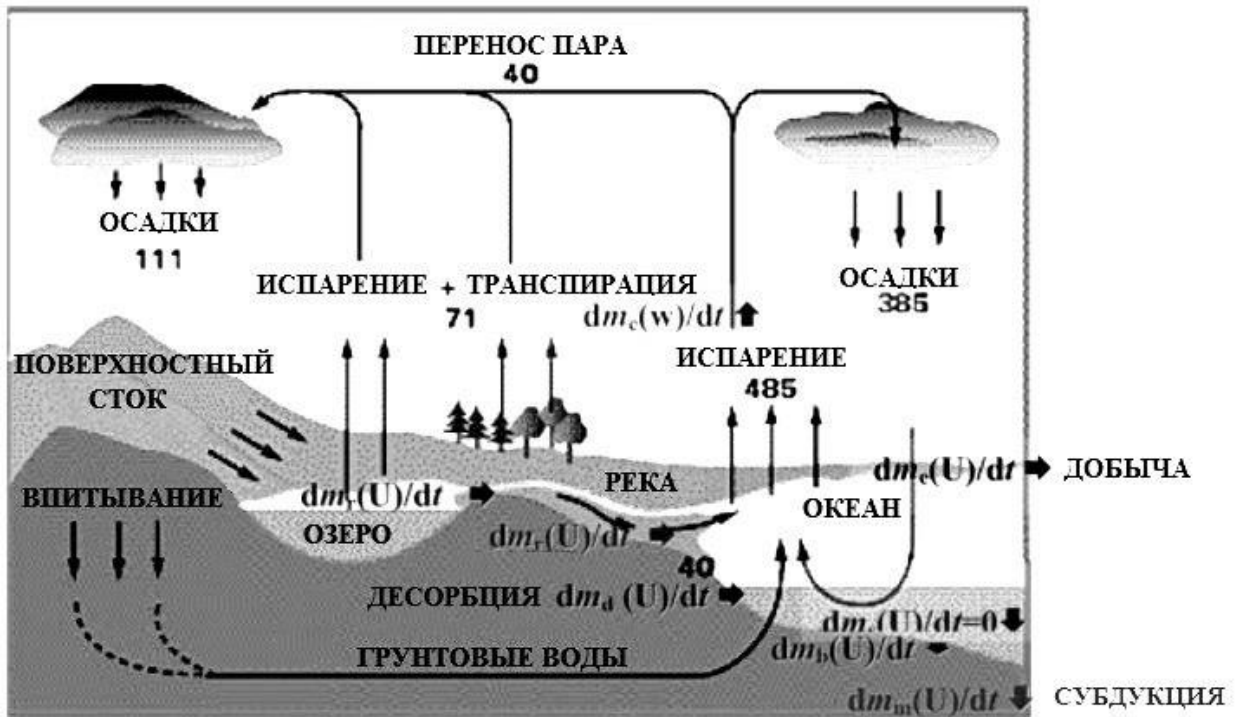


Рис. 1. Круговорот воды и урана в природе.

Уран в водном растворе образует в основном гидрооксидные и карбонатные комплексы. Комплексы уранила с фторидами, сульфатами, фосфатами и органическими веществами игнорируются из-за их низкой концентрации. Основную долю урана в морской воде составляет трикарбонат уранила $UO_2(CO_3)_3^{-4}$.

Средняя концентрация урана в морской воде, как сообщается, составляет около 3,3 миллиардных долей. Сравнение его концентрации с концентрациями других элементов показано на рисунке ниже. В общем объеме морской воды, а она составляет 1,37 млрд. км³, содержится около 4,5 млрд. тонн урана. Это примерно в 1000 раз больше, чем количество урана, содержащегося на поверхности морского дна. И этого количества достаточно, чтобы обеспечивать все атомные станции мира в течении 70000 лет при сохранении текущих объемов потребления.

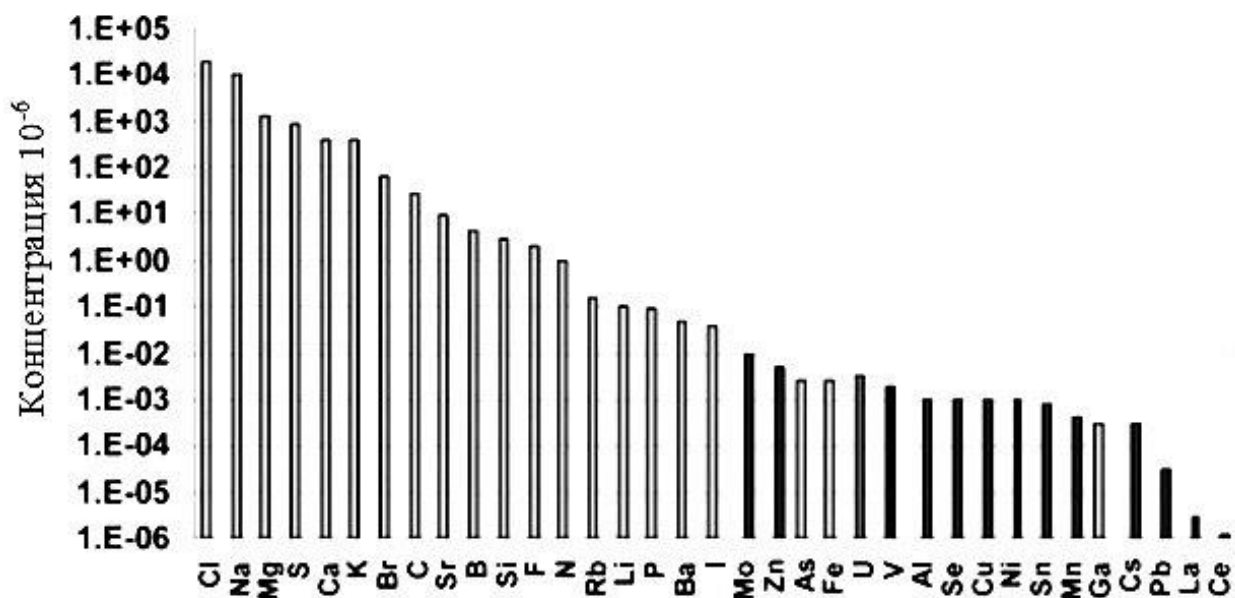


Рис. 2. Содержание элементов в морской воде (черным выделены добываемые металлы, представляющие непосредственный интерес).

Существует три основных направления извлечения урана из морской воды с использованием неорганических, органических и биоорганических сорбентов.

Исследований с неорганическими абсорбентами было проведено сравнительно мало. Возможно из-за сильной склонности к сорбции взвешенных органических веществ, а также из-за покрытия коллоидных частиц FeOH , что затрудняет их использование. Основная же часть исследований велась с органическими и биоорганическими абсорбентами.

В 2006 году был продемонстрирован гель с органическим сорбентом в виде группы амидоксима для селективной адсорбции урана хелированием в морской воде с pH 8,3.

В Японии технология извлечения урана из морской воды была продемонстрирована в середине 1990-х годов в лабораторных условиях. Стоимость добычи составила \$260 за кг урана.

Одним из способов извлечения урана из морской воды является использование в виде абсорбента уран-направленного нетканого материала. Общая масса урана, добытого в ходе эксперимента в 2003 году из трех ящиков, содержащих 350 килограмм этой ткани, составила 1 килограмм желтого осадка после 240-дневного погружения в океан.

В 2006 году та же группа исследователей продемонстрировала, что 1 килограмм адсорбента, погруженного в воду на 60 дней, дает 2 грамма урана. При 6-ти кратном цикле стоимость такого урана оценивается в \$880 за один килограмм, включая стоимость производства адсорбента, сбора урана и его очистки.

В 2012 году исследователи из Национальной лаборатории Ок-Ридж объявили об удачной разработке нового абсорбирующего материала и окрестили его NiCar. Он превосходит предыдущие аналоги, которые своей поверхностью задерживают молекулы, атомы или ионы. По результатам, полученным иссле-

дователями в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории, NiCap также эффективно удаляет токсичные металлы из воды.

В 2013 году были также протестированы другие поглощающие группы, такие как имидеидоксим, или группы, полученные из карбамоилфосфорамидичной кислоты $\text{H}_2\text{N}-\text{C}=\text{O}-\text{NH}-\text{P}=\text{O}(\text{OH})_2$. Тестирование технологии извлечения с использованием таких функциональных групп, как диазоний $\text{R}-\text{C}(=\text{NOH})-\text{NH}-\text{C}(\text{R})_2$, нанесенных на углеродную основу, показало их высокую эффективность адсорбции.

Среди всех методов извлечения урана из морской воды один представляется довольно перспективным. Это цветение воды для повышения концентрации урана. Цветение воды представляет собой развитие планктона, которое вызывается быстрым размножением водорослей, сопровождающееся изменением цвета воды.

Но до настоящего момента лишь небольшое количество урана извлечено из морской воды. Несколько организаций, в том числе Агентство по атомной энергии Японии, Национальная лаборатория Ок-Ридж и Атомный научно-исследовательский центр им. Х. Баба в Индии, пытаются оптимизировать процесс извлечения урана. Их методы включают использование лент ионообменного пластика, связанных с полистиролом для придания жесткости. Они размещены в проволочные клетки и закреплены на якорь в течении морской воды. После 1-2 месяцев пластик вынимается и вымачивается в кислоте, чтобы растворить трикарбонат уранила. Затем раствор обрабатывается для осаждения оксида урана.

Другой альтернативный способ для извлечения урана из морской воды – это наномембранная фильтрация. Он может быть включен в процесс опреснения морской воды с использованием мембран.

По данным Организации экономического сотрудничества и развития за 2008 год, при использовании метода Сёко стоимость добычи урана из морской воды составит около \$300 за килограмм, в то время как стоимость урана при традиционной добыче составляет \$100-200 за кг.

Переработка абсорбента и производство других стратегических металлов, также растворенных в морской воде, могут компенсировать некоторые издержки. Снижения затрат можно добиться эффективным использованием морских течений, приливов и теплой воды. Также крупномасштабные морские эксперименты могут повысить производительность этих технологий и сделать извлечение урана из морской воды более конкурентоспособным.

ЛИТЕРАТУРА:

1. J.W. Ball, D.K. Nordstrom. User's Manual for WATEQ4F, with Revised Thermodynamic Data Base and Test Cases for Calculating Speciation of Major, Trace, and Redox Elements in Natural Waters // U.S. Geological Survey Open-File Report.-1992.-N 91.-p. 189.
2. U. Bardi. Extracting minerals from seawater: an energy analysis // Sustainability.-2010.- pp. 980–992.

3. M. Carboni, C.W. Abney, Sh. Liu, W. Lin, W. Li. Highly porous and stable metal-organic frameworks for uranium extraction // Chem. Sci.-2013.- N 4, pp. 2396–2402.
4. N. Seko, A. Katakai, Sh. Hasegawa, M. Tamada, N. Kasai, H. Takeda, T. Sugo, K. Saito. Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system // Nucl. Technol.-2013.- N 144.- pp. 274–275.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, старший преподаватель каф АТЭС ЭНИН ТПУ.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПГУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

А.А. Уваров, А.М. Антонова
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Парогазовая установка с противодавленческой паровой турбиной (ПГУ-П) позволяет реализовать когенерационный комбинированный цикл. Авторами в работе [1] проведен анализ влияния экономичности отдельных узлов установки на тепловую эффективность ПГУ-П. При проектировании ПГУ-П для достижения ее высокой эффективности необходимо иметь оптимальные значения термодинамических параметров, расходов рабочего тела и сетевой воды, наиболее выгодное соотношение электрической и тепловой мощностей. Целью данного исследования является установление зависимостей между перечисленными факторами при заданных параметрах и характеристиках ГТУ. При этом ввиду взаимозависимости различных факторов не все из показателей управляемы. Исследование проводилось на математической модели ПГУ-П.

1 Моделирование тепловой эффективности ПГУ-П

Результаты расчетного исследования эффективности ПГУ-П

Тепловая эффективность ПГУ-П характеризуется значениями полного КПД, величиной электрической мощности паровой турбины и соотношением электрической и тепловой мощностей; чем выше это отношение, тем выше тепловая эффективность ПГУ-П. Модель основана на балансовом методе и представляет собой систему уравнений материальных и энергетических балансов парогазовой установки и отдельных ее элементов.

Особенность данного исследования заключается в том, что в качестве проектного режима принята работа ПГУ-П при температуре наружного воздуха $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (расчетная температура для проектирования отопления в условиях г. Томска). Основные показатели ГТУ рассчитываются с учетом ее энергетической характеристики; учтен подогрев воздуха до температуры $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, который осуществляется путем рециркуляции воздуха на выходе из компрессора. За основу ПГУ-П принята ГТУ Siemens SGT5-4000F, имеющая в режиме работы ГТУ при температуре наружного воздуха минус $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, показатели:

- электрический КПД – 35,37 %;

- электрическая мощность – 247,6 МВт;
- температура отработавших газов – 594,8 °С;
- расход отработавших газов – 644,9 кг/с.

В соответствии с рекомендациями [2] приняты значения ряда величин:

- температурный напор на холодном конце И – 10 °С;
- недогрев до температуры насыщения в СП – 5 °С;
- температурный напор на холодном конце ГСП – 10 °С;
- давление сетевой воды – 2 МПа.

Для паровой части ПГУ значения показателей в базовом варианте приведены в таблице 1.

Табл. 1. Основные показатели паровой части ПГУ-П и КПД установки для базового варианта

№	Характеристика	Значение
	Начальное давление пара, МПа	5,0
	Начальная температура пара, °С	540
	Электрическая мощность, МВт	68,51
	Тепловая мощность, МВт	302,9
	Температура прямой сетевой воды, °С	110
	КПД котла-утилизатора	0,828
	Полный КПД ПГУ	0,885
	Сумм. капитальные вложения, млн. USD	156,3
	Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн. USD	547,9

Модель реализована в среде MathCad и протестирована с помощью специального программного комплекса «THERMOFLEX».

В данном исследовании суммарные капитальные вложения не могут служить критерием выбора решения, поскольку значительно изменяется электрическая мощность паровой турбины. Поэтому для выбора оптимального варианта необходимо использовать чистый дисконтированный доход или его прирост относительно базового варианта [3].

2. Результаты расчетного исследования эффективности ПГУ-П

Проведены расчетные исследования влияния на тепловую эффективность ПГУ-П следующих факторов: температура прямой сетевой воды; температура обратной сетевой воды; начальное давление пара; начальная температура пара.

2.1 Влияние температуры прямой сетевой воды

Результаты расчетов паровой части ПГУ-П, проведенных при различных значениях температуры прямой сетевой воды, представлены на рис.1. Начальные параметры пара: 5,0 МПа и 540 °С; температура прямой сети 110 °С.

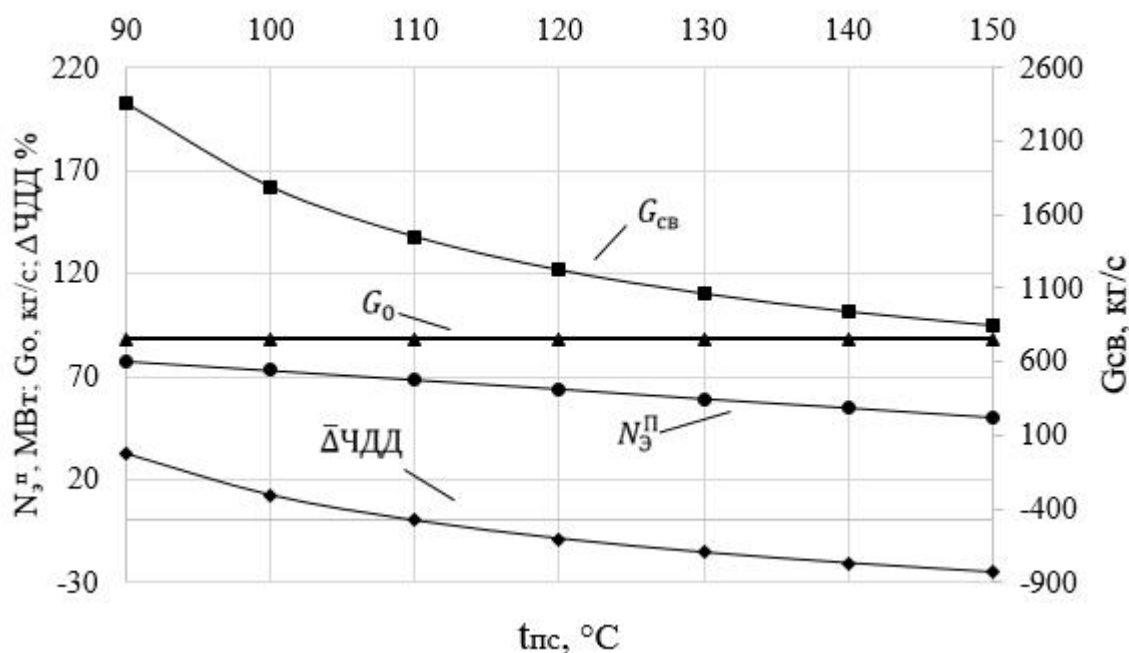


Рис.1 – График зависимости показателей ПГУ-П от температуры прямой сетевой воды

2.2 Влияние температуры обратной сетевой воды

Результаты расчетов, проведенных при различных значениях температуры обратной сетевой воды, представлены на рис.2. Начальные параметры пара: 5,0 МПа и 540 °С; температура прямой сети 110 °С.

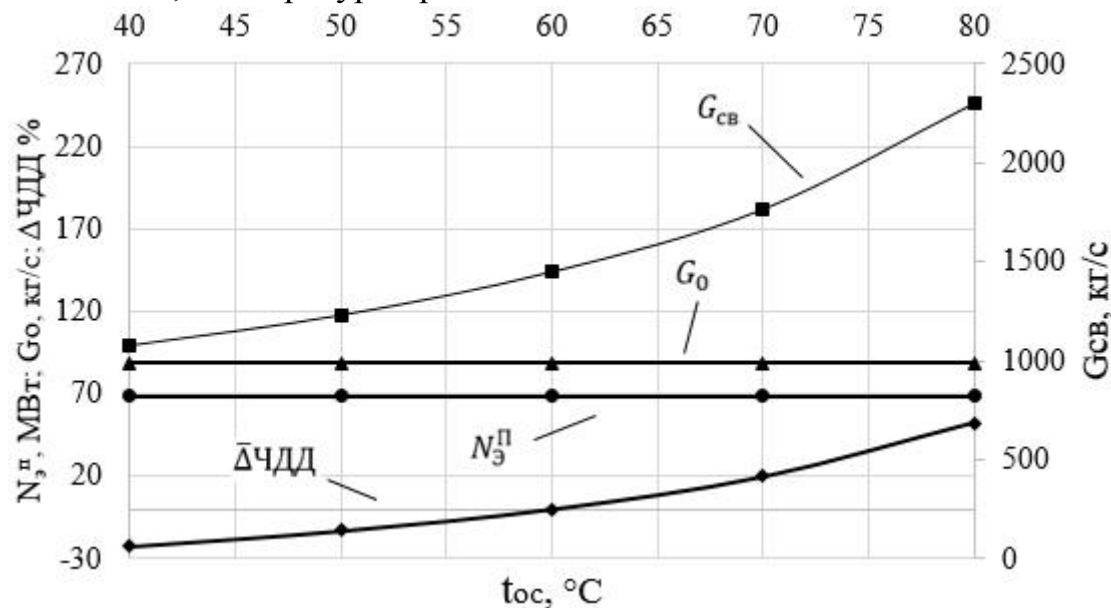


Рис.2 – График зависимости показателей ПГУ-П от температуры обратной сетевой воды

2.3 Влияние начальных параметров пара на эффективность ПГУ-П

Результаты расчетов при различных значениях начальных параметров пара, представлены на рис.3. Значение температуры прямой сетевой воды составило 110 °С, температура обратной сетевой воды имеет значение 60 °С.

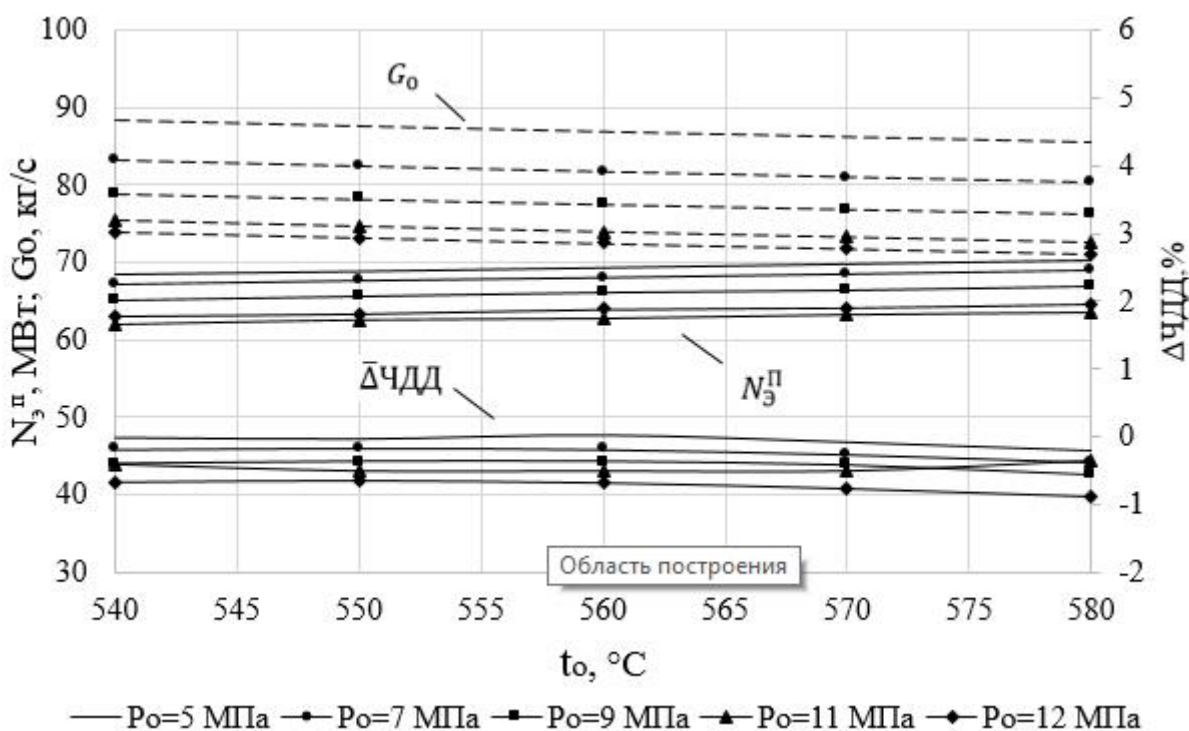


Рис.3 – График зависимости показателей ПГУ-П от начальной температуры пара при различных начальных давлениях

Выводы

1. Значения КПД ПГУ-П и КПД котла-утилизатора не зависят от температуры прямой сетевой воды, поскольку не меняется полезная мощность КУ ввиду постоянства значений температуры газов на входе и выходе из котла-утилизатора. С уменьшением температуры прямой сети эффективность инвестиций в проект растет, что наглядно показывает изменение прироста чистого дисконтированного дохода $\Delta\text{ЧДД}$. По этому критерию эффективность установки тем выше, чем ниже температура прямой сетевой воды (чем ниже противодействие).
2. При повышении температуры обратной сетевой воды от $40\text{ }^\circ\text{C}$ до $80\text{ }^\circ\text{C}$ происходит уменьшение КПД КУ на 7%, что сокращает количество отпускаемого тепла на 8,5% и понижает КПД ПГУ на 4,3%. Также с ростом температуры происходит изменение чистого дисконтированного дохода $\Delta\text{ЧДД}$ на 74,8%.
3. Рост начальной температуры в рассматриваемом диапазоне (на 7,4 %) в зависимости от начального давления приводит к снижению расхода свежего пара. Электрическая мощность, независимо от уровня начального давления, с ростом начальной температуры увеличивается незначительно. Прирост мощности составляет 1,6 – 1,9 МВт. При этом $\Delta\text{ЧДД}$ относительно базового варианта во всех случаях имеет несущественное отрицательное значение, а его величина практически не меняется с ростом начальной температуры пара.
4. При повышении начального давления пара уменьшается теплота, воспринятая каждой поверхностью нагрева котла-утилизатора, кроме ГСП. Вследствие этого уменьшается расход пара на турбину и проис-

ходит снижение электрической мощности. Суммарные капитальные вложения с ростом давления практически не меняются: при увеличении давления в рассмотренном диапазоне - уменьшаются на 0,75 % – 0,73%. Прирост ЧДД не наблюдается.

5. Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что технико-экономическая эффективность ПГУ-П в наибольшей степени определяется температурным графиком теплосети – температурами прямой и обратной сетевой воды. Изменение начальных параметров пара оказывает незначительное влияние на показатели ПГУ-П.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Антонова А.М., Уваров А.А. Анализ тепловой эффективности ПГУ с противодавлением методом малых отклонений. - Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2016.
2. Паровые и газовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013. - 648 с.
3. Девянин А.В. Оптимизация параметров тепловых схем трехконтурных парогазовых установок Москва. 2009 г. - 20 с. Автореферат дисс. на соискание уч.степени канд.техн.наук.

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент кафедры АТЭС ТПУ.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПГУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ МАЛЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

А.М. Антонова, А.А. Уваров
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Парогазовые установки (ПГУ), позволяющие значительно повысить эффективность и экологическую безопасность тепловой энергетики, в последние годы активно реализуются в мировой энергетике. Наиболее эффективны бинарные ПГУ утилизационного типа на базе современных высокотемпературных газотурбинных установок (ГТУ) [1]. Такие ПГУ значительно превосходят традиционные паротурбинные энергоблоки по термодинамической эффективности и экологическим показателям. Стремление еще более повысить эффективность ПГУ приводит к необходимости рассмотрения установок на когенерационном парогазовом цикле с применением противодавленческой паровой турбины (ПГУ-П) [2]. Они и являются объектом данного исследования.

В ПГУ-П утилизация теплоты отработавших газов ГТУ в котле-утилизаторе (КУ) происходит на двух участках теплофикационного цикла: при получении перегретого пара и при нагреве обратной сетевой воды в хвостовых

поверхностях КУ. Теплота отработавшего пара утилизируется при передаче ее потребителю технологического пара или сетевой воде, подаваемой в прямую сеть.

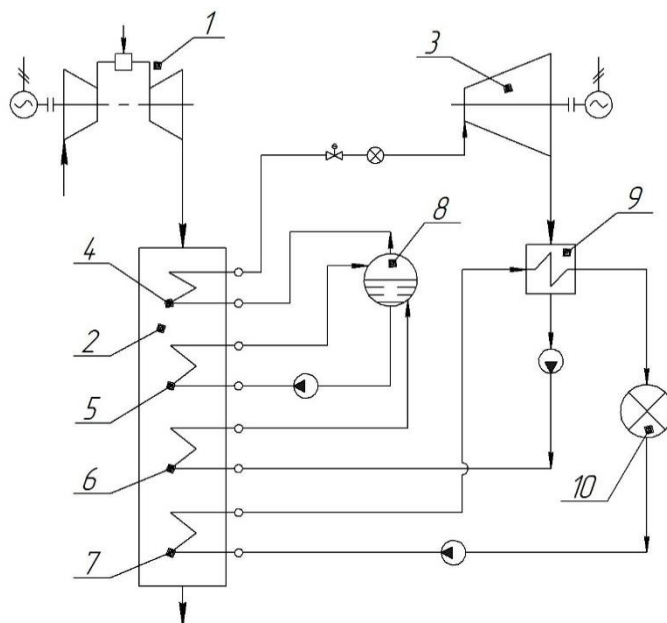


Рис. 1. Схема ПГУ с противодавленческой паровой турбиной: 1 – ГТУ; 2 – КУ; 3 – паровая турбина; 4 – пароперегреватель; 5 – испаритель; 6 – экономайзер; 7 – ГСП; 8 – барабан; 9 – СП; 10 – тепловой потребитель.

Схема ПГУ-П очень проста, поскольку отсутствует необходимость использования нескольких уровней давления пара и промежуточного перегрева пара. На рис. 1 показана схема ПГУ-П с сетевым подогревателем (СП), снабжающей теплотой потребителей отопления и горячего водоснабжения.

Повышение эффективности КУ и установки в целом достигается глубокой утилизацией теплоты за счет снижения температуры уходящих газов при передаче теплоты обратной сетевой воде в газовой сетевом подогревателе (ГСП). Температурный график теплосети является определяющим для характеристик паровой части ПГУ-П, поскольку температура прямой сетевой воды определяет давление отработавшего пара на выхлопе паровой турбины.

Тепловую эффективность ПГУ можно оценить с помощью так называемого полного коэффициента полезного действия ПГУ, показывающего долю теплоты топлива, полезно использованной в установке.

Полезно использованная теплота складывается из электрической мощности ПГУ $N_{э}$ и тепловой мощности, переданной тепловым потребителям $Q_{тп}$.

Полный коэффициент полезного действия ПГУ $\eta_{пгу} = \frac{N_{э} + Q_{тп}}{Q_{кв}}$, здесь $Q_{кв}$ – теплота, подводимая от топлива к рабочему телу в камере сгорания ГТУ.

В свою очередь, электрическая мощность ПГУ является суммой двух слагаемых $N_{э} = N_{э}^I + N_{э}^II$, где $N_{э}^I$, $N_{э}^II$ – электрические мощности газовой и паровой ступеней ПГУ.

Преобразуем формулу полного коэффициента полезного действия ПГУ

$$\eta_{ПГУ} = \frac{N_{\text{Э}} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma} + N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma}}{Q_{\text{КС}}} + \frac{N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} \quad (1)$$

Первое слагаемое в этой формуле – КПД газотурбинной установки

$$\eta_{ГТУ} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma}}{Q_{\text{КС}}}$$

Из энергетического баланса ПГУ следует: $Q_{\text{КС}} = N_{\text{Э}}^{\Gamma} + Q_{\text{КВ}}^{\Pi} + \Delta Q_{\text{yx}}$, (2)

здесь ΔQ_{yx} – потеря теплоты с уходящими из котла-утилизатора газами;

$Q_{\text{КВ}}^{\Pi}$ – полезная мощность котла-утилизатора. Выразим $Q_{\text{КВ}}^{\Pi}$ из (2):

$$Q_{\text{КВ}}^{\Pi} = Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma} - \Delta Q_{\text{yx}} \quad (3)$$

Потерю теплоты с уходящими газами ΔQ_{yx} определим, используя выражение для КПД котла-утилизатора:

$$\eta_{\text{КУ}} = \frac{Q_{\text{КУ}}^{\Pi}}{Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}} = \frac{Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma} - \Delta Q_{\text{yx}}}{Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}}, \quad (4)$$

здесь знаменатель является теплотой отработавших газов ГТУ, с которой они поступают в КУ. Отсюда $\Delta Q_{\text{yx}} = (1 - \eta_{\text{КУ}})(Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma})$.

Подставляя это выражение в (3), получим, что полезная мощность котла-утилизатора равна:

$$Q_{\text{КВ}}^{\Pi} = Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma} - (1 - \eta_{\text{КУ}})(Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}) = (Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}) \cdot \eta_{\text{КУ}} \quad (5)$$

С другой стороны, полезная мощность котла-утилизатора расходуется на две составляющих – электрическую мощность паровой части ПГУ $N_{\text{Э}}^{\Pi}$ и тепловую мощность, отпускаемую тепловому потребителю $Q_{\text{ТП}}$:

$$Q_{\text{КВ}}^{\Pi} = N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}} \quad (6)$$

Приравнивая правые части выражений (5) и (6), получим

$$N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}} = (Q_{\text{КС}} - N_{\text{Э}}^{\Gamma}) \eta_{\text{КУ}} \quad (7)$$

Отсюда, подставляя $N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}$ из (7) в (1), получим:

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \frac{N_{\text{Э}}^{\Gamma}}{Q_{\text{КС}}} + \frac{N_{\text{Э}}^{\Pi} + Q_{\text{ТП}}}{Q_{\text{КС}}} = \eta_{\text{ГТУ}} + \frac{Q_{\text{КС}}(1 - \eta_{\text{ГТУ}})\eta_{\text{КУ}}}{Q_{\text{КС}}} = \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \eta_{\text{ГТУ}}) \cdot \eta_{\text{КУ}}$$

Таким образом, полный коэффициент полезного действия ПГУ-П:

$$\eta_{\text{ПГУ}} = \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \eta_{\text{ГТУ}}) \cdot \eta_{\text{КУ}} \quad (8)$$

В этой формуле отсутствует КПД паротурбинной установки или какой-либо другой фактор, характеризующий ее экономичность. Отсюда следует вывод, что эффективность парогазовой установки с противогазотурбиной не зависит от экономичности ПТУ. Объясняется это тем, что ПТУ работает без потерь в цикле: теплота конденсации отработавшего водяного пара полностью используется для покрытия нагрузки тепловых потребителей.

Метод малых отклонений [3] позволяет получить решение в общем и численном виде, используя результаты расчета некоторого базового варианта.

Метод основан на линеаризации уравнений – математическом приеме, включающем дифференцирование уравнений и последующую замену значений величин их относительными изменениями. В итоге исходное аналитическое уравнение заменяется на уравнение в малых отклонениях входящих в него аргументов. Полученная явная аналитическая зависимость связывает изменения исходных переменных и изменения функции, что дает возможность провести анализ изменения функции с помощью коэффициентов влияния переменных величин. Это особенно необходимо при большом числе аргументов и нелинейных связях между ними и функцией.

Следуя положениям метода малых отклонений, продифференцируем выражение полного КПД ПГУ-П (8):

$$d\eta_{ПГУ} = \frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{ГТУ}} d\eta_{ГТУ} + \frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{КВ}} d\eta_{КВ} \quad (9)$$

Здесь частные производные: $\frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{ГТУ}} = 1 - \eta_{КВ}$; $\frac{\partial \eta_{ПГУ}}{\partial \eta_{КВ}} = 1 - \eta_{ГТУ}$.

Подставляя частные производные в (7), имеем:

$$d\eta_{ПГУ} = (1 - \eta_{КВ}) d\eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) d\eta_{КВ}$$

Перейдем к конечным приращениям и затем к относительным отклонениям:

$$\Delta \eta_{ПГУ} = (1 - \eta_{КВ}) \Delta \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ}) \Delta \eta_{КВ}$$

$$\frac{\Delta \eta_{ПГУ}}{\eta_{ПГУ}} = \frac{1}{\eta_{ПГУ}} \left[(1 - \eta_{КВ}) \eta_{ГТУ} \frac{\Delta \eta_{ГТУ}}{\eta_{ГТУ}} + (1 - \eta_{ГТУ}) \eta_{КВ} \frac{\Delta \eta_{КВ}}{\eta_{КВ}} \right]$$

Переходя к обозначениям коэффициентов при переменных, получим:

$$\delta \eta_{ПГУ} = K_1 \delta \eta_{ГТУ} + K_2 \delta \eta_{КВ} \quad (10)$$

Здесь коэффициенты влияния K_1 и K_2 определяются через величины «базового» варианта, имеющие в формулах индекс «0»:

$$K_1 = \frac{(1 - \eta_{КВ0}) \eta_{ГТУ0}}{\eta_{ПГУ0}}; \quad K_2 = \frac{(1 - \eta_{ГТУ0}) \eta_{КВ0}}{\eta_{ПГУ0}}$$

Для значений переменных в базовом варианте ПГУ-П [4]:

$$\eta_{ГТУ0} = 0,3537; \quad \eta_{ПГУ0} = 0,8847; \quad \eta_{КВ0} = 0,8281,$$

значения коэффициентов влияния составляют: $K_1 = 0,0687$, $K_2 = 0,6050$.

