

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ



МАТЕРИАЛЫ

V МЕЖДУНАРОДНОГО
МОЛОДЁЖНОГО ФОРУМА

«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ»

ТОМ 1.

Томск – 2017

УДК 620.9(063)
ББК 31л0
И73

Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодежного форума. В 3т. Томск 9 - 13 октября 2017г. Т.1. - Материалы V Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 284 с.

Настоящий сборник содержит материалы V Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы», проведенного 9 - 13 октября 2017г. на базе Энергетического института Томского политехнического университета.

Материал сборника представлен без редактирования авторских электронных версий.

СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ СБОРНИКА ТРУДОВ ФОРУМА

1. Матвеев А.С., к.т.н., заместитель директора по развитию ЭНИН ТПУ, председатель;
2. Козырева А.А., начальник научного отдела ЭНИН ТПУ, ученый секретарь;
3. Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., зав. кафедрой ТПТ ЭНИН ТПУ;
4. Глушков Д.О., к.ф.-м.н., доцент кафедры АТП ЭНИН ТПУ;
5. Заворин А.С., д.т.н., зав. кафедрой ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ;
6. Литвак В.В., д.т.н., профессор кафедры АТЭС ЭНИН ТПУ;
7. Кладиев С.Н., к.т.н., доцент кафедры ЭПЭО ЭНИН ТПУ;
8. Дементьев Ю.Н., к.т.н., зав. кафедрой ЭПЭО ЭНИН ТПУ;
9. Муравлев О.П., д.т.н., профессор кафедры ЭКМ ЭНИН ТПУ
10. Сурков М.А., к.т.н., зав. кафедрой ЭПП ЭНИН ТПУ;
11. Сулайманов А.О., к.т.н., зав. кафедрой ЭЭС ЭНИН ТПУ;
12. Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ТПУ;
13. Собинова Л.А., к.пед.н., ст. преподаватель кафедры ИЯ ЭНИН ТПУ;
14. Чеснокова И.А., к.ф.н., старший преподаватель кафедры ИЯ ЭНИН ТПУ;
15. Кобенко Ю.В., д.ф.н., профессор кафедры ИЯ ЭНИН ТПУ;
16. Ростовцева В.М., к.пед.н., доцент каф. ИЯ ЭНИН ТПУ.
17. Ардашкин И.Б., д.филос.н., профессор ФИЛ ИСГТ ТПУ
18. Лукутин А.В., к.т.н., начальник учебно-методического отдела ЭНИН ТПУ

Верстка и дизайн оригинал макета: Зими́на Н.А.

© Томский политехнический университет, 2017

**СЕКЦИЯ 1.
ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В
УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

А.А. Косторева¹, Ж.А. Косторева¹, С.В. Сыродой²
Томский политехнический университет^{1,2}
ЭНИН, ТПТ, 5БМ6Г¹

1 Введение

Деревообработка является одной из перспективных отраслей промышленности как в Российской Федерации, так и за рубежом. За последние годы в России начался рост деревообрабатывающей промышленности, которая нуждается в заготовках из хвойных и лиственных пород древесины. Таким производствам необходима высококачественная обработанная продукция [1]. Поэтому древесина является одним из наиболее востребованных материалов на настоящее время [2].

Основным этапом деревообработки является удаление влаги. Одним из самых перспективных технологических решений на настоящее время является сушка древесины в поле микроволнового излучения (СВЧ-сушка). Натурные исследования (эксперимент) процессов тепло- и массопереноса, протекающих при СВЧ-сушке древесины очень дороги и сложны, а иногда и просто невозможно. Разработанные на настоящее время математические модели основаны на ряде существенных допущений, не учитывающих весь комплекс теплофизических и электрофизических процессов. Так, например, в [3], приведены результаты математического моделирования СВЧ-нагрева диэлектрика, при этом принимается, что распределение вектора напряженности электрического поля по образцу равномерно, соответственно и объемное тепловыделение также равномерно распределено. Однако, как известно из работ Д.К. Максвелла [4] распределение напряженности электрического поля в пространстве существенно не равномерно. В [5] приведены результаты численного решения задачи нагрева древесного образца в поле СВЧ, с учетом неравномерности ЭМ-поля. Однако, при этом не решается задача сушки образцы. Известно [6], что при обезвоживании пористых материалов формируется фронт фазового перехода, разделяющий водонасыщенный и сухой слои древесины. Вследствие внутреннего нагрева возможно образование зоны обезвоженной древесины внутри образца.

Подводя итог можно сказать, что разработка «адекватной» физической теории и обеспечивающей ее математической базы процессов микроволновой сушки древесины является актуальной и нерешенной до настоящего времени задачей. Последнее будет способствовать разработке оптимальных режимов сушки влажной древесины.

Цель работы: Экспериментальное и теоретическое исследование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно в условиях интенсивных

фазовых (испарение воды) превращениях при интенсивном конвективно- микроволновом нагреве влажной древесины.

2 Эксперимент

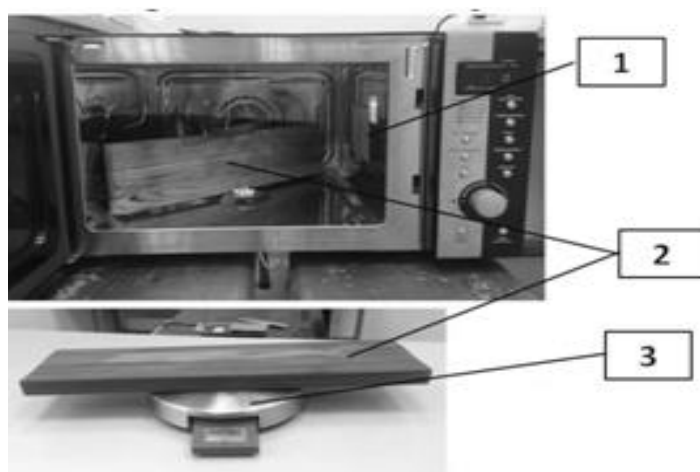


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1- СВЧ-печь, 2- Древесный образец, 3- Весы.

Перед проведением экспериментов древесные заготовки доводились до влажности φ свежесрубленного дерева $\varphi=30-40\%$. После этого образцы помещались внутрь СВЧ сушильной камеры. Затем древесина извлекалась, и проводилось контрольное взвешивание (период выдержки влажной заготовки в СВЧ-печи составлял 60 секунд, период взвешивания составлял не более $0,1 \cdot t_{\text{суш}}$). После взвешивания заготовка снова помещалась внутрь СВЧ-камеры и проводилось дальнейшее нагревание. Эксперименты повторялись до тех пор, пока изменение влажности в древесине за 60 секунд не превышало 0,01 %.

3 Постановка задачи

По результатам проведенных экспериментов сформулирована физическая и математическая модели исследованного процесса.

Физическая постановка

В начальный момент времени ($\tau=0$) древесная заготовка попадает в сушильную камеру и нагревается за счет комбинированного воздействия микроволнового излучения. В результате СВЧ-воздействия возникает внутреннее тепловыделение и инициируется процесс испарения влаги. Соответственно внутри древесного образца формируется слой сухой древесины с низким коэффициентом теплопроводности. Промежуток времени от начала нагрева до момента полного высыхания (полное удаление влаги) считается временем сушки t .

Соответственно, возможно формирование сухого слоя внутри образца и возникновение второго фронта испарения, который движется из глубины заготовки к поверхности.

Математическая постановка

Математически процесс сушки в рамках постановки, соответствующей выше изложенной физической модели, описывается уравнением энергии для влажной древесины с учетом эндотермического эффекта испарения:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{Q_{\text{исп}} \cdot W_{\text{исп}} \cdot \delta(x_v)}{h_d} + q_{\text{свч}} \cdot \theta(x_{\text{исп}} - x) \quad (1)$$

$W_{\text{исп}}$ – скорость испарения (кг/(м²·с)) рассчитывалась по формуле [11]:

$$W_{isp} = \frac{V_0 \cdot \exp[-Q_{isp} \cdot M_0 \cdot (T-273)]}{R \cdot T \cdot 273}; \quad (2)$$

$q_{свч}$ – тепловой эффект (Вт/м³) СВЧ воздействия:

$$q_{свч} = \varepsilon_1 \cdot f \cdot tg \delta \cdot |E|^2 \quad (3)$$

где: C - теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); T – температура, К; θ – функция Хевисайда; δ – дискретная функция Дирка; Q_{isp} – теплота эндотермического эффекта испарения, Дж/кг; h_d – коэффициент размазывания фронта испарения, м, ε_1 – диэлектрическая проницаемость; f - частота электромагнитного поля, Гц; $tg \delta$ - угол диэлектрических потерь; $|E|^2$ - напряженность электромагнитного поля, В/м.

- уравнение (1) решалось при следующих граничных условиях:

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

$$x = 0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$x = l: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_e - T); \quad (5)$$

Задача (1) - (5) решалась методом конечных разностей с использованием алгоритма аналогично [12-13]. Скорость «обезвоживания» вычислялась методом неявного выделения фронта испарения [14].

4 Результаты и их обсуждение

В таблице 1 приведены полученные экспериментально и теоретически времена сушки древесины. Можно отметить, что времена полной сушки древесного образца из кедра практически совпадают. Но для образца из ели отклонение теоретических и экспериментальных времен сушки около 30%. Последнее можно объяснить, тем что использовавшиеся при математическом моделировании исходные данные теплофизические и электрофизические характеристики ели ситхинской отличаются от аналогичных параметров ели обыкновенной, использованной в эксперименте.

Таблица 1.

Экспериментальные и теоретические времена сушки древесины.

Вид древесины	$t_{суш}$, С. Теоретические значения.	$t_{суш}$, С. Экспериментальные значения.	Относительное отклонения времен сушки, %
пихта	568	645	11,94
ель	564	810	29,13
сосна	579	510	13,53
кедр	560	660	1,52

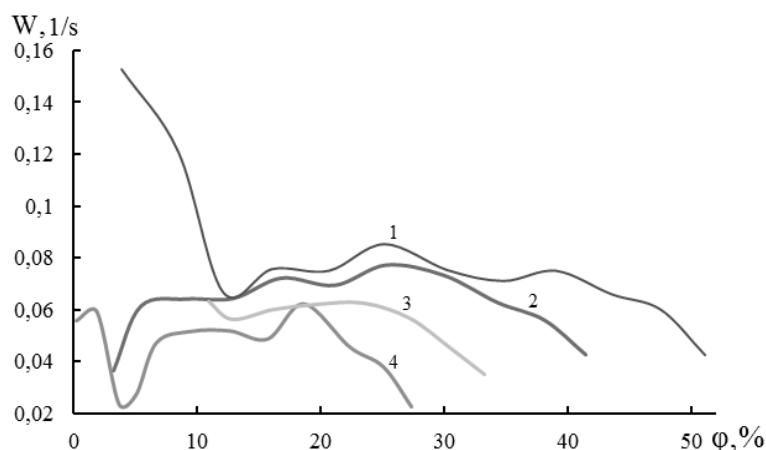


Рис. 2. Зависимость относительной скорости удаления $W=\Delta\phi/s$ от абсолютной влажности ϕ для образцов, выполненных из древесины: 1 – ель; 2 – пихта; 3 – сосна; 4 – кедр.

На рисунке 2 приведены зависимости скоростей влагоудаления от абсолютной влажности для образцов, выполненных из разных видов древесины. Можно отметить, что наибольший период обезвоживания соответствует сушке ели, в то время как наименьшая скорость удаления влаги зарегистрирована у кедра. Это объясняется существенными отличиями теплофизических и электрофизических свойств древесины. Вид кривых $W(\phi)$ для всех видов древесины одинаков, однако, для образцов из ели и кедра в конечной стадии (для ели $\tau = 720$ секунд, для кедра $\tau = 630$ секунд) сушки скачкообразно увеличиваются скорости обезвоживания.

На рисунке 3 приведены зависимости изменения массы древесной заготовки от времени сушки для образцов, выполненных из различных видов древесины. Характеристики изменения массы бруска для ели и кедра практически идентичны, соответственно, можно сделать обоснованный вывод, что такие виды древесины можно сушить в одной сушильной камере. Характеристики обезвоживания пихты существенно отличаются от аналогичных параметров сосны, ели и кедра. Соответственно, древесные образцы выполненные из пихты, нужно высушивать отдельно от остальных.

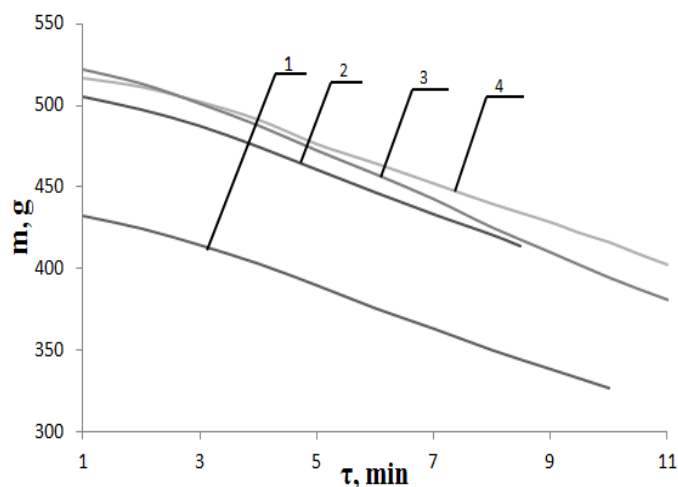


Рис. 3. Зависимости изменения массы образца (m) от времени сушки τ для образцов, выполненных из древесины: 1 – пихта; 2 – сосна; 3 – ёлка; 4 – кедр

Вывод

Приведены результаты экспериментальных и численных исследований процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины. По результатам экспериментального исследования установлено существенное влияние скорости удаления влаги от абсолютной влажности древесного образца, при этом было отмечено, что эта зависимость существенно нелинейная. Так в начальный период сушки скорость удаления влаги возрастает, однако, по истечению времени $\tau=0,74 \cdot \tau_{\text{суш}}$ скорость обезвоживания начинает уменьшаться. Сравнительный анализ полученных экспериментальных данных и теоретических зависимостей, приведенных показали удовлетворительное соответствие. По результатам экспериментальных исследований была разработана математическая модель процессов тепломассопереноса протекающих при СВЧ-сушке. По результатам математического моделирования было установлено, что интегральные характеристики процесса сушки существенно зависят от вида древесины. Например, время сушки сосны, ели и кедра примерно одинаковы, в то время как $t_{\text{суш}}$ пихты существенно отличается. Соответственно, можно сделать вывод, что древесные заготовки из сосны, ели и кедра можно обезвоживать одновременно в одной сушильной камере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ – 7538.2016.8)

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. Саломатов В. В., Сладков С. О., Пащенко С. Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике. Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 3. С. 535-549
4. Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М., 1952.
5. Microwave processing of materials/ National materials Advisory Board.- Washington: National Academy Press, 1994. – 150с
6. Лыков А.В. Сушка древесины. - М., 1937.
7. Хащенко А.А., Вечер О.В., Дискаева Е.И. Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева. Известия Алтайского государственного университета. – 2016. – Т. 89, № 1 – 2016.
8. Syrodoy S.V. N.Y. Gutareva R.I. Taburchinov. Influence of Absorption of Thermal Radiation in the Surface Water Film on the Characteristics and Ignition Conditions//MATEC Web of Conferences Volume 72, 2016, Article number 01109

9. S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva. R. I. Taburchinov. Influence of Absorption of Thermal Radiation in the Surface Water Film on the Characteristics and Ignition Conditions// MATEC Web of Conferences Volume 72, 9 August 2016, Article number 01109 DOI: 10.1051/mateconf/20167201109
10. S.V. Syrodoy, N. Y. Gutareva. K. A. Bugaeva. Ignition of Wet Wood Particles in the Stream of High-Temperature Gases//MATEC Web of Conferences. Volume 72, 9 August 2016, Article number 01035. DOI: 10.1051/mateconf/20167201035

Научный руководитель: С.В.Сыродой, к.т.н., старший преподаватель каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПОЛОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

С.А. Михайленко
Томский государственный университет

Изучение конвективного теплопереноса во вращающихся системах имеет большое значение при решении различных технических проблем, например, при проектировании газовых турбин высокого давления [1] или солнечных концентраторов [2]. Так, в [3] получены результаты численного моделирования конвекции во вращающемся цилиндрическом контейнере, заполненном ртутью, в условиях подогрева снизу. Моделирование конвективного теплопереноса во вращающейся замкнутой полости с локальным источником энергии постоянной температуры проводилось в [4]. Следует отметить, что большинство исследований конвективного теплопереноса во вращающихся системах проводится без учета влияния теплового поверхностного излучения.