С учетом полученных значений получаем зависимость КПД рассматриваемой парогазовой установки ПГУ-П от влияющих факторов в форме уравнения в малых отклонениях:

$$\delta \eta_{ПГУ} = 0,0687 \cdot \delta \eta_{ГТУ} + 0,6050 \cdot \delta \eta_{КВ} \quad (11)$$

Анализ уравнения показывает, что эффективность использования теплоты отработавших в ГТУ газов в котле-утилизаторе оказывает на коэффициент использования теплоты топлива на порядок большее влияние, чем КПД ГТУ значение $\eta_{КВ}$, т.е. при изменении $\eta_{КВ}$ на 1 % КПД ПГУ изменяется на 0,6050 %. Увеличение КПД ГТУ на 1 % ведет к росту КПД ПГУ на 0,0687 %. Определя-

ющее значение имеет температура уходящих газов на выходе из КУ, которая

Тепловая эффективность ПГУ-П

Анализ эффективности ПГУ-П методом малых отклонений

Выводы

в ПГУ-П однозначно зависит от температуры обратной сетевой воды.

Простая схема установки ввиду одноконтурности и отсутствия промежуточного перегрева пара обеспечивает повышенную надежность ПГУ-П.

Экономичность паротурбинной установки не влияет на тепловую эффективность ПГУ-П, поскольку ПГУ работает без потерь в цикле.

Наибольшее влияние на тепловую эффективность ПГУ-П оказывает полнота использования теплоты отработавших в ГТУ газов в КУ, т.е. выбор температурного графика теплосети определяет КПД КУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ольховский Г.Г. Перспективные газотурбинные и парогазовые установки для энергетики (обзор) // Теплоэнергетика. - 2013. - № 2.- С. 3-12.
2. Гуцин, А.В. Парогазовая ТЭЦ Siemens для города Гетеборг (Швеция) // Турбины и дизели (сентябрь - октябрь) 2007. - С. 16-21.
3. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. - М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
4. Уваров А.А., Антонова А.М. Технико-экономическая эффективность ПГУ с противодавлением. - Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2016.

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ОСАДКОВ В АТМОСФЕРЕ

Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, С.А. Шваб
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Одним из факторов негативного воздействия тепловых электрических станций (ТЭС) на окружающую среду является возможное образование кислотных осадков в районах, непосредственно прилегающих к ТЭС [1]. При сжигании топлив в окружающую среду поступают различные загрязняющие вещества [1].

В работе рассматриваются процессы конденсации серного ангидрида SO_3 и водяного пара H_2O . Серный ангидрид образуется в газоходах котлов тепловых электрических станций (ТЭС) путем частичного окисления SO_2 (до 5% от общей доли SO_2) при сжигании высокосернистых топлив, и относится к классу

умеренно опасных продуктов [1]. При взаимодействии серного ангидрида с водяным паром, который относится к парниковым газам, в определенных условиях образуется серная кислота.

В реальной практике в атмосфере всегда содержатся пары воды природного происхождения [2]. Кроме того, в прилегающих к ТЭС районах возможно существенное повышение концентрации водяных паров в воздухе за счет выбросов H_2O , обусловленных работой теплотехнического оборудования станции [1, 3]. Представляет интерес анализ процессов образования капель серной кислоты в воздухе при совместно протекающих процессах конденсации паров SO_3 и H_2O на поверхности ядер конденсации.

Целью настоящей работы является численный анализ влияния влажности воздуха на процесс формирования капель серной кислоты в атмосфере Земли, прилегающей к ТЭС. Проведено исследование процесса совместной конденсации серного ангидрида и водяного пара в летний период года (температура воздуха равна 294 К) при скорости ветра до 5 м/с. Рассматривались три категории ядер конденсации, на поверхности которых образуется капля, способная достигнуть поверхности Земли в процессе седиментации.

В соответствии с [1] принято, что образование капель серной кислоты происходит в результате конденсации SO_3 и водяного пара на поверхности «ядер конденсации» – микроскопических капель воды. Скорость этого термодинамического процесса существенно зависит от температуры [4]. Соответственно достоверность результатов моделирования процесса конденсации определяется точностью задания температурных полей на поверхности конденсации.

Механизм образования серной кислоты [1] основан на взаимодействии, при котором серный ангидрид SO_3 поглощается водяным паром.



Процесс переноса энергии, количества движения и массы в рассматриваемых условиях описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных [5]. Считается, что температура и концентрация на левой границы области решения задачи (дымовая труба ТЭС) не зависят от времени. Для моделирования изменения основных искомым функций использованы нестационарные двумерные уравнения смешанной конвекции в приближении Буссинеска [6].

Расчет скорости конденсации проводился с использованием формулы [4]:

$$W_i K = \beta \cdot \frac{P_A - P_{0_i} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{R \cdot T}\right)}{\sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}{M}}}$$

где P_A – атмосферное давление, Па; P_{0_i} – предэкспонента, Па; E_i – энергия активации процесса конденсации, Дж/кг; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); M – молярная масса, кг/моль; β – коэффициент конденсации.

Для решения задачи использовался алгоритм [7], разработанный для решения задач сопряженного теплопереноса в областях с локальным источником энергии. Оценка достоверности полученных результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы аналогично [8].

Значение коэффициента конденсации водяного пара варьировалось в диапазоне от 0,05 до 0,4. Ниже приведены результаты численного моделирования роста капель серной кислоты в процессе конденсации серного ангидрида и водяного пара, рассчитанные при скорости ветра 5 м/с в летний период года.

На рисунке 1 представлено изменение размера капли серной кислоты в зависимости от времени при различных начальных размерах ядер конденсации.

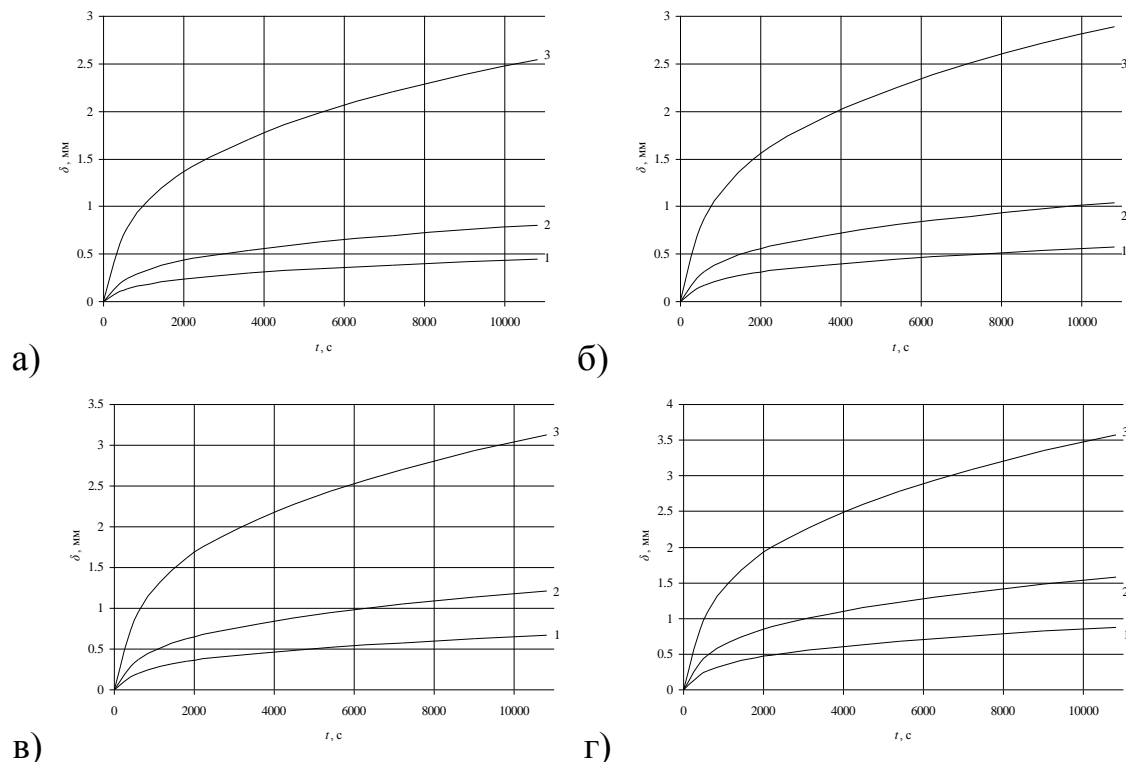


Рис. 1. Изменение размера капли серной кислоты: а) $\beta=0,05$; б) $\beta=0,1$; в) $\beta=0,2$; г) $\beta=0,4$

1 – $\delta_0=0,8 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – $\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м;

Результаты (рисунок 1) численных исследований показывают, что при коэффициенте конденсации 0,05 возможно формирование седиментационных кислотных осадков уже через 1800 с с момента начала процесса на поверхности ядер конденсации $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м. Дальнейшее протекание процесса одновременной конденсации серного ангидрида и водяного пара способствует образованию капли серной кислоты размером до $2,5 \cdot 10^{-3}$ м за рассматриваемый временной интервал.

Установлено, что в диапазоне изменения коэффициента конденсации от 0,1 до 0,2 формирование кислотных осадков происходит на поверхности ядер конденсации начальным размером $\delta_0=1,0 \cdot 10^{-6}$ м за время 9000 с и 7200 с соответственно. При этом за рассмотренный промежуток времени возможно формирование капли серной кислоты в воздушном пространстве, прилегающем к ТЭС, размером от $1,0 \cdot 10^{-3}$ м до $1,2 \cdot 10^{-3}$ м. Численная оценка роста границы частицы на поверхности ядер конденсации размером $\delta_0=5,0 \cdot 10^{-6}$ м иллюстрирует

возможность образования седиментационных капель серной кислоты за время 1800 с и 600 с с момента начала процесса одновременного ввода серного ангидрида и водяного пара на поверхность «зародыша».

Наиболее интенсивно, как показали исследования, формирование капли серной кислоты в атмосфере Земли происходит на поверхности ядер конденсации с начальными размерами от $1,0 \cdot 10^{-6}$ м до $5,0 \cdot 10^{-6}$ м при параметре конденсации $\beta=0,4$.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 гг.» (уникальный код (ID): PNIER RFMEFI58114X0001). Мероприятие 1.4. ГК 14.581.21.0001.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Израэль Ю.А. Кислотные дожди. / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман [и др.] – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 270 с.
2. D.Gvozdyakov. The influence of the form of condensation nucleus on the formation and propagation of acid precipitation near operating TPS [Text] / D.Gvozdyakov, V.Gubin // EPG Web of Conference. – 82, 01026 (2015).
3. Внуков А.К. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов: справочник [Текст] / А.К. Внуков – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 176 с.
4. Лабунцов А.Д. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике [Текст] / А.Д. Лабунцов – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 388 с.
5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч – М.: Мир, 1980. – 616 с.
6. Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена [Текст] / В.М. Пасконов, В.И. Полежаев, Л.А. Чудов – М.: Наука, 1984.–288 с.
7. Кузнецов Г.В. Сопряженный теплоперенос в замкнутой области с локально сосредоточенным источником тепловыделения [Текст] / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79. – №1. – С 56–63.
8. Kuznetsov G.V. The influence of heat transfer conditions at the hot particle-liquid fuel interface on the ignition characteristics [Text] / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – Т. 18. – №2. – С. 162–167.

ОБРАТНАЯ СТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КУБОИДА

К.Н. Яценко, К.В. Слюсарский, Ю.Я. Раков
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

Введение

Теплопроводность вещества является распространенным явлением и существенно влияет на различные аспекты технологических процессов: от расчетов надежности до определения тепловых потоков [1]. Значение коэффициента теплопроводности определяет поведение вещества при теплопроводности и критически важно для его корректного описания [2]. Существующие экспериментальные процедуры для его определения обычно зависят от коэффициента теплопроводности, который сложно измерить прямыми методами. Это приводит к существенной погрешности в определяемом значении коэффициента теплопроводности [3]. Для устранения влияния данного явления на точность измерений, они реализуются в вакууме.

Для определения эксплуатационных параметров процедуры измерения веществ с значением коэффициента теплопроводности в диапазоне 0,04-5 Вт/(м К) была сформулирована и исследована модель теплопереноса.

Физическая модель теплопереноса

Объектом испытаний являлся куб с тремя измерениями LX , LY и LZ . Он нагревается тепловым потоком с одной стороны (с верхней грани), а отводится тепло в окружающую среду при помощи радиации. Температура окружающей среды постоянна и равна T_{oc} .

При моделировании интегральная степень черноты ε и коэффициент абсорбции поверхности образца A считались постоянными, а также коэффициент теплопроводности не зависящим от температуры λ [4].

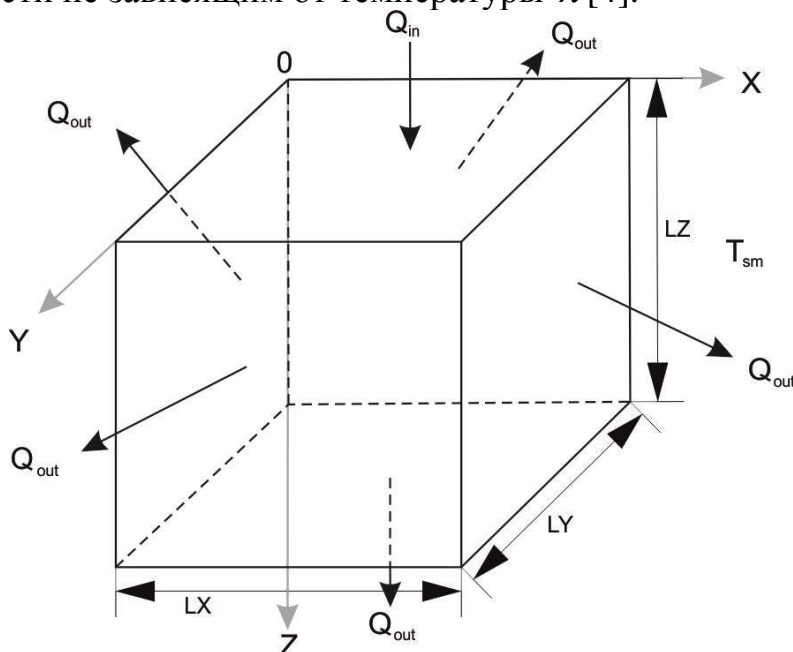


Рис. 1. Схема распределения тепловых потоков в образце.

Математическая модель и методы решения

Постановка математической модели обратной задачи теплопроводности в безразмерном виде для кубоида включает в себя уравнение теплопроводности (1), нелинейные граничные условия (2 – 7) и критерий оптимизации (8):

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{z}^2} = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{z}} \right)_{\tilde{z}=0} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}_{\tilde{z}=0}^4 - \tilde{T}_{oc}^4) - 1 \quad (2)$$

$$-\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{z}} \right)_{\tilde{z}=1} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}_{\tilde{z}=1}^4 - \tilde{T}_{oc}^4) \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} \right)_{\pi_2=0} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}_{\tilde{x}=0}^4 - \tilde{T}_{oc}^4) \quad (4)$$

$$-\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} \right)_{\pi_2} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}_{\pi_2}^4 - \tilde{T}_{oc}^4) \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} \right)_{\pi_3=0} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}_{\tilde{y}=0}^4 - \tilde{T}_{oc}^4) \quad (6)$$

$$-\left(\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} \right)_{\pi_3} = \pi_1 \cdot (\tilde{T}_{\pi_3}^4 - \tilde{T}_{oc}^4) \quad (7)$$

$$\left| \pi_4 - \int_F [\tilde{T}_{\tilde{z}=1}^4 - \tilde{T}_{oc}^4] \partial F \right| \rightarrow \min \quad (8)$$

Здесь $\pi_1 = \frac{\varepsilon \sigma \cdot LZ^4 \cdot q_F^3 A^3}{\lambda^4}$, $\pi_2 = \frac{LX}{LZ}$, $\pi_3 = \frac{LY}{LZ}$, $\pi_4 = \frac{Q_{LZ} \lambda^4}{\varepsilon \sigma q_F^4 A^4 \cdot LZ^6}$;

$$\tilde{T} = T / \left(\frac{q_F A \cdot LZ}{\lambda} \right), \quad \tilde{T}_{oc} = T_{oc} / \left(\frac{q_F A \cdot LZ}{\lambda} \right), \quad \tilde{F} = \frac{F}{LZ^2}, \quad \tilde{x} = \frac{X}{LZ}, \quad \tilde{y} = \frac{Y}{LZ}, \quad \tilde{z} = \frac{Z}{LZ}; \quad Q_{LZ}$$

– интегральный тепловой поток с нижней поверхности образца.

Из постановки математической модели обратной задачи теплопроводности следует, что решение получается путем решения прямой проблемы теплопроводности с различными значениями коэффициента теплопроводности. Итерационная процедура прекращается при достижении минимума искомой функции (уравнение 8).

Численные методы используются для решения нелинейной задачи и получения набора значений коэффициента теплопроводности. Для решения использовался метод конечных разностей.

Конечно-разностные аналоги дифференциальных уравнений решались методами простой итерации и последовательной релаксации (ускоренным методом Лейбманна).

Метод дихотомии использовался для определения коэффициента теплопроводности в обратной задаче [5].

Результаты и обсуждение

Рисунок 2 – 5 иллюстрирует зависимость между безразмерными параметрами $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4$ для определения геометрических размеров образца и физических свойств эксперимента. Коэффициент теплопроводности необходимо определять в определенном диапазоне данных параметров.

Значение π_1 должно находиться в диапазоне значений 0,001 – 0,01 при относительном размере образца $\pi_2 = \pi_3$ в диапазоне значений от 1 до 10. В таком случае, значение градиента температур в образце не превысит 100 К и применение математической модели (1 – 8) становится возможным.

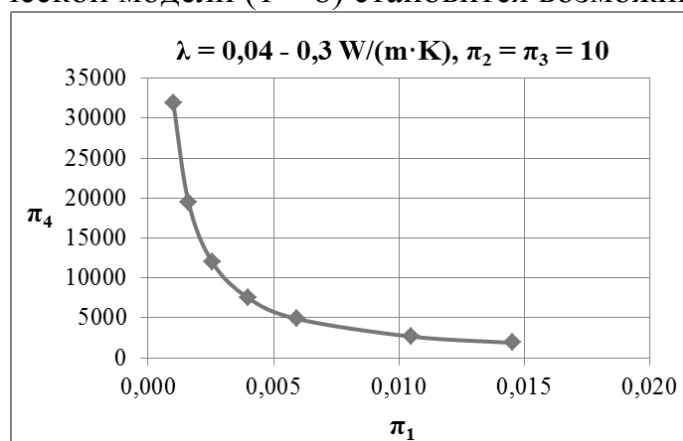


Рис. 2. Зависимость между π_4 и π_1 .

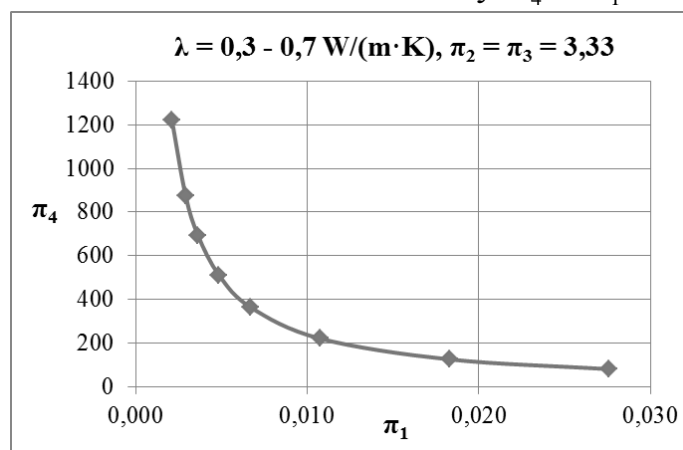


Рис. 3. Зависимость между π_4 и π_1 .

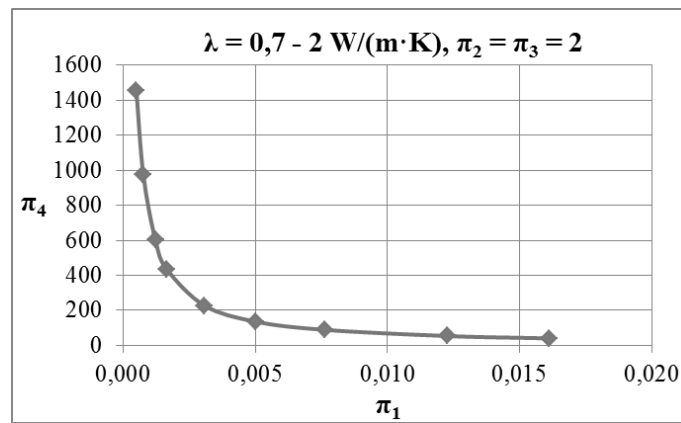


Рис. 4. Зависимость между π_4 и π_1 .

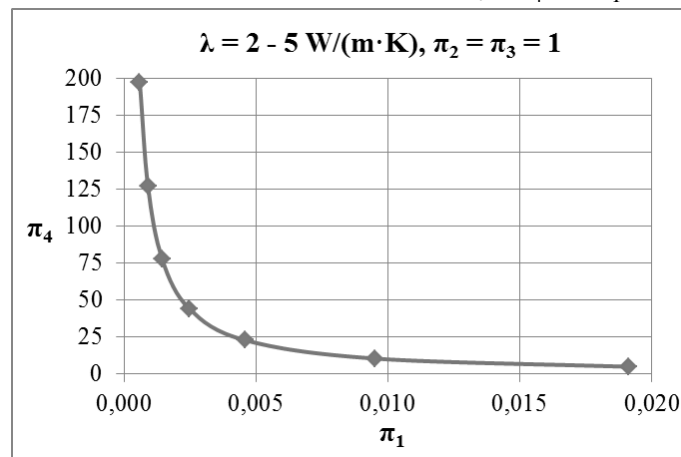


Рис. 5. Зависимость между π_4 и π_1 .

Заключение

Физико-математическая модель для определения коэффициента теплопроводности была сформулирована для образца кубической формы. Оптимальные параметры размера образца и теплового потока были определены в диапазоне значений λ 0,04-5 Вт/(м К).

ЛИТЕРАТУРА:

1. K.V. Slyusarskiy, M.K. Bejsekov, J.V. Marysheva, Y.J. Rakov, MATEC Web Conf **37** 01053 (2015)
2. T.E. Shoup, *Applied numerical methods for microcomputers* (Moscow: Higher School, 1984)
3. E.P. Mikhalev, Yu. Ya. Rakov, 9 Int Sci Pract Conf Stud Post-Grad Young Sci **1** 56-58 (2003)
4. A.S. Zavorin, A.V. Kuzmin, Y.Y. Rakov, *Methods for determination the condensed matter thermal conductivity: tutorial* (Tomsk: Publishing house TPU, 2009)
5. D.D. McCracken, W.S. Dorn, *Numerical methods and Fortran programming with application in engineering and science* (Business Machines Corporation: Wiley international edition, 1965)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ НИЗКОСОРТНЫХ УГЛЕЙ МАРКИ ЗБ

А.А. Толокольников, А.С. Янковский, В.Е. Губин
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС

1. Введение

Стратегия энергетического развития России [1] предполагает широкое использование твердых топлив в производстве энергии путем прямого сжигания на тепловых электрических станциях. Основным потребителем высококачественных углей является металлургическая промышленность в силу своих технологических особенностей в ущерб другим энергетическим объектам [2-5].

Известно [2], что множество тепловых электрических станций работают на непроектном топливе, зачастую с низкими теплофизическими параметрами, что приводит к серьёзным проблемам, особенно во время пиковых нагрузок котлов [2-5].

В существующее время имеется перспективная технология использования низкосортных углей в энергетике [6], так называемое водоугольное топливо [6]. Данная технология представляет собой композиционную дисперсную систему, состоящую из твердой фазы в виде мелкодисперсного угля, жидкой среды (вода) и пластифицирующего агента [6]. Исследования по данному направлению являются актуальными в связи с тем, что отсутствует научно обоснованная методическая база, описывающая физико-химические процессы в ВУТ.

2. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проведены на буром угле марки ЗБ «Балахтинского» месторождения.

Исходные образцы угля, после первичной обработки просеивались через сито с размером ячейки 80 мкм. Далее полученный материал молотся в керамическом барабане объемом 2 литра с дистиллированной водой и мелющими телами в течение 1, 5 и 9 часов. Массовое соотношение исследуемого угля и воды отражены в таблице 1. По достижению заданного времени помола, полученную суспензию подвергали дополнительной обработке в роторном аппарате модуляции потоков (РАМП). РАМП был включен в схему приготовления ВУТ, с целью улучшения реологических свойств. После обработки определялась плотность и динамическая вязкость с помощью вискозиметра Brookfield. Проведен опыт по определению седиментационной устойчивости топлива с помощью мерных стаканов с выдержкой в 24 часа.

Процентно-массовые концентрации рассматриваемых образцов ВУТ представлены в таблице 1.

Табл. 1. Рассматриваемые составы ВУТ

Наименование образца	Массовое содержание угля, %	Массовое содержание воды, %
Уголь марки ЗБ	48	52
	45	55
	42	58

3. Результаты и их обсуждение

В результате проведенной серии экспериментов получены следующие зависимости, представленные на рисунках 1-2.

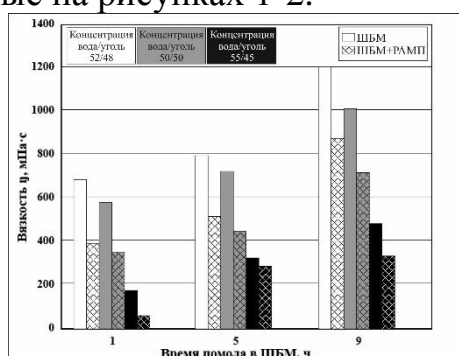


Рис. 1. Зависимость вязкости ВУТ на основе угля марки ЗБ от длительности помола и концентрационного состава при заданной скорости сдвига вискозиметра

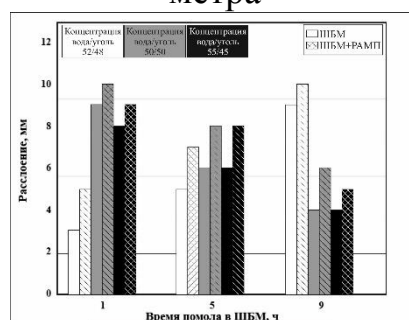


Рис. 2. Влияние времени помола на седиментационную устойчивость ВУТ для угля марки ЗБ

Анализ полученных результатов показал снижение вязкости образцов, что связано с диспергированием твердой части водоугольного топлива за счет акустического, гидродинамического и механического воздействия роторного аппарата модуляции потоков.

Седиментационная устойчивость ВУТ ухудшается в следствии того, что измельченная твердая фракция выпадает в осадок интенсивней, чем до механической обработки.

4. Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что применение роторного аппарата модуляции потоков снижает вязкость водоугольного топлива, и приводит к увеличению седиментационной устойчивости ВУТ.

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям раз-

вития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58114X0001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Б. Уголь или газ - энергетическая альтернатива XXI века (Москва, Вестник Российской академии наук, 2011).
2. Тайлашева Т., Гиль А., Воронцова Е. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», (2016).
3. Korotkikh A.G., Slyusarskiy K.V. Kinetic study of coals gasification into carbon dioxide atmosphere // MATEC Web of Conferences – 2015 – V.23 – P.01020.1-5.
4. Jankovskiy S., Luzhkovoj D., Larionov K., Matveeva A. Research of heating rates influence on layer coal gasification of Krasnogorsky and Borodinsky coal deposit // MATEC Web of Conferences – 2015 – V.37 – P.01026.1-4.
5. Zenkov A.G., Yankovsky S.A., Matveeva A.A., Lavrinenko S.V., Gromov A.A. Research of Heat Rates Effect on the Process of Fuel-Bed Gasification Of “Balakhtinskoe”, “Osinnikovskoe”, “Krasnogorskoe” and “Borodinskoe” Coal Deposits // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2016. — Vol. 72 : Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC-2016). — [01131, 4 p.]
6. Баранова М.П., Кулагин В.А. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий: монография / Сибирский федеральный университет, 2011. – 160 с.

Научный руководитель: С.А. Янковский ассистент каф.АТЭС ЭНИН ТПУ.

ОСОБЫЕ ВИДЫ БЕТОНА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Р.С. Федюк, Ю.Г. Евдокимова, И.Р. Зеленский
Дальневосточный федеральный университет

При ядерном распаде наибольшую опасность для живых организмов представляют γ -лучи и нейтронное излучение. Для защиты от них применяют особо тяжелые бетоны классов В7,5; В10; В15. Вяжущими служат портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент и др. В качестве заполнителей применяют материалы повышенной плотности – барит, лимонит, магнетит, чугунный скрап, обрезки стали, на которых можно получить бетон со средней плотностью от 2800 до 5000 кг/м³. Для улучшения защитных свойств в

их состав вводятся добавки карбида бора, хлорида лития, сульфата кадмия, содержащие легкие элементы – водород, литий, кадмий, бор.

Свойства особо тяжелых бетонов и растворов. Доминирующее влияние на свойства особо тяжелых растворов и бетонов оказывает вид и содержание вяжущего вещества и крупного заполнителя. Как правило, бетоны получают названия в зависимости от горной породы крупного заполнителя.

Базальтовые бетоны со средней плотностью 2410-2620 кг/м³ характеризуются большой однородностью плотности и химического состава. Базальты отличаются от обычных заполнителей наличием значительного количества элементов с большим атомным номером (Fe, Ca, Ti, Mn, K), которые хорошо ослабляют нейтроны [1, 2]. Бетоны на базальтовых заполнителях вследствие слабо кристаллизованной структуры являются стойкими к воздействию повышенных и высоких температур. Кроме того, температурное расширение базальтового заполнителя близко к аналогичному показателю цементного камня, что также обеспечивает высокую термическую стойкость указанных бетонов.

Лимонитовые бетоны вследствие невысокой средней плотности лимонита имеют среднюю плотность 2500-2900 кг/м³. Однако концентрация химически связанной воды в таких бетонах значительно больше (до 11% по массе). Допускаемая температура эксплуатации без потери химически связанной воды – 160°C [2]. По данным И.А. Аршинова, при нагреве до 300°C из лимонитового заполнителя удаляется до 50% химически связанной воды, при 500°C – около 70%, а при температуре более 800°C вода испаряется полностью. Повышенное содержание воды в лимонитовых бетонах способствует повышению защитных свойств по отношению к нейтронному излучению (толщина футеровки ядерных реакторов по сравнению с обычным бетоном уменьшается на 17-21%) [3].

Серпентинитовый бетон по сравнению с композитами на лимоните содержит большее количество химически связанной воды. При температуре 20°C содержание химически связанной воды в указанном бетоне составляет 10...15%, а при 400°C – 10%. При более высоких температурах (400-500°C) серпентинитовый бетон сохраняет достаточное количество воды, что предотвращает накопление в защите промежуточных нейтронов и делает защиту эффективной для нейтронов всех энергий [2]. Средняя плотность серпентинитового бетона 2300...2600 кг/м³, модуль упругости при 20°C – 18200 МПа, при 500°C – 4420 МПа. При нагреве до 650°C серпентинитовый бетон равномерно расширяется, а при дальнейшем увеличении температуры начинается быстрая усадка, вызванная перекристаллизацией кристаллов серпентинита [4].

Хромитовый бетон применяют для изготовления защитных конструкций, испытывающих в процессе эксплуатации воздействия повышенных радиационных нагрузок и температур. Хромитовый бетон на портландцементе выдерживает без существенных изменений геометрических размеров и свойств интегральный поток нейтронов $2,7 \cdot 10^{25}$ нейтрон/м² при температуре 200-350°C.

Магнетитовый бетон по свойствам аналогичен хромитовому бетону: средняя плотность 4000-4500 кг/м³, прочность при сжатии 50-70 МПа, модуль

упругости при температуре $T=20\pm 2^\circ\text{C}$ составляет $900 \cdot R_6 < E < 1200 \cdot R_6$ кг/м³, коэффициент Пуассона 0,2-0,23. [5].

Гематитовый бетон имеет аналогичные магнетитовому бетону физико-механические характеристики (средняя плотность 3800 кг/м³). Особенностью гематитовой руды является повышенная жесткость и твердость. Это создает трудности при подготовке заполнителя. Вследствие преобладания частиц гематита лещадной формы с острыми гранями необходимо увеличивать расход воды для обеспечения требуемой удобоукладываемости смеси. Тепловой коэффициент линейного расширения гематитового бетона $5,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Гематитовые бетоны вследствие сильной кристаллизованности заполнителя менее стойки к воздействию температуры, чем магнетитовые. Предельная температура эксплуатации гематитового бетона – до 800°C . При радиационной нагрузке до $7 \cdot 10^{24}$ нейтрон/м² линейное расширение бетона равно 1-2%. Такой бетон в 2 раза дешевле хромитового. Однако в гематитовых и магнетитовых бетонах вследствие высокого содержания железа при поглощении нейтронов возникает вторичное высокоэнергетичное гамма-излучение (до 7,7 МэВ), что требует увеличения толщины защиты на 18...20% по сравнению с защитой из материала с такой же плотностью, но без железа. Пиритовый бетон имеет среднюю плотность 4000 кг/м³. Напряжения, возникающие вследствие усадки и ползучести в бетоне на основе пирита, значительно меньше, чем в обычном бетоне, что объясняется высоким модулем упругости и низкой пористостью этого заполнителя. Баритовый бетон широко применяется в качестве защиты от излучений в рентгеновских лабораториях, научных, промышленных и медицинских учреждениях, заменяя дорогой и дефицитный свинец. Средняя плотность баритовых бетонов – 2700-3800 кг/м³, прочность при сжатии – 16-30 МПа; прочность при растяжении – 8-10% прочности при сжатии, коэффициент теплопередачи – 1,28-1,98 Вт/(м²·К), температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур 20-900°C – $(20-30) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [2]. Кроме того, баритовые бетоны имеют большую усадку и низкую стойкость к циклическим температурным воздействиям, что обусловлено крупнокристаллической структурой BaSO₄, а также высокими и неравномерными температурными деформациями по кристаллическим осям: $dx = 19 \cdot 10^{-6}$, $dy = 22 \cdot 10^{-6}$, $dz = 35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Это приводит к быстрому «расшатыванию» структуры заполнителя и, соответственно, бетона. Учитывая это обстоятельство, баритовые бетоны рекомендуется применять в конструкциях, которые не подвергаются воздействию температур выше 80°C и испытывают попеременное воздействие отрицательных температур. Наличие в баритовых рудах различных водорастворимых солей ограничивает применение баритовых бетонов на портландцементе в строительстве сооружений, подвергающихся воздействию грунтовых вод. Вследствие большой атомной массы элемент Ba, составляющий 59% барита, особенно хорошо ослабляет излучения низких энергий до 0,5 МэВ. Макроскопическое сечение поглощения гамма-излучения с энергией 5 МэВ для баритового бетона равно 0,101 см⁻¹. В отличие от бетонов на железорудных заполнителях в баритовых бетонах не наблюдается

возникновение высоких вторичных гамма-излучений. Достаточно высокое макроскопическое сечение выведения быстрых нейтронов бария $0,105 \text{ см}^{-1}$ обеспечивает большую эффективность баритового бетона для защиты от нейтронного потока. Для регулирования свойств баритовых бетонов применяют различные минеральные добавки, увеличивающие среднюю плотность (железная руда, сталь) и содержание химически связанной воды (лимонитовая руда).

Строительные растворы и бетоны на высокоплотном стеклозаполнителе. Радиационно-защитные растворы на основе высокоглиноземистого цемента рекомендуется использовать для проведения срочных ремонтно-восстановительных работ на объектах атомной энергетики и изготовления различных строительных деталей и изделий. Растворы имеют среднюю плотность $4000-4150 \text{ кг/м}^3$, предел прочности при сжатии (через 3 сут) – $40-54 \text{ МПа}$, предел прочности при изгибе (через 3 сут) – $5,7-7,7 \text{ МПа}$, общую пористость – $3,8-6,8\%$, водопоглощение – $1,3-2,3\%$, усадку – $0,036-0,096\%$, температурный коэффициент линейного расширения (в интервале $20-120^\circ\text{C}$) – $(7,1-7,3) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, коэффициент линейного ослабления при энергии фотонов $1,25 \text{ МэВ}$ – $0,22-0,23 \text{ см}^{-1}$, коэффициент радиационной стойкости (при поглощенной дозе $1,5 \text{ МГр}$) – $0,96$. Из особо тяжелого бетона на стеклозаполнителе рекомендуется изготавливать ограждающие конструкции хранилищ радиоактивных отходов.

Радиационно-защитные материалы на глетглицериновом цементе. Глетглицериновый цемент получают путем совмещения оксида свинца (свинцовый глет) и раствора глицерина. При оптимальном соотношении компонентов (технический глицерин – $14,6$, оксид свинца – $83,4$, вода – $2,0\%$) цементный камень имеет среднюю плотность 4570 кг/м^3 , предел прочности при сжатии – 23 МПа и водопоглощение за 24 часа – $0,96\%$. Использование высокоплотных заполнителей и дисперсно-армирующей добавки позволяет повысить среднюю плотность (до $5050-9580 \text{ кг/м}^3$) и предел прочности при сжатии (до $28-35 \text{ МПа}$) материала. Композиции на глетглицериновом цементе рекомендуется применять для изготовления штучных радиационно-защитных строительных изделий.

Бетоны на металлических заполнителях. Такие бетоны изготавливают на искусственных заполнителях – специально приготовленных металлических обрезках, шариках, роликах, цилиндрах и других. Так, для изготовления биологической защиты и ограждающих конструкций АЭС предлагается использовать особо тяжелый бетон на основе алюминатного цемента и свинца. Средняя плотность такого бетона – 8500 кг/м^3 , предел прочности при сжатии – 30 МПа , при растяжении – 6 МПа . В качестве добавок в такой бетон рекомендуются лимонит, серпентин, турмалин и другие [2]. Бетоны на чугунном ломе, свинцовой дробе, металлическом скрапе в виде обрезков, отходов от штамповки металла, на отходах от производства феррофосфора, феррокремния со средней плотностью $3600-6800 \text{ кг/м}^3$ имеют несколько худшие механические свойства, чем обычные бетоны: модуль упругости $(1-2,3) \cdot 10^4 \text{ МПа}$, прочность – $6-11,5 \text{ МПа}$, усадка через 6 мес. – $0,45 \text{ мм/м}$, полная усадка – $0,75 \text{ мм/м}$, температурный коэффициент линейного расширения – $5,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Это объясняется сложностью обеспечения однородности распределения компонентов по объему бетона.

Кроме того, трудно осуществить качественный контакт заполнителя с цементным камнем. Недостатком особо тяжелых бетонов на железном ломе является также активация железных включений под действием нейтронного потока и выделение жестких вторичных излучений

ЛИТЕРАТУРА:

1. Королев, Е.В. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы / Е.В. Королев, А.П. Прошин, Ю.М. Баженов, Ю.А. Соколова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Палеотип, 2006. – 272 с.
2. Дубровский В.Б., Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений. – М.: Стройиздат, 1983. – 240 с.
3. Десов А.Е. Структура, прочность и деформации бетонов. – М.: НИИЖБ, 1966. – 364 с.
4. Раманкулов М.Р., Байтасов У.Б., Сейтказиев А.С. Изучение зависимости проникающей способности γ -излучения от толщины проб и концентрации ВаО в цементе. – М.: Атомиздат, 1975. – 154 с.
5. Комаровский А.Н. Строительные материалы для защиты от излучений ядерных реакторов и ускорителей. – М.: Атомиздат, 1958. – 116 с.

Научный руководитель: А.В. Мочалов, начальник учебной части – заместитель начальника Учебного военного центра ДВФУ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕАЭРАТОРОВ ТЭС

А.Н. Долгова, И.З. Шайхутдинов, И.И. Гайнуллин, Р.В. Зиатдинов, Б.А. Аминов
Казанский государственный энергетический университет

Деаэраторы и декарбонизаторы предотвращают коррозию труб, радиаторов и котельного оборудования. Они являются незаменимой деталью в промышленных и бытовых системах водоподготовки. Различают деаэраторы сопловые, насадочные, пленочные, струйные и барботажные. Модернизация деаэраторов с целью повышения эффективности процесса удаления растворенных газов является актуальной задачей в водоподготовке.

По принципу действия деаэрация бывает термическая, десорбционная или химическая, вакуумная и др. Из них наиболее распространена термическая деаэрация, характеризующаяся как преимуществами - возможностью работы при пониженных параметрах теплоносителей, что существенно повышает энергетическую эффективность теплоснабжения, так и недостатками – повышенными энергозатратами.

Большой проблемой теплоэнергетики является неудовлетворительная работа деаэрационных установок для термической деаэрации питательной воды. Практика показывает, что срок службы тепловых сетей, питаемых водой с большой концентрацией агрессивных газов, значительно сокращается. Извест-

ны случаи, когда трубы тепловых сетей приходилось менять через полтора–два года работы из-за интенсивной внутренней коррозии вплоть до образования многочисленных сквозных свищей. Выход из строя тепловой сети связан с большими затратами. Особенно ухудшается ситуация с коррозией в сетях, питаемых химоочищенной водой, т.е. в ситуациях, когда внутренняя поверхность труб не защищена тонким слоем накипи.

Проблема энергосбережения – одна из наиболее актуальных. Одним из методов снижения энергозатрат при процессе термической деаэрации может быть разработка и исследование новых конструкций деаэраторов. В последние годы в практике отечественных и зарубежных предприятий сложилась устойчивая тенденция к замене устаревших контактных элементов (барботажных тарелок, насадок и т.п.) преимущественно в вакуумных и атмосферных колоннах на модернизированные или вновь разработанные виды насадок, обладающих более широким интервалом устойчивой работы и большей эффективностью. К достоинствам насадочных колонн можно отнести высокую эффективность и широкий интервал устойчивой работы, сравнительно невысокую стоимость и простоту конструкций, небольшое гидравлическое сопротивление, что особенно важно для работы вакуумных колонн [1].

Широко используемые в деаэраторах ТЭС кольца Рашига, представляют собой цилиндры с высотой, равной наружному диаметру, изготавливаемые путем нарезки из труб или гибки из металлической ленты. Преимуществами этого типа насадки являются простота изготовления и низкая стоимость. Недостатками – низкие гидродинамические и массообменные характеристики, экранирование элементов в слое, малая доступность внутренней поверхности кольца для омывания потоками, значительное перераспределение жидкости к стенкам аппарата по мере перемещения ее в слое насадки вне зависимости от характера ее начального распределения. Дальнейшее совершенствование кольцевых насадок шло по пути устранения указанных недостатков [2].

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления насадки Кольца Рашига с размерами 20x20x2 мм приведены на рис.1. Полученные экспериментальные кривые характеризуют изменение параметра Δp (гидравлического сопротивления) от скорости газа до достижения скорости захлебывания насадки при различной плотности орошения. Исследования проводились на лабораторном стенде каф. ЭЭ ФГБОУ ВО «КГЭУ» «Тепломассообменная колонна» диаметром 100 мм на модельной системе «воздух-вода».

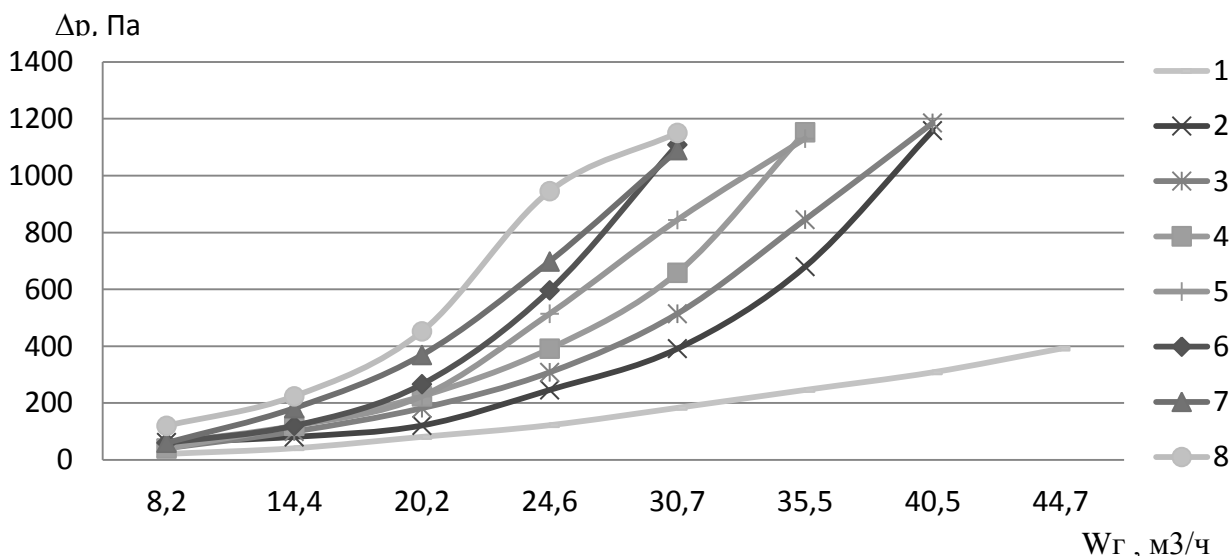


Рис. 1. Зависимость гидравлического сопротивления насадки «кольца Рашига» от скорости газа в колонне при постоянной плотности орошения: 1 – сухая насадка ($q=0$ л/ч); 2-9 – орошаемая насадка; 2 – $q=50$ л/ч; 3 – $q=85$ л/ч; 4 – $q=115$ л/ч; 5 – $q=150$ л/ч; 6 – $q=180$ л/ч; 7 – $q=210$ л/ч; 8 – $q=240$ л/ч

При создании насадок новых типов ставятся следующие цели: во-первых, увеличение эффективности массообменного процесса, во-вторых, расширение интервала устойчивой работы аппарата (как по нижнему, так и по верхнему пределам). Для достижения указанных целей насадки должны удовлетворять определенным технологическим требованиям:

- высокая эффективность (т.е. по возможности более низкое значение ВЭТТ, более высокие значения коэффициентов массопередачи и степени извлечения);
- небольшое обратное перемешивание;
- низкое гидравлическое сопротивление;
- высокая пропускная способность;
- простота монтажа в колонну.

Для выполнения этих требований насадка должна иметь, в первую очередь, по возможности высокую долю свободного объема и развитую геометрическую поверхность. Одновременно конструкция насадки должна обеспечивать наиболее полное омывание всей поверхности контактирующими потоками [2].

С учетом описанных требований, было разработано новое насадочное контактное устройство. Основами новой конструкции насадки являются известные и широко распространенные насадки – кольца Рашига и пропеллерная насадка (рис.2).



Рис. 2. Виды конструкций насадок: а – кольца Рашига; б – пропеллерная насадка [3]

Характеристика новой насадки:

- размер элемента $D - 30$ мм;
- толщина материала – 2 мм;
- количество элементов в $m^3 - 75000$ шт;
- удельная поверхность – $332 m^2/m^3$;
- свободный объём – $0,928 m^3/m^3$;
- эквивалентный диаметр – 11 мм.

Результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления новой насадки приведены на рис.3.

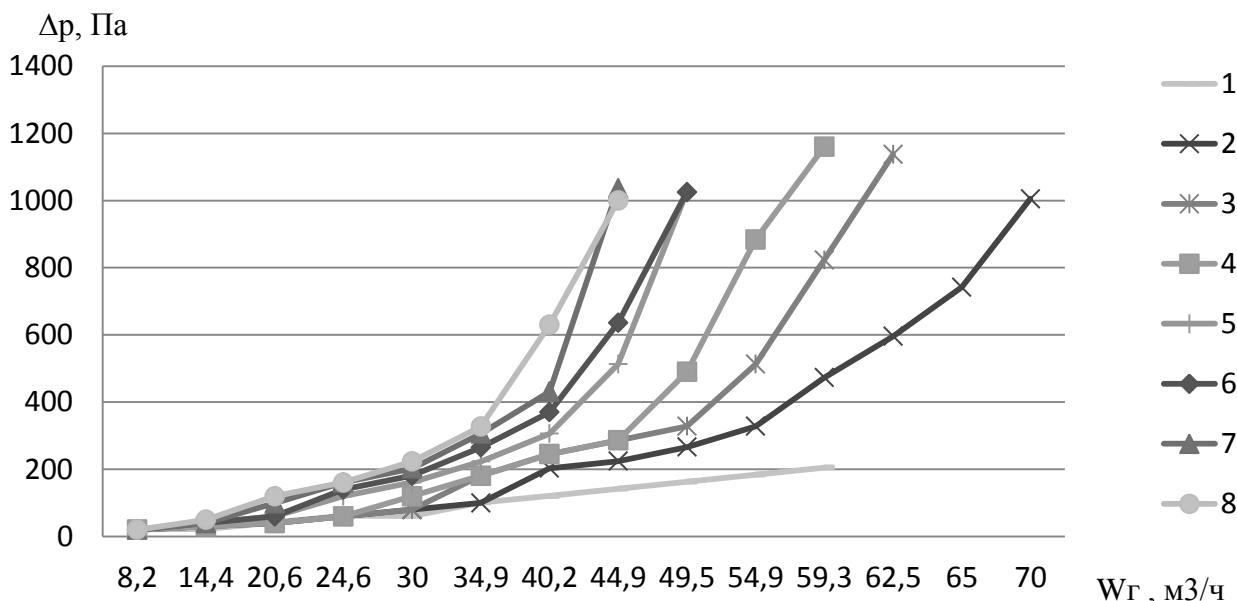


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления новой насадки от скорости газа в колонне при постоянной плотности орошения: 1 – сухая насадка ($q=0$ л/ч); 2-9 – орошаемая насадка; 2 – $q=50$ л/ч; 3 – $q=85$ л/ч; 4 – $q=115$ л/ч; 5 – $q=150$ л/ч; 6 – $q=180$ л/ч; 7 – $q=210$ л/ч; 8 – $q=240$ л/ч

По представленным экспериментальным данным видно, что диапазон устойчивой работы у новой насадки выше, в сравнении с кольцами Рашига ориентировочно на 15-30%.

Модернизация тепло- и массообменных аппаратов с использованием высокоэффективных контактных устройств является все более актуальным направлением в различных отраслях промышленности и энергетике. Исследования показали, что новая нерегулярная насадка является современной альтернативой кольцам Рашига. При равной высоте слоя она обеспечивает большую производительность, меньшее гидравлическое сопротивление.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Долгов А.Н. Повышение эффективности атмосферных термических деаэраторов тепловых электрических станций: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Казань: ФГБОУ ВПО "КГЭУ", 2012. - 105 с.

2. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. – Казань: КГЭУ, 2010. – 574 с.
3. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию – М.: Химия, 1991. – 496с.

Научный руководитель: А.Н. Долгова, к.т.н., доцент кафедры Энергообеспечение предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Казанский государственный энергетический университет»

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ЭКОЛОГО-ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ

Н.В. Седельников
Сибирский федеральный университет

Аннотация: задачей работы является разработка автоматизированного комплекса, позволяющего осуществлять визуализацию, сбор необходимой информации для формирования команд исполнительным устройствам с целью поддержания оптимальных режимов работы универсальных горелочных устройств котельных агрегатов с предварительным пиролизом топлива, что в конечном итоге будет способствовать комплексному решению проблем сжигания углей.

Расширение потребления угольного топлива в нашей стране, прежде всего, обусловлено освоением углей Канско-Ачинского бассейна. Многолетний опыт использования канско-ачинских углей (КАУ) на тепловых электростанциях показал, что традиционные способы их подготовки и сжигания не в полной мере соответствуют современным требованиям обеспечения надежности, эколого-экономической эффективности работы котельных агрегатов.

Возрастающая роль углей Канско-Ачинского бассейна в ТЭБ России на первый план выдвигает целый ряд вопросов, связанных с их эффективным энергетическим использованием. В первую очередь к ним следует отнести: снижение содержания оксидов азота как наиболее вредных газовых выбросов в уходящих дымовых газах на ТЭС; замена мазута при растопке и подсветке факела топочных камер котельных агрегатов углями Канско-Ачинского бассейна, стоимость которых более чем на порядок ниже стоимости жидкого топлива - мазута.

Решение проблемы повышения эффективности энергетического использования углей Канско-Ачинского бассейна осуществляется на основе научно обоснованной технологии высокоэффективного сжигания углей в универсальных горелочных устройствах с предварительной термической подготовкой. В лаборатории «Эколого энергоэффективное сжигание углей» кафедры «Тепловые электрические станции» Политехнического института, «Сибирский федеральный университет» разработана технология термической подготовки КАУ в

универсальном энергоэффективном горелочном устройстве непосредственно в условиях тепловой электрической станции.

На рисунке 1 представлен эскиз универсального горелочного устройства. Данные горелочные устройства, могут использоваться как в режиме растопки, так и в качестве основных горелок, при этом универсальные горелочные устройства устанавливаются в существующие амбразуры топочных камер котельных агрегатов ТЭС, что значительно снижает затраты при монтаже горелочного устройства.

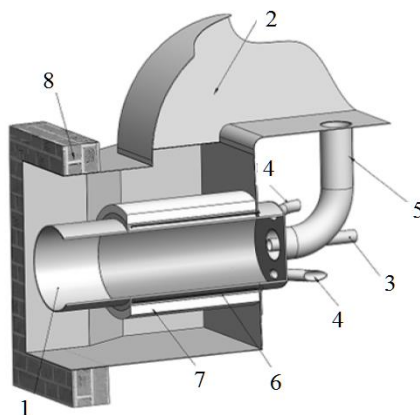


Рис. 1. Эскиз универсального горелочного устройства: 1—реакционная труба; 2—короб подвода вторичного воздуха; 3 – подвод пыли высокой концентрации (ПВК); 4 – патрубок тангенциальный подачи первичного воздуха; 5 – патрубок осевой подачи первичного воздуха; 6 – система нагрева; 7 – тепловая изоляция; 8 – амбразура котла.

Универсальное энергоэффективное горелочное устройство состоит из реакционной трубы 1 и короба подачи вторичного воздуха 2. Патрубок пыли высокой концентрации (ПВК) 3 соединен трубопроводом с пылепитателем, оборудованным двигателем с частотным приводом, что позволяет плавно регулировать подачу пылеугольного потока в горелочное устройство. Расход ПВК зависит от числа оборотов двигателя пылепитателя и изменяется от 150 об/мин до 1500 об/мин, что составляет от 0,139 кг/сек до 1,39 кг/сек. Первичный воздух подаётся в горелку тангенциально через воздухопроводы 4, расположенные на торцевой стенке горелочного устройства и трубопровод 5 установленный по оси горелки. Первичный воздух поступает в трубопровод 5 от короба вторичного воздуха 2. На трубопроводе 5 предусмотрена установка запорно-регулирующей аппаратуры позволяющей регулировать расход первичного воздуха в зависимости от подачи ПВК, что позволяет устанавливать необходимый режим газификации.

Пуск и работа горелки осуществляется путем нагрева стенки реакционной трубы системой электронагрева 6 до температуры 600–700°C, с последующей подачей в горелку первичного воздуха по воздуховодам (4, 5) и ПВК через патрубок (3). Для регулирования расхода первичного воздуха предусмотрена установка запорно-регулирующей аппаратуры, что позволяет варьировать значение коэффициента избытка воздуха, изменяя глубину газификации потока угольной пыли. За счет излучения от стенок муфеля происходит прогрев потока

пыли высокой концентрации и выход летучих веществ из угля при коэффициенте избытка воздуха значительно меньших единицы с образованием смеси горючих газов и коксовых частиц. Температура в пространстве муфельной части горелочного устройства должна поддерживаться в пределах 850-950°C, чтобы обеспечить устойчивое воспламенение пылегазового потока на выходе из горелочного устройства при смешении со вторичным воздухом и предотвратить шлакование муфельной части.

Инновационной составляющей является алгоритм управления работой универсальными горелочными устройствами, что позволяет комплексно решить проблемы экологии и энергоэффективности энергетического использования углей на современных тепловых электростанциях.

Система управления горелкой состоит из шкафа управления, пульта управления, привода подачи угольной пыли, привода воздушной заслонки и системы нагрева. Функциональная схема системы управления представлена на рисунке 2.

Основным элементом системы управления является программируемый контроллер SIMATIC S7-1200, посредством которого производится управление исполнительными механизмами системы: приводом подачи пыли, приводом воздушной заслонки и нагревом.

Пульт управления конструктивно состоит из панели оператора Weintek MT8101iE и аварийной кнопки. С помощью панели оператора задаются режимы работы горелки, производится ручное управление приводом подачи угольной пыли, приводом воздушной заслонки, осуществляется контроль за параметрами работы горелки. Связь панели оператора с контроллером осуществляется по сети Ethernet. Аварийная кнопка предназначена для отключения привода подачи угольной пыли в случае возникновения аварийной ситуации. Система нагрева состоит из трехфазного тиристорного регулятора мощности шкафного исполнения ШРМТ-160-04, карбидокремниевых нагревателей ККЭН в количестве трех штук общей мощностью 81 кВт, и четырех термопар. Сигналы с термопар, установленных в горелке, поступают в шкаф нагрева на модуль ioLogik E1262 MOXA, и далее по сети Ethernet в программируемый контроллер. Управление нагревом осуществляется по термопаре от программируемого контроллера аналоговым сигналом.

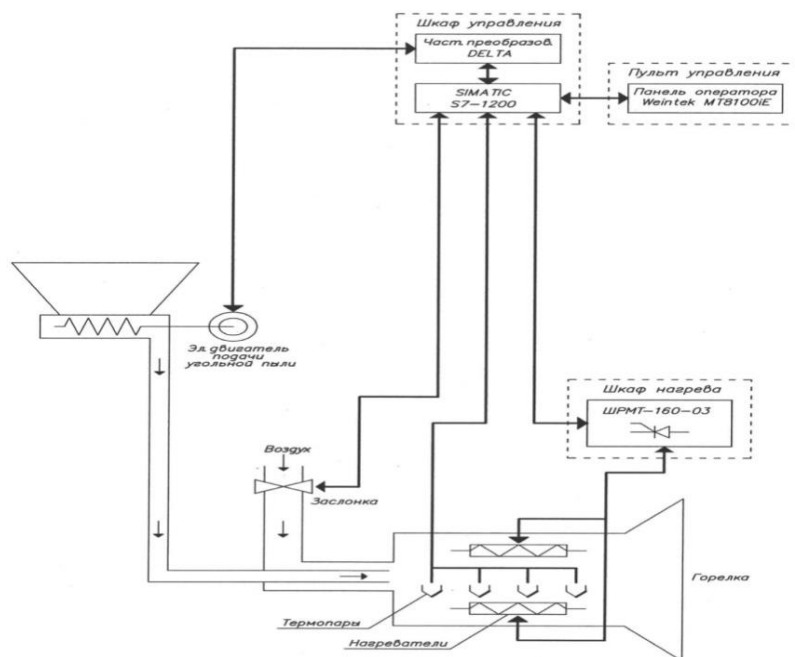


Рис. 2. Функциональная схема системы управления горелочным устройством

Привод лопастного питателя пыли (ППЛ-5) состоит из электродвигателя АИР 100S4 1081 и преобразователя частоты DeltaVFD037EL43A, что обеспечивает регулируемую подачу угольной пыли в горелку. Расход воздуха в муфельную часть горелки регулируется поворотом воздушной заслонки с помощью привода VelimoNF24A-SR-S2.

Управление приводом воздушной заслонки осуществляется от программируемого контроллера аналоговым сигналом, задание угла открытия заслонки и индикация её состояния производится с панели оператора.

Выводы:

Существенной новизной предлагаемой технологии является её направленность на комплексное решение проблем эффективного сжигания углей на основе специально разрабатываемых эколого - энергоэффективных универсальных горелочных устройств с предварительной термической подготовкой потока угольной пыли в муфельной части горелок.

Внедрение разрабатываемых универсальных горелочных устройств, оснащенных автоматизированным комплексом позволит существенно повысить эффективность работы угольных энергоблоков ТЭС, а именно:

- снизить в 2-2,5 раза выбросы оксидов азота, довести их до нормативных значений;
- полностью отказаться от применения растопочного жидкого топлива-мазута;
- обеспечить работу котлоагрегатов ТЭС на пониженных нагрузках без подсветки факела жидким топливом-мазutom;
- повысить устойчивость работы котлоагрегатов при пониженных нагрузках без подсветки факела мазutom.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дубровский В. А., Повышение эффективности энергетического использования углей Канско-Ачинского бассейна: Монография / В. А. Дубровский. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 184 с.
2. Пат. 95072 Российская Федерация, МПК F 23 D 1/06. Горелочное устройство/Дубровский В. А., Евтихов Ж.Л., Потылицын М. Ю.;опубл. 10.06.2010. 8с.
3. Пат. 94313 Российская Федерация, МПК F23K1/00. Система пылеприготовления котла/Дубровский В. А., Михайленко С. А., Зубова М. В., Евтихов Ж. Л., Потылицын М.Ю., Татаринов Н. А., Лыспак А. И..
4. Пат. 93939 Российская Федерация, МПК F23K1/00. Система подготовки твердого топлива к сжиганию Дубровский В. А., Михайленко С. А., Зубова М. В., Евтихов Ж. Л., Потылицын М.Ю., Татаринов Н. А., Лыспак А. И..

Научный руководитель: В.А Дубровский, д.т.н., профессор, Сибирский федеральный университет.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

И.Д. Абрамов

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А

Основными требованиями предъявляемые к техническому водоснабжению атомных электростанций является обеспечение бесперебойной и эффективной работы тепловой схемы станции за счет поддержания невыгоднейшего (экономического) вакуума в конденсаторах независимо от изменения режимов их эксплуатации и экологическая безопасность. Известные в настоящее время схемы технического водоснабжения с прудами-охладителями и градирнями [1] имеют ряд недостатков.

Так, применение прудов-охладителей предусматривает размещение главного корпуса вблизи пруда. Насосы размещаются в береговой насосной станции. Это связано со значительными колебаниями уровня воды в водоёме (до нескольких метров). На сегодняшний день использование прудов-охладителей, несмотря на их достаточную эффективность охлаждения проблематично ввиду их возможного засоления и обрастание микроорганизмами, также необходимостью организации периодической продувки.

Для систем охлаждения испарительного типа, использующие градирни необходимо значительное количество добавочной воды. Дренажные стоки с высокой концентрацией солей также способствуют загрязнению природных водоемов. Кроме того, туман, образуемый испарительными градирнями, оказывает отрицательное воздействие на окружающую среду.

Проектирование сухих градирен обеспечит решение проблем недостатка воды и экологического ущерба. Такая система выбрасывает только теплый и чистый воздух, который не вызывает необратимых процессов в окружающей среде и дает возможность сооружать электростанцию в отдаленных от источников воды местах.

Проведена оценка целесообразности применения системы Геллера, использующая сухие градирни в схемах технического водоснабжения АЭС как альтернатива пруду-охладителю. В системе Геллера (рис.1) тепло отработанного пара турбин поступает в замкнутую систему циркуляции конденсатора, которая обеспечивает дальнейший отвод и сброс тепла в окружающий воздух через систему мелкоребристых теплообменников типа Форго [2].

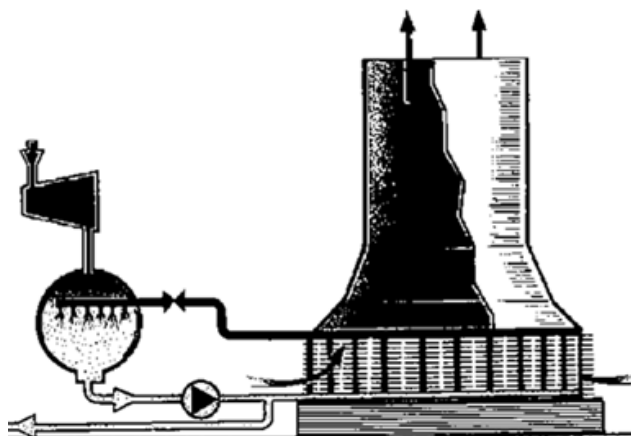


Рис. 1. Принципиальная схема системы Геллера

Теплообменники типа Форго обеспечивают экономичность осуществления воздушного охлаждения при помощи повышенной интенсификации теплоотдачи на воздушной поверхности. Основным конструкционным материалом теплообменников Форго, из которых собираются охладительные дельты, является чистый алюминий, обладающий высокими теплопередающими свойствами. По данным [2] применение сплошного плоского оребрения теплообменных трубок охладительных дельт системы Геллера, в отличие от широко применяемых спирально навитых теплообменных поверхностей, обеспечивает как увеличение интервалов между очисткой (отмывкой) охладительных дельт, так и легкость их отмывки с применением специального автоматического моющего оборудования. Охладительные дельты обладают высокой ремонтопригодностью, что выражается в относительной простоте ремонта и замены теплообменных трубок, монтируемых без сварки. Так же применяют усовершенствованные конструкции теплообменников с трубками из углеродистой стали (со стальными камерами) и с трубками из легированной стали (для энергоблоков АЭС с ресурсом 60 лет).

Проведено сравнение охлаждения циркуляционной воды в пруду-охладителе и в системе Геллера. Расчет выполнен для АЭС трехконтурного типа с реакторами БН-800 и турбоустановкой К-800-130. Сравнение выполнено по значениям электрической мощности, полученных при изменении параметров в конденсаторе в зависимости от температуры охлаждающей воды. Принято, что при перерасчёте новые значения параметров в конденсаторе будут влиять

только на работу, совершаемую в последнем отсеке турбины, а параметры подогревателей и деаэратора останутся неизменными в течение года.

По температуре пара определено давление насыщения в конденсаторе:

$$P_k = f(t_k). \quad (1)$$

По полученному значению давления пара в конденсаторе определена энтальпия пара на входе в конденсатор по h-s диаграмме:

$$h_k = f(P_k). \quad (2)$$

Используя новое значение энтальпии пара в конденсаторе, произведен пересчет тепловой схемы на номинальном режиме. Используя формулы теплового расчета блока, рассчитаны соответствующие параметры конденсатора на весь период расчёта и определено значение мощностей. Полученные значения сведены в таб.1.

Табл. 1. Значения среднемесячных параметров в конденсаторе и соответствующие им значения электрических мощностей

Месяц	Температура насыщения (прудохладитель)	Температура насыщения (система Геллера)	Давление насыщения (прудохладитель)	Давление насыщения (система Геллера)	Энтальпия (прудохладитель)	Энтальпия (система Геллера)	Электрическая мощность (прудохладитель)	Электрическая мощность (система Геллера)
	$t_{нас}^{np}, ^\circ C$	$t_{нас}^z, ^\circ C$	$P_k^{np}, кПа$	$P_k^z, кПа$	$h_k^{np}, \frac{кДж}{кг}$	$h_k^z, \frac{кДж}{кг}$	$N_s^{np}, МВт$	$N_s^z, МВт$
Январь	22,3	22,25	2,694	2,686	2307,2	2307,2	823,6	823,5
Февраль	22,2	23,7	2,678	2,915	2305,6	2320	824,5	816,3
Март	22,8	23,1	2,777	2,828	2308,8	2309,2	822,7	822,5
Апрель	25,2	29,55	3,208	4,138	2326,4	2348,8	812,6	799,7
Май	31,1	32,7	4,522	4,951	2358,4	2368	794,26	788,7
Июнь	35,9	37,85	6,063	6,579	2387,2	2254	777,7	773,15
Июль	37,1	39,45	6,316	6,273	2393,6	2403,2	774,07	768,56
Август	34,8	35,9	5,567	5,915	2380,8	2368	781,4	777,7
Сентябрь	28,8	32,3	3,963	4,841	2345,6	2366,4	801,6	789,67
Октябрь	22,4	29,05	2,71	4,021	2308	2346,4	823,16	801,1
Ноябрь	22,5	22,6	2,727	2,744	2308,4	2308,44	822,9	822,5
Декабрь	22,2	22,25	2,678	2,686	2307,2	2307,6	823,6	823,4

Для повышения эффективности охлаждения в системе Геллера рассмотрена целесообразность использования контактных конденсаторов. Применение контактных конденсаторов обеспечивает снижение температурного напора в

конденсаторе с 3-4°C - для поверхностных конденсаторов, до 0,1-1,0°C. То есть наблюдается более глубокий вакуум конденсаторе.

Определены среднегодовые значения мощностей с использованием различных систем охлаждения по следующему выражению:

$$N_{\text{э}}^{\text{с.г.}} = \frac{\sum N_{\text{э},i} \cdot \tau_i}{\sum \tau_i}, \quad (3)$$

где: $N_{\text{э},i}$ – электрическая мощность для i -го месяца, МВт; τ_i – число часов в i -том месяце, ч.

Расчётные значения электрических мощностей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчётные значения среднегодовой электрической мощности блока К-800-130 при охлаждении в пруду-охладителе и в системе Геллера

Месяц	Мощность (пруд-охладитель)	Мощность (градирня)	Время работы	Разность мощностей
	$N_{\text{э}}^{\text{пр}}, \text{МВт}$	$N_{\text{э}}^{\text{г}}, \text{МВт}$	$\tau_{\text{мес}}, \text{ч}$	$\Delta N_{\text{э}}, \%$
Январь	823,6	823,5	744	0,012
Февраль	824,5	816,3	672	0,995
Март	822,7	822,5	744	0,892
Апрель	812,6	799,7	720	1,587
Май	794,26	788,7	744	0,7
Июнь	777,7	773,15	720	0,585
Июль	774,07	768,56	744	0,703
Август	781,4	777,7	744	0,474
Сентябрь	801,6	789,67	720	1,488
Октябрь	823,16	801,1	744	2,673
Ноябрь	822,9	822,5	720	0,049
Декабрь	823,6	823,4	744	0,024
Итого	823,6	823,5	8760	0,012

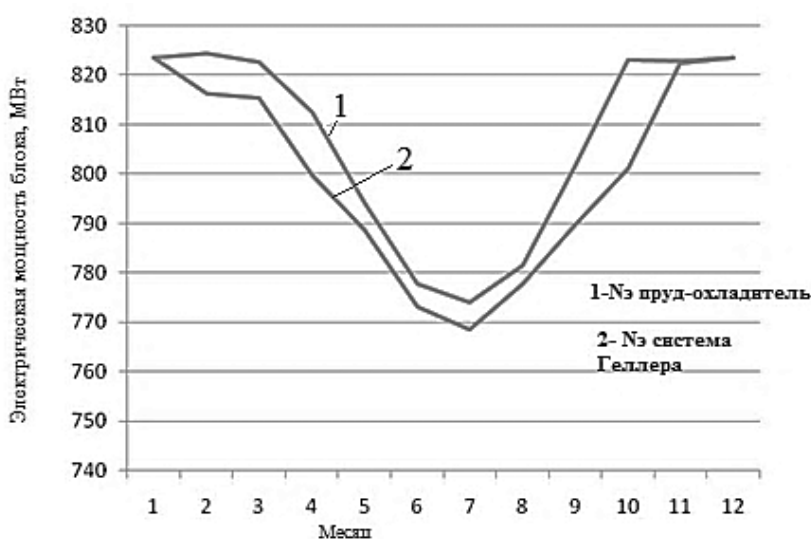


Рис. 1. Электрическая мощность блока по месяцам при разных системах технического водоснабжения

Получено, что использование сухой градирни системы Геллера с контактным конденсатором, практически не ухудшает вакуум в конденсаторе, т.е. разность мощностей блока при использовании двух систем охлаждения не превышает 2,7 %. При этом можно сделать вывод, что пруд-охладитель оказался более эффективной системой охлаждения, но при учете больших капитальных вложений и эксплуатационных затрат, и значительного влияния на окружающую среду целесообразнее в качестве охлаждающих устройств применять сухие градирни. Следует также отметить, что при увеличении электрической мощности блока в зимние периоды эффективность работы системы Геллера возрастает, так как отсутствует переохлаждение циркуляционной воды и разность мощностей блока в вариантах расчета изменяется в меньших пределах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочная серия: В 4 кн. / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. – 4-е изд. М.: Издательский дом МЭИ. 2007. 501с. 2. Охладительные системы Геллера для электрических станций. Референц-лист. ф. EGI Венгрия.1991.