Целью настоящей работы является численный анализ режимов естественной конвекции и поверхностного излучения во вращающейся квадратной полости, включающей локальный тепловыделяющий источник. Полость, представленная на рис. 1, заполнена ньютоновской жидкостью и вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω_0 . Нижняя и верхняя стенки считаются адиабатическими. На нижней стенке расположен твердый тепловыделяющий источник с постоянным объемным тепловыделением Q .

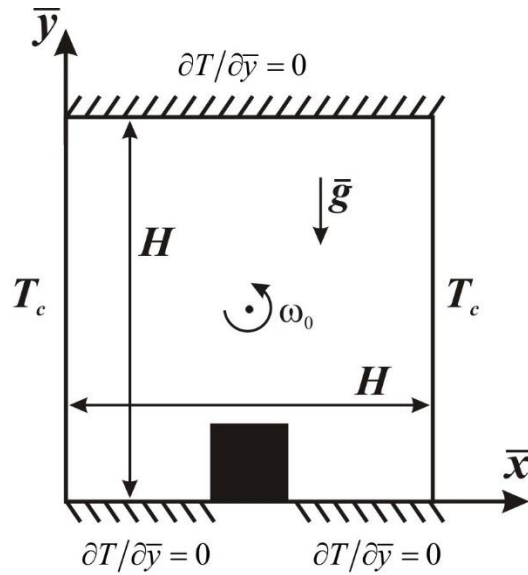


Рис. 1. Область решения задачи

Вертикальные стенки поддерживаются при постоянной температуре T_c . Все стенки полости считаются диффузно-серыми. Уравнения, сформулированные на основе законов сохранения массы, импульса и энергии, записываются в переменных “функция тока–завихренность” в безразмерном виде [4]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{\sqrt{Ta}} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) + \frac{Ra}{Pr \cdot Ta} \left[\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos(\tau) - \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin(\tau) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Pr \cdot \sqrt{Ta}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_{hs}/a}{Pr \cdot \sqrt{Ta}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + Os \right) \quad (4)$$

Здесь Ra – число Рэлея, Pr – число Прандтля, Ta – число Тейлора, Os – число Остроградского, a_{hs} – коэффициент температуропроводности источника, a – коэффициент температуропроводности среды.

Начальные и граничные условия выглядят следующим образом:

- в начальный момент времени: $\psi(x, y, 0) = 0$, $\omega(x, y, 0) = 0$, $\theta(x, y, 0) = 0$;

- при $x = 0$ и $x = 1$: $\psi = 0$, $\omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$, $\theta = 0$;

- при $y = 0$ (вне источника) и $y = 1$: $\psi = 0$, $\omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}$, $\frac{\partial \theta}{\partial y} = N_{rad} Q_{rad}$;

- на источнике энергии: $\psi = 0$, $\omega = -\frac{\partial^2 \psi}{\partial n^2}$, $\begin{cases} \theta_{hs} = \theta_f \\ \frac{\lambda_{hs}}{\lambda} \frac{\partial \theta_{hs}}{\partial n} = \frac{\partial \theta_f}{\partial n} - N_{rad} Q_{rad} \end{cases}$.

Определение плотности радиационного потока Q_{rad} осуществлялось при помощи метода сальдо. Для решения уравнений (1)-(4) с соответствующими начальными и граничными условиями применялся метод конечных разностей второго порядка точности. Уравнение Пуассона для функции тока (1) решается отдельно с применением метода верхней релаксации. Уравнение дисперсии завихренности (2) и уравнения энергии (3), (4) решаются на основе локально-одномерной схемы Самарского [4, 5] с применением метода прогонки. Разработанный вычислительный код был протестирован на множестве сеток, а также на тестовой задаче, для которой получено удовлетворительное сравнение с данными эксперимента [6, 7].

Численные решения получены для широкого спектра значений определяющих параметров: $10^4 < Ta < 10^6$, $0.1 < Os < 1.0$, $0.1 < \varepsilon < 0.9$. Установлены распределения изолиний функции тока и температуры, а также зависимости для среднего радиационного и конвективного чисел Нуссельта на поверхности источника энергии (рис. 2 и 3).

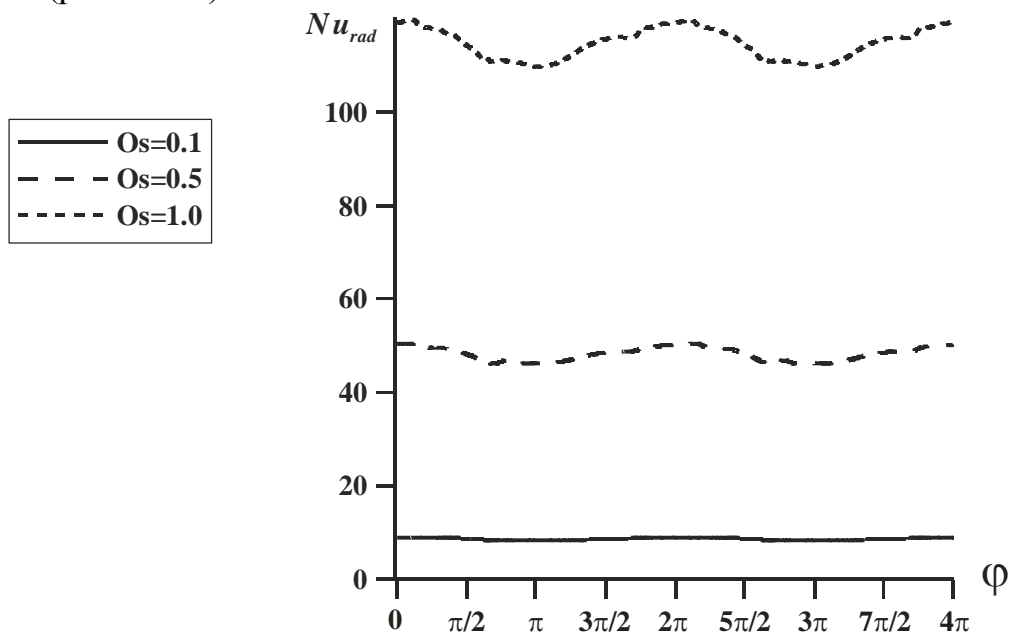


Рис. 2. Зависимость среднего радиационного числа Нуссельта от угла поворота полости и числа Остроградского при $Ta=10^4$, $\varepsilon=0.3$

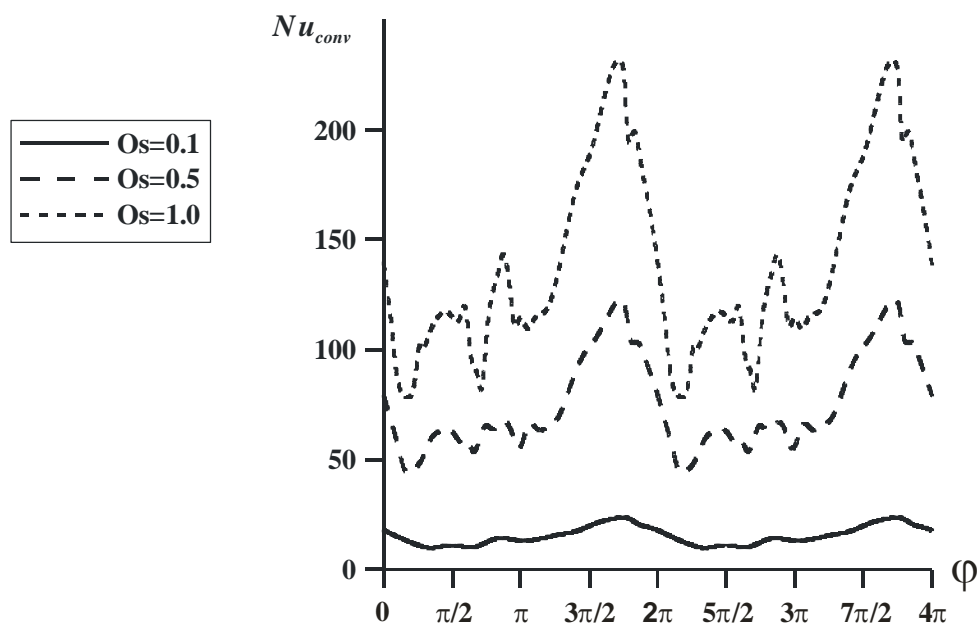


Рис. 3. Зависимость среднего конвективного числа Нуссельта от угла поворота полости и числа Остроградского при $Ta=10^4$, $\varepsilon=0.3$

На рисунках 2 и 3 изображена зависимость для средних чисел Нуссельта от угла поворота полости после 793 полных оборотов. Можно заметить, что значения в интервалах угла поворота φ от 0 до 2π от 2π до 4π повторяются. Из этого можно сделать вывод о том, что процессы, происходящие в полости, повторяются в пределах каждого последующего оборота и являются периодическими. Так же можно увидеть, что с ростом числа Остроградского происходит рост средних конвективного и радиационного чисел Нуссельта. При этом увеличение Os вызывает высокоамплитудные изменения Nu_{conv} в пределах одного оборота.

Работа выполнена в рамках реализации проекта Российского научного фонда (соглашение № 17-79-20141).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Alexiou A., Hills N.J., Long C.A., Turner A.B., Millward J.A. Heat transfer in high-pressure compressor gas turbine internal air systems: a rotating disc-cone cavity with axial throughflow // *Experimental Heat Transfer*.- 2000.- N 13.- P. 299-328.
2. Wu W., Amsbeck L., Buck R., Waibel N., Langner P., Pitz-Paal R. On the influence of rotation on thermal convection in a rotating cavity for solar receiver applications // *Applied Thermal Engineering*.- 2014.- N 70.- P. 694-704.
3. Smirnov S.I., Smirnov E.M., Smirnovsky A.A. Endwall heat transfer effects on the turbulent mercury convection in a rotating cylinder // *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*.- 2017.- N 3.- P. 83-94.
4. Михайленко С.А., Шеремет М.А. Моделирование конвективного теплопереноса во вращающейся замкнутой полости с локальным источ-

ником энергии // Вестник Пермского Университета.- 2017.- N 1.- С. 19-25.

5. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656 с.
6. Hamady F.J., Lloyd J.R., Yang K.T., Yang H.Q. A Study of Natural Convection in a Rotating Enclosure // J. Heat Transfer.- 1994.- N 116.- P. 136-143.
7. Tso C.P., Jin L.F., Tou S.K.W. Numerical Segregation of the Effects of Body Forces in a Rotating, Differentially Heated Enclosure // Numerical Heat Transfer.- 2013.- N 51.- P. 85-107.

Научный руководитель: М.А. Шеремет, д.ф.-м.н., профессор кафедры Теоретической механики ТГУ.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА ТЕКСТУРУ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

К.А. Батищева¹, Д.В. Феоктистов²
Томский политехнический университет^{1,2}
ЭНИН, ТПТ, группа 5Б2Б¹

Экспериментально определено влияние параметров (мощность излучения, частота импульсов, время воздействия луча) иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG-Photonics на текстуру поверхности алюминиевого сплава АМГ-6. Установлено, что после одиночного воздействия луча лазера на поверхности образуются кратеры. Получены зависимости геометрических размеров кратера (глубина, диаметр, высота кромки) от параметров лазера. Выявлено, что с увеличением времени лазерного облучения поверхности от 100 нс до 200 нс глубина кратера увеличивается, разность между диаметрами кратера, измеренными в продольном и поперечном разрезах уменьшается. Также установлено, что в условиях облучения поверхности лучом частотой более 60 кГц диаметр кратера не зависит от мощности. При малых частотах до 20 кГц диаметр кратера увеличивается с ростом мощности. Определены параметры иттербиевого импульсного волоконного лазера, обеспечивающие Создание неупорядоченных изотропных текстур на металлической поверхности.

Известно [1,2], что смачивающие свойства твердого тела зависят от текстуры. Модификация последней без обработки реагентами, изменяющими поверхностную энергию (например, перфтороктил-трихлорсилан), позволяет создавать поверхность с контактными углами от 0 до 120 градусов.

Одним из перспективных способов изменения смачивающих свойств металлической поверхности является создание неупорядоченной текстуры лазерным излучением. При таком способе обработки поверхности луч лазера нагревает металл до температуры плавления. Дальнейшее поглощение излучения металлической поверхностью приводит к кипению расплавленного металла. Происходит абляция – металл испаряется с поверхности. В условиях поглощения

энергии металлом, превышающей порог режима абляции инициируется микро-взрыв с образованием кратера.

Текстура, образованная воздействием лазерного луча состоит из расположенных отдельно на заданном расстоянии либо наслоившихся друг на друга кратеров. Выбор параметров лазера влияет на размеры текстуры (глубина, диаметр, высота кромки). Последние определяют режим смачивания (гомогенный, гетерогенный), который влияет на контактный угол.

Изучено [3] влияние единичного воздействия лазерного луча на металлическую подложку (алюминий с никелевым покрытием, стали). Установлено, что:

1. Повышение энергии импульса увеличивает глубину и диаметр кратеров. Высота кромки уменьшается;
2. Увеличение времени воздействия приводит к росту диаметра и не влияет на глубину и высоту кромки;
3. Повышение мощности приводит к образованию более глубоких кратеров с постоянным диаметром.

Исследовано [3] влияние мощности лазерного излучения на алюминиевую поверхность сплава АМГ-6. Установлено, что после обработки поверхности лазерным излучением мощностью до 6 Вт частотой 99 кГц, со скоростью перемещения луча $800 \cdot 10^{-3}$ м/с смачивающие свойства поверхности остались прежними. В условиях обработки металлической поверхности лучом мощностью более 6 Вт гидрофобные свойства металла улучшались, более 14 Вт формировалась пористая структура. Капля воды образовывала с подложкой контактный угол 114 градусов. Со временем капля, лежащая на пористой подложке, проникала в поры под действием силы тяжести.