Научный руководитель: И.А. Ростунцова, ассистент кафедры Тепловые и атомные станции, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А, энергетический факультет.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ПГУ 420 МВт НЯГАНСКОЙ ГРЭС

А.С. Петров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Одним из направлений развития энергетики России является широкое внедрение комбинированных парогазовых установок (ПГУ), в которых используется тепло выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ) [1-3].

Самым крупным инвестиционным проектом в энергетике и одна из самых мощных тепловых электростанций в мире, работающих на широтах севернее 62° является Няганская ГРЭС. Установленная мощность станции -1269,8 МВт. В своем составе станция имеет три блока: первый энергоблок мощностью 420,9 МВт, второй - мощностью 424 МВт, третий - мощностью 424,681 МВт.

Для блока 420 МВт рассмотрены схемные решения повышения эффективности парогазовой установки.

Базовым вариантом является тепловая схема блока ПГУ-420 МВт с трехконтурным котлом-утилизатором с промперегревом пара E-270/316/46-12,5/3,0/0,46-560/560/237, с силовой установкой производства Siemens, включающей расположенные на одном валу: комплектную газотурбинную установку SGT5-4000F, комплектную паротурбинную установку SST5-3000 с осевым конденсатором SCon1000, турбогенератором SGen5-2000H с водородным охла-

ждением, вспомогательное общешлюпочное оборудование и деаэрационной установкой, включенная по основному конденсату после ГПК и питаемая паром от паропровода низкого давления.

Схема одновальнoй силовой установки представлена на рис. 1.

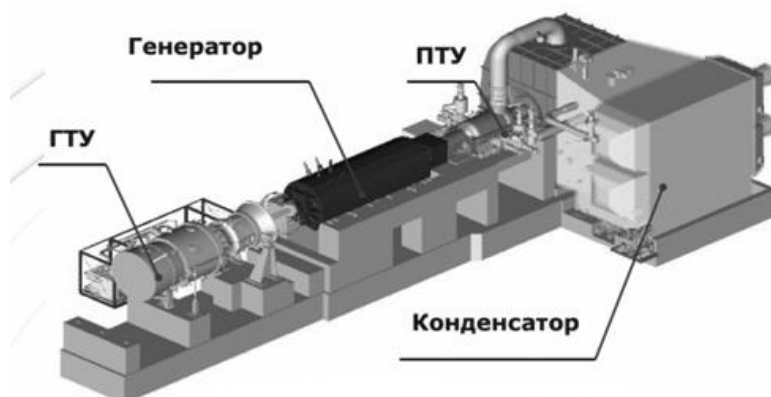


Рис. 1. Компоновка одновального моноблока SGT5- 4000F 1S мощностью 420 МВт, SIEMENS AG

Технические характеристики блока ПГУ 420 МВт по базовому варианту представлены в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики блока ПГУ 420 МВт (базовый вариант)

Характеристика энергоблока	Гарантийные показатели по контракту	Фактические показатели по результатам испытаний	Повышение фактических показателей
Мощность электрическая брутто, МВт	418,4	422,4	+4,0
Мощность потребителей собственных нужд, %	2,1%	1,2%	-0,9%
Мощность электрическая нетто, МВт	410	417,3	+7,3
КПД брутто, %	58,77	59,5	+0,73%
КПД нетто, %	57,59	58,79	+1,20%
Удельный расход условного топлива брутто, гут/кВт·ч	209,3	206,7	-2,6
Удельный расход условного топлива нетто, гут/кВт·ч	213,6	209,2	-4,4
Содержание оксидов азота в уходящих газах, мг/м ³	Не более 50	21,4	-28,6

Схемные решения отличаются вариантами подачи основного конденсата в котел-утилизатор:

Вариант 1. В тепловую схему включается автономный деаэратор повышенного давления, питаемый паром из барабана низкого давления и установленный после газового подогревателя конденсата (ГПК). Питательные насосы ВД, СД и НД установлены после деаэратора. Осуществляется рециркуляция основного конденсата в ГПК. Выхлопные газы ГТУ поступают в трехконтурный горизонтальный котел-утилизатор, где охлаждаются, проходя последовательно поверхности нагрева. Основной конденсат из конденсатора паровой турбины откачивается конденсатным насосом, проходит БОУ, затем направляется в ГПК котла-утилизатора. После ГПК конденсат подается в деаэратор, откуда питательная вода насосами низкого высокого/среднего давлений подается в барабан низкого давления, экономайзеры высокого и среднего давления. В экономайзер среднего давления питательная вода поступает из промежуточной питательной воды высокого/среднего давления. Отработав в ЦВД, пар поступает в трубопровод пара холодного промпрегрева. После смешения с паром СД поток направляется на промпрегрев. После пароперегревателя среднего давления пар по трубопроводу направляется в паровую турбину.

Вариант 2. В тепловую схему включается автономный вакуумный деаэратор, установленный после ГПК. Питательные насосы ВД, СД и НД установлены после ГПК.

Отличием данной схемы является использование вакуумного деаэратора. Давление пара в деаэраторе поддерживается 20 кПа, чтобы температура деаэрированной воды составила 60 °С. Деаэрация конденсата в штатном режиме осуществляется перегретой водой после ГПК. Использование данной схемы позволяет заполнить котел-утилизатор перед пуском деаэрированной водой.

Основной конденсат из конденсатора паровой турбины откачивается конденсатным насосом, проходит БОУ, затем направляется в вакуумный деаэратор. Деаэрированная вода поступает в ГПК, где нагревается и подается на всас питательного насоса высокого/среднего давления. Часть нагретого конденсата подается в вакуумный деаэратор. Расход подаваемого в деаэратор конденсата регулируется регулирующим клапаном так, чтобы поддержать температуру воды не ниже 60 °С. Подача питательной воды в барабан низкого давления осуществляется из напорного коллектора ПЭН СД

Вариант 3. В тепловую схему включается автономный вакуумный деаэратор, установленный на выходе из котла-утилизатора. Питательные насосы ВД, СД и НД установлены после деаэратора. Основной конденсат из конденсатора паровой турбины откачивается конденсатным насосом, проходит БОУ, затем направляется в вакуумный деаэратор. Деаэрированная вода поступает в питательный коллектор, откуда направляется в контур деаэратора и на всас ПЭН. Нагретый конденсат подается в вакуумный деаэратор. Расход подаваемого в деаэратор конденсата регулируется регулирующим клапаном. Особенностью данной схемы является расположение поверхностей нагрева в газоходе: экономайзеры высокого и среднего давлений и поверхность Д, в которой нагревается вода вакуумного деаэратора, расположены в одной температурной зоне - на выходе из котла. Подача питательной воды в барабан низкого давления осуществляется из напорного коллектора ПЭН СД.

Вариант 4. В тепловую схему включается автономный деаэратор повышенного давления, питаемый паром из барабана низкого давления и установленный после газового подогревателя конденсата. Питательные насосы ВД, СД и НД установлены после деаэратора. Осуществляется регенеративный подогрев основного конденсата в водоводяном теплообменнике (ВВТО). В данном варианте деаэрация происходит в вынесенном деаэраторе фирмы Stork. Выхлопные газы ГТУ поступают в трехконтурный горизонтальный котел-утилизатор, где охлаждаются, проходя последовательно поверхности нагрева. Основной конденсат из конденсатора паровой турбины откачивается конденсатным насосом. Нагретый конденсат после первого пакета ГПК поступает в ВВТО, нагревая конденсат из конденсатора до температуры не менее 60 °С. После теплообменника конденсат направляется во второй пакет ГПК. После ГПК недогретый до температуры насыщения конденсат поступает в выносной деаэратор. Пар на деаэрацию отбирается из барабана НД котла-утилизатора. Отработав в ЦВД, пар поступает в трубопровод пара холодного промперегрева. После смешения с паром СД, пар направляется на промперегрев. Далее пар по трубопроводу направляется в паровую турбину. Затем пар через стопорные и регулирующие клапана поступает в ЧСД. Пар НД через стопорные и регулирующие клапана поступает в турбину, где, смешавшись с паром СД, проходит ЧНД, после чего отработавший пар сбрасывается в конденсатор паровой турбины.

Расчетный анализ представленных выше принципиальных схем показывает: достоинством вариантов 1 и 4 является использование для деаэрации насыщенного пара из барабана низкого давления. Вариант 4 не предусматривает рециркуляционные насосы ГПК, вместо них устанавливается регенеративный ВВТО. При этом необходимо учитывать, что в обоих вариантах при работе котла - утилизатора под нагрузкой в штатном режиме через ГПК будет проходить недеаэрированный конденсат. Для обеспечения надежной работы деаэратора ГПК должен быть оснащен регулируемым байпасом по конденсату. Особенностью вариантов 2 и 3 является использование вакуумного деаэратора при давлении пара 20 - 25 кПа, работающего на нагретом в ГПК конденсате. Эти варианты отличаются от вариантов 1 и 4 большей простотой, так как деаэрация конденсата (предпусковая и штатная) осуществляется перед ГПК. Наиболее простым является вариант 2.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Степанов И. Р. Парогазовые установки. Основы теории, применение и перспективы. Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2000.- 706 с.
2. Ольховский Г. Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат, 1985.- 298 с.

3. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций/ С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов.- М.: МЭИ, 2002. - 584 с.

Научный руководитель: И.А. Ростунцова, ассистент кафедры Тепловые и атомные станции, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ТЭС ПО ПАРОГАЗОВОМУ ЦИКЛУ СБРОСНОГО ТИПА

Н.А. Бурмистров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Основным направлением обновления тепло- и электрогенерирующих мощностей России является сохранение действующего оборудования с вводом новых мощностей на основе парогазовых и газотурбинных технологий. Техническое перевооружение ТЭЦ осложняется необходимостью обеспечения надежного и бесперебойного теплоснабжения потребителей в течение всего периода замены оборудования. Опыт проектирования показывает, что использование чисто бинарных энергоблоков парогазовых установок для замены существующего оборудования ТЭЦ очень сложно. Это объясняется трудностями размещения такого энергоблока в существующем главном корпусе, что неминуемо приводит к снижению мощности теплоснабжения в течение не менее 36 мес. (с учетом демонтажа действующего оборудования). Поэтому при реконструкции ТЭЦ актуальным является установка газотурбинных надстроек, которые позволяют практически полностью сохранить компоновку главного корпуса, тепловую схему, а в ряде случаев и основное оборудование. Существенную роль играют и более низкие капитальные вложения по сравнению с внедрением бинарных схем, оказывающие положительное влияние на снижение стоимости вырабатываемой электрической и тепловой энергии. Поэтому применение схемы модернизации путем газовой надстройки существующей схемы ТЭЦ является актуальной задачей.

Повышение эффективности действующих ТЭЦ осуществляется путем использования газовых турбин в составе ПГУ со сбросом уходящих газов ГТУ в паровой котел. Принципиальная схема представлена на рис. 1.

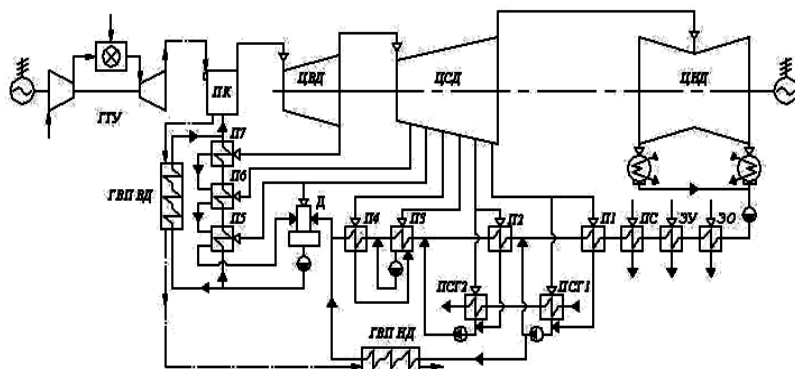


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ со сбросом в паровой котел: ГТУ – газотурбинная установка; ПК – паровой котел; ГВП – газо-водяной подогреватель; ПСТ – подогреватель сетевой воды горизонтального типа; Д – деаэрактор; ЭУ – эжектор уплотнений; ЭО – эжектор основной; ПС – подогреватель сальниковый.

Такой вариант модернизации требует несколько больших затрат которые идут на реконструкцию парового котла, так как уходящие газы ГТУ направляются в сбросные сопла, расположенные над горелками для сжигания в их среде органического топлива.

Для такой теплофикационной ПГУ мощность и параметры газа ГТУ выбираются из условия получения максимальной мощности, а не КПД, как для конденсационной ПГУ. При этом ГТУ подбирается по массовому расходу газов, которые не превышают 25-30 % воздуха. При условии вышеописанной модернизации, в зависимости от использования (по условиям габаритов, конструкции и схемы) той или иной ГТУ, достигается увеличение электрической мощности. КПД выработки электроэнергии нетто ПГУ возрастает до 38...40 %. Экономия топлива по сравнению с ПТУ такой же мощности достигает 10 %.

Для блока Т-110/120-130 рассчитана технико-экономическая эффективность установки ГТУ со сбросом газов в энергетический котел и глубоким охлаждением уходящих газов ГТУ. Оценка проводилась на основе вариантных расчетов тепловой схемы блока ПГУ-ТЭЦ. Результаты приведены в табл.1.

Таблица 1. Техничко-экономические показатели проекта

Наименование показателя	Единица измерения	Величина показателя
Установленная электрическая мощность	МВт	182,5
Установленная тепловая мощность	ГДж/ч	1184,86
Выработка электроэнергии	ГВт·ч/год	1347,89
Отпуск электроэнергии	ГВт·ч/год	1291,16
Выработка тепловой энергии	тыс ГДж/год	3464,2
Отпуск тепловой энергии	тыс ГДж/год	3433,3
Удельный расход топлива на отпуск электроэнергии	г у.т./(кВт·ч)	294,78
Удельный расход топлива на отпуск тепловой энергии	кг у.т./ГДж	27,380

Наименование показателя	Единица измерения	Величина показателя
КПД по отпуску электроэнергии	%	41,73
Капиталовложения	млн. руб	4562,5
Затраты на производство	млн. руб	2854,99
Себестоимость отпускаемой электроэнергии	коп/(кВт·ч)	1,7313
Себестоимость отпускаемой тепловой энергии	руб./ГДж	151,86
Чистый дисконтированный доход	млн. руб	3595,5
Внутренняя норма доходности	%	18,297
Индекс доходности	руб/руб	1,6025
Дисконтированный срок окупаемости	лет	10,6

Для повышения эффективности внедрения ГТУ рассмотрена замена паровой регенерации на газовую. Оценка экономичности включения газоводяного подогревателя в тепловую схему ПГУ приведена в табл. 2.

Таблица 2
Технико-экономические показатели включения ГВП

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Расчетная формула	Количество, отключаемых ПВД		
				1	2	3
Прирост электрической мощности	$N_{\text{Э}}$	МВт	из расчета тепловой схемы	6,61	10,21	15,52
Отпуск электрической энергии с шин ПГУ	$\text{Э}_{\text{от}}$	МВт·ч/год	$(N - N_{\text{с.н}}) \cdot \tau$	13959,7	14232,9	14637,2
Выработка электроэнергии на ПГУ	Э	МВт·ч/год	$N \cdot \tau$	14612,2	1488,4	15289,7
Расход электроэнергии на собственные нужды, относимые к выработке электрической энергии.	$\text{Э}_{\text{сн}}$	МВт·ч/год	$(N_{\text{с.н}} - N_{\text{сн}}) \cdot \tau$	458,660	458,660	458,660
Расход топлива на выработку электроэнергии	$B_{\text{Э}}^y$	кг у.т./с	$B^y \cdot k_{\text{Э}} \frac{\text{Э}_{\text{от}}}{\text{Э} - \text{Э}_{\text{сн}}}$	18	18	18
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии	$b_{\text{Э}}$	кг у.т./кВт·ч	$\frac{B_{\text{Э}}^y \cdot \tau}{\text{Э}_{\text{от}}}$	176,4	173	168,2
КПД по выработке электроэнергии	$\eta_{\text{Э}}$	доли	$\frac{0,123}{b_{\text{Э}}}$	0,697	0,71	0,73

Оценка экономического эффекта включения ГВП в схему ПГУ проведена по следующей методике:

1. Капиталовложения, руб.

$$K_i = S_{\text{ГВП}} \cdot C$$

2. Затраты на каждом шаге расчета, руб.

$$Z_i = 0,15 \cdot K_i$$

4. Результаты, достигаемые на каждом шаге расчета, руб.

$$R_t = \Delta b_{\text{э}} \cdot N_{\text{э}} \cdot C_T + \Delta N_{\text{э}} \cdot h_{\text{уст}} \cdot T_{\text{э}},$$

где $\Delta b_{\text{э}}$ - экономия топлива при включении в систему регенерации ГВП, г у.т./кВт·ч; $N_{\text{э}}$ - отпущенная электроэнергия, кВт; C_T - цена топлива ,руб/т.у.т; $\Delta N_{\text{э}}$ - увеличение электрической мощности при включении в систему регенерации ГВП и отключении ПВД, кВт; $T_{\text{э}}$ - тариф на электроэнергию; $h_{\text{уст}}$ – число часов, используемой мощности, ч/год.

5. Интегральный эффект достигаемый на каждом шаге расчета

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = (R_t - 3_t \cdot \alpha_t) - K_t \cdot \alpha_t,$$

где α_t - коэффициент дисконтирования:

$$\alpha_t = (1+E)^{-(t-\tau_{\text{стр}})},$$

где $E = 0,08$ норма дисконта. Горизонт расчета 9 лет.

Результаты технико- экономических расчетов приведены на рис. 2-3.

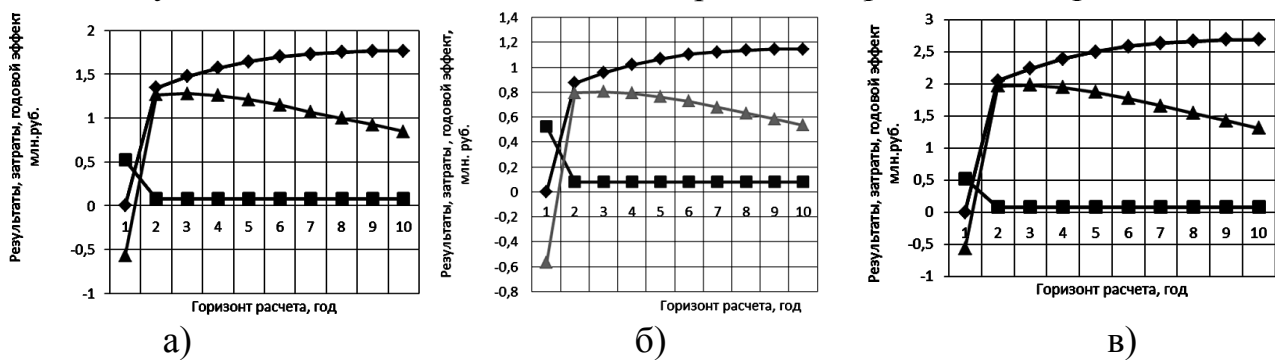


Рис. 2. Техничко-экономические показатели внедрения ГВП при отключении: а) одного ПВД; б) двух ПВД; в) трех ПВД

Обозначение:
 —◆— Результаты
 —■— Затраты
 —▲— Годовой эффект

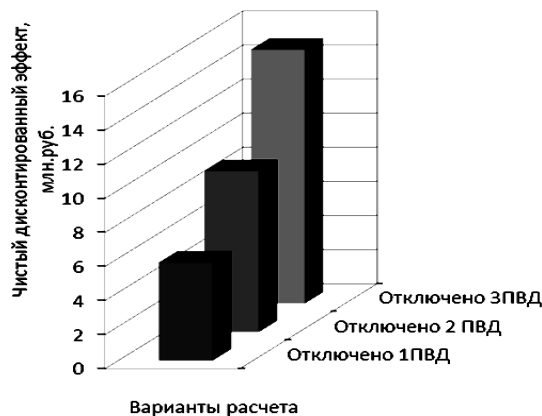


Рис. 3. Чистый дисконтированный доход при внедрении газодляного подогревателя

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции/ В.Я. Рыжкин.- М.:Энергия, 1976. -448 с.
2. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С.В.Цанев, В.Д. Буров, А.Н.

Ремезов; под ред. С.В. Цанева. - 3-е изд., стереот. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 584 с.

Научный руководитель: И.А. Ростунцова, ассистент кафедры Тепловые и атомные станции, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНЕШНЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОЙ ТЕПЛОТЫ ТЭС

Н.Н. Бубнов

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Основным направлением развития современной экономики является поиск перспективных технологий энергопреобразования и производство новой техники на основе высокоэффективных термодинамических циклов с использованием возобновляемых энергоресурсов. Переход на новый технологический уровень связан, прежде всего, с энергосбережением и сокращением доли использования традиционных энергоресурсов. Перспективным направлением при этом является разработка и широкое внедрение энергетических установок на основе двигателей внешнего сгорания, использующие цикл Стирлинга. Двигатель Стирлинга - тепловая машина, в которой жидкое или газообразное рабочее тело движется в замкнутом объёме. Принцип действия основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела с извлечением энергии из возникающего при этом изменения объёма рабочего тела. Достижением Стирлинга является добавление очистителя, названный «эконом». В современной научной литературе этот очиститель называется «рекуператор». Он увеличивает производительность двигателя, удерживая тепло в тёплой части двигателя, в то время как рабочее тело охлаждается. Этот процесс намного повышает эффективность системы. Чаще всего рекуператор представляет собой камеру, заполненную проволокой, гранулами, гофрированной фольгой (гофры идут вдоль направления потока газа). Газ, проходя через наполнитель рекуператора в одну сторону, отдаёт (или приобретает) тепло, а при движении в другую сторону отбирает (отдаёт) его.

Таким образом, низкий уровень шума, малая токсичность отработавших газов, работа на различных видах топлива, большой ресурс, соотношение размеров и массы, хорошие характеристики крутящего момента – все эти параметры дают возможность двигателям Стирлинга в ближайшее время значительно «потеснить» двигатели внутреннего сгорания [1-4].

Коэффициент полезного действия (КПД) современных двигателей внутреннего сгорания составляет 30-40 %, т.е. до 70 % тепловой энергии отводится в атмосферу. Одним из возможных направлений утилизации теплоты является ее трансформация в электрическую энергию при помощи двигателей внешнего сгорания, использующие цикл Стирлинга.

Основные технические характеристики предлагаемых сегодня на рынке энергетических установок на основе двигателей Стирлинга, в зависимости от фирмы производителя, колеблется в следующих пределах [5]:

- удельная стоимость от 1300\$ до 8000\$ за киловатт установленной мощности;
- моторесурс от 2000 до 80000 часов;
- эффективный КПД от 10% до 38%.

Анализ информации различных технических источников [4,5] и данные паспортов производителей энергетических установок показывает, что в настоящее время практически все выпускаемые двигатели внешнего сгорания являются аналогами двигателей Стирлинга, созданные в середине прошлого столетия голландской компанией «Philips». Эти разработки предназначались, в основном, для автомобилестроительных фирм и компаний, разрабатывающих энергоустановки для военных нужд, таких как, «General Motors», «Ford Motor», «MAN-MBW» и др. [1-3]. За последнее время появились новые объединения, например, европейский швейцарско-немецкий концерн, включающая в себя компании «Stirling Systems AG» (Schweiz) и «Stirling Systems GmbH» (Deutschland), транснациональная компания, в состав которой входят американские, японские, итальянские и немецкие фирмы («Merloni Termosanitari (MTS Group)», «Bosch Group», «Rinnai», «Infinia»), использующие двигатели внешнего сгорания в промышленных условиях.

Одним из способов повышения эффективности ТЭС и АЭС является утилизация тепловой энергии, теряемой в процессе преобразования. Использование даже части теряемой энергии может позволить решить задачи энергопотребления для собственных нужд тепловых электростанций. При этом тепловые сбросы станций могут быть переведены в высокопотенциальное тепло с помощью двигателей внешнего сгорания.

Основной принцип работы двигателя Стирлинга заключается в постоянно чередуемых процессах нагревании и охлаждении рабочего тела в закрытом цилиндре. В роли рабочего тела может выступать воздух, но также могут использоваться водород и гелий.

Получена зависимость КПД двигателя Стирлинга от термодинамических параметров. Из термодинамики известно, что давление, температура и объем идеального газа взаимосвязаны и следуют закону:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1),$$

где: P- давление газа; V - объём газа; n - количество молей газа; R - универсальная газовая константа; T - температура газа, °K .

Это означает, что при нагревании газа его объём увеличивается, а при охлаждении - уменьшается. Это свойство газов и лежит в основе работы двигателя Стирлинга. Термодинамический цикл Стирлинга представлен на рис.1.



Рис.1. Термодинамический цикл Стирлинга

Цикл Стирлинга состоит из четырёх фаз и разделён двумя переходными фазами:

1. Нагрев и перекачивание вытеснителем горячего газа вверх и одновременно изотермическое расширение;
2. Изохорное охлаждение;
3. Изотермическое сжатие и перекачивание вытеснителем охлажденного газа вниз;
4. Изохорное нагревание.

Таким образом, при переходе от тёплого источника к холодному источнику происходит расширение и сжатие газа, находящегося в цилиндре, за счёт чего можно получить полезную работу.

Работа газа в процессах 2 и 4 равна нулю, в процессе 1 положительна и равна

$$A_1 = nRT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (2)$$

В процессе 3 работа отрицательна и равна

$$A_2 = -nRT_2 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (3)$$

где T_1 - это температура зоны нагрева, а T_2 – температура зоны охлаждения, n – количество вещества газа, V_2 – это объем газа после нагрева, а V_1 – после охлаждения (первоначальный объем). Тогда общая работа совершенная газом за цикл равна

$$A = nR \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \cdot (T_1 - T_2), \quad (4)$$

Теплота получается в процессах 4 и 1

$$Q = Q_4 + Q_1 = \frac{i}{2} nR(T_1 - T_2) + nRT_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (5)$$

Где i – количество степеней свободы газа

Коэффициент полезного действия равен:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{nR \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \cdot (T_1 - T_2)}{\frac{i}{2} \cdot n \cdot R \cdot (T_1 - T_2) + n \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{i}{2 \ln \frac{V_2}{V_1}} \cdot (T_1 - T_2) + T_1}, \quad (6)$$

По полученной зависимости (6) проведена оценка КПД двигателя внешнего сгорания в зависимости от рабочего тела и температуры. Для получения достаточного количества энергии используют нагрев:

- гелия от 25 до 700 градусов, КПД цикла будет равен 35,6 %;
- водорода от 38 до 705 градусов, КПД цикла будет равен 35,8 %.

При нагреве воздуха от 25 до 100 градусов КПД равен 16 % (при использовании цикла Карно КПД получится равным 20%).

Перспектива использования предлагаемых решений заключается в реализации их на действующих и вновь вводимых ТЭС и АЭС для утилизации сбросной теплоты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Круглов М.Г. Двигатели / М.Г. Круглов, В.Н. Даннличев, С.И. и др. - М.: Машиностроение, 1977. – 150 с.
2. Ридер, Г.Т. Двигатели Стирлинга / Г.Т. Ридер, Ч.К. Хупер.; пер. с англ. М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
3. Уокер, Г. Двигатели Стирлинга. / Г. Уокер; пер. с англ. М.: Машиностроение, 1985. – 408 с.
4. Кукис В. С. / Двигатель Стирлинга вчера, сегодня, завтра / В.С. Кукис, В. А. Романов, Ю. А. Постол. // Ползуновский альманах. АлтГТУ. 2009. том 1. №3. С.83-85.

Научный руководитель: И.А. Ростунцова, ассистент кафедры Тепловые и атомные станции, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., энергетический факультет.

ВВЕДЕНИЕ ГАЗОВОГО ПРОМПЕРЕГРЕВА В СХЕМАХ ПГУ

С.Д. Осьминин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Перспективным направлением развития современной энергетики России является внедрение парогазовых технологий. Это связано с необходимостью строительства и внедрения более совершенных энергетических блоков в плане тепловой экономичности по сравнению с паротурбинными установками. В двухконтурных парогазовых установках коэффициент полезного действия (КПД) по выработке электрической энергии достигает 45-50 %. КПД трехконтурной ПГУ с промежуточным перегревом пара, в которой температура газов

перед газовой турбиной находится на уровне 1450°C , достигает 60 %. Дальнейшее совершенствование парогазовых установок сопряжено с применением промежуточного перегрева пара, тем самым увеличивая КПД паровой турбины в составе ПГУ за счет подвода к пару дополнительной теплоты. Поэтому разработка схемы многоступенчатого перегрева пара на ПГУ-КЭС двухконтурного типа в плане повышения КПД цикла является актуальной задачей.

Для повышения надёжности и экономичности работы ПГУ станции предусматривается с наружной стороны камеры сгорания ГТУ разместить кольцевой канал для промежуточного перегрева водяного пара (рис.1).

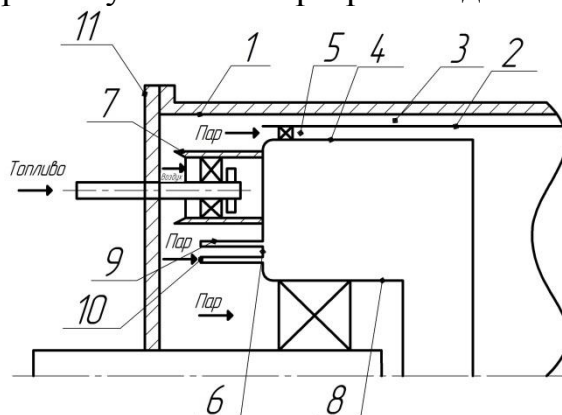


Рис .1. Конструктивные особенности камеры сгорания ГТУ

Как видно из рис.1 камера сгорания содержит цилиндрический корпус 1, соосную с ним жаровую трубу 2, образующих проточную полость для подвода воздуха 3, цилиндрический экран 4, расположенный соосно внутри жаровой трубы и образующий с ней кольцевой канал 5 для прохода пара, фронтное устройство 6, периферийные горелочные устройства 7, расположенные равномерно по окружности во фронтном устройстве, центральное горелочное 8, расположенную на оси жаровой трубы и задвинутую в жаровую трубу глубже, чем периферийные горелочные устройства, охлаждающие глушители 9, установленные на фронтном устройстве, выполненные в виде полых тел произвольного поперечного сечения, направленных открытым торцом к зоне горения, при этом противоположные торцы охлаждающих глушителей закрыты крышками 10, крышку камеры сгорания 11, закрывающую корпус камеры сгорания с торца.

Работа камеры сгорания осуществляется следующим образом. Часть пара, проходя по проточной полости для подвода пара 3, подается в кольцевой канал для прохода пара 5, проходя по которому охлаждает экран 4. Другая часть пара, проходя по проточной полости для подвода пара 3 через отверстия 11, поступает в охлаждающие глушители 9 и, охлаждая их, проходит в центральный паротвод. Оставшаяся часть пара, проходя по проточной полости для подвода пара 3, мимо охлаждающих глушителей 9 и дополнительно охлаждая их, поступает так же в центральный паротвод. Возникающие пульсации давления частично подавляются охлаждающими глушителями 9, а частично объемом, образованным между крышкой камеры сгорания 11 и фронтным устройством 6. Температура фронтной доски снижается за счет теплоотвода по охлаждающим глушителям 9.

Промежуточный перегрев позволит повысить располагаемый теплоперепад пара в части низкого давления паровой турбины за счёт подвода к нему дополнительной теплоты, что увеличивает мощность турбины. Основное отличие от стандартного принципа работы ПГУ заключается в том, что отработавший пар на выходе из цилиндра высокого давления с пониженными значениями температуры и давления поступает по паропроводу в расположенный с наружной стороны камеры сгорания газотурбинной установки кольцевой канал, где перегревается до заданной температуры. Затем по трубопроводу перегретый пар направляется в цилиндр низкого давления, куда также подается генерируемый в котле-утилизаторе пар низкого давления. Принципиальная тепловая схема энергоблока ПГУ-170 с газовым перегревом пара представлена на рис.2.

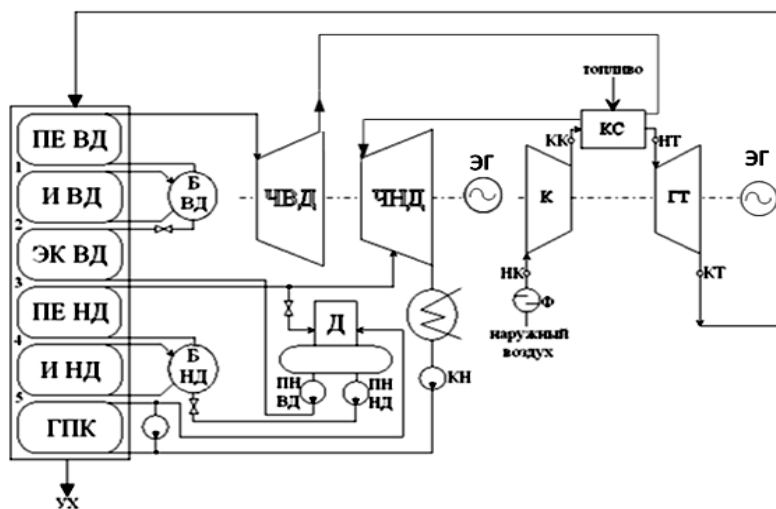


Рис.2. Принципиальная тепловая схема энергоблока ПГУ-170 с газовым перегревом пара: PE ВД, PE НД – пароперегреватель высокого и низкого давлений; И ВД, И НД – испаритель высокого и низкого давлений; ЭК ВД – экономайзер высокого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата; Б ВД, Б НД – барабан высокого и низкого давлений; ПН ВД, ПН НД – питательный насос высокого и низкого давлений; ЧВД, ЧНД – часть высокого и низкого давлений; Д – деаэратор; КН – конденсатный насос; К – конденсатор; ЭГ – электрический генератор; К – воздушный компрессор; ГТ – газовая турбина; Г – электрогенератор; Ф – воздушный фильтр; КС – камера сгорания топлива

Баланс камеры сгорания представлен на рис.3.

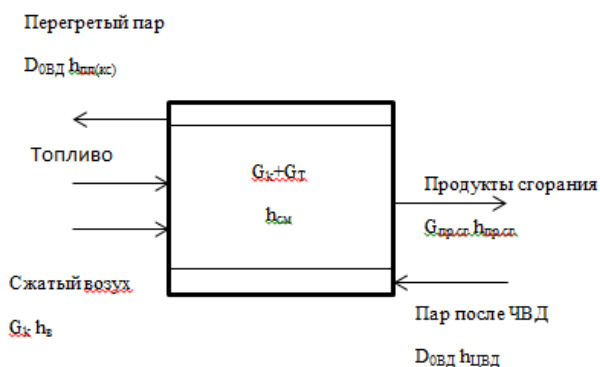


Рис.3. Баланс камеры сгорания ГТУ

$$D_{0ВД}(h_{пп(кc)} - h_{цвд}) = G_{пр.сг}(h_{см} - h_{пр.сг}) \quad (1)$$

$$h_{см} = f(t_{см}) = 34056,3 \text{ кДж/кг.}$$

$$h_{\text{пр.ср.}} = (D_{0\text{ВД}}(h_{\text{пп(к)}} - h_{\text{цвд}}) - G_{\text{пр.ср}}h_{\text{см}}) / G_{\text{пр.ср}} \quad (2)$$

$$h_{\text{пр.ср.}} = 33993,31 \text{ кДж/кг}$$

$$t_{\text{пр.ср.}} = f(h_{\text{пр.ср.}}) = 1016^\circ\text{C}$$

Показатели эффективности парогазовой установки с газовым промперегревом (ГПП) приведены в табл.1.

Табл. 1. Показатели эффективности ПГУ с внедрением газового промперегрева

Показатели	Размерность	Без ГПП	С введением ГПП
КПД ПГУ, $\eta_{\text{ПГУ}}$	%	50,36	53,96
Электрическая мощность ПГУ, $N_{\text{ПГУ}}$	МВт	165,9	177,66
КПД паротурбинной установки, $\eta_{\text{ПТУ}}$	%	35,48	38,95
Электрическая мощность ПТУ, $N_{\text{ПТУ}}$	МВт	55,11	64,45
КПД ГТУ, $\eta_{\text{ГТУ}}$	%	35,85	31,95
Электрическая мощность ГТУ, $N_{\text{ГТУ}}$	МВт	110,8	113,21
Расход уходящих газов, $G_{\text{ух.г}}$	кг/с	258,45	376,45
Температура после КС, $t_{\text{нт}}$	$^\circ\text{C}$	1210	1016

Изменение КПД и электрической мощности ПГУ без промперегрева (вариант 1) и при внедрении многоступенчатого промперегрева (вариант 2) показано на рис.4.



Рис. 4. Изменение КПД и электрической мощности ПГУ без ГПП и с введением ГПП

В результате введения газового перегрева пара температура на входе в газовую турбину снизится на 194°C , что приведет к снижению КПД ГТУ, но при неизменном расходе газа будет наблюдаться увеличение мощности ГТУ, КПД ПТУ, мощности ПТУ. Это в свою очередь приведет к увеличению мощности и КПД парогазовой установки в целом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Степанов И. Р. Парогазовые установки. Основы теории, применение и перспективы. Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2000.
2. Ольховский Г. Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Ривкин С. Л., Александров А. А. –М.: Энергия, 1975.
4. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Под. ред. С. В. Цанева –М.: МЭИ, 2002.
5. Фаворский О. Н., Длугосельский В. И., Земцов А. С., Трушин С. Г. Первый отечественный одновальный парогазовый энергоблок ПГУ-170 // Теплоэнергетика. 2001. №5. С. 2-7.

Научный руководитель: И.А. Ростунцова, ассистент кафедры Тепловые и атомные станции, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ЦИКЛЕ ПГУ

Р.О. Юмагулов

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

При проектировании и эксплуатации парогазовых установок особое внимание уделяется снижению температуры уходящих газов после котла-утилизатора. Одним из направлений глубокого охлаждения газов ГТУ является отвод их через вытяжную башню градирни. При этом решаются две проблемы: охлаждение газов на выходе из котла-утилизатора и снижение избыточного увлажнения атмосферного воздуха вокруг градирни [1]. Поэтому разработка и оценка эффективности схемы глубокого охлаждения уходящих газов ГТУ с применением градирни является актуальной задачей.

Для глубокого охлаждения уходящих газов ГТУ применена схема их отвода через башенную градирню испарительного типа (рис.1).

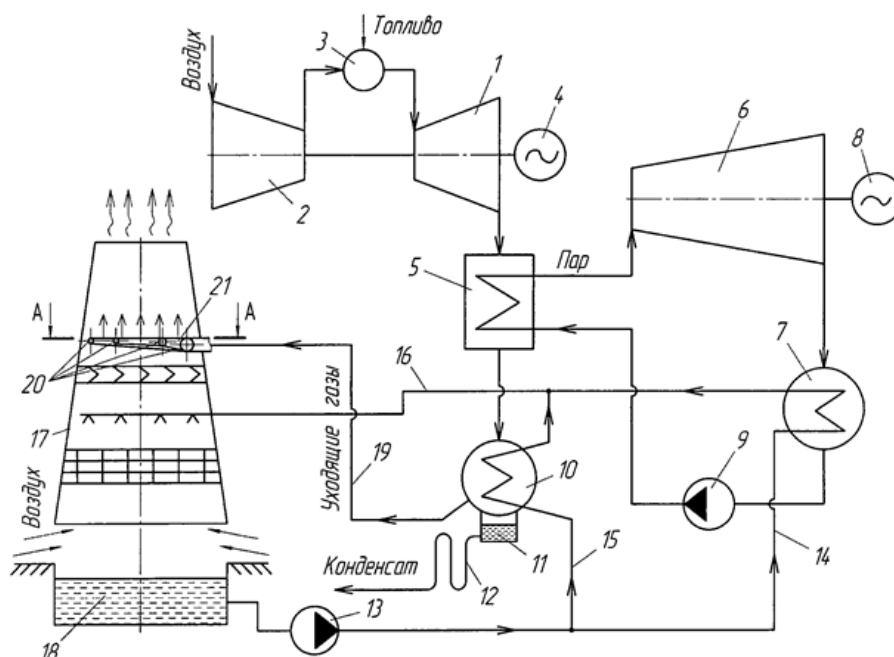


Рис.1. Схема глубокого охлаждения уходящих газов ГТУ с применением градирни

Парогазовая установка схемы рис.1 содержит газотурбинную установку, состоящую из газовой турбины 1, турбокомпрессора 2, камеры сгорания 3 и электрогенератора 4, котел-утилизатор 5, паротурбинную установку, состоящую из паровой турбины 6 с конденсатором 7, электрического генератора 8 и питательного насоса 9, теплообменник-утилизатор 10 теплоты уходящих газов, снабженный конденсатосборником 11 с гидрозатвором 12, систему обратного водоснабжения, включающую циркуляционный насос 13, напорный трубопровод 14 к конденсатору 7 паровой турбины 6, напорный трубопровод 15 к теплообменнику-утилизатору 10 теплоты уходящих газов и сливной напорный трубопровод 16 к градирне, состоящей из вытяжной башни 17 и водосборного бассейна 18, трубопровод 19, соединяющий теплообменник-утилизатор 10 теплоты уходящих газов с распределительным устройством, установленным в вытяжной башне 17 градирни и состоящим из двух кольцевых перфорированных коллекторов 20 переменного поперечного сечения, соединенных между собой патрубком 21.

Рассчитана эффективность отвода уходящих газов ГТУ через градирню. Определена температура циркуляционной воды на выходе из градирни при различном объеме пропуска газов через градирню. Температура определялась исходя из баланса:

$$D_k \cdot (h_n^s - h_B^s) \cdot \eta_k = G_B \cdot (t_{2B} - t_{1B}) \cdot c_p \quad (1)$$

$$t_{1B} = t_{2B} - \frac{D_k (h_n^s - h_B^s) \cdot \eta_k}{G_B \cdot c_p} \quad (2)$$

При расчете также учитывалось снижение влажности атмосферного воздуха. Результаты расчета представлены в табл.1 и на рис.2.

Табл. 1. Результаты теплового расчета градирни

Расход уходящих газов через градирню Gг, % от общего объема	40	60	80	100
Расход пара на конденсатор Дк, кг/с	129,1	129,1	129,1	129,1
Расход циркуляционной воды Gв, м3/ч	10054	10054	10054	10054
Влажность воздуха φ, %	65	63	61	60
Температура на выходе из градирни t1в, °С	30	29	28	27
Температура на входе в градирню t2в, °С	38	35	33	30

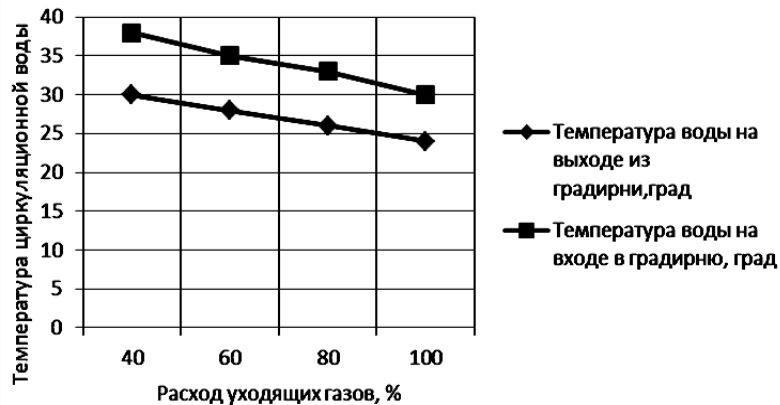


Рис. 2. Изменение температуры циркуляционной воды

Как видно из табл.1 и рис. 2, что температуры циркуляционной воды на выходе из градирни и влажность воздуха при 100 % подачи уходящих газов через градирню снижаются на 10 %.

Самотяга градирни определялась по формуле [2]:

$$\Delta p = H_6 \cdot g \cdot (p_1 - p_2) \quad (3)$$

где p_1 , p_2 – плотность воздуха начальная и конечная; H_6 – высота башни градирни; g – скорость свободного падения.

Получено, что при полном отводе уходящих газов ГТУ самотяга увеличивается на 30%, а общее сопротивление градирни возрастает на 15%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Буров В.Д. Тепловые электрические станции/В.Д. Буров, Е.В. Дорохов, Д.П. Елизаров и др. -М.: Издательство МЭИ, 2005. С.380.
2. Пономаренко В.С. Градирни промышленных и энергетических предприятий/ В.С. Пономаренко, Ю.И. Арефьев.-М.: Энергоатомиздат, 1998, С. 376.

3. Патент №2453712 (RU)/ МПК F01K23/10. Парогазовая установка электростанций/Кудинов А.А. и др. //Б.И. №17 ,2012 .

Научный руководитель: И.А. Ростунцова, ассистент кафедры Тепловые и атомные станции, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА КВ-Ф-116-150 ПРИ ПОМОЩИ КОНДЕНСЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Р.С. Маслов, К.А. Плешанов
Московский технологический университет

Существуют различные способы повышения эффективности работы тепловых электростанций [1]. Один из возможных вариантов повышения эффективности - это применение установки рекуперации низкопотенциальной теплоты или иначе конденсерной технологии [2]. Данная технология позволяет уменьшить температуру уходящих газов и сократить расход топлива на котел. Наибольшую эффективность конденсерная технология показывает при работе на топливе с повышенным содержанием влаги. К такому топливу относится древесина и продукты ее переработки (древесная щепа, древесные опилки). Для данного топлива был спроектирован водогрейный котел КВ-Ф-116-150 [3] и рассмотрена совместная работа конденсера и котла.

Согласно энергетической стратегии России на период до 2035 года [4] необходимо увеличить использование возобновляемых источников энергии и местных видов топлива. Это позволит снизить темпы общего объема потребления органического топлива, повысить уровень энергетической безопасности и надежности энергоснабжения субъектов РФ и России в целом, уменьшить транспортные затраты.

Водогрейный котел КВ-Ф-116-150 (рис. 1) предназначен для сжигания древесной щепы в стационарном кипящем слое. Подобные котлы предполагается устанавливать в районах с большим запасом лесов, тем самым увеличивая использование местных видов топлива. Эти котлы смогут ликвидировать проблему хранения древесных отходов и обеспечивать предприятие водой для собственных нужд.

Расчёт котла осуществлялся при помощи норм теплового расчёта котельных агрегатов [5] и различных рекомендаций [6], в том числе ОАО «ВТИ» [7] и НПО «ЦКТИ» с использованием программы «Boiler Designer» [8].

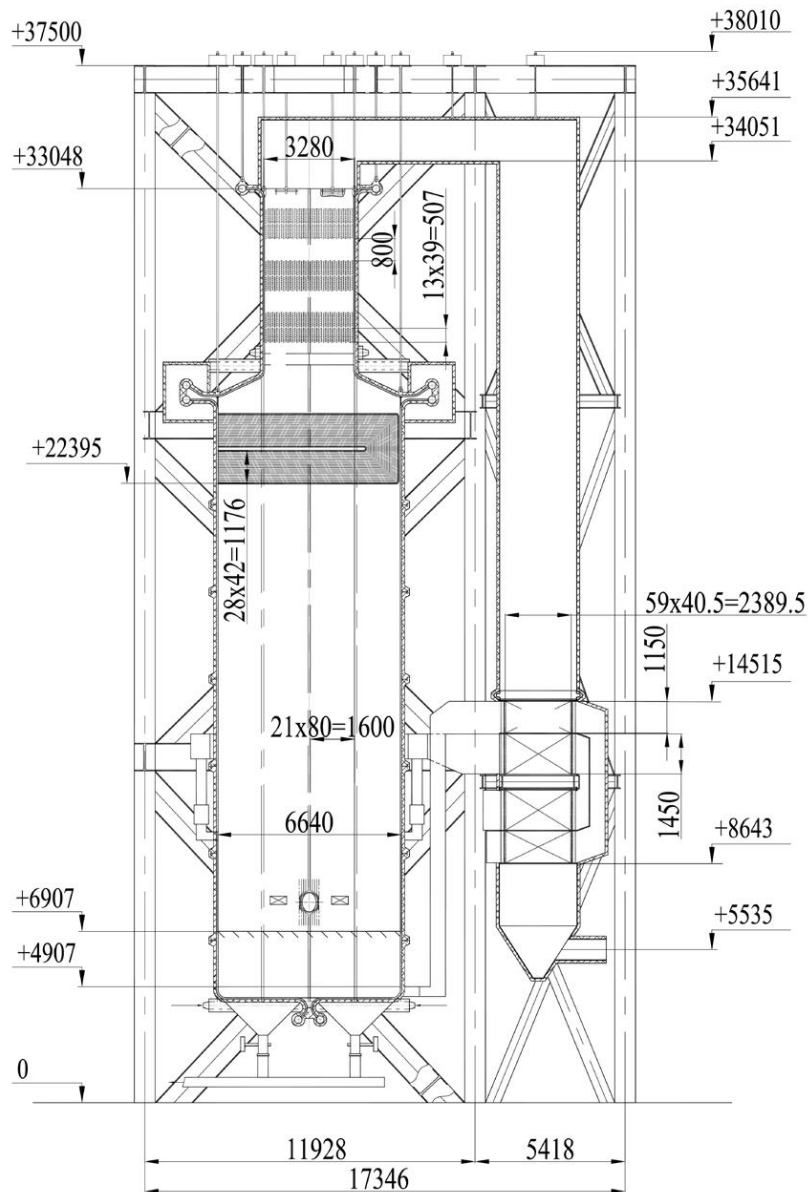


Рис. 1. Водогрейный котел КВ-Ф-116-150

Конденсерная установка располагается за котлом. Уходящие газы направляются в установку рекуперации низпотенциальной теплоты, где отдают свою теплоту охлаждающей их воде. Вода разбивается на мелкие капли за счет установки расщепителя для получения максимальной поверхности контакта. Установка рекуперации низпотенциальной теплоты представляет собой контактный теплообменный аппарат. В случае контактного теплообмена уходящие газы имеют непосредственный контакт с охлаждающей водой. Часть теплоты получается за счет скрытой теплоты парообразования при конденсации водяных паров, содержащихся в уходящих газах котла. Другая часть теплоты получается за счет охлаждения дымовых газов. Охлаждение дымовых газов позволит получить экономию топлива вплоть до 20%. Итоговый КПД котла вместе с конденсерной установкой получился более 95% в соответствии с расчётом по [5]. Теплота, нагреваемой в конденсере воды, полезно используется в цикле для теплофикационных и технологических нужд. Продукты сгорания обязательно

проходят жалюзийный сепаратор, для уменьшения влажности уходящих газов, и направляются в дымовую трубу.

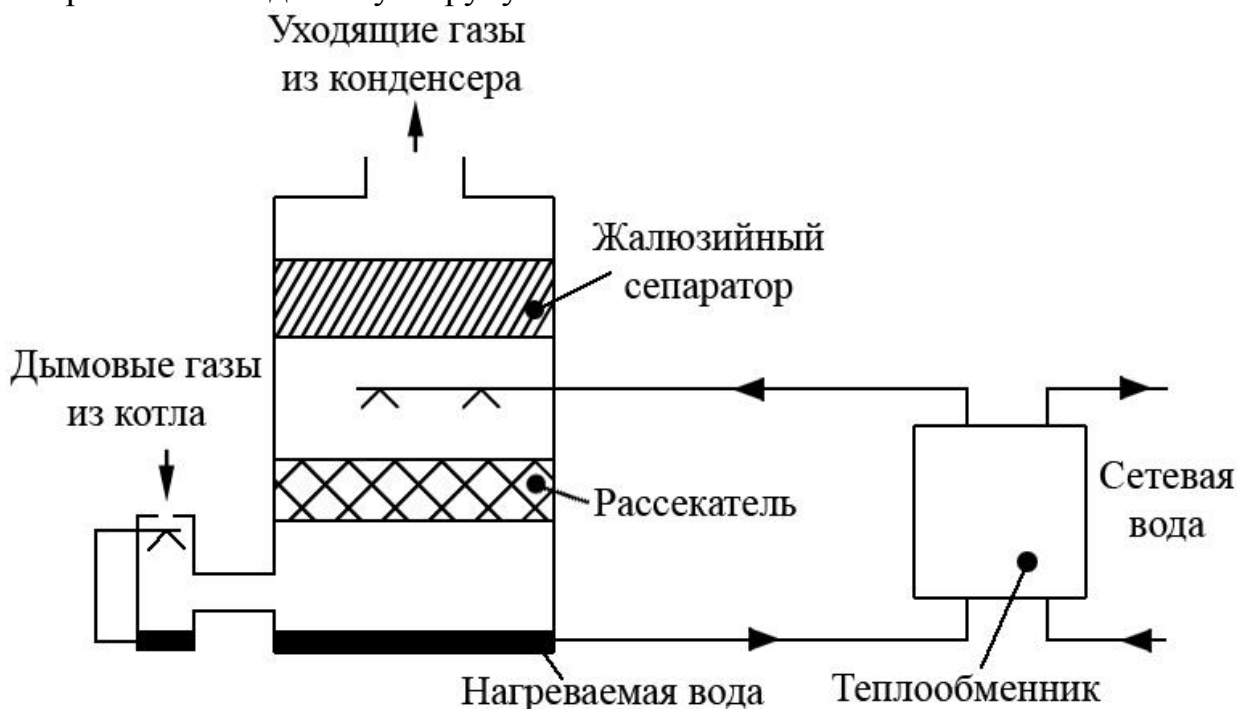


Рис. 2. Схема установки рекуперации низкопотенциальной теплоты

Для оценки эффективности работы конденсерной установки было использовано ПО «Condenser», осуществляющее расчет установки. В результате расчета воспринятого тепла для котла КВ-Ф-116-150 удалось достигнуть сокращения расхода топлива 17%, тем самым расчетный расход топлива на котел 43 т/ч уменьшился до 36 т/ч.

Повышение эффективности тепловой станции осуществляется за счет снижения температуры уходящих газов в конденсерной установке и дополнительном использовании скрытой теплоты парообразования. Чем большее содержание влаги в уходящих газах котла, тем больше теплоты можно полезно возвращать в цикл за счет нагрева обратной сетевой воды. Таким образом, целесообразно использовать установку рекуперации низкопотенциальной теплоты при сжигании высоковлажных топлив, таких как древесина.

Снижение температуры уходящих газов приводит к уменьшению расхода топлива на котел, а также повышению КПД котла за счет снижения потерь с уходящими газами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодежного форума. В 3т. Томск.- 2015 г. Т.2.- Материалы III Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 291 с.
2. Конденсерная технология утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих дымовых газов / Б. Луннинг, И.Л. Ионкин, А.В. Рагуткин, П.М. Сверчков // Повышение надёжности и эффективности эксплуата-

- ции электрических станций и энергетических систем. - М. : Издательский дом МЭИ, 2012. - С. 213-216.
3. Разработка новых энергетических котлов с кипящим слоем для сжигания коро-древесных отходов / К.А. Плешанов, Е.Г. Хлыст, Р.С. Маслов // Труды Международной научно-практической конференции «Информатизация инженерного образования» — ИНФОРИНО-2016 (Москва, 12—13 апреля 2016 г.). — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 706 с.
 4. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Проект. <http://www.minenergo.gov.ru/upload/iblock/621/621d81f0fb5a11919f912bfa1fb3248d.pdf>.
 5. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973.
 6. Мунц В.А., Баскаков А.П. Тепловой расчет топок со стационарным низкотемпературным и циркулирующим кипящим слоем. Ч. 1 // Теплоэнергетика.- 1990. N 1. -С. 74–77.
 7. Georgy A. Ryabov, Dmitry S. Litoun, Eduard P. Dik. Agglomeration of bed material: influence on efficiency of biofuel fluidized bed boiler // Thermal science.- 2003, -V. 7, -I. 1, -P. 5-16. DOI: 10.2298/TSCI0301005R.
 8. Плешанов К.А., Стерхов К.В., Зайченко М.Н. Расчет динамических характеристик котла-утилизатора Новогорьковской ТЭЦ // Электрические станции.- 2015. -N 4. - С. 10–15.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”, уникальный идентификатор прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (проекта) RFMEFI57414X0125.

Научный руководитель: К.А. Плешанов, к.т.н., с.н.с. ЦКЭиЭ МГТУ МИРЭА.

ЗАЩИТА ЛОПАТОК ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН ОТ СОЛЕВОЙ И ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ, ГАЗООБРАЗНОЙ И КАПЕЛЬНО-УДАРНОЙ ЭРОЗИИ

Г.Е. Ернурова, Д.Е. Силамгазы
Казахский аграрный университет им. С.Сейфуллина

В паровых турбинах ударному эрозионному износу подвержены рабочие лопатки последних и предпоследних ступеней конденсационных турбин. В местах, где поток с повышенным содержанием влаги имеет высокую скорость, в особенности в ЦВД турбин АЭС, работающих на влажном паре, наблюдается износ от щелевой эрозии корпусов, обойм, диафрагм, арматуры и других деталей.

Эрозионный износ рабочих лопаток при ударах капель влаги о поверхность входных кромок лопаток проявляется вначале в появлении шероховатости поверхности, затем на поверхности появляются углубления, кратеры, язвены, искажается форма профиля лопаток. При длительной работе возможно постепенное полное разрушение верхней части рабочей лопатки. В результате снижается механическая прочность эродированных лопаток и КПД ступени [1].

Механизм эрозионного износа рабочих лопаток связан в основном с усталостным разрушением материала лопаток вследствие высоких механических напряжений, которые возникают при ударе капли влаги о поверхность лопатки.

Одним из способов защиты лопаток паровых и газовых турбин от солевой и газовой коррозии, газообразной и капельно-ударной эрозии служит проведение ионной имплантации перед нанесением многослойного покрытия и нанесение в вакууме многослойного покрытия. Перед нанесением многослойного покрытия проводят ионную имплантацию используя комбинации химических элементов Yb и В или комбинации Cr, Yb, С, В, Zr с ионами N. Многослойное покрытие наносят многократным чередованием слоев эрозионно-стойких и коррозионностойких материалов, например Ti, Zr, Cr и их нитридов. Толщина слоя составляет от 100 нм до 2 мкм при общей толщине покрытия от 6 мкм до 100 мкм. Это позволяет повысить стойкость покрытия к солевой и газовой коррозии, газообразной и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости и циклической прочности покрытия [2].

В индустрии популярен электрический метод нанесения никель-кадмиевого (NiCd) возмещения в лопатки компрессора ГТД. Недостатками данного метода считаются: низкая стабильность к солевой ржавчине, природоохранный ущерб электрического изготовления, и кроме того возможность наводороживания плоскости, обуславливающего сокращение выносливости и повторяющейся прочности.

Также известен способ защиты стальных деталей машин от солевой коррозии последовательным осаждением в вакууме на поверхность пера первого слоя конденсированного покрытия сплава на основе никеля толщиной от 6 до 25 мкм и второго слоя покрытия на основе алюминия толщиной от 4 до 12 мкм.

Недостатками этого способа являются высокая температура отжига ($=610^{\circ}\text{C}$), которая приводит к изменениям в структуре материала (например, таких сталей как 20X13, ЭИ961, 15X11МФ). Кроме того, процесс осаждения таких покрытий характеризуется высокой трудоемкостью (не менее 4 ч на садку) и материалоемкостью, при этом увеличение толщины покрытия приводит к существенному снижению ее усталостной и адгезионной прочности.

Популярен метод защиты металлических продуктов от солевой ржавчины (в большей степени лопаток паровых турбин), содержащий поочередное осаждение в вакууме 1-го покрытия из титана шириной с 0,5 вплоть до 5,0 мкм, далее нанесение 2-го покрытия нитрида титана шириной 6 мкм.

Основным минусом данного метода является получение в результате слабой стойкости, которая приводит солевой и малой стойкости к капельно-результативной эрозии из-за небольшой толщины и твердости. При увеличении

толщины происходит сокращение её усталостной стабильности, то что усугубляет рабочие качества элементов.

Более близким согласно промышленности считается метод защиты металлических элементов установок с солевой ржавчины, пылегазовый и капельно-ударной эрозии, состоящий в том, что перед нанесением мультислойного возмещения выполняют гетерополярную имплантацию ионами азота и постимплантационную выдачу, которую соединяют с нанесением мультислойного возмещения, а мультислойное покрывание с неоднократным чередованием кругов титана, нитрида титана, при этом постимплантационную отдачу мультислойного возмещения выполняют в 1 криогенном размере из-за единственного научно-технического курса.

Основным недостатком аналога является обеспечение недостаточно надежной защиты изделия от пылевой и капельно-ударной эрозии при одновременном повышении выносливости, циклической прочности, что особенно важно при эксплуатации компрессорных лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) и лопаток паровых турбин, а также недостаточно широкого диапазона свойств защитных покрытий, снижающих возможность оптимизации покрытий по условиям эксплуатации защищаемых деталей.[3]

Технологическим итогом заявляемого метода считается увеличение стойкости возмещения к солевой ржавчины, пылегазовый и капельно-результативной эрозии присутствие синхронном увеличении выносливости, повторяющейся стабильности, уменьшении затратности труда при осуществлении и увеличение качеств предохранительного напыления.

Наиболее оптимальным при защите лопаток паровых и газовых турбин от солевой и газовой коррозии, газообразной и капельно-ударной эрозии, является проведение ионной имплантацию, с использованием комбинации химических элементов Yb и В или комбинации Cr, Y, Yb, С, В, Zr с ионами N, с последующим нанесением многослойного покрытия. Причем, многослойное покрытие наносят многократным чередованием слоев эрозионно-стойких и коррозионно-стойких материалов, например, чередованием слоев Ti, Zr, Cr и их нитридов. Толщина слоя может составлять от 100 нм до 2 мкм при общей толщине покрытия от 6 мкм до 100 мкм [2].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Молочек, Виктор Александрович. Ремонт паровых турбин / В. А. Молочек. — 3-е изд., полностью перераб. — Москва: Энергия, 1968. — 376 с.: ил. — Библиогр.: с. 373. — Предм. указ.: с. 369-372.
2. Эрозия рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин на пусковых малорасходных режимах / Орлик В.Г., Качуринер Ю.Я., Червонный В.Ф., Филаретов М.А., Матюшин А.В., Дебринов Г.А. - Электрические станции. 2007. № 4. С. 6-10.

3. Эрозия рабочих лопаток последних ступени влажно-паровой турбины / Ташлицкий Н.И. - Вестник машиностроения. 2011. № 11. С. 95-96.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель, АТЭС ЭНИН ТПУ.

ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЧС-33 ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА (ПГ-1000М)

Д.И. Буквич, К.И. Савина

Карагандинский государственный технический университет

Введение

Важнейшим элементом АЭС с реакторами с водой под давлением (ВВЭР и PWR) являются парогенераторы (ПГ), выдающие пар на турбогенератор для выработки электроэнергии.

В настоящее время на АЭС с ВВЭР применяются ПГ типа ПГВ-440 и ПГВ-1000.

Основные проблемы эксплуатации горизонтальных ПГ является коррозия [1]. Несмотря на то, что опыт эксплуатации подтверждает возможность длительной эксплуатации трубчатки из нержавеющей стали без существенной коррозионной деградации, существует актуальность работы по повышению коррозионной стойкости трубчатки.

Выбор материала

В горизонтальных ПГ шлам оседает на нижней части корпуса, что облегчает его удаление. В случае применения разреженной коридорной компоновки труб в пучке проблема накопления и удаления шлама становится менее актуальной [2].

Большой опыт эксплуатации ПГ говорит о том, что трубчатка из аустенитной стали обладает весьма высокой коррозионной стойкостью при отсутствии загрязнения поверхности и условий для локального упаривания.

Существует перспективность применения нержавеющей стали, как материала трубчатки в ПГ. Она имеет преимущества: относительная дешевизна, технологическая отработанность. Однако нержавеющая сталь в отличие от высоконикелевых сплавов склонна к хлоридной коррозии под напряжением, что и является ее основным недостатком. ВХР при работе ПГ должен исключать условия возникновения данного вида коррозии, поскольку в воде отсутствует кислород, а содержание хлоридов, сульфатов и других примесей жестко нормируется.

Альтернативой нержавеющей стали может выступать, например высоконикелевый сплав типа 03X21H32M3By-ВИ (ЧС-33), который является близким аналогом сплава 800 имеющим положительный опыт эксплуатации. Сплав ЧС-33 позволяет добиться более высокой коррозионной стойкости трубчатки ПГ к питтингообразованию и коррозионному растрескиванию. Это делает парогенератор более устойчивым к возможным нарушениям проектных условий хране-

ния и эксплуатации. Вместе с тем данный сплав заметно дороже, чем нержавеющая сталь. Сплав имеет более низкую теплопроводность в сравнении с нержавеющей сталью, что компенсируется более высокими механическими свойствами для уменьшения толщины стенки.

Заключение

В заключение можно сказать, что высоконикелевый сплав дает ряд преимуществ. Уменьшение толщины стенки позволяет:

- поместить в корпус ПГ до 12200 труб;
- понизить вес ПГ;
- обеспечить осуществимость перевозки ПГ по железной дороге;
- избежать непредвиденных затрат при серийном производстве типовых блоков АЭС (нет необходимости в новой компоновке);
- увеличить эффективность использования теплообменной поверхности ПГ;
- нарастить тепловую мощность ПГ практически без изменения его габаритов;
- улучшить условия циркуляции в объеме ПГ за счет организации более выраженного контура циркуляции [3];

ЛИТЕРАТУРА:

1. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных установок // Б.И. Лукаевич, С.Е. Давиденко, Н.Б. Трунов, Ю.Г. Драгунов. - М.: Академкнига, 2004. - 391 с.
2. Седьмой международный семинар по горизонтальным парогенераторам: Сб. ст. - Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2006. - .255 с.: ил.
3. Д.А. Лахов. Горизонтальный парогенератор. Проблемы повышения мощности и возможные пути решения // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Обеспечение безопасности АЭС». - Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2012. – С. 14-23.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, старший преподаватель каф. АТЭС ТПУ.

IMPACT OF ANGLE OF THE INITIAL ORIENTATION OF THE RIGID BUS 6–10 KV ON THE ELECTRODYNAMIC STABILITY

A.H. Baran, I.P. Klimkovich
Belarusian national technical university

At the present time power engineering must react advancely to constant increase of electric loads in power system. That is why present generating plants is being modernized and new ones are being brought into exploitation. Increase of power of power system naturally leads to increase of currents of short circuit at the all levels

of voltage. That is why there is a need in invention of new constructions of electric plants which have heightened electrodynamic stability. And the developer must have an ability to check taken decisions in calculating way on the stage of projecting of such plants and only then an experimental model can be subjected to expensive experiments.

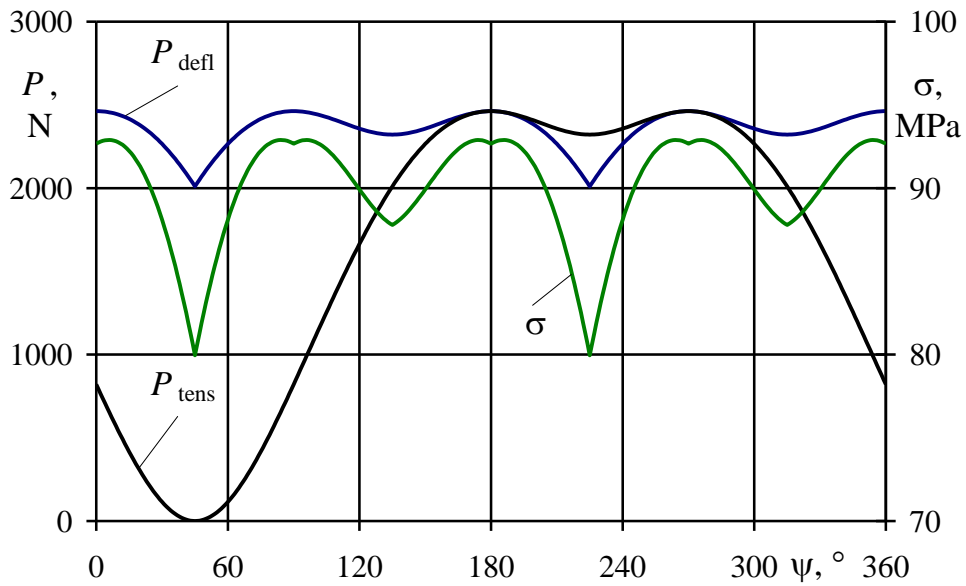
State Standard 30323-95 contains a methodic of calculating of electrodynamic influence of short circuit currents [1]. But adducted methodic doesn't take into account the final length of a tire and availability of taps and also it is useful only for participant event when bus are situated at one line or at the tops of right-angled triangle or equilateral triangle. Collapsible bus of modern dispatch devices are often situated at the tops of an arbitrary triangle.

According to mathematical model [2, 3] and computer program [4] of evident method of calculating of electrodynamic stability of rigid tire of dispatch devices 10 kV, which are developed on the Department of "Power Stations" of Belarusian national technical university, the research of influence of initial orientation of tire constructions, which are situated in horizontal plain and on the tops of triangles where angles are equal 90° and 60° , was run. According to the results of calculating experiment the of deflective ($P_{\max \text{ defl}}$) and tensile ($P_{\max \text{ tens}}$) efforts on tops of insulators and maximal voltage in the tire material (σ_{\max}) dependences from initial angle of orientation of current-carrying part were calculated [5].

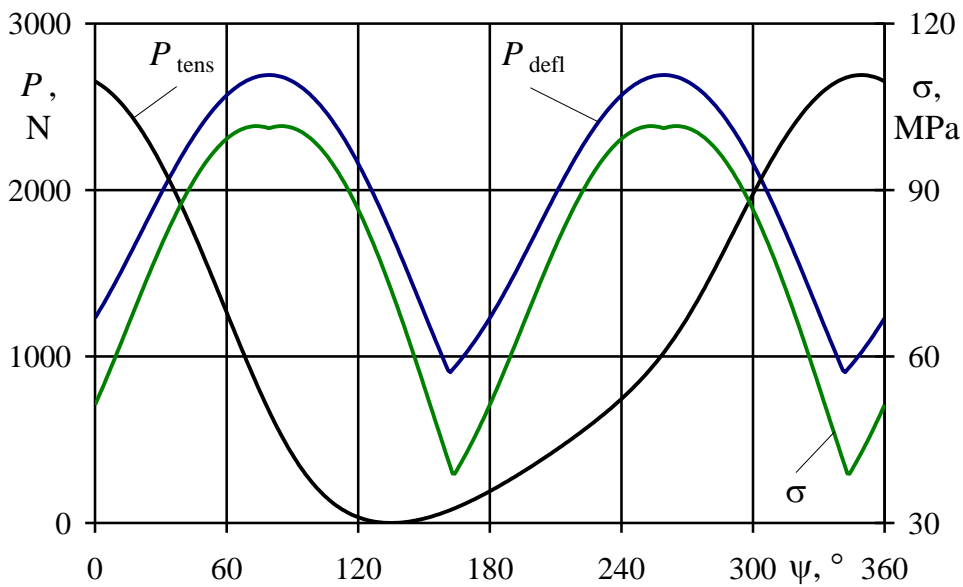
There are results of calculating of parameters of electrodynamic stability when bus are situated at the tops of right-angled and equilateral triangles for aluminium bus with cross-section $100 \times 10 \text{ mm}^2$, with phase spacing 250 mm and periodical current of short circuit 25 kA at fig. 1 and 2.