Отсутствуют работы, посвященные анализу размеров единичного кратера, образованного лазерным излучением, с целью создания текстуры, позволяющей улучшить либо ухудшить смачивающие свойства металлов и обеспечить их стабильность.

Цель работы – экспериментально установить зависимости геометрических размеров кратера от частоты, мощности, времени воздействия лазерного луча.

В качестве материала выбран алюминиевый сплав АМГ-6 (таб.1), широко используемый в энергетике. Из АМГ-6 изготавливают топливные баки, радиаторы, теплоотводы, кабелепроводы, применяется при прокладке высоковольтных линий электропередачи.

Табл. 1. Состав алюминиевого сплава АМГ-6

Название	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cu	Ti	Be	Примесей
Содержание %	91,1-93,68	5,8-6,8	0,5-0,8	до 0,4	до 0,4	до 0,2	до 0,1	0,02-0,1	0,0002-0,005	0,1

Текстура изменялась с использованием иттербиевого импульсного волоконного лазера IPG-Photonics с длиной волны 1064 нм. Луч лазера с выбран-

ными параметрами (таб.2) воздействовал на полированную поверхность АМГ-6 в воздушной среде. В результате образовывались одиночные кратеры.

Проведен полный факторный эксперимент, факторы приведены в таблице 2.

Табл. 2. Факторы

Время воздействия	нс	100, 200
Мощность	Вт	8, 12, 20
Частота	кГц	20, 60, 99

Микроструктура поверхности определена с помощью электронного сканирующего микроскопа «Hitachi-3000M» (рис.1 а). Трехмерное изображение текстуры и профиль получены на профилометре «HOMMEL TESTER T1000» (рис.1б,в).

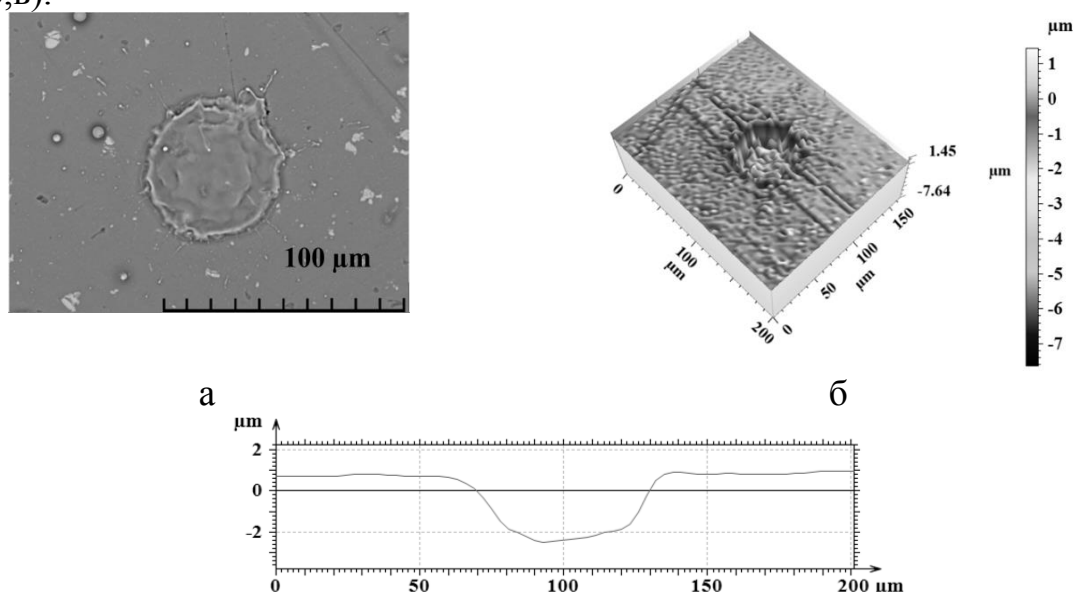


Рис. 1. Подложка из алюминиевого сплава АМГ-6 (точка №2): а – фотография микроструктуры увеличением в 1000 раз; б – трехмерное изображение; в – профиль поверхности (базовая линия проведена через центр кратера), применен фильтр микрошероховатости с отсечкой шага 25 мкм

Оценка погрешности определения размеров, повторяемость анализировались по трем кратерам, полученным лазером с одинаковыми параметрами. Размах значений не превышал 5 мкм.

По результатам анализа фотографий микроструктуры поверхности сплава АМГ-6, образованной лазером с различными параметрами, установлено, что луч лазера частотой 99 кГц и мощностью 8 Вт, 12 Вт образует кратеры разных размеров (рис.2). Отсутствует повторяемость результатов. Текстура, образованная лазером с частотой 99 кГц будет не однородна.

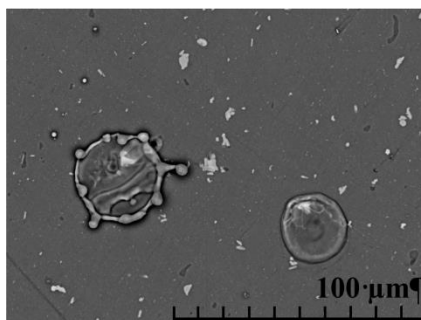


Рис. 2. Фотография микроструктуры, образованная лазером частотой 99 кГц, мощностью 12 Вт со временем воздействия 200 нс, увеличением в 1000 раз

Воздействие мощностью 20 Вт образует кратер с сильным растеканием и разбрызгиванием металла. Можно предположить, что нанесение текстуры импульсами такой мощности приведет к перекрыванию соседних кратеров и перетеканию металла.

Получены зависимости глубины кратера от мощности лазерного излучения при различных частотах (рис.2а).

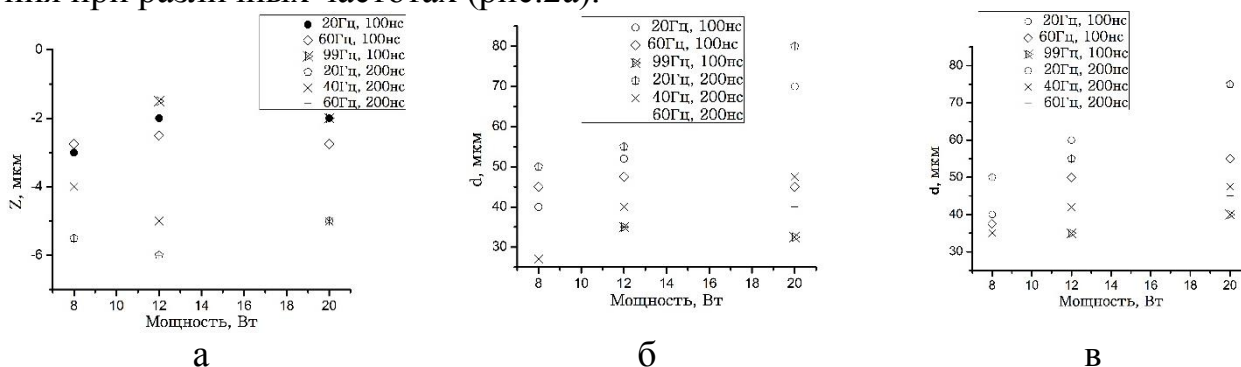


Рис. 2. Зависимости: а – глубины; б – диаметра измеренного вдоль; в – диаметра измеренного поперек от мощности лазерного излучения

Установлено, что с увеличением времени воздействия от 100 нс до 200 нс глубина кратеров увеличивается (рис 2а). Воздействие лазерным лучом частотой 60 кГц и 99 кГц образует кратеры с постоянным диаметром, не зависящим от мощности (рис. 2б,в). Уменьшение мощности до 20 кГц приводит к росту диаметра кратера с увеличением мощности.

На основе результатов выделены следующие параметры лазера: время воздействия лазерного излучения 200 нс; частота 20 кГц; мощность от 8 Вт до 20 Вт. Предполагается, что выбранные параметры обеспечат высокую повторяемость и воспроизводилось геометрии текстуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ – 7538.2016.8)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение // Успехи химии.- 2008.- Т. 77.- С. 619-638.

2. Changsheng Donga, YuGua, MinlinZhong, Lin Li, KursadSezer, Mingxing Ma, Wenjin Liu Fabrication of superhydrophobic Cu surfaces with tunable regular micro and random nano-scale structures by hybrid laser texture and chemical etching // Elsevier.- 2011.- Т. 211.- С. 1234–1240.
3. Kseniya Batishcheva, Dmitriy Feoktistov, Yuliya Shanenkova, Ekaterina Kirichenko Modification of aluminum alloy surface properties by wave-long laser texturing // MATEC Web of Conferences.- 2017.- Т. 110.- 01013.

Научный руководитель: Д.В. Феоктистов, к.т.н., доцент кафедры ТПТ ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ СОТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.В. Золотухин^{1,2}, В.И. Терехов^{1,2}, К.А. Шаров¹

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН¹, г.Новосибирск
Новосибирский государственный технический университет²
Факультет летательных аппаратов, Кафедра технической теплофизики

Введение

На данный момент важным направлением развития теории теплообмена и аэрогидродинамики является поиск новых способов интенсификации теплопереноса при равноценном или даже пониженном росте гидравлических потерь.

Рассматриваемые в настоящей работе сотовые поверхности, используемые в частности для целей теплозащиты элементов космических аппаратов, а также как уплотнения для газовых турбин, имеют ряд сходных черт с вихрегенераторами. Об этом свидетельствуют результаты первых экспериментальных исследований продольного обтекания поверхностей с сотовыми покрытиями [1-3]. Главной особенностью данных работ является обнаруженный эффект проскальзывания потока на сотовой поверхности, величина которого может достигать до 30% от скорости в ядре потока. Это позволяет использовать подобные вихрегенераторы в качестве эффективных методов управления процессами турбулентного переноса. Однако из-за отсутствия детальной опытной информации о структуре течения нет возможности создать целостную картину данного явления, и поэтому требуется более детальное его исследование.

В данной работе проводится исследование развития поля течения и турбулентных характеристик вдоль сотовых поверхностей. Более ранние данные по сотовым поверхностям были представлены в источнике [4].

Экспериментальная установка и методика измерений

Рабочий канал экспериментального стенда имел прямоугольное сечение 21×150мм, длину 1м и был выполнен из прозрачного органического стекла толщиной 8мм. Поперечные размеры входного канала подбирались из условий обеспечения двумерного течения в центральном продольном сечении канала.

На расстоянии 580мм от входа в канал заподлицо монтировались пластины с гексагональными ячейками (все данные по сотам в табл.1.).

Табл. 1. Параметры рабочих участков

Участок	Материал	Длина, мм	Ширина, мм	Глубина ячеек (b), мм	Толщина стенки, мм	Размер ячеек (d), мм
№1	текстолит	200	40	21	0,2	5
№2	пластик	182	58,4	2,4	0,5	12
№3	пластик	182	58,4	6	0,5	12
№4	пластик	182	58,4	12	0,5	12
№5	пластик	182	58,4	24	0,5	12

В настоящих опытах изучалось развитие течения по всей длине сотовой пластины при трех различных скоростях: 5, 10 и 20м/с; к началу пластины с сотами течение было развитым.

Измерения выполнены с помощью PIV-системы, состоящей из импульсного Nd:YAG лазера и цифровой камеры. В качестве трассеров использовались частицы воды размером около 1-3мкм.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Течение в окрестности сотовой поверхности принципиально отличается от обтекания гладкой стенки, это видно по представленным ниже графикам. В пристенной области сотовой поверхности профиль скорости является менее заполненным по сравнению с классическим распределением на гладкой стенке (wall) (рис. 1a).

В то же время, продольные и поперечные пульсации скорости (рис. 1b и 1c, соответственно) в окрестности сотовой поверхности в разы больше, чем на гладкой (wall).

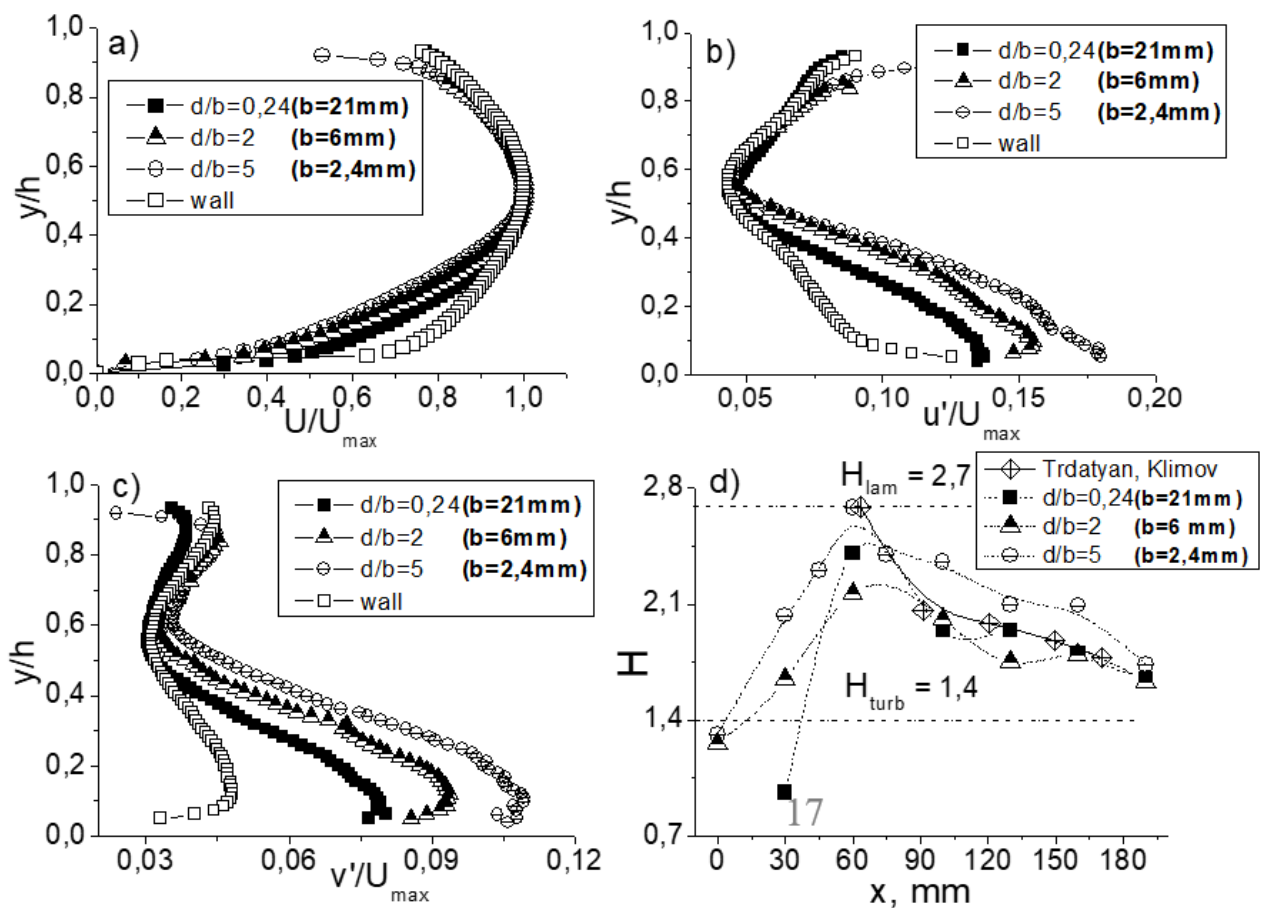


Рис. 1. Распределение по высоте канала: а) продольной скорости, б) продольных, с) поперечных флуктуаций и d) изменение формпараметра H вдоль сотовых поверхностей.