Analysis of calculated results shows that when bus are situated at the angles of a right-angled triangle the most perspective angle of orientation of tire phase *A* (top of 90° -angle), angle when there are minimal value of researched quantity, is 45° -angle. For phase *B* minimal value of $P_{\max \text{ defl}}$ is when the angle is equal 162° and 342° , for $P_{\max \text{ tens}}$ – 164° and 344° ; but for σ_{\max} – the only orientation is 135° . For phase *B* the optimal angle of tire orientation can be 164° -angle. For phase *C* the optimal angle of tire orientation can be 196° -angle.

When bus are situated at the tops of an equilateral triangle the most perspective angle of orientation of tire phase *A* is 0° -angle. $P_{\max \text{ defl}}$ and σ_{\max} have minimal values but $P_{\max \text{ tens}}$ has maximal value when it is 180° -angle. For phase *B* 210° -angle is optimal; for phase *C* – 150° .



a)



b)

Fig. 1. The busbar are situated at the tops of a right-angled triangle:
a – phase A; b – phase B

When bus are situated horizontally the most perspective angle of orientation of tire phase A is 90° -angle. For phase C – 270° -angle. For phase B – $P_{\max \text{ defl}}$ has minimal value when it is 0° -angle and 180° -angle, for $P_{\max \text{ tens}}$ and σ_{\max} – when it is 90° -angle and 270° -angle. The optimal angle of tire orientation is when the angle is equal 45° , 135° , 225° and 315° for phase B. But if remember the fact that insulator works well on pressing and tension then it is more preferably to have angles with minimal values of $P_{\max \text{ tens}}$ – 90° and 270° .

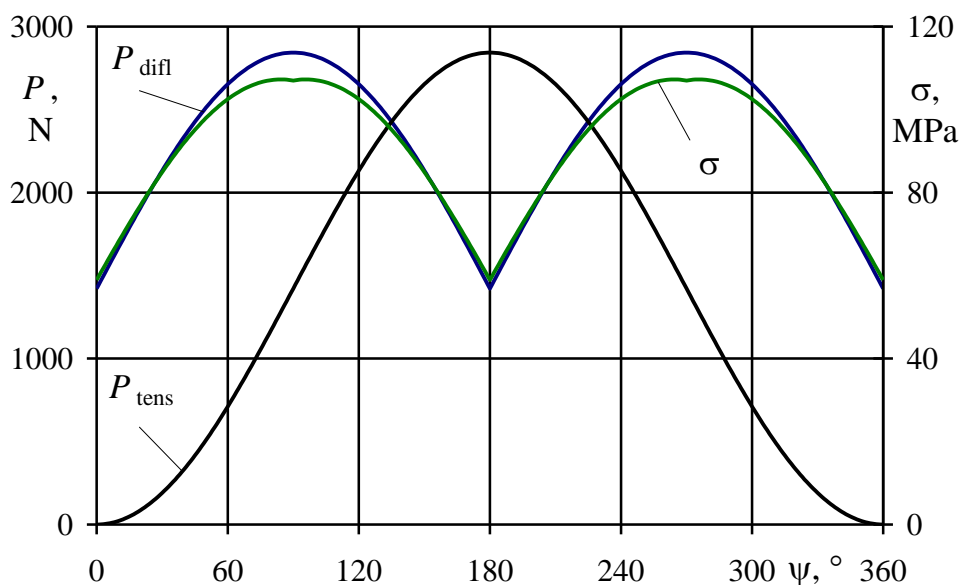


Fig. 2. The busbar are situated at the tops of an equilateral triangle for phase A

During the calculating experiment there are made families of dependences which let the constructor to make decisions operatively about reasonability of planning space orientation current-carrying tire and insulation construction without any calculating actions. Or to determine the most optimal orientation of current-carrying construction if there is no opportunity to direct it in space constructively in the model. Also calculated results let to estimate the opportunity of following exploitation of present current-carrying constructions when the short circuit current has increased on the object.

REFERENCES:

1. ГОСТ 30323-95. Короткие замыкания в электроустановках: Методы расчета электродинамического и термического действия токов короткого замыкания. Введен в действие с 01.03.1999. – 57 с.
2. Шпаковский А.А., Баран А.Г., Климович П.И. Расчет электродинамической стойкости токоведущих конструкций с жесткими произвольно расположенными составными проводниками // Энергия-2014: материалы Девятой международной. научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Иваново, 15–17 апреля 2014 г. В 7 т. Т. 3. Ч. 2. / ФГБОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». – Иваново: ФГБОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина», 2014. – С. 143–147.
3. Klimkovich Pavel, Shpakouski Anton, Baran Anastasiya, Klimkovich Ilya. Mathematical Modeling of Electrodinamic Forces in a Rigid Busbar Switchgear 6–10 kV During Short Circuit // 9th International Conference NEET-2015 / Zakopane, Poland, June 23–26, 2015. – P. 64.
4. Климович П.И., Шпаковский А.А., Баран А.Г. RigidBusbars – компьютерная программа расчета электродинамической стойкости токоведущих конструкций с жесткими произвольно расположенными проводниками // Актуальные вопросы энергетики восточноевропейского

региона: материалы международной конференции, Минск, 21–23 октября 2014 г. / БНТУ. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 129–131.

5. Баран А.Г., Шпаковский А.А., Климкович И.П. Влияние начального положения элементов жесткой ошиновки 10 кВ на параметры электродинамической стойкости // Наука – образованию, производству, экономике: материалы тринадцатой международной научно-технической конференции. В 4-х т. Т. 1 / БНТУ. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 10.

Scientific supervisor: I.I. Sergey, D. Sc., Professor, Professor of Chair of Power Station, Belarusian national technical university.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМ КОТЛОАГРЕГАТОВ ДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.С. Качин, А.А. Асинский, А.А. Абрамовских
Карагандинский государственный технический университет

Постоянный рост цен на энергетические ресурсы, в том числе на углеводородное топливо является одной из основных проблем в современной энергетике [1]. В свою очередь, суровые климатические условия в нашей стране послужили одной из причин широкого развития котельных установок. Они обеспечивают жизненно необходимые условия для проживания и ведения хозяйственной деятельности. Поэтому решение технических задач, связанных с эффективным управлением котельными установками и их модернизацией является одним из важнейших направлений развития науки и техники [2].

Высокий износ коммунальной инфраструктуры – актуальная проблема для большинства регионов России. Работы по модернизации тепловых сетей и котельного оборудования не только позволяют не допустить локального коммунального коллапса, но и априори ведут к повышению энергоэффективности – старое оборудование меняют на новое, обладающее улучшенными характеристиками. Если не проводить модернизацию локальных котельных, то, по оценкам специалистов, можно прийти к коллапсу на рынке коммунальных услуг. Во-первых, многие из них скоро просто выйдут из строя, и ни одна эксплуатирующая организация не возьмется за эксплуатацию старого изношенного оборудования. Во-вторых, многие люди будут вынуждены перейти на печное отопление, то есть вернуться на несколько десятилетий назад. К тому же модернизация котельных подразумевает не только замену оборудования, но и участков тепловых сетей. Все это ведет к сокращению тепловых потерь, и, как следствие, сдерживает рост тарифов [3].

Одной из основных задач, возникающей при эксплуатации котельного агрегата, является обеспечение равенства между производимой и потребляемой энергией. В свою очередь процессы парообразования и передачи энергии в котлоагрегате однозначно связаны с количеством вещества в потоках рабочего тела и теплоносителя. Интенсивность горения, а также экономичность и устойчивость процесса горения топлива зависят от способа подвода и распределения

воздуха между частицами топлива. Условно принято процесс сжигания топлива делить на три стадии: зажигание, горение и дожигание. Эти стадии в основном протекают последовательно во времени, частично накладываются одна на другую. Расчет процесса горения обычно сводится к определению количества воздуха в кубических метрах, необходимого для сгорания единицы массы или объема топлива количества и состава теплового баланса и определению температуры горения [4]. В данный момент технические средства, использованные в данной системе управления, морально и физически устарели и зачастую уже не являются ремонтно-пригодными. Вследствие чего большинство контуров регулирования переведены в ручной режим.

Цель модернизации котлоагрегата ПК-10 ОАО «Южно-Кузбасской ГРЭС» (рис. 1) - устранение недостатков существующей системы и обеспечение снижения расхода топлива на производство пара и теплофикационной воды потребителям. Назначение системы - сбор информации о значениях технологических параметрах и режимах работы, управление режимами работы, а также архивирование значений измеренных параметров и построение графиков их изменений.

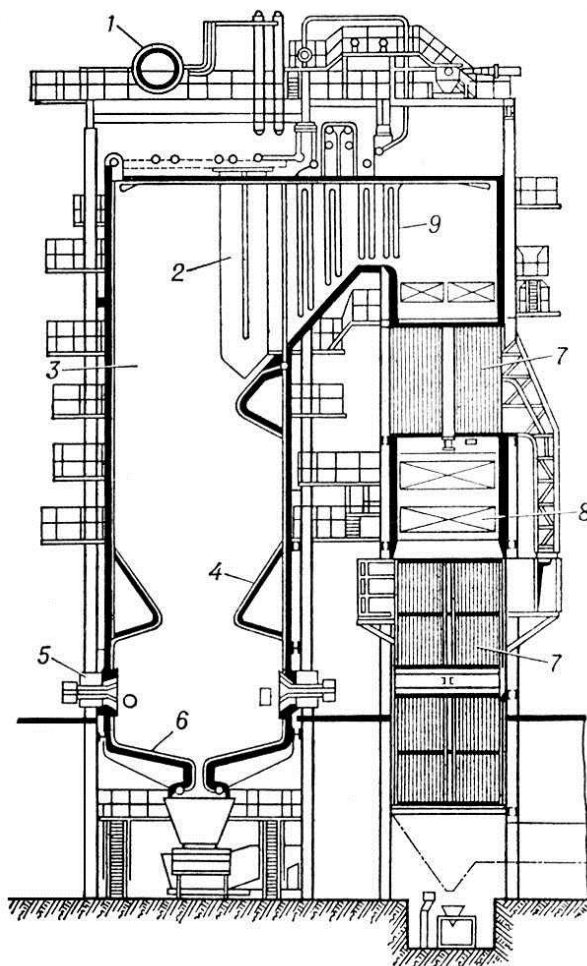


Рис. 1. Котлоагрегат ПК-10 ОАО «Южно-Кузбасской ГРЭС» в разрезе:
 1-барaban, 2-змеевиковый пароперегреватель, 3-топочная камера, 4- водооупускные трубы, 5-горелки, 6-экранные трубы, 7-воздухоподогреватель, 8- водянной экономайзер, 9-перегретый пар [5].

В котлоагрегате ПК-10 процесс горения происходит в топочной камере (3), в которой питательная вода опускается по водоопускным трубам (4), а по экранным трубам (6) поднимается насыщенный пар. Продукты горения, топливо-воздух, поступают в топочную камеру через горелки (5). Котел снабжен пароперегревателем (2) смешанного типа с поперечным омыванием змеевиков газами. Первая по ходу часть пароперегревателя чисто противоточная, вторая – параллельноточная с предвключенной петлей. Пароперегреватель предназначен для преобразования насыщенного пара в перегретый [5]. Водяной экономайзер (8) - змеевиковый, глаткотрубный с горизонтальным расположением змеевиков, с поперечным омыванием газами, кипящего типа, расположение змеевиков шахматное. Водяной экономайзер предназначен для предварительного подогрева питательной воды. Водяной экономайзер состоит из двух блоков. Между блоками водяного экономайзера расположен второй блок воздухоподогревателя (7), который также состоит из двух блоков. Воздухоподогреватель трубчатый, четырех ходовой с продольным омыванием газами. Воздухоподогреватель предназначен для нагрева воздуха, предназначенного для горения.

Модернизация АСУТП котлоагрегата была реализована по иерархической структуре, состоящей из трех уровней автоматизации, по которым распределены задачи контроля входных и выходных сигналов управления, а также визуализация состояния технологического процесса:

1 уровень – «Полевой уровень системы» (базовая автоматика - датчики расхода, давления, температуры, исполнительные механизмы) - должен обеспечивать непосредственное измерение входных и выходных сигналов котлоагрегата, а также управление регулирующими органами и передачу информации на следующий уровень системы.

2 уровень – «Нижний уровень системы» (программируемый контроллер с устройствами ввода/вывода) - должен быть связан с полевым уровнем системы с использованием кабельной продукции.

3 уровень – «Верхний уровень системы» – автоматизированные рабочие места (АРМы) оператора-технолога должны быть реализованы на базе ПК с применением программных средств, включающих SCADA - программы и стандартные интерфейсы.

Для модернизации котлоагрегата были использованы контроллеры фирмы «Овен», т.к. данные контроллеры зарекомендовали себя на Российском рынке, как показатель цена-качество. Датчики расхода, давления, уровня, которые были использованы в проекте, производятся фирмой «Элемер». Данные датчики уже используются в системе контроля технологических параметров котлоагрегата и зарекомендовали себя, как надежные и практичные приборы. Микро – SCADA – программное обеспечение АСУ ТП, реализующее автоматическое управление и контроль технологического процесса, специализирующееся на автоматизации в определенной области [6]. На мониторе компьютерной станции, в виде мнемосхем с анимацией (рис. 2), можно отслеживать работу механизмов котла, основные технологические параметры, а также сообщения предупредительной и аварийной сигнализации.

PROBLEMS AND SOLUTIONS REMOVING NPP FROM SERVICE

A.S. Kachin

Karaganda state technical university

Decommissioning of nuclear power units, as any nuclear or radioactive object, is an essential and inevitable stage of its life cycle. The essence of the decommissioning of NPP is consistent implementation of the complex of administrative and technical measures aimed at the cessation of all activities associated with the functional purpose of the object, and its transformation into ecologically safe state requiring no control by the Supervisory authorities.

Today in the world there are 441 nuclear power plant units with a capacity of over 350 GW, more than 20 nuclear power units under construction, more than 110 nuclear power plant and 380 research reactors for various purposes already stopped or are in the process of preparing for decommissioning [1].

As shown by international practice, the decommissioning requires considerable intellectual and material costs, balanced planning, a special regulatory framework, careful organization, coordination and control of work special infrastructure, develop innovative engineering solutions and highly skilled personnel [2-5].

The operational challenges of nuclear energy is associated with mass ageing of NPP units of the 1st-generation design life is 30 years. These units were created for projects of the 60-ies of the last century by General norms in the absence of a regulatory framework of nuclear energy and operating experience of power reactors. In addition, when creating units with the WWER-440 project In-230 (which was constructed in several Eastern European countries) were allowed substantial deviations from international approaches that caused problems in ensuring their security.

The performance of work under radiation hazardous conditions requires a large amount of research, design, technological and experimental-design works, manufacturing, testing and implementation of devices for deep decontamination and radiation-hardened robotic devices.

The construction of storage facilities and burial sites of radioactive waste of different activity, containers for transportation, and technical equipment for conditioning of radioactive waste, separation of waste – without addressing these issues it is impossible to create technology, and consequently, a holistic concept.

It is estimated that the total cost of decommissioning and dismantling a nuclear power plant will be from 20 to 30 % of the construction of the new comparable [6]. A significant impact on costs have national characteristics – this includes the scope of work required, and the methods of RW management.

The importance of target use of funds at the conclusion of the nuclear power plant has a way of managing the Fund (in the case of the Reserve) - table. 6 [3, 7]. In France, Germany and Russia, the funds are managed by operating organizations, which gives them more flexibility, but does not ensure transparency and could facilitate the use of funds intended for the decommissioning of nuclear power plants for other purposes. For example, in France the Fund was used for debt repayment and investment in new projects in Russia on the extension of life. In the Czech Republic,

Finland, Hungary, Italy, Lithuania, Netherlands, Slovakia, Slovenia, Spain and Sweden, the funds are not in control of operating organizations of NPPs. This enables greater transparency and better guarantees for the proper expenditure of Fund [3, 7].

Based on international experience later, the IAEA has developed a document on the Economics of decommissioning of VVER-440 reactors. In an international project participated by all countries operating this type of reactors. Cost estimation was conducted based on unified methodology of the IAEA and the nuclear energy Agency of the OECD. Currently, this report is the most comprehensive and detailed document on the problem [8].

According to the ESP, 2010 and 2015 estimated costs of safe decommissioning of three nuclear power plants has increased by 40%, and are today 5.7 billion euros. And this amount is at least double when you consider the costs associated with extraction, processing, transportation and disposal of used reactor fuel.

According to the European Commission, of the 91 plugged in Europe nuclear reactor only three today totally dismantled. Others are pending allocation of funds for the ultimate decommissioning.

In Finland at great depths for 40 years is under construction is Europe's first underground storage of nuclear waste, and it will be ready no earlier than 2020. Auditors MSB note that none of the countries in which it is dismantling nuclear power plants, does not have access to the repository. According to the internal report cap, leaked to Reuters, the EU is lacking more than 118 billion euros for the planned dismantling of nuclear power plants.

Conclusion

In the world implemented national and international programmes for decommissioning of NPP units. Work on removing NPP from service are funded from different sources. Different and the use of these funds. In some countries there are options for centralized funds, most of which are based on mandatory contributions from operators and controlled by the state. In others, for example, in the UK, public funds are not available, for commercial nuclear power plants established by private funds. Another mechanism for full financing by the state.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Муратов О.Э., Тихонов М.Н. Снятие АЭС с эксплуатации: проблемы и пути решения. PROATOM. Электронный ресурс: URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1198&mode=flat&order=1&thold=0>;
2. Полуэктова Г.Б., Ковальчук О.В., Круглов А.К. Снятие АЭС с эксплуатации // Атомная техника за рубежом, 1990, № 8, с. 3-8.
3. Бодров О., Муратов О., Попова Л. и др. Концепция вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС, выработавших проектный ресурс: Предложение общественных экологических организаций. – СПб., 2007, - 32 с.3. Кремнев В.А., Елин В.А., Гаврилов С.Д. Концепция прекращения эксплуатации АЭС в СССР и ряде стран – членов СЭВ // Атомная энергия, 1990, т. 68, вып. 5, с. 371-373.

4. Былкин Б.К., Савченко В.А. Концептуальные аспекты снятия ядерных установок в России // Теплотехника, 1996, № 11, с. 45-48.
5. Концепция вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов, инв. № 04-01281. Утв. Федеральным агентством по атомной энергии 04.02.2005 г.
6. Фатеев В., Бауэр Х., Раболд Х. Некоторые вопросы, связанные с окончанием расчетного срока службы АЭС. – В сб.: Пути сокращения сроков и совершенствования методов строительства, монтажа и освоения мощности, а также снижения затрат при сооружении АЭС с реакторами ВВЭР. – Будапешт, 1979, с. 252.
7. Кузнецов В. Чему учит чужой опыт? // Мировая энергетика, 2005, № 5, с. 97-98.
8. Nuclear Power Reactors in the World // IAEA issue 2. - Vienna, 2002, p. 26.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И РАДИОИЗОТОПНЫХ ТЕРМОПРЕОБРАЗУЮЩИХ ГЕНЕРАТОРОВ В КОСМОСЕ

С.А. Майкова, В.Ю. Борисов
Томский политехнический университет
ЭНИН. АТЭС, группа 5032

История развития ядерной энергетики берет свое начало еще с прошлого века и продолжается до сих пор. Сначала энергию деления атомного ядра люди использовали в военных целях, а именно для создания атомной бомбы. Затем были созданы экспериментальные, а далее и промышленные ядерные реакторы, с помощью которых получают тепло и свет. Однако область применения ядерных энергетических установок (ЯЭУ) не ограничивается земной поверхностью.

В 60-е годы прошлого столетия началась разработка ядерных энергетических установок для космических летательных аппаратов. В то время всего две страны активно занимались разработкой ядерных реакторов для использования в космосе: Россия (на тот момент СССР) и США. На данный момент продолжается тенденция использования ЯЭУ в космосе. Кроме того, помимо России и США, разработкой ядерных реакторов для космических аппаратов стали заниматься и ряд других стран, что повлекло за собой совместное сотрудничество некоторых стран.

Существует два способа генерации электроэнергии с использованием ядерной энергии:

- С использованием ядерных реакторов;
- С использованием радиоизотопных электрических генераторов.

Ранние разработки

Термоэлектрический реактор-преобразователь «Ромашка»

СССР стала первой страной, которая начала разрабатывать космические ядерные энергетические установки. Советский термоэлектрический реактор-преобразователь «Ромашка» (рис.1) был впервые запущен в Институте атомной энергии («Курчатовский институт») 14 августа 1964 г. Это первая в мире установка, в которой тепловая энергия, выделившаяся в результате ядерной реакции, преобразовывалась непосредственно в электрическую. Реакторная установка работала на нейтронах с энергией больше 0,1 МэВ (быстрые нейтроны) и имел тепловую мощность 40кВт. Термоэлектрический преобразователь выполненный из кремний-германиевых полупроводниковых элементов выдавал мощность до 800 Вт. В качестве топлива использовался карбид урана, максимальная температура которого в активной зоне составляла 1800°C. [1]

Особенностью таких установок является то, что в реакторе отсутствует теплоноситель, а отвод тепла из активной зоны (АЗ) осуществляется путем теплопроводности материалов АЗ и бериллиевого отражателя. [2]

SNAP-10A (System of Nuclear Auxiliary Power)

Первым в мире ядерным реактором, который был применен на космическом аппарате, стал американский SNAP-10A (рис.2). Реакторная установка была разработана компанией Boeing по заказу ВВС и комиссией по атомной энергетике США. Запуск состоялся 3 апреля 1965 г. Реактор работал на тепловых нейтронах, АЗ которого состояла из твэлов со смесью металлического урана 235 с обогащением 93% и гидрида циркония (замедлитель). Тепловая мощность которого состояла 40 кВт, в качестве теплоносителя использовался жидкий металл. Тепловая мощность нагревала жидкометаллический теплоноситель до температуры 475-540°C, затем тепло сбрасывалось в полупроводниковый преобразователь, который выдавал на выходе электрическую энергию до 550 Вт. [1]

В отличие от вышеперечисленных ядерных установок, Кассини (рис.3) – целая космическая станция, выполняющая исследование Сатурна. Запуск состоялся 15 октября 1997 г.

Так как расстояние между Солнцем и Сатурном велико, невозможно использовать солнечный свет в качестве источника энергии. Поэтому энергия на борту космической станции вырабатывается за счет радиоизотопного электрического генератора, работающего на оксиде плутония-238. В результате генератор выдавал мощность порядка 628 Вт. [3]

Современные разработки

«Новые горизонты»-

Автоматическая межпланетная станция НАСА, которая предназначена для изучения Плутония. Запуск состоялся 19 января 2006 г. (рис.4)

В качестве источника энергии используется радиоизотопный электрический генератор, работающий на оксиде плутония-238. Вырабатываемая электрическая мощность равна 200 Вт. [4]

Ядерная энергетическая установка SAFE-300-ТЭП

SAFE-300-ТЭП (рис.5) предназначена для эксплуатации в составе лунной базы в качестве основного источника энергоснабжения. Ее основной отличительной особенностью является использование реактора типа SAFE-300 в соче-

тании с теплотрубной (ТТ) системой теплоотвода из активной зоны и низкотемпературным термоэмиссионным преобразователем (ТЭП), размещенным в зоне конденсации ТТ.

Реактор SAFE-300 работает на быстрых нейтронах, в котором при сгорании топлива – урана-235 с обогащением 97%- вырабатывается тепловая мощность, примерно равная 300 кВт. Выходная электрическая мощность составляет 30 кВт. [6]

Сравнение

Существенные отличия между этими способами заключаются в том, что в ядерных реакторах источником энергии является цепная реакция деления, происходящая в активной зоне реактора, с последующей передачей тепла на преобразователи; в то время как радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЕГ) используют энергию естественного распада радиоактивных изотопов, после чего она преобразуется в электроэнергию с помощью термоэлектродгенератора. [5] В отличие от ядерных реакторов, РИТЕГ имеет сравнительно маленькие размеры и не требуют обслуживания на протяжении длительного периода. Это связано с отсутствием движущихся частиц. При всех своих плюсах и относительной безопасности у РИТЕГ существует и недостаток- выходная мощность не велика и достигает значений в несколько сот ватт, невысокий КПД.

Как можно заметить история создания ядерных энергетических установок для использования в космосе началась еще в прошлом веке. Первым шагом стал вывод космических аппаратов с ЯЭУ и РИТЕГ на околоземную орбиту. Сейчас же человек ставит для себя более крупные задачи- исследование отдаленных уголков нашей галактики, а даже выход за ее пределы. Как показывает практика одной солнечной энергии недостаточно, необходимы более мощные источники, которые смогут обеспечивать энергией длительное время. Выражая свое мнение, хочу сказать, что по опыту прошлых лет для подобных целей возможно использование как ядерных энергетических установок, так и радиоизотопных термоэлектрических генераторов, но что именно будет иметь большее преимущество, покажет только время.

ЛИТЕРАТУРА:

1. "ПРОАтом" [Электронный ресурс]/ Информационное агентство- Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=2740>, свободный
2. Энциклопедия по машиностроению XXL [Электронный ресурс]/ Оборудование, материаловедение, механика и ...- Режим доступа: <http://mash-xxl.info/info/770180/>, свободный
3. Википедия [Электронный ресурс]/Свободная энциклопедия- Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B)

- 8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82), свободный
4. Википедия [Электронный ресурс]/Свободная энциклопедия- Режим доступа:
[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82)), свободный
 5. Википедия [Электронный ресурс]/Свободная энциклопедия- Режим доступа:
[https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BD%D0%B8_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82)), свободный
 6. Ярыгин В.И., Лазаренко Г.Э., Овчаренко М.К., Пышко А.П., Лазаренко Д.Г. Космическая язу на основе реактора на быстрых нейтронах safe с низкотемпературными термоэмиссионными преобразователями.//
 7. Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2011, N 4, с18-26

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, ст. преподаватель каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

СЕКЦИЯ 12. МОЙ ПЕРВЫЙ ШАГ В НАУКУ (ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ)

ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ

А.А. Гумовская
Лицей при ТПУ

В современном мире большая часть энергии вырабатывается на крупных электростанциях, которые находятся на значительном удалении от потребителей. Поэтому объемы передаваемой энергии по линиям электропередачи (ЛЭП) очень велики, при этом потери весьма значительны и составляют около 8% от всей передаваемой мощности.

Существенно снизить потери при передаче можно за счет регулирования напряжения линий при изменении погодных условий и величин передаваемой мощности. Потери зависят от напряжения неоднозначно, они определяются совокупностью многих факторов, поэтому положительный эффект может дать только регулирование, которое осуществляется по некоторому алгоритму, заданному для конкретной линии.

Цели работы:

8. разработать алгоритм изменения напряжения с учетом изменения погодных условий и величин передаваемой мощности воздушной линии 500 кВ с целью снижения потерь;
9. сконструировать микропроцессорное устройство, реализующее данный алгоритм на физической модели.

Одна из причин, приводящая к значительным потерям в линии – «корона», вид электрического разряда в резко неоднородном электрическом поле, которое существует на поверхности провода линии, находящегося под напряжением U по отношению к земле [1]. Под воздействием электрического поля линии свободные электроны, имеющиеся в воздухе, приобретают дополнительную энергию, ускоряются и выбивают из других атомов вторичные электроны, которые также ускоряются. При некоторой напряженности поля E этот процесс приобретает лавинообразный характер, в результате чего в тонком слое около провода создается ионизированная зона, насыщенная электронами. Внешне это проявляется в виде свечения вдоль провода, которое можно заметить в темное время суток. Процессы ионизации вокруг провода приводят к существенному увеличению потерь энергии в линии. Потери на корону можно уменьшить за счет снижения напряженности электрического поля, которая определяется по формуле

$$E = UC / (2\pi\epsilon_0\epsilon r), \quad (1)$$

где U – напряжение линии, C – емкость провода, r – радиус провода, ϵ , ϵ_0 – диэлектрические постоянные.

Из (1) очевидно, что снизить напряженность E можно увеличивая радиус r и уменьшая U . На практике используют оба пути. В данной работе рассматри-

вается возможность снижения потерь на корону за счет регулирования напряжения в допустимом диапазоне.

Потери на корону найдем по формуле, приведенной в [2]

$$\Delta P_K = \Delta P_0 l \left(6,88 \frac{U}{U_{\text{ном}}} - 5,88 \frac{U^2}{U_{\text{ном}}^2} \right), \quad (2)$$

где l – длина линии; $U_{\text{ном}} = 500$ кВ – номинальное напряжение линии; U – фактическое напряжение; ΔP_0 – удельные потери мощности на корону на линиях 500 кВ при различных видах погоды.

Другая составляющая потерь при передаче – нагрузочные потери ΔP_H , которые изменяются в соответствии с законом Джоуля-Ленца

$$\Delta P_H = I^2 R = (P^2 / U^2) R, \quad (3)$$

где R – активное сопротивление провода; I – ток в линии; P – передаваемая мощность.

Сопротивление провода зависит от тока в проводнике, охлаждения, температуры окружающей среды [2]

$$R = R_0 l (1 + 0,004 (\theta_{\text{пр}} - 20^\circ)),$$

где R_0 – сопротивление проводника при температуре 20°C ,

$\theta_{\text{пр}}$ – температура провода [4].

Причем $\theta_{\text{пр}} = \theta_{\text{окр}} + (I^2 / I_{\text{дд}}^2) \cdot (\theta_{\text{доп}} - \theta_{\text{орасч}})$,

где $\theta_{\text{окр}}$ – фактическая температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$;

$\theta_{\text{доп}} = 90^\circ\text{C}$ – расчетная длительно допустимая температура провода, $^\circ\text{C}$;

$\theta_{\text{орасч}} = +25^\circ\text{C}$ – расчетная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$ (для воздушных линий). $I_{\text{дд}} = 680$ А – длительно допустимый ток в проводнике, А [4],

$I = P / \sqrt{3} U$ – фактический ток, А.

Суммарные потери в линии складываются из нагрузочных потерь ΔP_H и потерь на корону ΔP_K . Причем нагрузочные потери при увеличении напряжения уменьшаются, а потери на корону увеличиваются. Значит, необходимо найти некоторое оптимальное значение напряжения, при котором суммарные потери будут минимальны. В [2, стр. 648] приведена формула, позволяющая рассчитать оптимальное напряжение, соответствующее минимуму потерь активной мощности

$$U_{\text{опт}^*} = \frac{5,88 \Delta P_0 l \pm \sqrt{(5,88 \Delta P_0 l)^2 + 4 \cdot 13,76 \Delta P_0 l \frac{2P^2 R}{U_{\text{ном}}^2}}}{2 \cdot 13,76 \Delta P_0 l}. \quad (4)$$

Длина линии принята равной $l = 300$ км. Линия выполнена сталеалюминевым проводом АС 300/66, имеющем удельное активное сопротивление $R_0 = 0,10226$ Ом/км.

Согласно правилам эксплуатации изменение напряжения в пределах $\pm 5\%$ от 500 кВ не нарушает нормального режима работы потребителей. Для линии 500 кВ минимальное допустимое значение напряжения равно 475 кВ, максимальное – 525 кВ.

Потери мощности были определены при трех значениях передаваемой мощности, соответствующих трем характерным режимам:

$P = 450$ МВт – слабо нагруженная линия,
 $P = 900$ МВт – линия работает в номинальном режиме,
 $P = 1350$ МВт – линия работает в тяжелом режиме.

По рекомендациям, изложенным в [2], все многообразие погодных условий разбито на 4 группы с соответствующими удельными потерями мощности на корону: хорошая с влажностью менее 90% ($\Delta P_0 = 2,4$ кВт/км), сухой снег ($\Delta P_0 = 9,1$ кВт/км), влажная ($\Delta P_0 = 30,2$ кВт/км), изморозь ($\Delta P_0 = 79,2$ кВт/км).

На рис. 1 представлены зависимости потерь мощности от напряжения для слабонагруженной линии при температуре 20 градусов.

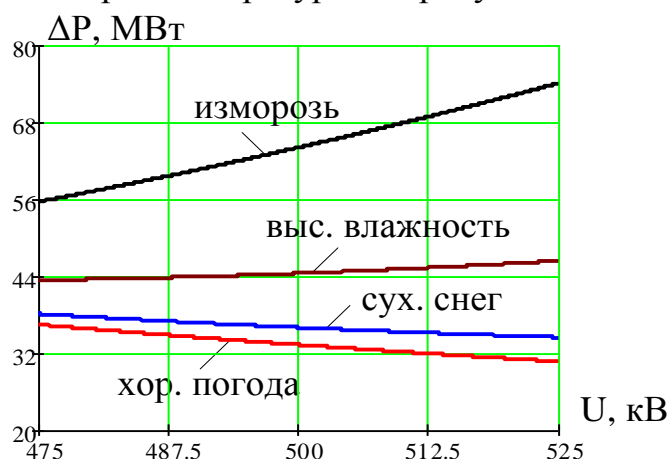


Рис. 1. Зависимости потерь мощности от напряжения

Согласно расчетам, для линии при хорошей погоде для всех уровней передаваемой мощности целесообразно поддерживать самое высокое напряжение в заданном диапазоне – 525 кВ. Когда идет сухой снег или на улице большая влажность при наименьшей передаваемой мощности 450 МВт минимум потерь обеспечивается при напряжении 475 кВ, при увеличении передаваемой мощности до 900 МВт и выше лучшему режиму соответствует напряжение 525 кВ. В случае изморози при любой передаваемой мощности целесообразно поддерживать самое низкое напряжение 475 кВ.

В резко континентальном климате Томской области температура окружающей среды может меняться в течение суток на 10–20 °С. Разумеется, это не означает, что при изменении температуры на 1–2 °С необходимо изменять режим по напряжению. В данной работе были приняты следующие граничные условия. Если фактическое напряжение отличается от оптимального, рассчитанного по (4), более чем на 5%, то устройство выдает сообщение о желательном изменении напряжения.

Возникает естественный вопрос, как на практике будет реализовываться разработанный алгоритм? На данный момент существуют технические устройства, которые позволяют изменять напряжение плавно, по заданному алгоритму, например, управляемый шунтирующий реактор (УШР). Однако нужный уровень напряжения определяется не только из условия минимизации потерь. Решение этого важного вопроса должен принимать дежурный диспетчер, который владеет всей информацией о текущем режиме.

На основании описанного алгоритма было разработано устройство с применением микроконтроллера STM32. В качестве входных сигналов используются аналоговые сигналы, поступающие от датчика температуры и датчика влажности. Режим нагрузки задается. Устройство рассчитывает оптимальное напряжение по (5) и выдает сообщение для диспетчера.

Расчеты показали, что при учете погодных условия при выборе режима по напряжению в рассматриваемой линии можно снизить потери примерно на 10 МВт в год. Общая протяженность воздушных линий 500 кВ в энергосистеме Сибири несколько тысяч км. Если грамотно регулировать напряжение на всех линиях 500 кВ в зависимости от погодных условий и величины перетока мощности, то можно существенно снизить потери в линиях.

Эксплуатация ЛЭП высокого напряжения связана с большими материальными затратами и поэтому важно, чтобы эти затраты были использованы с максимальной эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 488 с.
2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – Ростов-н/Д: Феникс, 2006. – 720 с.
3. Неклепаев Б.Н. и др. Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
4. Системы электроснабжения, курс лекций, Лыков Ю.Ф. <http://home.samgtu.ru/~epp/Lekcii.SES/1.8.htm> дата обращения 02.02.2016.

Научный руководитель: В.В. Шестакова, к.т.н., доцент кафедры ЭЭС ЭНИН ТПУ.

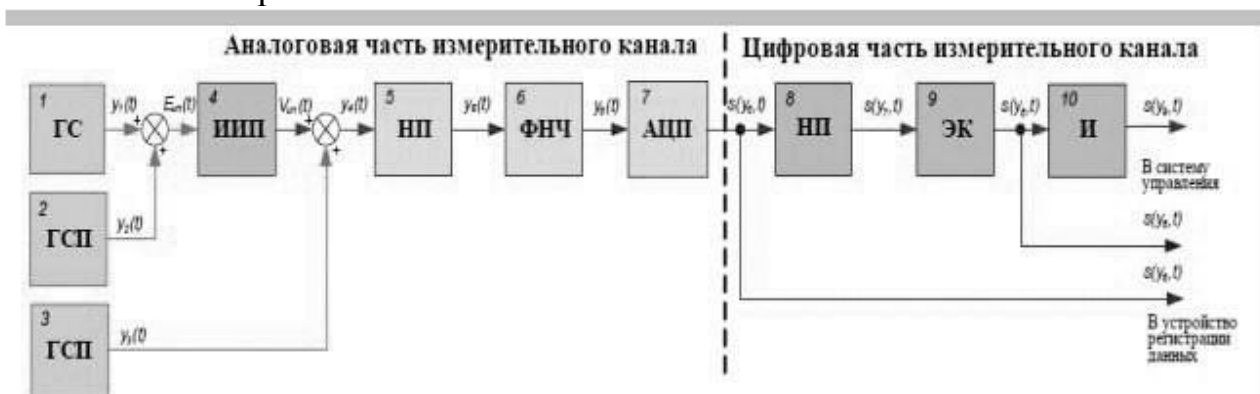
АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ИНДУКЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКАХ ТИПА ТОКАМАК

А.И. Чухонастова
Лицей при ТПУ

Современные методы построения измерительных систем не исчерпывают возможности своего применения на экспериментальных установках. Они могут применяться для построения систем сбора данных с физических диагностик, для которых требования к точности, помехоустойчивости и скорости передачи данных не такие жесткие, как для систем измерения электромагнитных параметров (СМИ).

В связи с этим, целью проекта является исследование алгоритмов обработки сигналов, измерение и реконструкция параметров магнитного поля.

Система автоматизации научных экспериментов электрофизической установки (ЭФУ) по количеству реализуемых функции управления и контроля технологических параметров, составу и технологичности используемой аппаратуры является сложным программно-техническим комплексом. Поиск неисправностей функционирования и настройка такого комплекса на заданные параметры сценария эксперимента оператором представляет собой трудоемкий и медленный процесс, при этом человеческий фактор в данном процессе играет особую негативную роль. Ввиду этих причин СМИ должна функционировать в автоматическом режиме.



1- генератор сигнала; 2, 3 – генератор сигнала помехи; 4- измерительный преобразователь; 5- нормирующий преобразователь; 6-аналоговый фильтр нижних частот; 7- аналого-цифровой преобразователь; 8- нормирующий преобразователь; 9- элемент частотной коррекции; 10 –интегратор, $y_1(t)$ – идеальный аналоговый сигнал характеризующий скорость изменения потока магнитного поля ($d\Phi/dt$); $y_2(t)$ – аналоговый сигнал помехи; $E_m(t)$ – реальный сигнал; $V_m(t)$ – реальный сигнала с датчика ЭМД; $s(y_6, t)$ – реальный сигнал после аналого-цифрового преобразования; $s(y_7, t)$ – цифровой сигнал, характеризующий магнитный поток (Φ); $s(y_8, t)$ – цифровой сигнал характеризующий скорость изменения потока магнитного поля ($d\Phi/dt$); $s(y_9, t)$ – необрабатываемый цифровой сигнал (код АЦП).

Рис. 1. Модель измерительного канала.

Датчики ЭМД, исходя из своего принципа действия, чувствительны не только к магнитным полям, формируемым плазмой, но также к полям, формируемым обмотками электромагнитной системы. Добавочные магнитные потоки, формируемые обмотками управления токамака, рассматриваются как систематические составляющие погрешности измерительных каналов, поскольку токовые диаграммы, формируемые в обмотках, определены на всем интервале эксперимента.

Поскольку магнитный поток, пронизывающий поверхность определяется $\Phi = B \cdot S \cdot \cos(\alpha)$ где, α -угол между вектором магнитной индукции и нормалью к плоскости поверхности, а S -площадь поверхности, то зная габаритные размеры датчиков, текущий ток I в обмотках, координаты расположения датчиков r относительно обмоток управления из сигнала на выходе датчиков ЭМД вычисляется значение систематической составляющей вносимой обмотками управле-

НИЯ.



Рис. 2. Структурная схема стенда для испытания измерительных каналов

По результатам проведенного анализа сценария эксперимента и режимов работы электрофизической установки, а также, учитывая требования, обеспечивающие функциональную эффективность распределенных измерительных систем, был разработан стенд. Его схема представлена на Рис 2. При испытаниях канала передачи данных регистрация данных в ЭВМ длилась 10 с. После завершения эксперимента, полученные данные сохранялись в виде файла и передавались по интерфейсу Ethernet в сервер.

Были получены следующие результаты:

1. объем файла с данными составил 3201 Мбайт;
2. фактическое время, затраченное на сохранение данных в виде файла - 130 с;
3. время передачи файла в сервер - 72 с;
4. Время передачи данных, полученных в одном цикле измерения, во внешние системы управления составило 1.7 мкс.

Наличие ошибок, возникающих при передаче данных, определялось путем обработки файла с полученными данными дополнительной подпрограммой, выполняющей поиск выпадений в счетной последовательности. Эксперимент повторялся 25 раз, однако в результате не было выявлено ни одной из вышеперечисленных ошибок.

В результате модельных исследований измерительного канала, был проведен анализ литературных источников, выбраны методы исследования для достижения цели проекта. В рамках проекта проводился анализ методов исследования комплексных алгоритмов и многоканальных измерительных систем для измерения параметров магнитных полей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Обходский А.В., Меркулов С.В. Применение метода динамической коррекции информационных сигналов с датчиков электромагнитной диагностики

для повышения качества управления параметрами плазмы на физических установках типа ТОКАМАК // XV международная науч. практ. конференция молодых ученых. Современная техника и технологии: сборник трудов, - Томск. 2009. - Т.2. - С.264-266.

Научный руководитель: А.В. Обходский, к.т.н., доцент ФТИ ТПУ.

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО КВАНТОВОГО РЕЖИМА ОБЛУЧЕНИЯ ТЕПЛИЧНОГО САЛАТА

С.Е. Темник, К.В. Смолякова
Лицей при ТПУ

Выращивание сельскохозяйственных культур требует дополнительного искусственного облучения, затраты на которое составляют 25-30% от всей потребляемой теплицей электроэнергии. В связи со вступившим в силу федеральным законом об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности [1], возникает потребность в повышении энергоэффективности тепличных комплексов. Последние исследования, проводимые учеными в данной области науки, доказывают, что для облучения растений целесообразнее использовать светодиодные (СД) технологии, а не самые распространённые на сегодняшний день газоразрядные светильники типа ДНаТ [2-4]. Но, несмотря на стремительное развитие светодиодов, на сегодняшний день еще не сформулированы принципы освещения растений с их помощью. Поэтому одним из способов повышения энергоэффективности является разработка эффективного способа облучения тепличных растений на основе светодиодных технологий.

Целью данной работы является разработка способа облучения и подбор его оптимальных параметров для эффективного выращивания сельскохозяйственных культур.

Существует два основных параметра, которые важно учитывать при облучении растений: спектральный состав (цвет) и плотность фотонного потока (количество квантов взаимодействующих с растением). В данной работе исследовалось влияние плотности фотонного потока разного уровня на процессы роста растений, и как результат выбор самого оптимального из них.

Для эксперимента использовались специализированные лабораторные установки - фитотроны, которые представляют из себя макет интеллектуальной теплицы с возможностью управления параметрами облучения и микроклимата в четырех независимых друг от друга ячейках (рисунок 1).

В качестве объекта для исследований был выбран листовой салат, 27 ростков которого были посажены в каждую из 4 ячеек фитотрона. Параметры микроклимата (влажность, температура, концентрация CO_2) для исключения их влияния были одинаковые в каждой из ячеек. Режимы облучения в каждой ячейке были подобраны таким образом, чтобы спектральный состав был везде одинаковый, но находился в пределах фотосинтетически активной радиации (400-700 нм.), а плотность фотонного потока составляла:

1. ячейка №1 (ФТ 1) – $80 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$;
2. ячейка №2 (ФТ 2) – $160 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$;
3. ячейка №3 (ФТ 3) – $260 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$;
4. ячейка №4 (ФТ 4) – $360 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$;

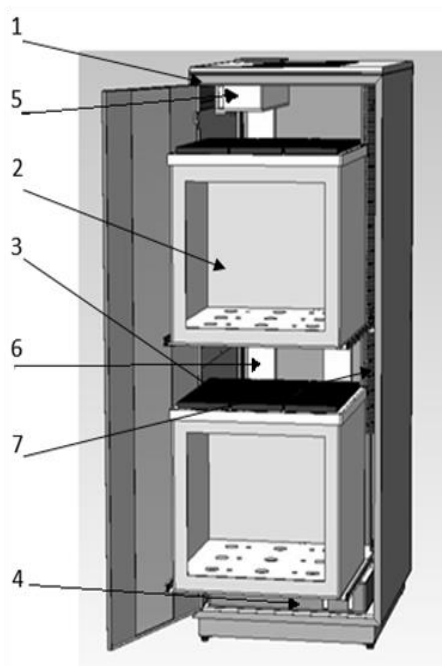


Рис. 1. Макет интеллектуальной теплицы – Фитотрон, где 1 – корпус исследовательской установки, 2 – ячейки фитотронов, 3 светильники с независимой регулировкой режима облучения растений, 4,5 – система полива (нижний и верхний баки); 6 – система микроклимата, 7 – электронная система питания и управления.

Такой подбор параметров исключает влияние всех внешних факторов, что позволит получить объективные результаты. В течение всего периода вегетации (30 дней) проводились наблюдения за ростом салата, измерялись его морфологические параметры: длина и ширина листа и на основе полученных измерений рассчитывалась площадь листовой пластинки. На основании проводимых замеров, был построен график зависимости площади листа салата от его возраста (рисунок 2).

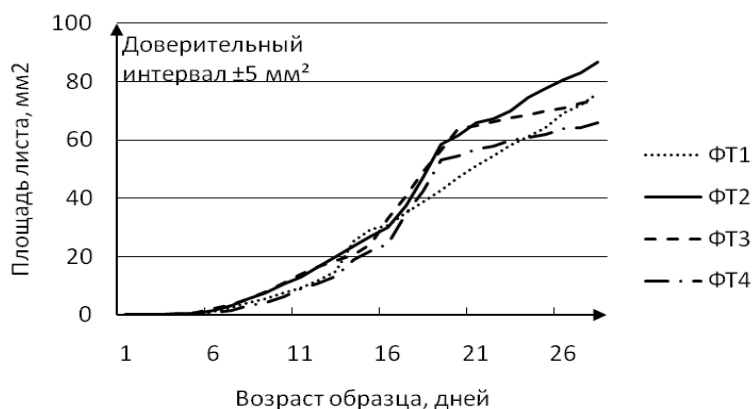


Рис. 2. Зависимость площади листа от его возраста

Проанализировав результаты исследования можно сделать следующие выводы:

1. Первые 7-8 дней во всех ячейках фитотрона салат развивался практически одинаково (разница по площади листа не более 10%). Т.к. основной задачей подбираемого режима облучения является его энергетическая эффективность, целесообразнее для облучения выбрать наименьшее из значений фотонного потока – $80 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$.
2. В период с 8 по 30 день образцы лучше развивались в ячейках №2 и №3. Была выбрана наиболее энергоэффективная из них – ячейка №2 ($160 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$).

На основании всего вышеизложенного можно предложить следующий режим облучения тепличного салата: первые восемь дней создавать уровень плотности фотонного потока – $80 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$, а начиная с 9 дня и до окончания вегетации салата - $160 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$. Учитывая, что уровень плотности фотонного потока в большинстве теплиц составляет $260 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$, а также то, что плотность фотонного потока прямо пропорционально зависит от мощности и типа светового прибора (1 Вт ДНаТ светильника $\approx 1,6 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$, 1 Вт светодиодного светильника $\approx 2,2 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1} / \text{м}^2$), можно сделать вывод, что для облучения тепличного салата целесообразнее использовать светодиодный облучатель с предложенным выше режимом. При его использовании экономия электрической энергии составит 47% по сравнению с традиционными газоразрядными облучателями типа ДНаТ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rg.ru/2009/11/27/energo-dok.html> (дата обращения: 10.09.2016)
2. Фокин А.А. Применение светодиодных светильников в защищенном грунте // Вестник МичГАУ. – 2012. – № 2. – С. 112–116.
3. Яковлев А.Н., Упадышева И.Н., Туранов С.Б., Корепанов В.И. Влияние спектрального состава светодиодного источника света на развитие тепличных образцов салата // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики», Саранск, 28-29 мая 2015г. – Саранск: СВМО, 2015. – [С. 71-78]
4. Тепличное освещение: новые тенденции и подходы. [Электронный ресурс]. URL: <http://ovoschevodstvo.com/journal/browse/201302/article/853/> (дата обращения 11.10.2016).

Научный руководитель: С.Б. Туранов, ассистент ИФВТ ТПУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ СВЕТОВОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ СТЕНКИ ТЕПЛИЦЫ ПРИ ЕЕ ОСВЕЩЕНИИ ДНАТ СВЕТИЛЬНИКАМИ

С.Е. Темник, К.В. Смолякова
Лицей при ТПУ

В связи с вступлением в силу федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» крупные предприятия ищут возможные пути экономии энергоресурсов [1]. Тепличное хозяйство является крупным потребителем электроэнергии. Большинство теплиц изготавливается из прозрачных материалов (стекло, поликарбонат и т.д.). При освещении таких теплиц, значительная часть света, выходит за пределы теплицы, а значит, расходуется впустую. Что приводит к перерасходу электроэнергии и световому загрязнению. Это хорошо видно в ночное время, когда свет от теплицы виден за несколько километров от самой теплицы. В связи с этим, предотвращение потерь светового потока через светопропускающие элементы промышленных теплиц, является одним из способов повышения энергоэффективности тепличных комплексов.

Целью данной работы является моделирование и расчет потерь светового потока через прозрачные элементы конструкции теплиц при ее освещении. А также разработка предложений по предотвращению данных потерь. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить конструкции промышленных теплиц и выбрать для моделирования наиболее распространенные из них;
2. Изучить специализированную светотехническую программу DIALux EVO и разработать в ней 3Д модели выбранных промышленных теплиц;
3. Смоделировать систему освещения выбранных теплиц и рассчитать величину потерь светового потока через стенки теплицы для разных тепличных конструкций;
4. Выявить причину возникновения рассчитанных потерь;
5. Предложить возможные пути предотвращения рассчитанных потерь.

Для решения поставленных задач, в программе DIALux EVO были рассчитаны и построены модели наиболее распространённых промышленных теплиц: плоская, двухскатная и двухскатная мансардная. Так как в основном при строительстве промышленных теплиц используют стекло (коэффициент пропускания 88%), оно было выбрано в качестве материала для прозрачных элементов.

Для моделирования освещения были выбраны газоразрядные светильники ЖСП 20-600-702 Agro мощностью 640 Вт. В данном светильнике используются ДНаТ лампы мощностью 600 Вт, световой поток, которых составляет 90 клм, а световой поток от светильника – 59,5 клм. Для обеспечения средней освещенности 12 клк [2, 3] на рабочей поверхности, понадобилось 380 светильников общей мощностью – 0,24 МВт. Их общий световой поток составил –

22,63 Млм. Система освещения для всех конструкций моделировалась одинаковая, чтобы сравнивать между собой результаты расчетов.

Расчет потерь света через прозрачные элементы теплицы, производился по формуле:

$$\Delta\Phi = 100 \cdot \frac{\Phi_{\text{сн}}}{\Phi_0} \quad (1)$$

где $\Phi_{\text{сн}}$ – это суммарный поток света, прошедший через все стенки теплицы, а Φ_0 – это общий поток света, излучаемый всеми светильниками.

Поток света, прошедший через стенки теплицы рассчитывался по формуле:

$$\Phi_{\text{сн}} = \sum_{i=1}^6 E_i \cdot S_i$$

где E – это средняя освещенность на рассчитываемой поверхности, S – это площадь рассчитываемой поверхности (стенки теплицы), а i – количество рассчитываемых поверхностей (стенок теплицы).

С помощью программы DIALux EVO была получена средняя освещенность на рассчитываемых поверхностях теплицы. Далее, по приведённой выше формуле, рассчитан общий поток света, вышедший за пределы теплицы. На основании полученных данных, была рассчитана величина потерь светового потока через прозрачные элементы теплиц, которая составила:

1. 33 % - для плоской крыши;
2. 30,5 % - для двускатной крыши;
3. 29 % - для двускатной мансардной крыши;

По результатам исследования выдвинуто предположение, что большая часть данных потерь связана с отражением части светового потока от поверхности листьев. Для подтверждения данной теории было проведено сравнение спектра отражения зеленых листьев со спектром излучения ДНаТ светильников (рисунок 2). Спектры отражения листьев были измерены спектрофотометром СФ-256 УВИ согласно методике [4], а спектры излучения ДНаТ светильников измерены спектрофотометром Avaspec 2048. Результаты измерений приведены на рисунке 2. Видно, что максимумы излучения ДНаТ светильника совпадают с максимумами отражения зеленым листом. Т.е. в том диапазоне спектра, где листья больше всего отражают, светильники типа ДНаТ излучают больше всего световой энергии. Это подтверждает выдвинутую теорию о причине потерь светового потока.

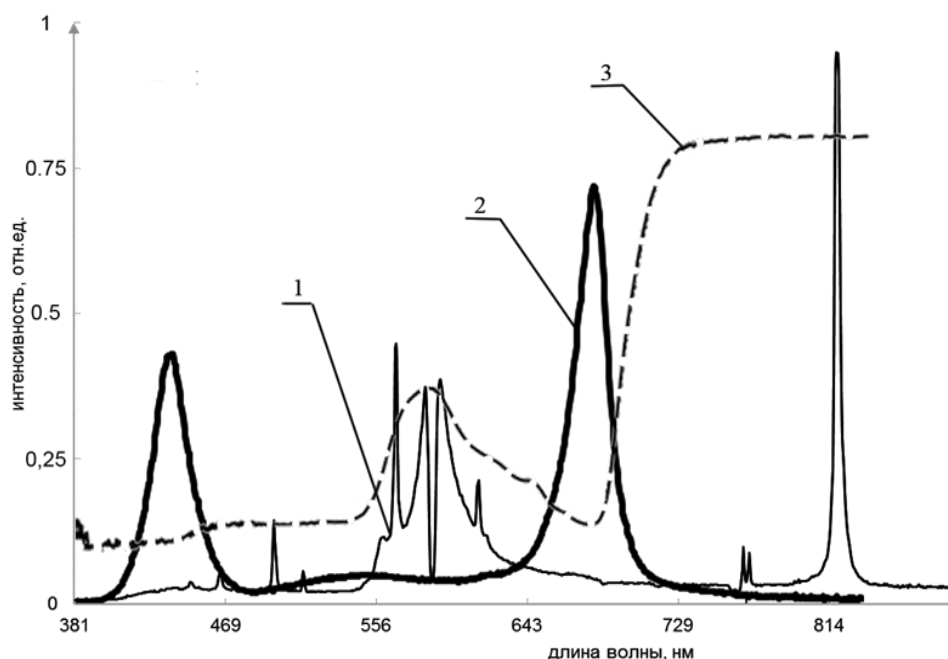


Рис. 2. Сравнение спектральных характеристик СД и ДНаТ светильника со спектром отражения зеленого листа

Таким образом, предотвращение рассчитанных потерь позволит на $\approx 30\%$ снизить потребление электрической энергии, т.к. весь световой поток будет распределяться внутри теплицы и не выйдет за ее пределы. Проанализировав данную проблему можно предложить следующие способы ее решения:

1. Строительство теплиц закрытого типа из непрозрачных материалов;
2. Использование светоотражающих штор при освещении теплицы;
3. Использование светодиодных светильников с таким спектром излучения, чтобы его максимумы совпадали с минимумами отражения зеленых листьев.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rg.ru/2009/11/27/energo-dok.html> (дата обращения: 10.09.2016)
2. Нормы технологического проектирования теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады НТП 10-95 [Электронный ресурс] URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/8/8604/ (дата обращения: 28.02.2016);
3. Естественное и искусственное освещение. СНиП 23-05-95* [Электронный ресурс] URL: http://www.know-house.ru/gost/sp_2013/sp_52.13330.2011.pdf (дата обращения 24.05.2016);

4. Спектрофотометр СФ-256 УВИ. Руководство по эксплуатации Ю-30.67 101 РЭ. 2011.

Научный руководитель: С.Б. Туранов, ассистент ИФВТ ТПУ.

ПОВЫШЕНИЕ КПД РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.П. Бир
Лицей при ТПУ

КПД реактивного двигателя – это безразмерная величина, характеризующая степени совершенства реактивного двигателя как тепловой машины и реактивного движителя. Различают несколько видов КПД газотурбинного двигателя: полный, тепловой, тяговый и трансмиссионный. Тяговый КПД описывает потери на превращение механической энергии в энергию реактивной струи. Трансмиссионный КПД определяется совершенством механической части, которая обеспечивает передачу крутящего момента от турбины к вентилятору и компрессору. Тепловой КПД показывает совершенство двигателя, как тепловой машины. Их произведение дает полный КПД.

Турбореактивный двухконтурный двигатель является сложным устройством, в котором к различным узлам и агрегатам применяются разные технические требования. Самым сложным агрегатом является турбина, так как тепловой КПД определяется именно температурой на входе в турбину, чем она выше, тем выше КПД. К турбине предъявляются следующие требования: вращательная прочность, устойчивость к высоким нагрузкам и температурам, устойчивость к ползучести и окислению, температурный диапазон: 530 - 1300° С. Сейчас используются никелевые сплавы, иногда встречаются монокристаллические никелевые сплавы с защитным покрытием.

В данном разделе будут представлены результаты механических испытаний различных материалов, применяющихся в авиастроении, в частности в двигателестроении. Цели данного исследования: изучить методы определения механических характеристик конструкционных материалов и произвести испытание образцов алюминиевых, титанов сплавов и углепластика на растяжение, определив диаграмму нагружения, предел прочности и предельное удлинение.

Испытание провели на универсальной электромеханической испытательной машине Instron-5582. Образцы зажимались в кленовые захваты и нагружались со скоростью 1 мм/мин перемещением верхней подвижной траверсы. С помощью датчика нагрузки была записана диаграмма нагружения. После разрушения образца был определен предел прочности и предельное удлинение.

Для более детального изучения процесса деформации и разрушения была использована система оптического мониторинга VIC 3D, работающая по принципу корреляции цифровых изображений. Суть данного метода заключается в высокоточном измерении деформации на поверхности исследуемого материала. Для функционирования данного метода образцы были покрыты белой краской, а для освещения образца использован светодиодный источник

РЕЗУЛЬТАТЫ:

Алюминиевый сплав В96 обладает высоким пределом прочности, но низкой допустимой температурой эксплуатации, поэтому для двигателестроения он интересен в качестве материала для различных кронштейнов, силовых элементов, обшивок в холодной зоне двигателя

Титановый сплав ВТ-23 обладает очень высокими механическими характеристиками, в частности пределом прочности, сравнимым с высокопрочными сталями, обладая при этом низкой плотностью (4,54 г/см³). Таким образом удельная прочность этого сплава совместно с высокой допустимой температурой делают его незаменимым для изготовления лопаток вентилятора и компрессора, дисков вентилятора и компрессора, корпуса двигателя, в которых температура не превышает 650° С.

Предел прочности данного углепластика является средним, однако его плотность составляет 1,5 г/см³, что дает ему значения удельной прочности близким к высокопрочным сплавам. Одним из выдающихся характеристик данного материала является очень высокая температура эксплуатации, при таких температурах предел прочности не падает. Все это в совокупности позволяет применять этот материал в «теплых» и «горячих» зонах двигателя. Может выдерживать до 2000 градусов при наличии защитного покрытия.

Вывод:

Изучены принципы работы реактивного двигателя. Установлено, что одним из самых сложных и тяжелонагруженных агрегатов, является турбина, из-за одновременного воздействия высокой температуры, коррозионной среды и больших механических нагрузок. Проведен обзор материалов, применяющихся в производстве серийных ТРД, а также перспективных материалов для двигателей новых поколений. Проведено испытание на прочность образцов металлов и композитов.

Установлено, что композиты, благодаря возможности комбинировать различные армирующие и связующие компоненты, все шире применяются в разных узлах. Так, в двигателях будущего широкое применение найдут композиты на керамической матрице, позволяя существенно поднять рабочие температуры ТРД. То есть решением проблемы повышения КПД по-моему является применение именно таких композитов. Однако данные материалы достаточно сложные в производстве, поэтому внимание инженеров и исследователей направлено на создание коммерчески доступных технологий производства.

Научный руководитель: М.В. Бурков, доцент ИФВТ ТПУ.

РЕГИСТРАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГИПЕРСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИДЕОФИКСАЦИИ

А.Э. Риф
Лицей при ТПУ

Плазма – четвертое состояние вещества, наиболее характерное для Вселенной. Это квазинейтральный газовый ансамбль заряженных частиц, размер которого превышает радиус Дебая.

Огромная часть вещества Вселенной находится именно в состоянии плазмы. Солнце, другие звезды, а также межзвездная среда вследствие высокой температуры состоят, в основном, из полностью ионизированной плазмы. Межзвездная плазма является примером низкотемпературной плазмы. Плазменные объекты окружают нас и в повседневной жизни, например, плазма используется в лампах дневного света или мы можем наблюдать её при электросварке.

Диагностика плазмы имеет достаточно важное значение в практических целях, и в первую очередь в получении управляемой термоядерной реакции. С другой стороны, понимание процессов, протекающих в технологическом объекте, позволяет направленно совершенствовать его рабочие характеристики.

Трудность измерения температуры плазмы заключается в том, что любой прибор, помещенный в среду с температурой в миллионы градусов, должен либо охладить ее, либо сгореть. Следовательно, судить о параметрах плазмы надо на расстоянии, и «термометр» безусловно должен быть бесконтактным.

В наше время существует много различных методов измерения температуры плазмы, большинство из них основаны на оптических явлениях, такие как:

1. Томсоновское рассеяние света [1]

Метод заключается в измерении температуры плазмы по доплеровскому уширению линии упруго рассеянного лазерного излучения. Погрешность измерения не превышает 10%.

2. Лазерно-индуцированная флуоресценция [1]

Метод, состоящий в лазерном возбуждении электронных уровней молекул и регистрации спектра спонтанного излучения. Температура же молекул определяется по больцмановскому распределению интенсивности во вращательной структуре полос излучения. Погрешность измерения $\pm 5\%$.

3. Доплеровское уширение спектральных линий поглощения [1]

Метод основан на регистрации профилей и измерении ширины спектральных линий поглощения света тяжелыми частицами плазмы. Погрешность измерения не более 5%.

4. Лазерная интерферометрия пламён и плазмы [1]

Метод, основанный на связи температуры, плотности, а, следовательно, и показателя преломления газа.

Существующие методы, несмотря на достаточно низкую погрешность в измерениях, имеют свои недостатки, в частности необходимость использования сложных технических решений и последующей математической обработки. А

также такие методы не позволяют измерить температуру в быстропротекающих плазменных процессах.

Одним из таких быстропротекающих плазменных процессов является гиперзвуковая плазменная струя, генерируемая коаксиальным магнитоплазменным ускорителем [2].

Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель [3] относится к области электротехники и электрофизики, а именно к ускорительной технике, и может быть использован для генерирования сверхзвуковых высокоэнтальпийных струй электроразрядной плазмы и получения ультрадисперсных фаз сверхтвердых материалов, оксидов, нитридов, карбидов и боридов (рис.1).

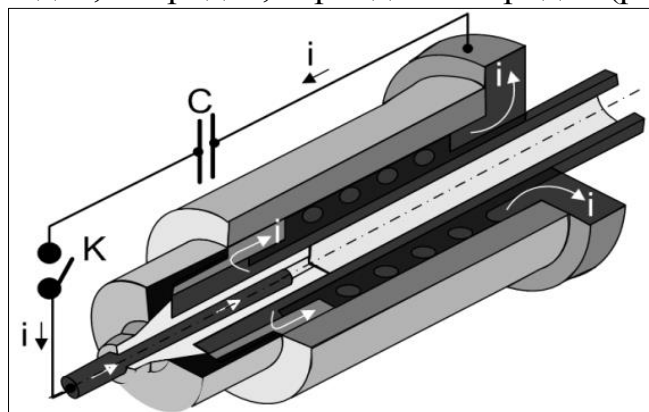


Рис.1. Ускоритель

Для изучения химических и физических явлений, происходящих в ускорителе, нужно знать условия, при которых генерируется плазма. Одним из таких условий является температура. Поэтому в данной работе мы предлагаем методику измерения температуры плазмы, основанную на высокоскоростной видеофиксации явлений.

Суть метода регистрации состоит в сравнении с эталоном и заключается в съемке объектов с известной температурой (эталона) и последующей обработки (построение градуировочной кривой) и оценки температуры плазмы у реального процесса.

В качестве объекта исследования была выбрана гиперзвуковая плазма, генерируемая коаксиальным магнитоплазменным ускорителем и зафиксированная с использованием высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA1.1.

Для работы в качестве «эталона» была выбрана спираль накала лампы накаливания мощностью 100 Вт. Для оценки температуры спирали накала использовался пирометр фирмы Raytek (Германия), с диапазоном регистрации температур от 600 до 3000 °С. Съемка плазмы проводилась с помощью монохромной высокоскоростной камеры Photron SA1.1. с установленным объективом Helios 44-2 в режиме съемки: диафрагма 2.0 и использованием двух светофильтров ND64 и ND32. Использование дополнительных светофильтров обеспечивает регистрацию «не засвеченной» картины истечения плазмы.

Методика оценки температуры плазмы заключается в следующем: при помощи лабораторного автотрансформатора изменяя мощность лампы накаливания (соответственно и интенсивность накала самой спирали), одновременно проводится оценка температуры нити с использованием пирометра, одновре-

менно при этом фиксируются изображения с использованием высокоскоростной камеры. В итоге проведения данной работы нами была получена серия изображений спирали накаливания с разным уровнем интенсивности свечения при известных температурах.

Уровень интенсивности свечения нити накала (в градациях серого) для всех полученных снимков был оценен с использованием свободного программного продукта ImageJ. На снимках для оценки максимального значения свечения нити в градациях серого, через интересующий нас участок, проводилась линия. Используя системную функцию программы Plot Profile, программа автоматически создает массив данных с указанием величины в градациях серого для каждого пикселя (от 0 до 255).

Проведя анализ серии снимков с разным уровнем интенсивности излучения, нами был получен массив данных, обработка которого позволила выявить описывающую функцию – градировочную кривую.

Итоговый анализ фотографии истечения гиперзвуковой плазмы, представлен на рис.3

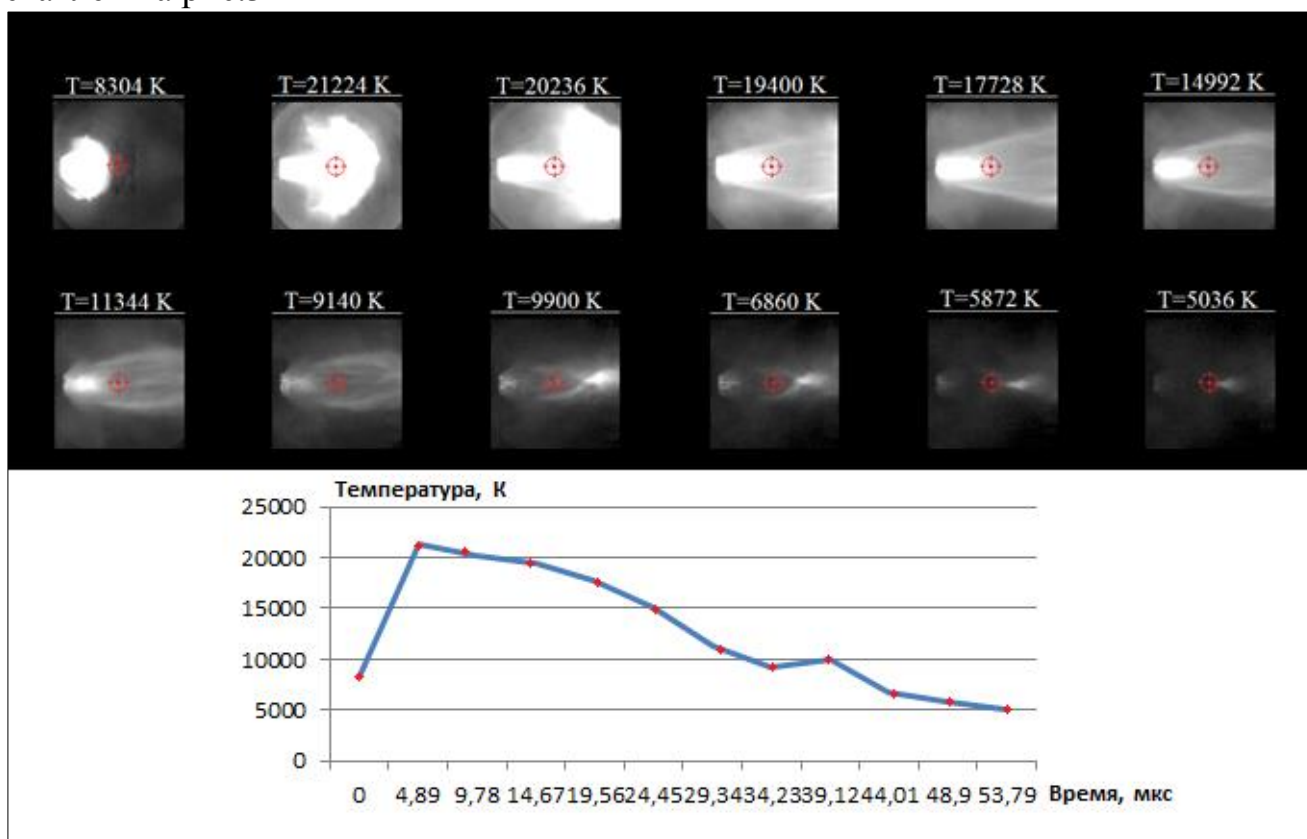


Рис. 2. Динамика изменения температуры плазмы во время работы коаксиального магнитоплазменного ускорителя

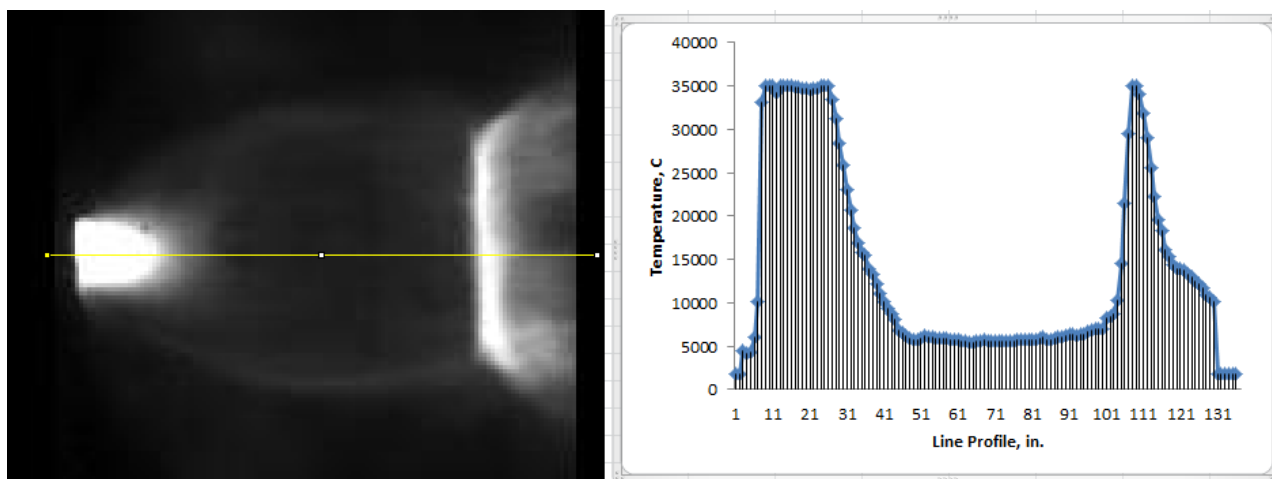


Рис. 3. Итоговый анализ фотограммы истечения плазмы

На основании проведенной работы были выявлены следующие особенности данного метода такого подхода оценки температуры плазмы или иными словами можно сказать – выявлены достоинства и недостатки.