На рис. 1d показано распределение формпараметра пограничного слоя $H = \delta^* / \delta^{**}$ вдоль различных сотовых поверхностей при скорости потока 20 м/с (координата $x = 0$ соответствует началу сотового участка). На графике значение H соответствует развитому турбулентному течению, после чего можно наблюдать его рост до величины, характерной для ламинарного режима течения ($H \rightarrow 2,7$) и последующее снижение.

Столь сложный сценарий развития течения обусловлен взаимодействием пограничного слоя с сотовыми ячейками. Действительно, обтекание углублений различной формы на поверхности приводит к образованию периодического вихревого слоя за ними. Но в настоящей работе обнаружить наличие подобных структур не удалось.

Выводы

В работе представлены результаты экспериментального исследования течения потока газа, обтекающего сотовые поверхности.

Было установлено, что пограничный слой на поверхности с гексагональными ячейками сильно отличается от профиля на гладкой стенке. При этом наблюдается одновременный рост турбулентных пульсаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ - 8780.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Климов А.А., Трдатьян С.А. Использование сотовой поверхности для управления пограничным слоем // ТВТ. Т. 41, №6, С. 901-906. (2003)
2. Трдатьян С.А., Климов А.А. Пограничный слой на сотовой поверхности при натекании на нее ламинарного потока// Труды РНКТ-3. Изд-во МЭИ. М.: т.2. С. 281-284. (2002)
3. Trdatyan S.A., Klimov A.A. Friction and heat transfer on a honeycomb surface in laminar and turbulent flows/ Proc. 12-th Int. Heat Transfer Conf. Grenoble. p. 221. (2002)
4. Терехов В.И., Смутьский Я.И., Шаров К.А., Золотухин А.В./ Структура пограничного слоя при обтекании сотовой поверхности в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. - Т.21, № 6. - С.719-724.

КОНДУКЦИЯ, КОНВЕКЦИЯ И ИЗЛУЧЕНИЕ В ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ С ИСТОЧНИКОМ РАДИАЦИОННОЙ ЭНЕРГИИ

А.Э. Ни

Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, группа А5-11

Исследования физических процессов, связанных с передачей массы и теплоты, играют важную роль в науке и технике. Совместный перенос энергии конвекцией и излучением [1-3] встречается во многих инженерных системах (солнечные коллекторы, строительная теплофизика и др.). Однако на текущий момент не опубликованы результаты анализа процесса тепломассообмена в условиях интенсивного радиационного нагрева полости с учетом кондукции в ограждающих полость стенках.

Целью работы является математическое моделирование сложного теплопереноса в закрытой системе с источником лучистой энергии.

На рисунке 1 приведена полость, заполненная оптически тонким газом 1 (например, воздух) и заключенная в адиабатический корпус 2. В качестве источника энерговыделения рассматривался инфракрасный излучатель 3. На границах раздела «газ – стенка» задавались краевые условия четвертого рода. Предполагалось, что теплофизические свойства воздуха, стенок и источника нагрева не зависят от температуры. Лучистый теплообмен моделировался при помощи метода результирующих потоков.

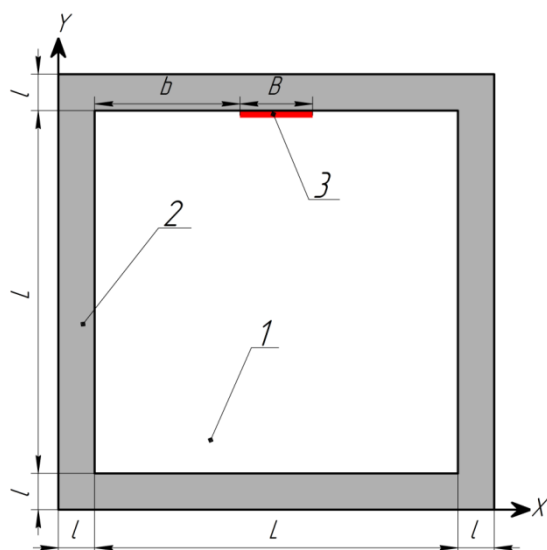


Рис. 1. Область решения: 1 – газ; 2 – теплопроводные стенки конечной толщины; 3 – инфракрасный излучатель (ИИ).

Для описания рассматриваемого процесса сложного теплопереноса использовались двумерные нестационарные уравнения Навье - Стокса и энергии для вязкой несжимаемой жидкости, удовлетворяющей приближению Буссинеска, аналогично [4]. Дифференциальные уравнения в частных производных решены методом конечных разностей [4] на равномерной сетке. Численное моделирование проводилось при следующих значениях безразмерных параметров: число Рэлея $Ra = 4 \cdot 10^6$, число Прандтля $Pr = 0,71$, число кондуктивно-радиационное число $N_r = 78.84$, безразмерный поперечный размер излучателя $D = 0.1$. На рисунке 2 приведено распределение температур в газовой полости в сечении $X = 0,6$.

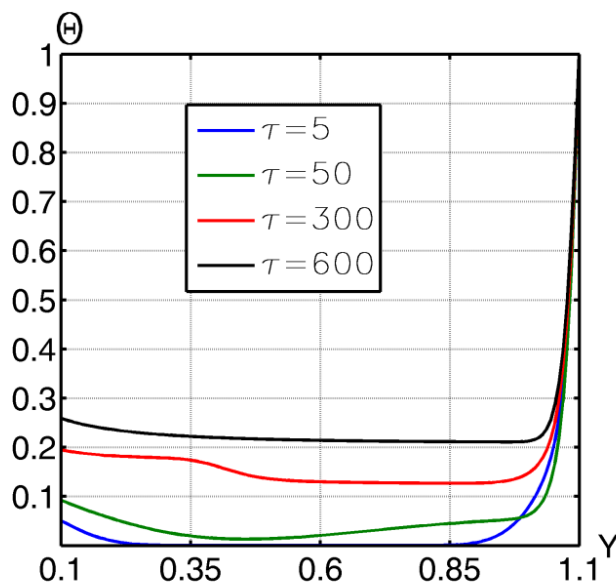


Рис. 2. Распределения температур в газовой полости.

Хорошо видно (рис. 2), что с ростом безразмерного времени τ увеличивается температура границ раздела «газ – стенка», что, очевидно, обусловлено интенсивным подводом энергии от источника радиационного нагрева. Как результат, уменьшается вертикальный градиент Θ . Однако температура в малой окрестности излучателя изменяется незначительно с течением времени, что

связано с доминированием кондуктивного механизма передачи энергии в области $1,05 < \gamma < 1,1$.

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

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ait-taleb T., Abdelbaki A., Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfers by conduction, natural convection and radiation in hollow structures heated from below or above // Int J Therm Sci. – 2008. – Т. 47. – С. 378 – 387.
2. Anil Kumar Sharma, Velusamy K., Balaji C. Interaction of turbulent natural convection and surface thermal radiation in inclined square enclosures // Heat Mass Transfer. – 2008. – Т. 44. – С. 1153 – 1170.
3. Cherifi M., Laouar-Meftah S., Benbrik A., Lemonnier D., Saury D. Interaction of radiation with double-diffusive natural convection in a three-dimensional cubic cavity filled with a non-gray gas mixture in cooperating cases // Numer Heat Tr A Appl. – 2015. – Т. 69. – С. 479 – 496.
4. Martyushev S.G., Sheremet M.A. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source // Int J Heat Mass Transf. – 2014. – Т. 73. – С. 340 – 353.

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХВОЙНОЙ БИОМАССЫ НА ПРОЦЕСС СУШКИ

Н.А. Иванова

Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ, группа А7-11

В результате обработки древесины и лесозаготовок появляется достаточное количество отходов, использование которых минимально, а их утилизация связана с большими финансовыми затратами [1]. Вместо этого биомассу можно использовать с целью получения из нее более ценных сортов топлива - твердого, жидкого или газообразного, которое сжигается с высоким коэффициентом полезного действия и при минимальном загрязнении окружающей среды [2].

Процесс удаления влаги из древесной биомассы длителен и энергозатратен, поэтому анализ закономерностей процессов влагоудаления является одной из основных задач при разработке технологий сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов [3].

Методика эксперимента

Эксперимент проводился в сушильном шкафу типа SU 32. Нагрев рабочей камеры в сушильном шкафу обеспечивался проволочными нагревателями, размещенными вокруг камеры нагрева.

В эксперименте использовалась биомасса четырех образцов хвойных пород древесины, которые наиболее распространены на территории Сибири: сосна, ель, кедр, пихта.

Эксперимент осуществлялся в несколько этапов:

- подготовка образца древесины массой 100 грамм;
- взвешивание емкости, используемой для сушки, с помощью лабораторных весов;
- заполнение емкости исследуемым образцом биомассы;
- с помощью электроконтактного термометра устанавливалась необходимая температура в сушильной камере;
- ёмкость с биомассой помещалась в сушильную камеру на заранее выбранный интервал времени (10 минут);
- по истечению необходимого времени проводилось изъятие ёмкости и измерение её массы;
- анализ полученных результатов [4].

Каждый эксперимент при фиксированных условиях проводился 3 раза для выбранного диапазона температур в печи в одном и том же интервале времени.

Результаты

Основной задачей исследования является определение парциального давления и коэффициента аккомодации на поверхности испарения исследуемых образцов. Используя уравнение состояния и уравнение Герца-Кнудсена, а также зная массовую скорость испарения жидкости, найденную экспериментальным путем, были получены значения парциального давления и коэффициента аккомодации для каждого образца и представлены в таблице.

Табл. 1.

Результаты расчетов для кедра при температуре в сушильной камере 353 К

№ п/п	$\square m$, кг	время, с	$W_{исп} \cdot 10^3$, кг/м ² ·с	m(общее), кг	m(с.в.), кг	M, Г/МОЛЬ	gh2o	rh2o	Pп, Па	A · 10 ³	
1	0,002	600	0,147	0,005	0,003	28,4	0,034	0,05	2513,6	2,7	
2	0,00195	1200	0,143	0,007	0,007	28,2	0,047	0,07	3487,4	2,8	
3	0,0021	1800	0,154	0,009	0,010	28,0	0,060	0,09	4415,9	2,9	
4	0,00215	2400	0,158	0,012	0,013	27,8	0,073	0,11	5367,0	3,1	
5	0,0022	3000	0,162	0,014	0,017	27,5	0,088	0,14	6408,6	3,1	
6	0,002	3600	0,147	0,016	0,020	27,3	0,102	0,16	7359,8	3,0	
7	0,00195	4200	0,143	0,018	0,023	27,1	0,115	0,17	8220,3	3,0	
8	0,00185	4800	0,136	0,020	0,026	26,9	0,127	0,19	8990,2	2,9	
9	0,00175	5400	0,129	0,021	0,029	26,7	0,140	0,21	9828,1	2,8	
10	0,00165	6000	0,121	0,023	0,033	26,5	0,156	0,23	10847,1	2,8	
11	0,00155	6600	0,114	0,024	0,035	26,3	0,167	0,24	11549,1	2,7	
12	0,00145	7200	0,107	0,026	0,038	26,2	0,177	0,26	12228,5	2,5	
13	0,0014	7800	0,103	0,027	0,040	26,0	0,188	0,27	12885,2	2,5	
14	0,00135	8400	0,099	0,029	0,042	25,9	0,198	0,29	13519,3	2,5	
15	0,0013	9000	0,095	0,030	0,044	25,7	0,209	0,30	14130,7	2,4	
16	0,00125	9600	0,092	0,031	0,047	25,6	0,218	0,31	14719,5	2,4	
									среднее значение	9154,4	2,8

По данным таблиц были построены зависимости массовой скорости испарения от времени и температуры и представленные на рисунках 1,2.

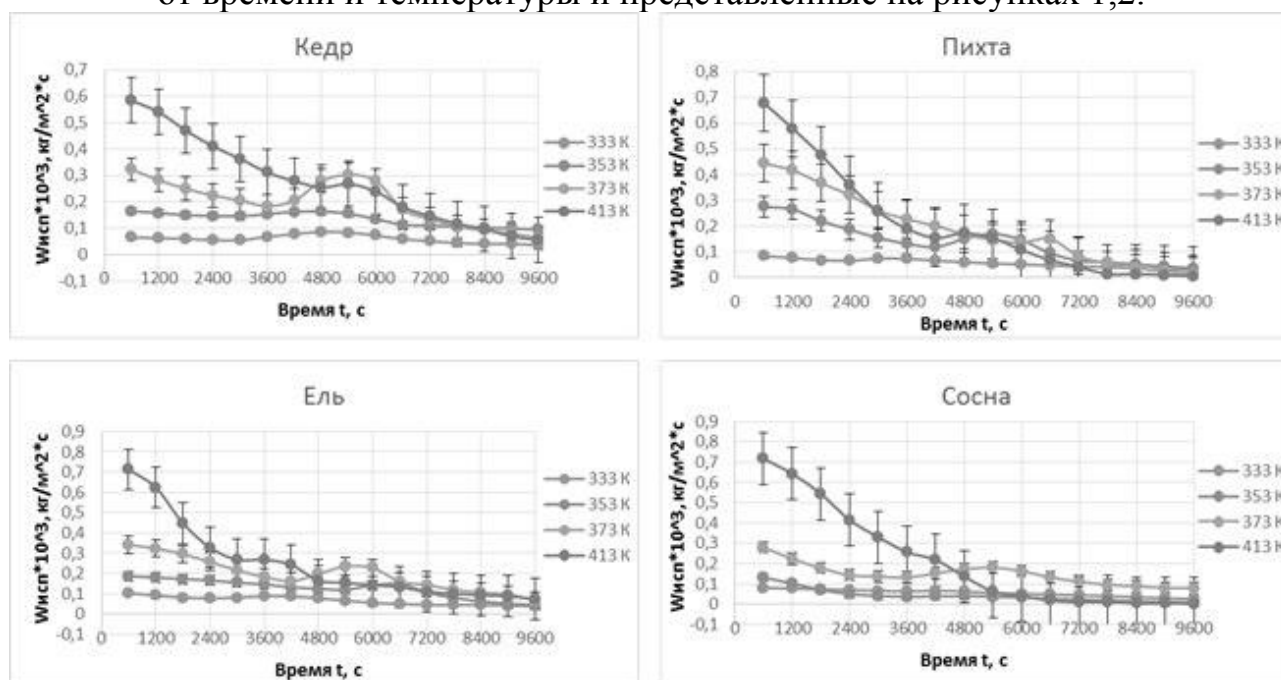


Рис.1. Зависимости массовой скорости испарения от времени

Как видно из полученных зависимостей, процесс испарения жидкости стационарный в диапазоне температур 333-353 К. Это объясняется тем, что при такой температуре за 9600 секунд не наступает период удаления связанной влаги. При температурах 373- 413 К скорость испарения понижается до определенного промежутка времени, который для всех образцов приблизительно равен 60 минутам – это первый период сушки, он соответствует удалению свободной влаги покрывающей поверхность материала. После чего начинается

удаление связанной влаги, этот период приблизительно равен 2 часам. Повышение скорости испарения перед наступлением второго периода, объясняется тем, что вместе со свободной влагой начинает испаряться и связанная, что увеличивает общую скорость испарения. Далее начинается период постоянной скорости, который говорит о том, что влага уже не испаряется из образца.