К достоинствам метода стоит отнести следующее: во-первых, это достаточно простая техническая реализация; во-вторых, возможно проведение измерений температуры в полуавтоматическом режиме (реализация пакетной обработки данных).

К недостаткам относится более высокая погрешность измерения (около 20%) относительно других методов, описанных ранее и невозможность оценки максимальной температуры в случае «засвета» фото-/видеосъемки, либо отдельных объектов на неё.

Указанные недостатки являются не существенными и могут быть практически полностью устранены в случае подбора и использования более сильных светофильтров и проведения предварительной калибровки системы на объектах с известной температурой близкой к анализируемой.

Предложенная методика является достаточно универсальной и может быть применена в различных научных и технических сферах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Магунов А. Н. Лазерная термометрия плазмы, газов и конденсированных сред // Фотоника №3, 2010, 43-47.
2. Сивков А.А., Найденов Е.П., Пак А.Я. Динамический синтез ультрадисперсных кристаллических фаз системы С-N. // Сверхтвердые материалы, №5, 2009, с.22-30
3. FindPatent.ru - патентный поиск, 2012-2016.
<http://www.findpatent.ru/patent/243/2431947.html>
4. Курнаев В.А. Плазма – XXI век. Москва, 2008.

Научный руководитель: А.С. Ивашутенко, к.т.н., доцент кафедры ЭПП ЭНИН ТПУ.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

¹К.Д. Иконникова; ²К.В. Иконникова

¹Гимназия №56 г. Томска

²Томский политехнический университет

ЭНИН, ЭПЭО

В сообщении рассматриваются актуальные вопросы использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

На сегодняшний день 86% потребляемой в мире энергии получают из невозобновляемых источников энергии (каменный уголь, бурый уголь, нефть, природный газ). Однако их запасы истощаются, добыча стоит дорого. В сообщении рассмотрены риски и угрозы сохранения экологической чистоты Планеты при использовании традиционных энергоносителей.

Истощение ресурсов заставляет вырабатывать ресурсосберегающую политику. Альтернативными источниками энергии являются ВИЭ: экологически чистые и практически неисчерпаемые источники энергии. Проанализированы мировые тенденции использования ВИЭ: геотермальные источники, солнечная энергия, энергия ветра, топливо из биомасс.

Рассмотрены энергетическая и сырьевая проблемы в России. Выявлено, что в условиях Сибири более рационально и выгодно использовать биоэнергетику. Биоэнергетика – это производство энергии из биологического топлива, которое можно производить в твердом, жидком и газообразном состоянии. Используются растительное и животное сырьё, продукты жизнедеятельности организмов и органические промышленные отходы.

Проанализирован опыт Томской области по использованию биологического топлива в автономных источниках теплоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иконникова К. Д. Нетрадиционная и возобновляемая энергетика / К.Д. Иконникова // «Интеллектуальные энергосистемы»: материалы Международного форума. – Томск: ТПУ. - 2013.–Т. 2 – С. 292.
2. Иконникова К. Д. Биоэнергетика. Биогаз. // «ЭНЕРГОСТАРТ»: материалы Всероссийской молодежной научно-практической школы. Секция 1. Теплоэнергетика [Электронный ресурс]. – Кемерово, - 2016.

Научные руководители: К. В. Иконникова, к.х.н., доцент, доцент кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ, Е. В. Чечина, учитель биологии, Гимназия № 56.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНТЕЗ-ГАЗА В СИСТЕМАХ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПУТЕМ ГАЗИФИКАЦИИ НИЗКОСОРТНОГО ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

А.В. Губин
Лицей при ТПУ

Проект направлен на решение актуальнейшей мировой проблемы повышения экологичности и ресурсоэффективности технологий производства энергии при современном топливном балансе (росте доли потребления твердых топлив).

Цели работы:

- отработка рецептуры приготовления водоугольного топлива (ВУТ) на основе отходов угольной промышленности и низкосортного бурого угля;
- экспериментальное исследование процесса газификации и получаемого состава синтез-газа, с помощью современного научно-аналитического оборудования при различной скорости нагрева ВУТ;
- разработка схемы использования синтез-газа, получаемого из низкосортного твердого топлива;

АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Удовлетворение возрастающих энергопотребностей человечества на современном этапе возможно лишь с использованием разных видов энергоисточников (ядерная энергетика, традиционная углеродная энергетика, возобновляемые источники энергии).

На сегодняшний день преобладающее число энергетических предприятий в качестве исходного производственного сырья применяют органические и синтетические топлива [1]. Согласно существующей тенденции развития традиционной энергетики [2], ведущая роль в топливно-энергетическом балансе отдается углю [3].

В свою очередь рост потребления угля приводит к ухудшению экологии - значительными выбросами оксидов азота, углерода, серы и золы [4], [5]. При переработке угля образуются отходы, также представляющие опасность для окружающей среды. К настоящему времени в мире накоплено более 1 млрд. тонн. Одним из современных решений является получение синтез-газа путем газификации ВУТ и его дальнейшее использования в энергоустановках [6]. Перевод низкосортного угля и отходов в ВУТ для получения синтез-газа позволит улучшить экологическую обстановку и повысить экономический эффект.

ВУТ - композиционное жидкое топливо, содержащее смесь угольной пыли и воды с добавками поверхностно-активных веществ или без таковых [7].

Основные достоинства ВУТ - снижение эксплуатационных затрат на 20-30% [8], уменьшение себестоимости вырабатываемой тепловой энергии в 1,3 – 4 раза. Используемая нами активация ВУТ позволяет уменьшить выбросы в атмосферу оксидов серы (на 20%), оксидов азота (на 30%).

Однако, газификация имеет до конца не решенные проблемы, связанные с механизмом процесса [8], от которого зависит качество получаемого газа и его эффективное сжигание. Это вызывает необходимость получения новых методов приготовления ВУТ, фундаментальных исследований ВУТ на научно-аналитическом оборудовании, чему и посвящен мой проект. На основе изученного опыта [9], [10] предложена усовершенствованная технологическая схема использования получаемого синтез-газа для энергоснабжения автономных объектов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Экспериментальные исследования ВУТ проводились с помощью метода синхронного термического анализа на оборудовании типа Netzsch STA 449 F3 и приставки в виде квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 D Aeolos для анализа выделяющегося синтез-газа.

В качестве исходных образцов были использованы шламы каменных углей марок К и СС Кузбасских обогатительных фабрик и бурый уголь марки 2Б месторождений Красноярского края. Согласно элементному составу образцов, определенному с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6000 выявлено, что наибольшим значением теплотворной способности обладают как раз угольные шламы марок. Это прежде всего связано с большим содержанием углерода в химическом составе исходного топлива.

С помощью лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 был проведен гранулометрический анализ, показавший, что преобладающий (90%) размер составляет 100-140 мкм. Такая тонкость помола свидетельствует о том, что приготовление ВУТ из данного вида образцов не потребует существенных временных и энергетических затрат.

Для каждого вида угля были приготовлены пробы ВУТ с помощью валковой мельницы, керамического барабана и мелющих тел того же материала цилиндрической формы. После загрузки, барабан ставился на валки с последующей выдержкой помола в течение двух часов, что обеспечило качественное смешение и осуществление дополнительного размола твердой части.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основными компонентами получаемого синтез-газа являются CO, CO₂, CH₄, H₂, а так же пары воды, примеси оксидов серы, азота, сероводород.

В результате экспериментов с различными температурами нагрева в процессе газификации ВУТ, были получены составы синтез-газа, позволяющие сделать вывод о том, что с увеличением скорости нагрева снижается выход CO₂, что благоприятно сказывается на теплоте сгорания синтез-газа. При увеличении интенсивности нагрева образцов углей наблюдается снижение концентрации H₂ и CH₄, но при этом увеличивается концентрация CO. Это вызвано более высокой скоростью реакции окисления CH₄ и H₂ с выделяющейся влагой и кислородом углей в процессе их нагрева [10]. Количественный состав синтез-газа при увеличении скорости нагрева имеет линейный характер изменения содержания компонентов. По количественному составу синтез-газа расчетным путем определена теплота сгорания [11]. Установлено, что скорость нагрева

образцов существенно влияет на состав получаемого синтез-газа и его теплоту сгорания.

Полученные значения теплотворных способностей позволяют сделать вывод о том, что исследуемые ВУТ, могут быть использованы в энергоустановках малой мощности. При этом полученный синтез-газ из отходов угольной промышленности имеет более высокие показатели качества по теплотворной способности и химическим свойствам нежели низкосортный бурый уголь марки, что дает дополнительную привлекательность к утилизации данного вида отходов с экономической и экологической стороны с использованием предлагаемой технологической схемы. Полученные при исследованиях зависимости позволят настроить оптимальный энергоэффективный и экологичный режим газификации при различных видах исходного твердого топлива.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гаврилов В.П. Состояние ресурсной базы нефтедобычи в России и перспективы ее наращивания // Геология нефти и газа, 2012, №5. – С. 30-38.
2. Филиппов С.П. и др. Газификация угля в энергетике: современное состояние и тренды: Аналитический обзор // Фонд «Энергия без границ», 2012. – С. – 39-42.
3. Дубинин А.М., Маврин С.П. Трансформация углей в электрическую и тепловую энергию // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 30.
4. Воробьев Б.М. Уголь или газ - энергетическая альтернатива XXI века // Вестник Российской академии наук, 2011, Том 11. №1. – С. 65-69.
5. Чуханов З.В. Некоторые проблемы топлива и энергетики // М. АН СССР. 1961.
6. Архипов В.А., Сидор А.М., Сурков В.Г. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органоводоугольных топлив // «Технічнатеплофізика та промисловатеплоенергетика». Випуск 5, 2013
7. Пинчук В.А., Шарабура Т.А., Шевченко Г.Л. Исследование и разработка режимов газификации водоугольного топлива // Современная наука, 2010, №3 (5).
8. Долинский А.А., Халатов А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе // Пром. Теплотехн., 2007, т. 29, №5.
9. Higman C. Gasification / Higman C. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – 391 с.
10. Технологии «Shell» для газификации угля. Альтернативные топлива, энергетика [Электронный ресурс] // http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=6429

11.ГОСТ 31369-2008 Вычисление теплоты сгорания, плотности, отн. плотности и числа Воббе на основе компонентного состава // Москва, Стандартиформ 2009.

Научный руководитель: К.Б. Ларионов, ассистент каф. АТЭС ЭНИН ТПУ.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИИ ПРИНЦИПА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ

Р. Яруллов
Лицей при ТПУ

В настоящее время почти все электростанции и подстанции России работают в составе энергообъединений. Основу любого энергообъединения составляют мощные электростанции (тепловые, атомные станции, гидроэлектростанции), связанные между собою воздушными линиями напряжением 500 или 750 кВ. Параллельная работа электростанций позволяет уменьшить себестоимость производства электрической энергии и повысить надежность электроснабжения.

С другой стороны, при объединении большого количества электростанций энергосистема становится более сложной, передаваемые по линиям мощности растут, увеличивается вероятность развития крупных системных аварий. В Америке такие системные аварии получили название «Black-Out». Системной называют аварию, которая приводит к вынужденной остановке части или всех электростанций энергообъединения. Известны случаи, когда системная авария начиналась с перегрузки нескольких линий.

В данной работе рассмотрена одна из возможных причин перегрузки линий электропередачи и разработано устройство, для демонстрации известного принципа регулирования потоков мощностей в разветвленных сетях.

Современные разветвленные электрические сети могут иметь в своем составе замкнутые кольцевые структуры. Один из возможных примеров такой структуры представлен на рис. 1.

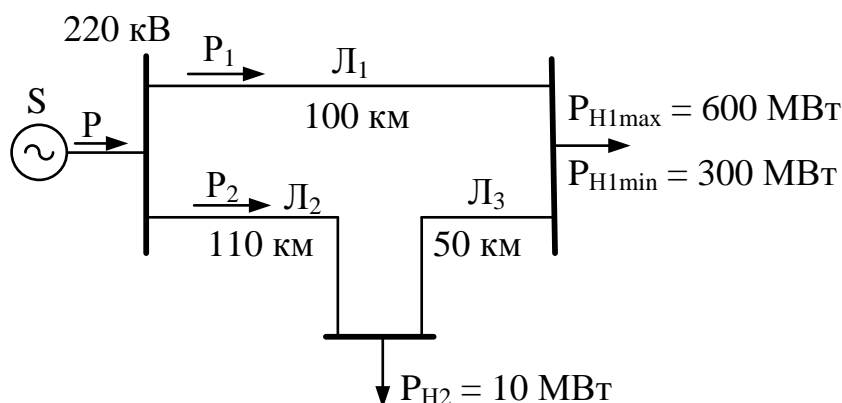


Рис. 1. Фрагмент схемы электрической сети

В данном примере мощная нагрузка P_{H1} питается по трем линиям Л1, Л2, Л3 от системы S. Нагрузка 1 изменяется, ее минимальное значение равно 300 МВт, а максимальное – 600 МВт. Нагрузка 2 постоянна и равна $P_{H2} = 10$ МВт.

Удельное индуктивное сопротивление линий равно $X_0 = 0,4$ Ом/км [1]. Длины линий указаны на рис. 1. Потери активной мощности в линиях не учитываем. Для линий задано ограничение – поток мощности по ним не должен превышать

$$P_{\text{пред}} = 340 \text{ МВт.}$$

Сопротивление линии Л1 значительно меньше, чем суммарное сопротивление линий Л2 и Л3, соединенных последовательно

$$X_1 = 40 \text{ Ом, } X_2 + X_3 = 44 + 20 = 64 \text{ Ом.}$$

Поэтому поток мощности P от системы распределяется по линиям неравномерно, в соответствии с правилом разброса. Например, при минимальной нагрузке P_{H1} мощность распределится следующим образом

$$P_1 = P(X_2 + X_3)/(X_1 + X_2 + X_3) = 300(44+20)/(40 + 44 + 20) = 185 \text{ МВт,}$$

$$P_2 = P \cdot X_1/(X_1 + X_2 + X_3) = 300 \cdot 40/(40 + 44 + 20) = 115 \text{ МВт,}$$

При максимальной нагрузке P_{H1} потоки мощности по линиям будут равны

$$P_1 = 600(44+20)/(40 + 44 + 20) = 369 \text{ МВт,}$$

$$P_2 = 600 \cdot 40/(40 + 44 + 20) = 231 \text{ МВт,}$$

Большая часть потока (P_1) идет по линии Л1, меньшая (P_2) по линиям Л2 и Л3. В результате линия Л1 перегружена

$$P_1 = 369 \text{ МВт} > P_{\text{пред}} = 340 \text{ МВт,}$$

а остальные линии недогружены.

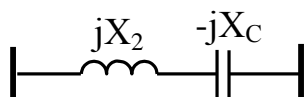


Рис. 2. Компенсация сопротивления линии

Известен ряд способов, позволяющих перераспределить потоки мощности. Рассмотрим один из них, который заключается в уменьшении индуктивного сопротивления недогруженной линии за счет компенсации. Компенсация заключается в том, что в рассечку недогруженной линии (линия 2), в каждую фазу, включается конденсаторная батарея с емкостным сопротивлением X_C (рис. 2). В результате имеет место электрический резонанс напряжений. Если сопротивления X_2 и X_C равны, то получается, что относи-

тельно источника линия имеет нулевое сопротивление (если пренебречь активным сопротивлением провода), то есть имеет место полная компенсация.

На практике полная компенсация недопустима, рекомендуется компенсировать не более 50% сопротивления линии. В соответствии с данной рекомендацией примем максимальное значение $X_C = 0,5X_2 = 22\text{ Ом}$.

Расчет потоков мощности проведем по формулам

$$P_1 = P(X_2 - X_C + X_3)/(X_1 + X_2 - X_C + X_3), \quad (1)$$

$$P_2 = P \cdot X_1/(X_1 + X_2 - X_C + X_3). \quad (2)$$

Зависимости перетоков мощности по линиям от значения сопротивления конденсаторной батареи, рассчитанные по (1), (2), приведены на рис. 3. Зависимости $P_{1\max}$, $P_{2\max}$ получены соответственно для первой и второй линий при максимальной нагрузке 600 МВт. Зависимости $P_{1\min}$, $P_{2\min}$ получены при минимальной нагрузке 300 МВт.

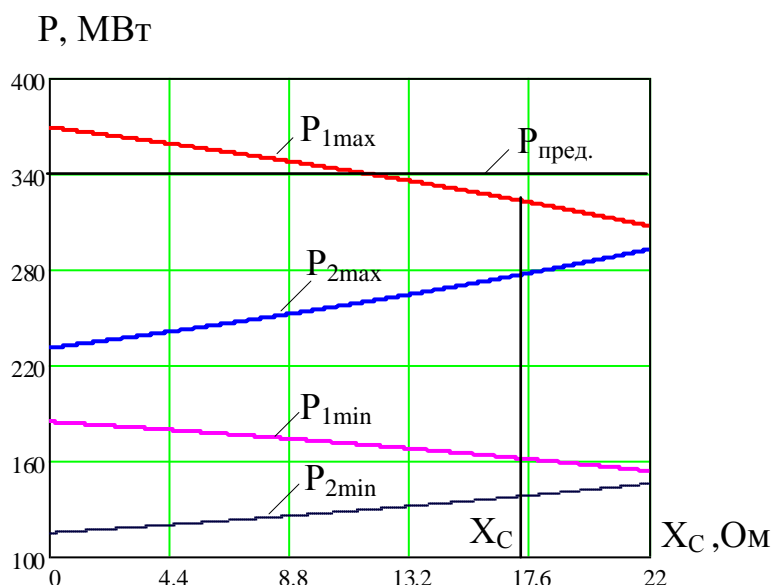


Рис. 3. Зависимости перетоков мощности по линиям от значения сопротивления конденсаторной батареи

Как видно, при максимальной нагрузке достаточно включить конденсаторную батарею с сопротивлением около 17 Ом, чтобы разгрузить линию L_1 до значений, меньших предельного перетока.

Для демонстрации изложенного принципа было реализовано устройство на основе контроллера STM32 Discovery. Физическая модель состоит из трех катушек индуктивности, моделирующих сопротивления трех линий электропередачи, соединенных в кольцевую схему. Изменение нагрузки моделируется с помощью потенциометра. Согласно разработанному алгоритму при увеличении тока в катушке X_1 до определенного значения в схему автоматически вводится конденсатор, соединенный последовательно с катушкой X_2 .

В настоящее время качественное управление объектами электроэнергетики невозможно без внедрения новых технологий, реализованных с помощью микропроцессорных технических средств. Автор надеется в своей будущей профессиональной деятельности принять участие в разработке и внедрении технологий Smart Grid.

ЛИТЕРАТУРА:

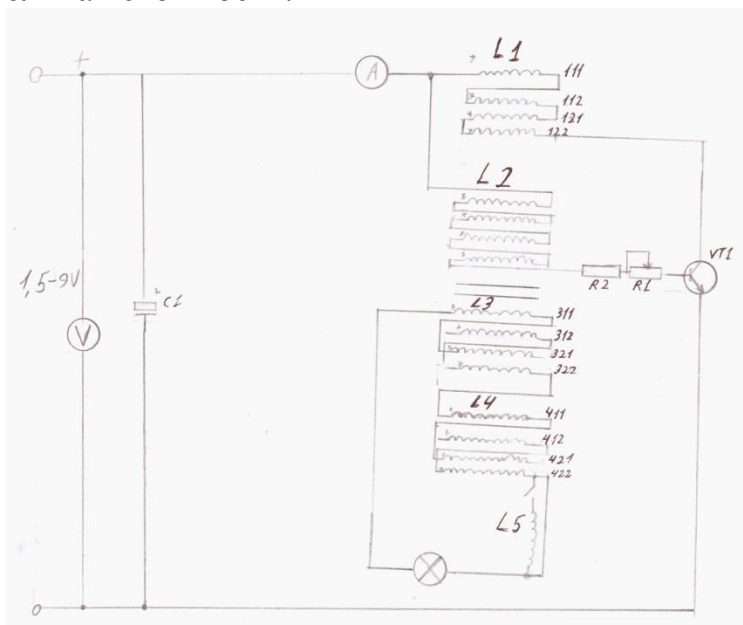
1. Неклепаев Б.Н. и др. Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – Москва: КноРус, 2014. – 645 с.
3. Быстрицкий, Геннадий Федорович Общая энергетика (производство тепловой и электрической энергии) : учебник для вузов / Г. Ф. Быстрицкий, Г. Г. Гасангаджиев, В. С. Кожиченков. — 2-е изд., стер.. — Москва: КноРус, 2014. — 407 с.
4. Основы современной энергетики: учебник для вузов в 2 т. / под ред. Е. В. Аметистова. — 5-е изд., стер.. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010 – 472 с.
5. Рыжкин, Вениамин Яковлевич Тепловые электрические станции : учебник для вузов / В. Я. Рыжкин; под ред. В. Я. Гиршфельда. — 4-е изд., стер.. — Москва: АРИС, 2014. — 328 с.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Ф.А. Сизиков Т.А. Тюленин
Школа №4 им И.С.Черных

В данной работе были проведены исследования тороидального трансформатора, намотанного с продольной обмоткой, и была проверена теория А. Мишина об использовании межобмоточной емкости катушек в работе трансформатора.

Приблизительная стоимость:



Транзистор КТ 405 (КТ829)
Резистор 220 Ом – 2шт
Резистор переменный 47 кОм

Светодиодная лампа 220-240В

Обоснование габаритов изготовления устройства

Габаритные размеры примерно

Масса не более 0,5кг

Вывод: Данная схема позволяет использовать межобмоточную емкость, но нужен тщательный подбор емкости для настройки работы трансформатора в резонансном режиме. Продольная обмотка существенного эффекта не дает, т.к. малое количество витков. Для дальнейших исследований нужно увеличить количество витков и использовать дополнительную емкость.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Валиева Л.Е. Моделирование процесса пространственного теплопереноса в закрытом двухфазном термосифоне.....	3
Нурпейис А.Е., Валиева Л.Е. Математическое моделирование теплопереноса в двухфазном термосифоне в диапазоне типичных тепловых потоков от поверхности масляного бака трансформатора ТЭС.....	6
Толстоухова В.П. Сохранение теплоэнергии жилого дома с помощью оптимальных геометрических параметров и материалов.....	8
Красношлыков А.С. Исследование влияния свойств теплоносителей на интенсивность теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах.....	13
Сыродой С.В., Косторева А.А., Косторева Ж.А. Математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового и радиационно-конвективного нагрева влажной древесины.....	17
Сергиенко В.А. Анализ тепловых потерь запорной арматуры тепловых сетей.....	20
Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Артёмов Н.О. Устойчивая регулярная структура при движении слоя жидкости в миниканале.....	25
Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Меньшиков Д.С. Экспериментальное исследование изменения температуры вблизи поверхности раздела “жидкость-газ”.....	29
Степанова О.В. Максимов В.И. Математическое моделирование теплового состояния фундаментного основания резервуара для хранения сжиженного природного газа.....	32
Зайкан К.О., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Влияние степени заполнения вертикального термосифона теплоносителем на распределение температур по высоте конденсационной части.....	37
Феоктистов Д.В., Жидкова Л.С., Батищева К.А. Механизм движения контактной линии в условиях растекания капли по твердой поверхности.....	40
Гердт С.Е. Установка для измерения коэффициента теплопроводности материала методом пластины.....	45
Терентьев М.О. Исследование модели автоматике разгрузки оборудования линий на основе синхронизированных векторных измерений с использованием RTDS.....	46
Батищева К.А., Феоктистов Д.В., Овчинников В.В., Мисюра С.Я. Зависимости статического контактного угла от объема капель дистиллированной воды на специально структурированных поверхностях.....	50
Hoang Hiep, Sheremet Mikhail A. Natural convection of nanofluid from an isothermal vertical flat plate using single-phase model.....	54

Гуков М.И., Шаненков И.И., Циммерман А.И. Оценка влияния совместных добавок нанопорошка ALN, полученного плазмодинамическим способом, и микронного порошка Y ₂ O ₃ на конечные свойства керамики, основанной на промышленном порошке ALN.....	58
Вергаскина М.А., Головина Л.С., Нечупей И.А. Определение теплопроводности металлов методом стержня.....	61
Маслов Е.А., Фарапонов В.В., Чупашев А.А., Мацкевич В.В., Чижов С.Ю. Экспериментальное исследование закономерностей и особенностей обтекания тел различной формы сверхзвуковым потоком	64
Астанина М.С. Моделирование естественной конвекции жидкости с переменной вязкостью в замкнутой пористой полости	68
Демчегло В.Д. Анализ анизотропии свойств на основе изучения текстуры крупнозернистых слитков низкотемпературных термоэлектрических материалов Bi ₂ Se _{0,3} Te _{2,7}	71
Пискунов М.В., Опарин А.О. Распад существенно неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде	76
Назаров К.К., Абдулаев А.А. Установка для преобразования электроэнергии на основе термоэлектрических процессов	80
Легкоступова В.В., Судаков А.В. Моделирование двухфазного потока в спп-500-1 для АЭС с реакторами РБМК.....	82
Багаутдинов И.З., Мисбахов Р.Ш., Лизунов И.Н., Фунт А.Н. Перспективные системы связи для релейной защиты и автоматики централизованных систем управления и контроля в электроустановках среднего напряжения	86
Каграманов Ю.А., Лабинцев Е.С., Ершов М.И., Тупоногов В.Г. Моделирование пузырькового кипящего слоя методом сплошных сред и методом дискретных фаз	89
Донской И.Г. Математическое моделирование обращенного процесса совместной газификации бурого угля и пластика	93
Савина Л.А. Термодинамический цикл Калины	96
Литвиненко М.О., Шульга Т.А., Курбацкий В.В. Использование распределения технологических параметров для модернизация системы управления каталитической ароматизацией.....	99
Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н., Богомоллов Г.Н. Экспериментальное исследование процессов взрывного нагружения пресноводного льда.....	102
Секция 2. Автоматизированные системы управления технологическими процессами	
Адамчук А.В. Реализация автоматической системы регулирования уровня воды в резервуаре в среде MexBIOS Development Studio	106
Alehin R.A., Svechkarev S.V., Gurin T.S. A test signal generator of telemetry and teleaction.....	110

Халилов А.Т. Процесс выплавки высокоуглеродистого феррохрома с применением в шихте агломерата в условиях завода ферросплавов	113
Михайлова Е.В., Самохин Д.С. Разработка web-приложения для расчёта показателей надёжности сложных технических систем структурными методами.....	117
Нигай А.Г., Васильева Ю.З. Разработка программно-технического комплекса мониторинга давления удаленного объекта	119
Коптева А.В., Семенюк А.В. Неразрушающий метод контроля АСПО в магистральном нефтепроводе	123
Нечаев Д.А. Конструкция многофункциональной крупногабаритной нефтесборной системы	129
Ивлева Д.Ю. Прогнозирование технологического состояния нефтегазопроводов	132
Джамбеков А.М. Оценка эффективности применения ПИД-регулятора для процесса стабилизации катализата	136
Иванов Д.А., Савельев О.Г., Садыков М.Ф. Датчик системы мониторинга гололедно-ветровой нагрузки	138
Лазариди К.М., Карташова Т.П. Система управления роторным траншеекопателем	140
Кашипова Л.А., Макаров Д.В. Построение оптимальной структуры промышленных теплоэнергетических систем.....	144
Ахмад Рами Камал, Аль-Джабри Адель Яхья Али. Моделирование автоматической системы управления установкой деаэрации парогенератора.	148
Кабанов А.А. Беспроводной мониторинг основных физических величин технологических процессов	149
Морозова М.П., Гречная Т.А. Совершенствование системы автоматизации процесса висбрекинга.....	151
Закамалдин А.А., Андык В.С. Моделирование адаптивной системы нейро-нечеткого управления ветроэнергетической установкой	155
Олиферович Н.М., Астапенко А.С. Гармоническая и меандровая идентификации для технологических объектов в реальном времени	160
Секция 3. Ресурсоэффективные технологии для топливосжигающих энергетических установок	
Бородин А.К. Роль когенерации в современной энергетике	164
Третьякова Е.И. Биогазовые установки для птицеводческой отрасли .	166
Савченков Д.В., Плиско В.Ю., Павлов С.А., Долгих А.Ю. Использование отходов лесопереработки в качестве топлива для котлов	170
Миронова Н.В., Елистратов С.Л. Возможности применения абсорбционных хлористо-литиевых тепловых насосов в энергетике	175

Астафьев А.В., Ибраева К.Т., Суздальцев В.Е. Исследование термического разложения торфа применительно к брикетированию	178
Лебедев А.А., Артамонцев А.И. Эффективность использования плазменных технологий для растопки котельных агрегатов.....	182
¹Биятто Е.В., Привалихина К.К., Пак А.Я. Исследование электрического дугового разряда в воздушной атмосфере.....	185
Нигай А.Г., Сивков Д.С. Экспериментальное исследование зажигания органоводоугольного топлива горячей частицей	189
Вершинина К.Ю. Зажигание капель водоугольных суспензий, приготовленных с использованием воды разного качества	193
Кокшарев О.М. Численный анализ топочной среды при организации сжигания твердых топлив и их смеси	197
Худеев А.А., Шутова Е.В., Орлова К.Ю. Исследование влияния скорости нижнего дутья на процессы в НТВ топке.....	201
Цибизов Е.Р., Худеев А.А., Орлова К.Ю. Разработка и создание геометрии и расчетной сетки модели НТВ топки.....	205
Зуева Е.А. Численный анализ моделей при расчете образования оксидов азота при факельном сжигании твердого топлива.....	209
Попова Е.С. Влияние загрязнений на работу поверхностей нагрева при сжигании твердого топлива на примере плоской стенки.....	213
Лихач С.А., Ильясова А.С. Исследование сырья накопленного в золошлакоотвалах ТЭС сжигающих угли основных месторождений Сибири	216
Козлова Е.В. Влияние соединений железа на обменную способность катионита КУ-2-8	220
Секция 4. Повышение эффективности работы тепловых и атомных электростанций	
Базыкин Я.В., Савостьянова Л.В. Временные показатели производственного цикла турбоустановки.....	224
Беспалов В.В., Беляев Л.А., Кучман Л.С. Моделирование конденсационных установок поверхностного типа для утилизации тепла дымовых газов с подогревом воздуха	228
Дмитриев В.О., Ткаченко И.Г. К расчету температурного состояния графитового замедлителя реактора РБМК	232
Sameh Helmy. Supercritical water cooled reactors	236
Асанов И.А., Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Перспективные направления совершенствования утилизационных ПГУ	240
Ларионов К.Б., Мишаков И.В., Громов А.А., Губин В.Е., Зенков А.В. Влияние каталитических добавок NaNO_3 и CuSO_4 на кинетические закономерности процесса окисления угля.....	244

Дягель А.Р., Слюсарский К.В. Атомно-водородный энергетический комплекс	247
Лужковой Д.С., Ромашова О.Ю. Эффективность применения абсорбционных тепловых насосов для повышения экономичности работы ТЭЦ.....	251
Рабский А.Г. Модернизация паровой турбины Р-12-90/18	255
Дергачёв И.С. Повышение мощности АЭС за счет модернизации конденсационной установки	257
Ромашова О.Ю., Беляев Л.А., Скребатун Е.А., Туболев А.А. Экономическая эффективность газотурбинной надстройки для промежуточного перегрева пара на теплофикационных турбоустановках	260
Бычок А.С., Самохин Д.С. Создание интерактивной информационной системы для оптимизации технических решений по выводу из эксплуатации объектов ядерных технологий	265
Назаров Р.Р. Способы и перспективы добычи урана из морской воды. 267	
Уваров А.А., Антонова А.М. Техничко-экономическая эффективность ПГУ с противодавлением	271
Антонова А.М., Уваров А.А. Анализ тепловой эффективности ПГУ с противодавлением методом малых отклонений	275
Гвоздяков Д.В., Губин В.Е., Шваб С.А. Численная оценка процесса формирования антропогенных осадков в атмосфере	279
Яценко К.Н., Слюсарский К.В., Раков Ю.Я. Обратная стационарная задача теплопроводности для кубоида.....	283
Толокольников А.А., Янковский А.С., Губин В.Е. Исследование влияния механической обработки на реологические свойства водоугольного топлива на основе низкосортных углей марки ЗБ	287
Федюк Р.С., Евдокимова Ю.Г., Зеленский И.Р. Особые виды бетона для объектов атомной энергетики	289
Долгова А.Н., Шайхутдинов И.З., Гайнуллин И.И., Зиатдинов Р.В., Аминов Б.А. Повышение эффективности деаэраторов ТЭС.....	293
Седельников Н.В. Автоматизированный комплекс эколого-энерго-эффективного сжигания углей	297
Абрамов И.Д. Перспективные направления модернизации технического водоснабжения атомных электростанций.....	301
Петров А.С. Оценка эффективности схемных решений ПГУ 420 МВт Няганской ГРЭС	305
Бурмистров Н.А. Модернизация действующих энергоблоков ТЭС по парогазовому циклу сбросного типа	309
Бубнов Н.Н. Использование двигателей внешнего сгорания для утилизации сбросной теплоты ТЭС	313

Осьминин С.Д. Введение газового промперегрева в схемах ПГУ	316
Юмагулов Р.О. Исследование схемы охлаждения уходящих газов в цикле ПГУ	320
Маслов Р.С., Плешанов К.А. Повышение эффективности водогрейного котла КВ-Ф-116-150 при помощи конденсерной технологии	323
Ернурова Г.Е., Силамгазы Д.Е. Защита лопаток паровых и газовых турбин от солевой и газовой коррозии, газообразной и капельно-ударной эрозии.....	326
Буквич Д.И., Савина К.И. Перспектива применения высоконикелевого сплава ЧС-33 для горизонтального парогенератора (ПГ-1000М).....	329
Varan A.N., Klimkovich I.P. Impact of angle of the initial orientation of the rigid bus 6–10 kV on the electrodynamic stability	330
Качин А.С., Асинский А.А., Абрамовских А.А. Модернизация систем котлоагрегатов действующих электростанций	334
Kachin A.S. Problems and solutions removing npp from service	338
Майкова С.А., Борисов В.Ю. Использование ядерных энергетических установок и радиоизотопных термопреобразующих генераторов в космосе...	340
Секция 12. Мой первый шаг в науку (Для школьников)	
Гумовская А.А. Принципы регулирования напряжения линий электропередачи в целях снижения потерь	344
Чухонастова А.И. Алгоритм обработки сигналов с индукционных датчиков для измерения параметров плазмы на установках типа токамак	347
Темник С.Е., Смолякова К.В. Разработка эффективного квантового режима облучения тепличного салата.....	350
Темник С.Е., Смолякова К.В. Моделирование и расчет потерь светового потока через стенки теплицы при ее освещении днат светильниками.....	353
Бир А.П. Повышение КПД реактивного двигателя.....	356
Риф А.Э. Регистрация температуры гиперскоростной плазменной струи с использованием высокоскоростной видеофиксации.....	358
Иконникова К.Д., Иконникова К.В. Характеристика возобновляемых источников энергии и проблемы их использования.....	362
Губин А.В. Получение и использование синтез-газа в системах автономного энергоснабжения путем газификации низкосортного водугольного топлива	363
Р. Яруллоев. Устройство для демонстрации принципа регулирования потоков мощности в высоковольтных линиях	366
Сизиков Ф.А., Тюленин Т.А. Электромагнитный преобразователь	369