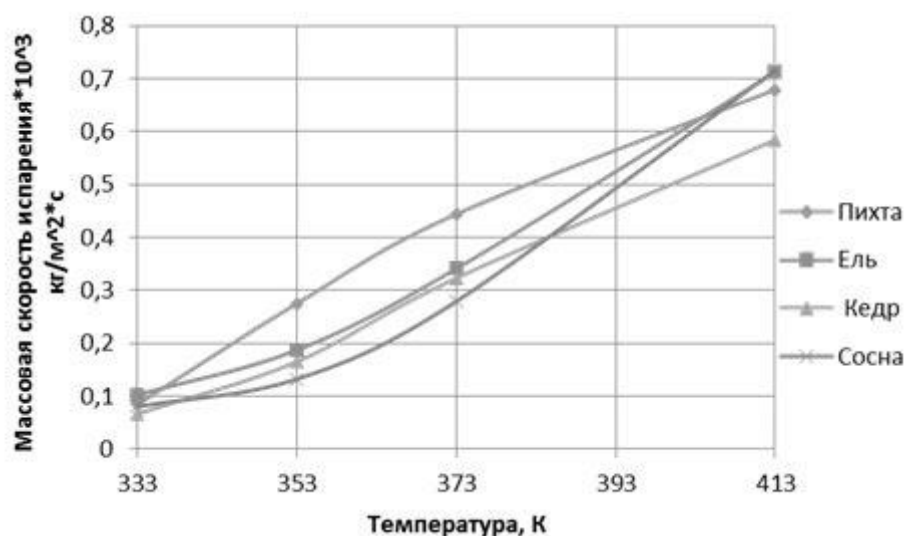


Рис. 2. Зависимость массовой скорости испарения от температуры

Анализ полученных зависимостей показал, что наивысшей скоростью испарения обладает пихта. Это связано с тем, что плотность пихты ниже плотности остальных образцов, например, ели на 15 %, а сосны на 25%. Наименьшей скоростью испарения обладает сосна, так как она устойчива к впитыванию влаги и обладает большей механической прочностью, плотностью, чем остальные образцы. Из чего следует, что сушка биомассы состоящей из пихты и ели производится при меньших временных и энергетических затратах.

Заключение

Проведены исследования теплофизических свойств типичных для данного региона хвойных пород древесины в диапазоне температур от 333 К до 413 К. Рассчитан коэффициент аккомодации и парциальное давление на поверхности испарения для каждого образца биомассы.

Получены зависимости массовой скорости испарения от времени и температуры для каждого образца биомассы и сделаны выводы, что наиболее быстро высушивается образец пихты при меньших временных и энергетических затратах.

Результаты выполненных экспериментальных исследований могут служить базой для дальнейшего уточнения механизма удаления влаги из пористой структуры влагосодержащего материала и развития общей теории сушки. Также результаты исследований могут служить рекомендациями при разработке математической модели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кирпичникова И.М., Филь Н.С. Древесные отходы как возобновляемый источник для получения тепловой и электрической энергии //

- Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика. 2012. № 16. С. 275.
2. Семенов М.И., Суховеев М.Е. Возможности использования биомассы заготовленной древесины в лесах Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 12 С.122.
 3. Bulba, Elena Evgenievna. Experimental Research of Moisture Evaporation Process from Biomass in a Drying Chamber [Electronic resource] / E.E. Bulba, A.A. Malinovsky // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: 2015. — Vol. 23: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. — [01053, 4 p.].
 4. Бульба Е.Е., Иванова Н.А. Экспериментальное исследование скорости испарения жидкости из хвойной биомассы [Электронный ресурс] / Е. Е. Бульба, Н. А. Иванова // МАТЭК. — МАТЕС Web Conf. 2017 — том 110: тепло-и массоперенос в системе теплового контроля технических и технологических энергетического оборудования. — [01020, 5 с.].

Научный руководитель: Е.Е. Бульба, к.т.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ СЛЕДОВ ЖИДКОСТНОГО АЭРОЗОЛЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГАЗЫ

И.С. Войтков

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП

Продукты сгорания, выбрасываемые промышленными предприятиями в окружающую среду, являются причиной больших тепловых потерь. Потери тепла, заключающегося в парах, достигают 12-13 % теплоты сгорания газа [1]. Вдобавок, выбросы в атмосферу продуктов сгорания оказывают негативное влияние на экологическую обстановку [2]. По этой причине утилизация тепла дымовых газов является одной из важных задач энергосбережения. Использование тепла уходящих дымовых газов на сегодняшний момент становится возможным с применением водонагревателей контактного типа, принцип работы которых заключается в нагреве подаваемой в теплообменную контактную камеру распыленной воды при непосредственном ее взаимодействии с высокотемпературными продуктами сгорания топлива.

Традиционный подход, используемый при выборе таких водонагревателей, основывается на использовании эмпирических зависимостей и известных номограмм. Важнейшее внимание при выборе конструкции и режимов работы контактных водонагревателей традиционно уделяется определению скоростей движения продуктов сгорания, гидравлическому расчету, характеристикам распыла и пр. [3-4]. Однако до настоящего времени не получено достоверной экспериментальной информации о диапазонах изменения температур продуктов сгорания при воздействии на них распыленным капельным потоком, а также

значениях характерных времен сохранения пониженных (относительно начальных) температур продуктов сгорания (после впрыска аэрозоля). В связи с этим представляет интерес экспериментальное определение максимальных перепадов температур, а также времен сохранения пониженных температур в следе аэрозольного капельного потока при его движении в потоке продуктов сгорания жидкого топлива.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение динамики изменения температуры продуктов сгорания жидкого топлива при импульсной подаче водного капельного аэрозоля.

Экспериментальный стенд и методы исследований

При проведении исследований использовался экспериментальный стенд (рис. 1) для диагностики двухфазных газопарожидкостных потоков, работающий на базе панорамных оптических методов «Particle Image Velocimetry» (PIV) и «Shadow Photography» (SP). Для регистрации температур газовой среды (T_g) в следе капельного потока применялся измерительный комплекс «National Instruments». По основным элементам установка аналогична использованной в экспериментах [5].

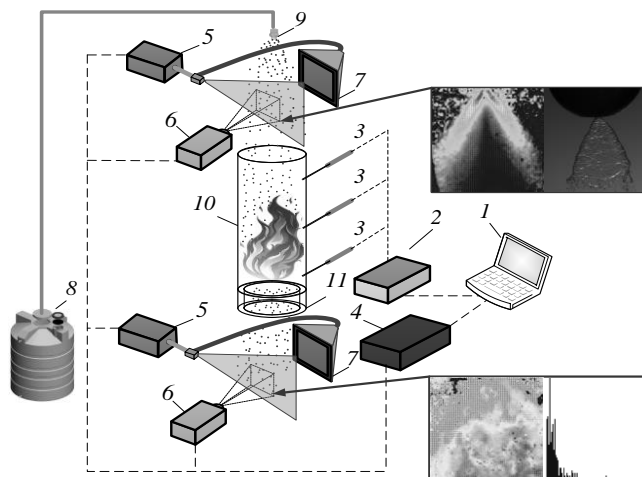


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – персональный компьютер (ПК); 2 – высокоскоростная плата аналогового ввода; 3 – термопары; 4 – синхронизатор сигналов; 5 – двойной импульсный Nd:YAG лазер; 6 – кросскорреляционная CCD видеокамера; 7 – диффузный экран; 8 – емкость с водой; 9 – распылительная форсунка; 10 – цилиндр из кварцевого стекла; 11 – полый цилиндр с горючей жидкостью

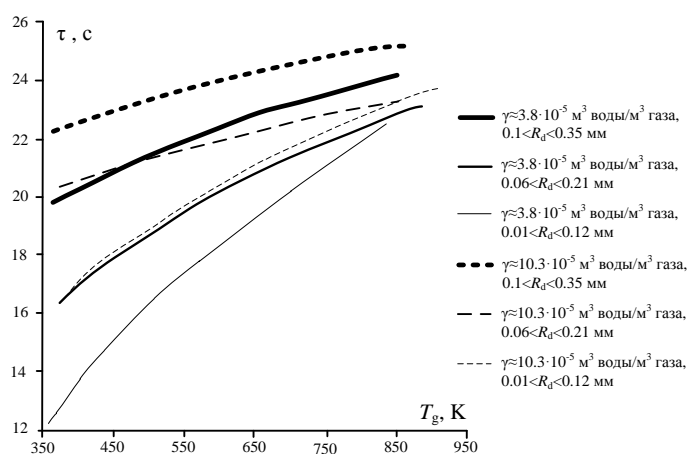
Для создания потока высокотемпературных продуктов сгорания применялись цилиндр 10 (высота – 1 м, диаметр – 0,2 м) из жаропрочного кварцевого стекла и полый цилиндр (горелка) 11, наполненный горючей жидкостью [5]. Во внутреннее пространство горелки 11 заливалось жидкое топливо – керосин (марки ТС-1).

Для генерации капельного потока применялась система, состоящая из баллона с водой 8 (под давлением 100–300 кПа), канала подачи воды и распылительной форсунки 9. Использовались три типа распылительных форсунок, генерирующих различные (по дисперсности) капельные потоки: крупный распыл – $R_d=0.08\text{--}0.25$ мм; средний распыл – $R_d=0.06\text{--}0.18$ мм; мелкий распыл – $R_d=0.04\text{--}0.12$ мм

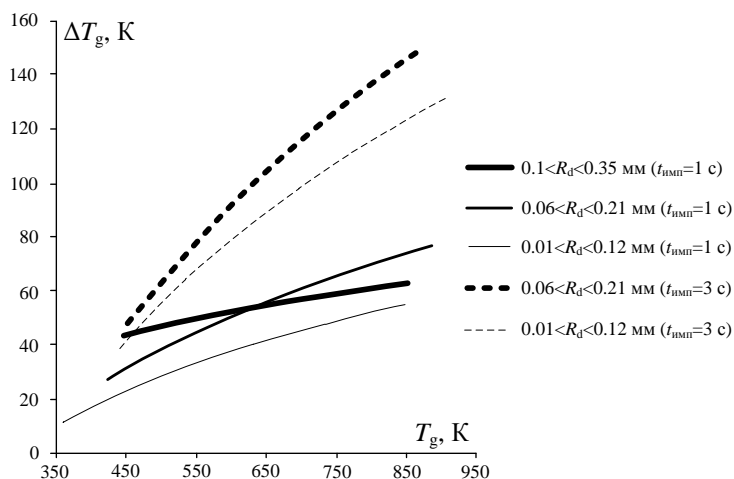
При проведении экспериментов осуществлялась импульсная (1-3 с) подача воды во внутреннюю полость цилиндра 10 (область высокотемпературных продуктов сгорания). Проводилась непрерывная регистрация температуры продуктов сгорания хромель-алюмелевыми термопарами (погрешность – 3 К). Данные сохранялись на персональном компьютере 1, где выполнялась их обработка, и определялись характерные значения перепадов температур (ΔT_g), а также времен (τ) сохранения пониженных (относительно начальных) температур продуктов сгорания в следе капельного потока.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости времени (τ) сохранения «температурного следа» (восстановления температуры до начальных значений T_g) водного аэрозоля при разных начальных размерах капель и их объемных концентрациях в потоке.



а



б

Рис. 2. Аппроксимационные (а) зависимости времен сохранения «температурного следа» аэрозоля воды при разных размерах капель от температуры газового потока (б) зависимости перепадов температур парогазовой смеси при разных размерах капель от температуры газового потока

Зависимости хорошо иллюстрирует тот факт, что определяющее влияние на время сохранения пониженной температуры (τ) и перепад температур (ΔT_g) оказывает именно начальный размер капель и их объемная концентрация. Так, видно, что чем больше R_d , тем более продолжительное время сохраняются по-

ниженные температуры в следе. Полученный результат можно объяснить следующим образом. Механизм снижения температуры в следе капельного потока обусловлен двумя эффектами: во-первых, интенсивным испарением жидкости и во-вторых, вытеснением «горячих» продуктов сгорания непосредственно самим капельным потоком [4, 5]. Так, очевидно, что при размерах капель $R_d=0.01-0.12$ мм последние испаряются практически в полном объеме [4, 5], тем самым снижение температуры и, как следствие, времена τ обусловлены главным образом процессом испарения воды. Однако при фиксированной концентрации капель увеличение их размеров приводит к росту расстояний между ними, как в продольном (соответствующем направлению движения), так и в поперечном направлениях. Интенсивность испарения капель снижается при росте R_d до 0.35 мм на 50-70 %. Тем самым снижение температуры продуктов сгорания по большей части обусловлено вытеснением «горячих» газов самим капельным потоком. Полученный результат имеет важное прикладное значение: скорость испарения жидкости напрямую зависит от температуры среды. Тем самым, используя импульсную подачу воды и регулируя при этом дисперсность потока, можно существенно повысить интенсивность испарения жидкости, тем самым, увеличив КПД водонагревателей контактного типа.

Заключение

В результате выполненных экспериментов установлено, что времена сохранения пониженных температур в следе капельного водного аэрозоля могут достигать 10-25 с в зависимости от дисперсности капельного потока. Выполненные исследования показали существенную роль процессов парообразования и вытеснения продуктов сгорания при формировании «температурных следов» аэрозолей. Выделенные особенности снижения температуры продуктов сгорания в следе капельного потока воды позволят существенно повысить эффективность работы водонагревателей контактного типа за счет замены непрерывной подачи воды на импульсную.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бухаркин Е.Н. К методике теплового расчета конденсационных утилизаторов тепла уходящих газов. // Теплоэнергетика. 1997. № 2. С. 41-46.
2. Закревский В.А. Контактный нагрев воды уходящими газами в газовых котлах. // Энергетика вестник БНТУ. 2007. № 3. С. 54-62.
3. Ю.П. Соснин. Контактные водонагреватели. // Стройиздат. 1974г 362 С.
4. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование особенностей перемещения и испарения капель воды в типичных для теплообменных камер контактных водонагревателей условиях. // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 68-75.

5. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование эффективности распыления жидкости при тушении возгораний в помещениях. // Безопасность жизнедеятельности. 2014. № 7. С. 38-42.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Д.Х. Габидуллина, Г.А. Калугин, И.Р. Снопко
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТЭС, 5031,5042

Введение

Оптическая печь устройство для фокусировки лучистой энергии от источника на объект нагрева. Оптические печи используются для изучения свойств материалов путем их нагрева до высоких температур, отсюда появляется необходимость в определении их параметров.

При нагреве в оптических печах используют зеркальные ящики, с целью выравнивания плотности теплового потока для того, чтобы упростить дальнейшие расчеты при определении свойств материалов (привести задачу теплопроводности к одномерному виду)

Цель исследования заключалась в определении параметров нагрева трех оптических систем: печи радиационного нагрева УРАН-1, оптической системы осветителя ОК-1 и бипараболидной оптической печи при использовании зеркального ящика и без него.

Оборудование

Осветитель ОК-1 имеет следующие параметры: диаметр отражателя 350мм, фокусное расстояние 560мм. В качестве источника лучистого потока используется лампа накаливания мощностью 170Вт (на 12В). Форма отражателя- моноэллипсоидная. Параметры источника питания: напряжение $U=6.5В$, сила тока $I=26.15А$. Оптическая схема печи представлена на рис.1.

Параметры оптической печи УРАН-1 согласно [1]: фокусное расстояние 1000мм, диаметр отражателя 600мм. Источник лучистого потока- лампа накаливания мощностью 500Вт (на 220В). Форма отражателя- моноэллипсоидная. Источник питания дает следующие параметры сети: напряжение $U=125.5В$, сила тока $I=1.42А$. Схема печи представлена на рис.2.

Бипараболидная система имеет следующие параметры: диаметр отражателя 650мм, расстояние между отражателями 520мм, фокусное расстояние 360мм. В качестве источника лучистого потока используется лампа накаливания мощностью 170Вт (на 12В) Источник питания дает следующие параметры сети: напряжение $U=6.3В$, сила тока $I=8А$. Оптическая схема печи представлена на рис.3.

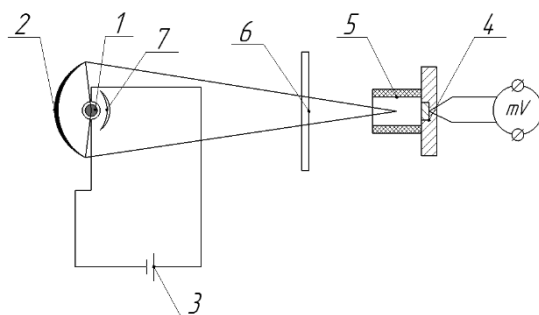


Рис. 1. Осветитель ОК-1. 1 - лампа, 2 - отражатель, 3 - источник питания, 4 - датчик, 5 - зеркальный ящик, 6 - задвижка, 7 - контротражатель

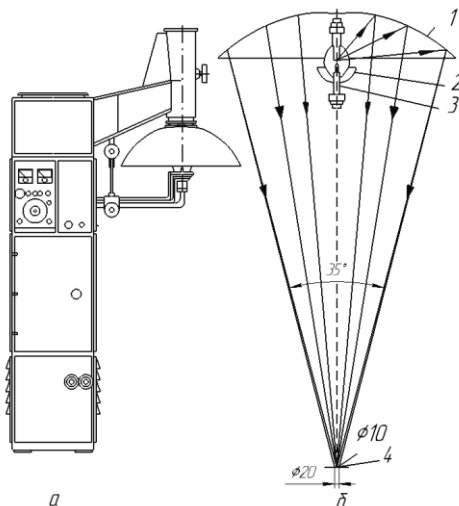


Рис. 2. Оптическая печь типа УРАН-1: а — конструктивное выполнение; б — оптический излучатель: 1 — отражатель; 2 — контротражатель; 3 — лампа; 4 — рабочее пятно

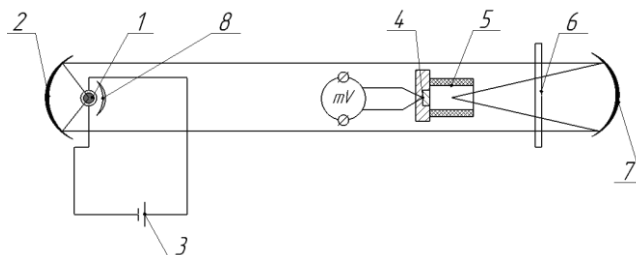


Рис. 3. Бипараболоидная система. 1 - лампа; 2 - первый отражатель; 3 - источник; 4 - датчик; 5 - зеркальный ящик; 6 - задвижка; 7 - второй отражатель; 8 - контротражатель

В качестве измерителя лучистого потока используется экспоненциальный датчик [2]. Методика измерений датчиком этого типа основана на регулярном тепловом режиме второго рода, устанавливаемом в нагреваемой постоянным тепловым потоком пластине, согласно которому температурное поле в пластине толщиной h с постоянными теплофизическими свойствами при значениях числа Фурье $Fo > 0,3$ описывается выражением

$$T(x, t) = \frac{q_{рез} t}{\rho c_p h} + \frac{q_{рез} h}{\Lambda} \frac{3x^2 - h^2}{6h^2} \quad (1),$$

Дифференцирование этого выражения приводит к соотношению

$$q_{рез} = \rho c_p h \frac{dT}{dt} \quad (2),$$

из которого следует, что при const темп изменения температуры $b = \frac{dT}{dt} =$

const для любой точки пластины и его регистрация позволяют определить тепловой поток. Схема датчика представлена на рис. 4

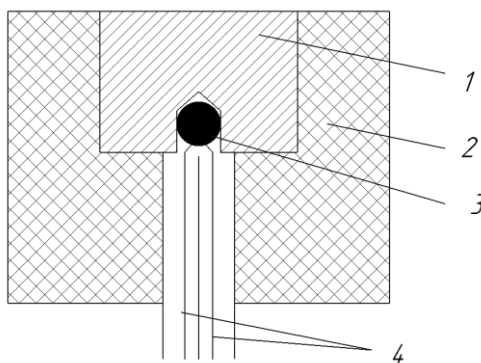


Рис. 4. Схема экспоненциального датчика теплового потока: 1 - калориметрический элемент; 2 — теплоизолирующая втулка; 3 — спай термопары; 4 — электроды

В качестве калориметрического элемента используется медный цилиндр с параметрами: $h = 0,003 м$, $c_p = 0,384 \frac{кДж}{кг \cdot K}$, $\rho = 8,96 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}$; материал теплоизолирующей втулки- вспененный кварц, термопара- хромель-алюмелиевая.

Метод

Включался источник лучистого потока, в течении 30сек происходил его нагрев, затем в течение минуты, каждые 10сек измерялась термоЭДС термопары из которого находилась температура калориметрического элемента. На основе этих измерений строилась зависимость температуры от времени из которой находилось значение $\frac{dT}{dt}$, затем рассчитывалась плотность теплового потока по формуле (2).

КПД оптической печи определялся как отношение электрической мощности, сообщаемой лампе к тепловой мощности, передаваемой поверхности согласно

$$\eta = \frac{Q_{менл}}{Q} = \frac{0,25\pi d^2 \overline{q_{рез}}}{UI} \quad (3),$$

где d - диаметр светового пятна, $\overline{q_{рез}}$ - средняя плотность теплового потока, U - напряжения, I - сила тока.

Результаты

В ходе измерений были получены следующие результаты.

КПД печей: УРАН-1 2.67%, бипараболоидной системы 4.3%, осветителя ОК-1 1.2%

На рис. 5 представлено распределение плотности теплового потока с зеркальным ящиком (меньшие значения плотности теплового потока) и без него (большие значения плотности теплового потока) для каждой из оптических печей.

Значение плотности теплового потока в фокусе (в скобках максимальное значение плотности теплового потока при использовании зеркального ящика): для Осветителя ОК-1 14839 (5592) Вт/м², для бипараболоидной системы 12329 (366) Вт/м², для УРАН-1 16618 (4923) Вт/м²

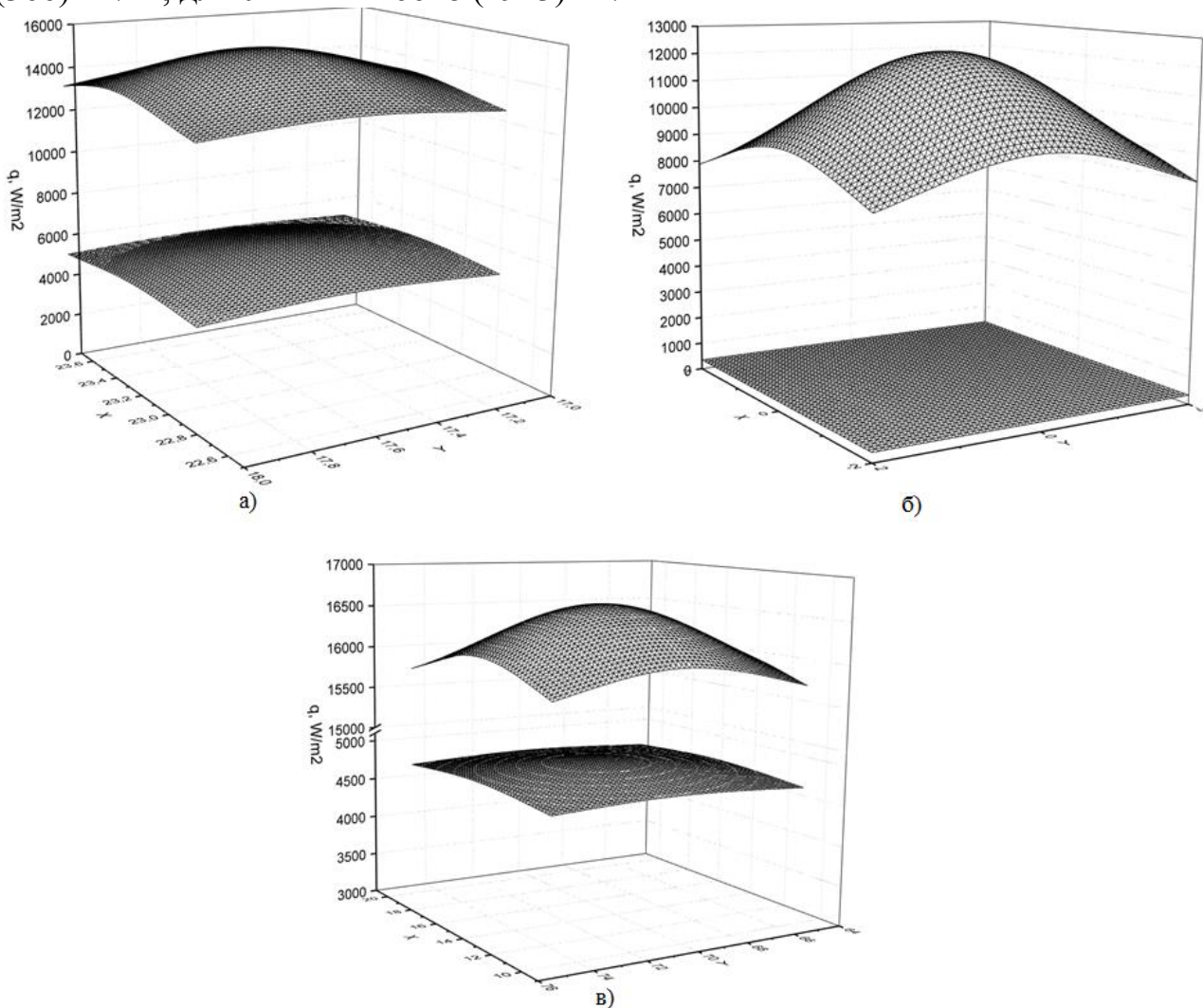


Рис. 5. Распределение плотности теплового потока. а) Осветитель ОК-1, б) Бипараболоидная оптическая система, в) УРАН-1

Анализ результатов

Как видно из сопоставления полученных результатов для опыта с зеркальным ящиком и без- зеркальный ящик выравнивает тепловой поток по площади, но при этом сам тепловой поток уменьшается, ввиду поглощения части лучей стенками ящика внутри (из- за не идеальности отражательной поверхности)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Оптические печи // Г.Г. Лопатина, В.П. Сасоров, Б.В. Спицын, Д.В. Федосеев. - М.: Металлургия, 1969.- 215 с
2. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве. - М.: МГТУ, 2014- 396с.

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

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СООРУЖЕНИЙ В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ

А.А. Бычкова

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

В настоящее время вопросам энергосбережения и повышения энерго- и ресурсоэффективности зданий и сооружений административного и производственного назначения уделяют особое значение. Эффективным решением, как показывает практика, становится комплексный подход, включающий проведение энергетического моделирования с целью разработки стратегий энергосбережения и внедрения автоматизированных систем управления зданием [1].

При этом стоит задача разработки комплексной модели, которая позволит проводить широкий спектр исследований процессов теплообмена, характеристик энергопотребления и устойчивости тепловых режимов помещений. Анализ известных периодических изданий позволяет сделать вывод о том [2], что наиболее перспективным подходом при создании комплексных моделей сложных динамических систем является использование метода «акаузального» моделирования. В этом случае появляется возможность [3] интеграции на одной программной платформе моделей систем, функционирующих на различных физических принципах. Такая комплексная модель, включающая термодинамические системы здания, до сих пор не разработана для сооружений, эксплуатирующихся в суровых климатических условиях Арктики.

Целью данной работы было разработать одну из таких термодинамических систем – модель пластинчатого теплообменного аппарата (ПТА). С точки зрения оптимального энергопотребления управление теплоснабжением здания с учетом характеристик потребления энергии реализуется с помощью индивидуальных тепловых пунктов [4], которые предусматривают наличие ПТА.

Пластинчатый теплообменный аппарат представляет собой набор пластин из нержавеющей стали, скомпонованных таким образом, что две среды, участвующие в процессе теплообмена, движутся по разные стороны одной пластины. Теплопередача в теплообменном аппарате происходит посредством конвекции

между горячей средой, протекающей в горячей камере, и горячей стороной стенки, которая предотвращает перемешивание сред, посредством теплопередачи через стенку и посредством конвекции между холодной стенки и нагреваемой средой. Пакет пластин набирается для организации определенного количества параллельных каналов и необходимой площади теплообмена [5].

Такая конструкция теплообменника обеспечивает эффективную компоновку теплообменной поверхности и, соответственно, малые габариты самого аппарата. Для моделирования выбран теплообменный аппарат типа М6 FG, технические характеристики которого приведены в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики ПТА типа М6 FG и пластин

Характеристика	Параметр
Массовый расход гор.в., кг/с	3,6 ÷ 14,4
Массовый расход хол.в., кг/с	3,6
Температура гор.в. на входе	110
Температура хол.в. на входе	70
Пластины	
Ширина, м	0,248
Высота, м	0,750
Расстояние между пластинами, м	0,008
Толщина пластин, м	0,0005
Эквивалентный диаметр, м	0,0155
Площадь поперечного сечения канала, м ²	0,002
Площадь одной пластины, м ²	0,27
Количество каналов по горячей стороне	31
Количество каналов по холодной стороне	30
Удельная теплоемкость материала пластины, Вт/м °С	16,3
Схема движения теплоносителя	противоток

В теплообменном аппарате при определённой схеме движения теплоносителей разность температур между его холодным и горячим теплоносителями изменяется во времени и характеризуется среднелогарифмическим температурным напором.

$$LMTD = \frac{(T_{p1} - T_{s1}) - (T_{p2} - T_{s2})}{\ln \frac{T_{p1} - T_{s1}}{T_{p2} - T_{s2}}}, \quad (1)$$

где T_{p1} , T_{p2} – температуры на входе и выходе горячего теплоносителя; T_{s1} , T_{s2} – температуры на входе и выходе холодного теплоносителя.

Для каждого области теплообмена записывается математическое описание в виде выражений, характеризующих изменение температуры в потоке теплоносителя во времени, обусловленное движением потока и теплопередачей. С каждой стороны можно установить энергетические балансы для горячей и холодной стороны согласно закону сохранения энергии:

$$M_{DH} \cdot c_p \cdot \frac{dT_{p2,DH}}{dt} = \varphi_{m,DH} \cdot c_p \cdot (T_{p1,DH} - T_{p2,DH}) - U_{DH} \cdot A_{DH} \cdot LMTD \quad (2)$$

$$M_{rad} \cdot c_{p,w} \cdot \frac{dT_{s1,rad}}{dt} = \varphi_{m,rad} \cdot c_{p,w} \cdot (T_{s2,rad} - T_{s1,rad}) + U_{DH} \cdot A_{DH} \cdot LMTD \quad (3)$$

где M_{DH} – масса, кг; c_p – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); $\varphi_{m,DH}$ – массовый расход на теплоснабжение помещений, кг/ч; U_{DH} – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К); A_{DH} – поверхность теплообмена, м²; M_{rad} – масса, кг; $\varphi_{m,rad}$ – массовый расход теплоносителя из радиатора, кг/ч. Индекс DH и rad обозначают теплоноситель из системы централизованного отопления и теплоноситель, принадлежащий к радиаторной сети.

Модель включает отдельный блок для определения коэффициента теплопередачи k , Вт/(м² К), который характеризует интенсивность переноса тепла от греющего теплоносителя к нагреваемому через твердую стенку-пластину.

$$k = \frac{\beta}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4)$$

где β – коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента теплоотдачи из-за термического сопротивления накипи и загрязнений на пластине, в зависимости от качества воды принимается равным $0,7 \div 0,85$; $\delta_{ст}$ – толщина стенки пластины, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки пластины, Вт/(м² К).

Расчет коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 , Вт/(м² К) от греющей воды к стенке пластины и от стенки пластины к нагреваемой воде [6] согласно методике ГОСТ 15518.

$$\alpha = 1,16 \cdot A \cdot \left[23000 + 283 \cdot t_{cp} - 0,63 \cdot (t_{cp})^2 \right] \cdot \nu_{mn}^{0,73} \quad (5)$$

где A – коэффициент, зависящий от типа пластин (0,492); t_{cp} – средняя температура, °С соответствующего теплоносителя.

Фактическая скорость греющей и нагреваемой воды.

$$\nu_{mn} = \frac{G}{3600 \cdot f \cdot \rho}, \quad (6)$$

где f – общее живое сечение каналов в пакете по ходу греющей и нагреваемой воды, м²; ρ – плотность воды, кг/м³; G – расход, кг/ч, соответственно, греющей и нагреваемой воды.

Моделирование ПТА осуществляется с помощью методов физического моделирования в ПО Matlab-Simulink/Simscapе. Разработанная модель представлена на рис. 1.

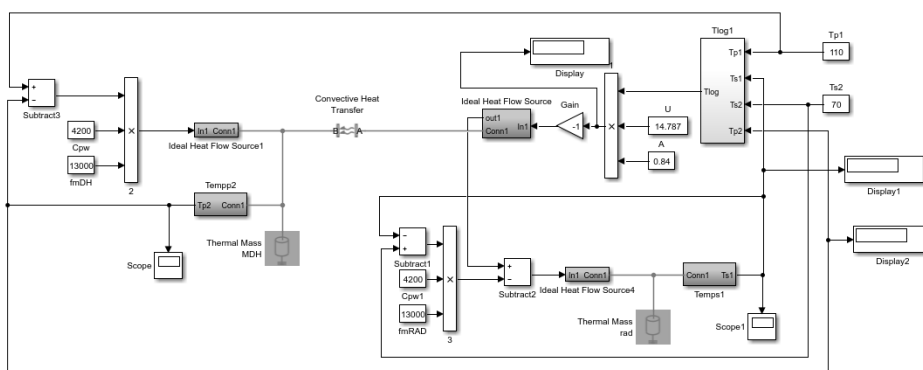


Рис. 1. Блок для теплообменного аппарата в Simulink/Simscapе

Для оценки адекватности разработанной модели проведена серия экспериментальных исследований. В первой серии исследование выполнялось на базе разработанной модели, во второй серии использовалась компьютерная программа Альфа Лаваль CAS200. Сравнению подверглись следующие параметры: температуры на входе холодного теплоносителя (T_{s1} и T_{out_cold}), температуры на выходе горячего теплоносителя (T_{p2} и T_{out_hot}). Результаты исследований представлены в таблице 2.

Табл. 2. Результаты расчета

G_DH, кг/с	Ts1, °C	Tout_cold, °C	$\Delta 1$, %	Tp2, °C	Tout_hot, °C	$\Delta 2$, %
3,6	101,8	100,2	1,5717	78,21	79,8	2,0330
5,4	104,8	104,7	0,0954	86,82	86,9	0,0921
7,2	106,7	106,6	0,0937	91,63	91,8	0,1855
9	107,7	107,5	0,1857	94,91	95	0,0948
10,8	108,3	108,1	0,1847	97,24	97,4	0,1645
12,6	108,6	108,4	0,1842	98,96	99,1	0,1415
14,4	108,9	108,6	0,2755	100,3	100,4	0,0997

Результаты показали погрешность разработанной модели на уровне 2%, что является достаточным для выполнения моделирования. Модель может быть принята в текущей реализации и интегрирована в комплексную модель.

В ходе работы была разработана модель ПТА на основе методов физического моделирования в среде MatLab и проведены исследования, косвенно показавшие адекватность модели. В дальнейшем планируется выполнить верификацию с реальным объектом и улучшить точность модели, а также интеграцию модели ПТА в термодинамическую систему для различных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кожевников В.А. Энергоаудит систем теплоснабжения. О некоторых аспектах // Интернет – Доклад., МЭИ (ТУ). – 2008.
2. Broman D. Higher-order acausal models // Proceedings of the «2-nd International workshop on equation-based object-oriented languages and tools». – Raphos, 2008. – pp. 59–69.

3. Lauenburg P. Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure // Proceedings of the Eleventh International Building Simulation Conference (IBPSA). Glasgow, 2009. – pp. 150–158.
4. Марков А.Р. Повышение эффективности систем централизованного теплоснабжения // Экологические системы. –2008. №11.
5. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении // Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П. А. КАПУСТЕНКО и др. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 448 с.
6. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. – 472 с.

Научный руководитель: М.Н. Морозов, ассистент каф АТП ЭНИН ТПУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В РАЗОГРЕТОМ ВОЗДУХЕ

А.В. Абрамова

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

Процессы высокотемпературного (более 500 К) испарения эмульсий, суспензий и растворов на основе воды интенсивно исследуются на протяжении последних лет вследствие большой группы приложений (выпаривание и выжигание примесей при термической очистке сточных вод, утилизации тепла дымовых путем создания газопаровых теплоносителей и др.).

С ростом численности населения, увеличением потребности в сельскохозяйственной продукции и развитием промышленности неуклонно увеличивается и потребление воды. Несмотря на колоссальные запасы этого ценнейшего ресурса на Земле, доля пресной воды в этом объеме составляет не более 3 % [1–3]. Пропорционально объему потребления возрастает и объем сточных вод. В таких условиях развитие эффективных и недорогих технологий нейтрализации вредных примесей бытовых и промышленных стоков является особенно важным. Эффективная очистка технологических и сточных вод позволит не только снизить негативное антропогенное воздействие на окружающую среду, но и экономить ресурсы за счет применения в технологических циклах систем оборотного водоснабжения.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение отличий характеристик испарения водных эмульсий с разной концентрацией примесей в условиях, соответствующих термической очистке промышленных стоков.

Экспериментальный стенд и методы проведения исследований. В исследованиях применялись водные эмульсии, содержащие органические жидкости в концентрациях, соответствующих предприятиям энергетической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслей ($\gamma=3-7\%$). I группа: бензин и керосин, II группа: трансформаторное и компрессорное масла, III группа: сырая нефть.

Объем капель эмульсий во всех проведенных сериях экспериментов составлял 15 мкл. Капли эмульсий генерировались электронным дозатором (шаг варьирования генерируемого объема 0.1 мкл) в 2 этапа. Сначала на держатель 7 помещалась капля дистиллированной воды, а затем к ней (также с использованием дозатора) добавлялась капля органической жидкости в объеме, соответствующем требуемой по условиям эксперимента концентрации примеси и соблюдению общего объема капли $V_d=15$ мкл.

При проведении экспериментов фиксировались времена полного испарения капель t_h , либо время до их взрывного разрушения (распада) t_d . В результате обработки полученных видеogramм определяли изменение характерного размера капель R_d . Для этого по известному расстоянию между двумя точками рассчитывался масштабный коэффициент (в проведенных экспериментах в качестве масштаба использовался диаметр держателя капли $D_m=0.36$ мм). Выполненные измерения затем использовались при вычислении скорости испарения эмульсий W_e . Для каждого состава эмульсий, использованных в экспериментах, температура разогретого воздуха варьировалась от минимальной ($T_g= 373$ К) и до значения, при котором фиксировался взрывной распад капель.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

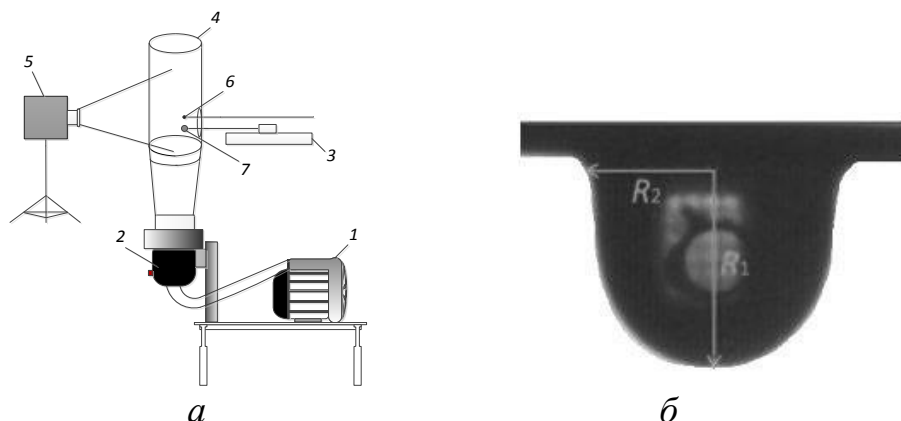


Рис. 1. Схемы экспериментального стенда (а): 1 – нагнетатель воздуха; 2 – воздухонагреватель; 3 – автоматизированный координатный механизм; 4 – жаропрочный цилиндр (канал) из кварцевого стекла; 5 – высокоскоростная видеокамера; 6 – термопара; 7 – объект исследования (капля эмульсии) и вычисления массовой скорости испарения (б)

Результаты и обсуждение. В процессе проведения экспериментов при варьировании условий нагрева (в первую очередь, за счет изменения температуры разогретого воздуха) для всех исследованных групп водных эмульсий было установлено *три режима* прогрева испарения (рис. 2).

Первый – режим монотонного испарения капель со свободной поверхности в основном за счет конвективного теплообмена с разогретой газовой средой (рис. 2, а). Этот режим наблюдался при относительно невысоких температурах (I группа примесей $T_g < 573$ К, II группа примесей $T_g < 423$ К, III группа примесей $T_g < 423$ К) и характеризовался, как правило, длительностью до трех минут. При этом примеси групп II и III после испарения воды оседали на поверхности держателя капли. Компоненты капли практически не оказывали ощутимого взаим-

ного влияния, испаряясь последовательно. При этом бензин и керосин в силу своей меньшей относительно воды плотности образовывали на поверхности капли микропенку и испарялись в составе капель.

Второй режим регистрировался в среднем диапазоне температур (I группа примесей $573 \leq T_g \leq 623$ К, II группа примесей $423 \leq T_g \leq 523$ К, III группа примесей $423 \leq T_g \leq 473$ К) воздуха. На первой стадии нагрева уменьшение объема капли происходило монотонно. Затем внутри капли формировались пузыри, начинался процесс интенсивного кипения (рис. 2, б). Пузырьки локализовались в основном вблизи держателя, а их объем был значительно меньше размеров капли в целом. Выход формирующихся в результате кипения паров через поверхность капли не приводил к ее необратимому разрушению.

Третий режим испарения характеризовался малой длительностью существования капель вследствие их распада на более мелкие фрагменты (рис. 2, в). Распаду предшествовали краткая стадия монотонного испарения, а затем стадия кипения с формированием паровых пузырей, значительно (в 2–3 раза) превышающих по объему исходные капли. Схлопывание пузырей приводило к разрушению целостности оболочки капли и ее распаду. В результате распада от держателя отрывались более мелкие (относительно начального объема капли) фрагменты жидкости, т.е. происходило дробление капли.

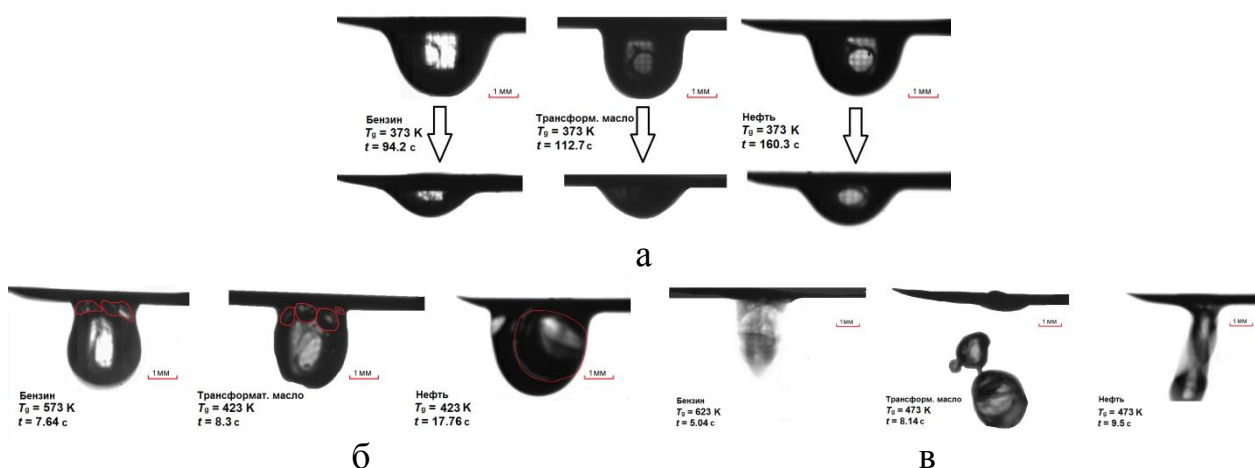


Рис. 2. Типичные видеокadres характерных режимов испарения капель водных эмульсий при концентрации жидких примесей $\gamma=7$ %: а – режим I (монотонное испарение); б – режим II (пузырьковое кипение); в – режим III (распад)

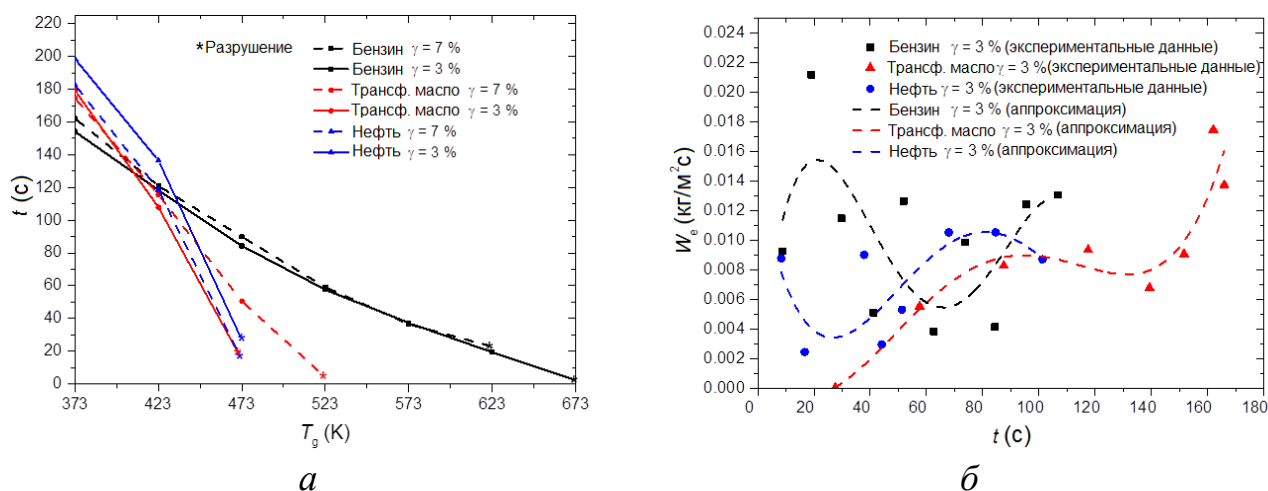


Рис. 3. Предельные условия прогрева капли (*a*) для взрывного дробления (*соответствует условиям распада капель) и экспериментальные значения колебаний скорости испарения (*б*) капель водных эмульсий и их аппроксимация в режиме монотонного испарения ($T_g=423$ K)

Наибольшие значения предельных температур (рис. 3, *a*), при которых происходит взрывной распад капель, характерны примесям первой группы. Бензин и керосин при введении в каплю обволакивают ее поверхность тонкой пленкой. Вероятно, для этой группы примесей в механизме возникновения взрывного разрушения капель большую роль играют процессы окисления паров, формирующихся в малой окрестности пленки горючей жидкости на поверхности капли, а также значительный разогрев металлического держателя, которые интенсифицируются при высоких температурах окружающей среды. Кипение капель с примесью бензина и керосина (рис. 2, *б*) происходит преимущественно в окрестности зоны контакта с держателем, поскольку на его поверхности формируются локальные очаги парообразования, центрами которых могут быть микropоры, шероховатости и т.д.

На рис. 3, *б* представлены колебания значений массовой скорости испарения капель водных эмульсий в разные моменты времени в течение одного цикла испарения в монотонном режиме. Разброс значений скорости испарения вызван существенной нестационарностью процессов теплообмена. На скорость прогрева и парообразования влияют соотношение содержания воды и примеси, а также толщина формирующегося вблизи поверхности капли слоя пара. С одной стороны, паровая прослойка снижает интенсивность прогрева и испарения вследствие меньшего (более чем в 10 раз) значения коэффициента теплопроводности и изменения других теплофизических свойств относительно воды в жидком состоянии. С другой стороны, формирующаяся паровая оболочка в отличие от воды не является диатермичной [4, 5], и может как поглощать, так и быть самостоятельным источником инфракрасного излучения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке стипендии Президента РФ для аспирантов и молодых ученых СП-1350.2015.1.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kalogirou S.A. Seawater desalination using renewable energy sources // Prog. Energy Combust. Sci. – 2005. – Vol. 31, no. 63. – P. 242–281.
2. Global Issues Overview – Water, United Nations. <http://www.un.org/ru/sections/issues-depth/water/>.
3. Romero R.J., Rodríguez-Martínez A. Optimal water purification using low grade waste heat in an absorption heat transformer // Desalination. – 2008. – Vol. 220, Iss. 1–3. – P. 506–513.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
5. Robertson C.W., Williams D. Lambert Absorption Coefficients of Water in the Infrared // Opt. Spektrosk. – 1960. – Vol. 27. – P. 790.

Научный руководитель: О.В. Высокоморная, к.ф.-м.н., доцент каф. ТПТ ЭНИИ ТПУ.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОГО ВДУВА ГАЗА НА ТЕПЛООБМЕН В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Н.В. Савкина¹, Н.П. Скибина¹, Е.А. Маслов^{1,2}, В.В. Фарапонов¹

Томский государственный университет

ФТФ, ДП¹

Томский политехнический университет

ЭНИИ, ТПТ²

Маневренность сверхзвукового летательного аппарата на траектории полета может быть осуществлена с помощью локального вдува газа с поверхности в пограничный слой. При этом на этапе проектирования возникает необходимость решения задачи определения основных параметров и структуры потока в пограничном слое в зависимости от условий вдува.

Целью настоящей работы является экспериментально-теоретическое исследование влияния локального вдува газа в пограничный слой при обтекании осесимметричной модели в диапазоне чисел Маха $M = (2 \div 5)$.

Эксперименты по определению коэффициента сопротивления осесимметричного тела при обтекании сверхзвуковым потоком проводились на импульсной аэродинамической установке [1]. Диапазон реализуемых режимов обтекания: числа $M = (2 \div 5)$; давление торможения на срезе сопла диффузора, формирующего сверхзвуковой поток, $P_0 = (0.15 \div 0.3)$ МПа при статическом давлении $P = (0.03 \div 0.07)$ МПа; температура торможения набегающего воздушного потока $T_0 = (17.5 \div 250)$ °С. Длительность работы импульсной аэродинамической установки в зависимости от условий испытаний составляет $(1.0 \div 3.0)$ с.

Поля температуры и давления при обтекании конуса сверхзвуковым потоком с учетом локального вдува газа в пограничный слой определялись на ос-

новании численного моделирования процесса. Термогазодинамические характеристики течения получены с помощью пакета программ Ansys Fluent. Течение сплошной среды (газа) моделировалось системой уравнений Навье-Стокса турбулентного течения вязкого сжимаемого газа. В качестве модели турбулентности была использована SST-модель (модель сдвиговых напряжений Ментера), основанная на гипотезе вихревой вязкости. Численная реализация решения осуществлялась на неструктурированной сетке с различным сеточным разрешением (рис.1). Сетка сгущалась вблизи поверхности тела.

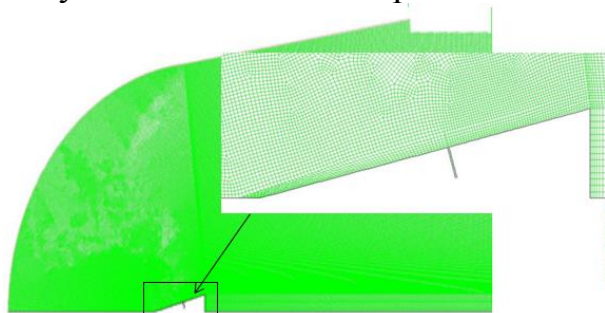


Рис. 1. Сеточная область решения задачи.

Количество узлов сетки выбиралось по экспериментально определенному значению коэффициента лобового сопротивления c_x .

В качестве примера в таблице 1 приведены данные о сеточной сходимости (количество узлов сетки) в численном исследовании обтекания конуса сверхзвуковым потоком ($M = 3$), $\delta c_x = \frac{|c_x^{calc} - \bar{c}_x|}{\bar{c}_x}$ – относительная погрешность расчетного значения коэффициента лобового сопротивления, $\bar{c}_x = 0.324$. (табл.1).

Табл. 1.

Сеточная сходимость при обтекании конуса сверхзвуковым потоком, $M = 3$.

cells	c_x^{calc}	δc_x
92 532	0.3189	0.0157
138 798	0.3212	0.0086
208 197	0.3239	0.0003
320 500	0.3241	0.0003

На основании численных исследований получены данные о распределении температуры и давления при обтекании конуса сверхзвуковым потоком, $M = (2 \div 5)$, с учетом локального вдува газа в пограничный слой.

На рисунке 2 приведен график распределения температуры вблизи поверхности конуса при локальном вдуве, $M = 3$, угол атаки $\alpha = 0^\circ$. Анализ полученных результатов показал влияние вдува на распределение температуры в пограничном слое. Распределение температуры носит существенно немонотонный характер: наиболее высокая температура – от вершины конуса до отборного отверстия, резкое уменьшение температуры на участке вдува, монотонное увеличение температуры – от отборного отверстия до основания конуса.

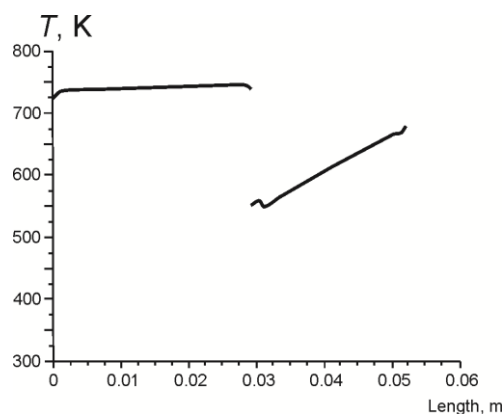


Рис. 2. Распределение температуры вблизи поверхности конуса при наличии локального вдува.

На основании результатов экспериментально-теоретического исследования влияния локального вдува газа в пограничный слой при обтекании осесимметричной модели в диапазоне чисел Маха $M = (2 \div 5)$ определены основные термогазодинамические характеристики течения.

Качественный анализ полученных результатов при обтекании конуса со вдувом и без вдува показал существенное влияние вдува на динамику пограничного слоя и формирование конуса Маха.

ЛИТЕРАТУРА:

1. E.A. Maslov, V.V. Klochikhin, I.K. Zharova. Experimental research of supersonic flow around simulating rocket-ramjet, MATEC Web of Conferences 23,01026 (2015)
2. E.A. Maslov, V.V. Faraponov, N. N. Zolotorev, A.V. Chupashev, V.V. Matskevich, S.Yu. Chizhov, MATEC Web of Conferences 92, 01056 (2017)
3. V.G. Artonkin, P.G. Leutin, K.P. Petrov, Scientific works CAI. 92 1413 (1972)
4. Yu.V. Sheludko, *Physical and gas-dynamic ballistic studies* (Science, Leningrad, 1980)

Научный руководитель: Е.А. Маслов, к.ф.-м.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

МЕТОДЫ ОЦЕНОК КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРАХ

С.Р. Эсенбеков¹, Н. Жангарач уулу¹, А.С. Разва²
Томский политехнический университет^{1,2}
ЭНИН, ТПТ, группа 5ФМ61¹

Введение. Циклонные и вихревые аппараты широко используются в системах сепарации дисперсных материалов в технологиях пылеприготовления на

электростанциях, получения порошковой продукции в производствах строительных материалов, обогащения руд, химических, металлургических производствах. На рис. 1 приведена схема измельчения крупного материала, в которой неизмельченный материал из классификатора возвращается на вход мельницы.

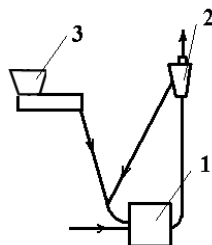


Рис. 1. Схема измельчения: 1–мельница, 2–классификатор, 3–бункер

В отличие от пылеуловителей в классификаторах эффективность процесса определяется степенью загрязненности мелкого продукта крупными частицами. Имеются несколько методов оценки эффективности классификации [1–3]. В пылеприготовлении топлив эффективность системы определяется относительным остатком $R_3(0,09)$ просеянной массы пробы мелкого продукта через сито 90 мкм. В обогатительной практике эффективность $E = \frac{\varepsilon - \gamma}{1 - \frac{\alpha}{\beta_T}} = \frac{\gamma(\beta - \alpha)}{\alpha \left(1 - \frac{\alpha}{\beta_T}\right)}$,

где $\varepsilon = \frac{\gamma\beta}{\alpha}$ – извлечение ценного продукта, α – содержание ценного компонента в исходном материале, β – то же в обогащенном продукте, β_T – теоретически предельно возможное содержание ценного компонента, γ – выход обогащенного продукта [4]. Для классификаторов эффективность – отношение фактической разницы между извлечением данного класса крупности в мелкий продукт и выходом мелкого продукта к теоретически возможной их разнице [5]. В этом случае $E = \frac{\varepsilon_m - \gamma_m}{1 - \alpha}$. В общем случае, безотносительно к гранулометрическому составу, характеристикой процесса классификации является $\varphi_\delta(\delta)$ – зависимость доли фракции, выносимой из аппарата в мелкий продукт от размера этой фракции. Существует размер частицы δ_* , для которого $\varphi_\delta(\delta_*) = 0,5$. Гранулометрический состав исходного материала характеризуется кривой остатков $R_1(\delta)$, крупного продукта $R_2(\delta)$, мелкого продукта $-R_3(\delta)$ на ситах с ячейкой размером δ . Если $\varphi_\delta(\delta)$ и $R_1(\delta)$ определены, можно найти связь $\varphi_\delta(\delta)$ и $R_1(\delta)$ [2]. Отклонение от идеальности процесса классификации, при котором $R_3(\delta) = 0$ при размере ячейки сита $\delta > \delta_*$, определяется величиной $\chi_\varphi = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}}$, где $\delta_{0,75}$ и $\delta_{0,25}$ – размеры частиц фракций, выносимых в тонкий продукт на 75 и 25 %.

Величина χ_φ характеризует эффективность классификатора. К.п.д. классификатора определяется величиной [2]

$$\eta_{3M} = \int_0^1 \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta}, \quad (1)$$

где $\bar{\delta} = \delta/\delta_*$ [2].

Другой оценкой эффективности классификации является соотношение [3], в которой эффективность реального процесса представляется как эффективность идеального процесса, уменьшенного на долю деления

$$\eta_{3P} = 1 - \frac{\int_0^{\delta_*} (1 - \varphi) dx + \int_0^{\delta_*} \varphi dx}{2 \int_0^{\delta_*} \varphi dx \left(1 - \int_0^{\delta_*} \varphi dx \right)}, \quad (2)$$

где $x = \frac{\delta - \delta_{\min}}{\delta_{\max} - \delta_{\min}}$. Барский М.Д. [6] предлагает эффективность классификации определять по соотношению

$$\eta_{3B} = \frac{\int_0^{y_*} \varphi dy}{y_*} - \frac{\int_0^1 \varphi dy}{1 - y_*}, \quad (3)$$

где $y = \delta/\delta_{\max}$, $y_* = \delta_*/\delta_{\max}$.

Циклонный пылеуловитель можно рассматривать как классификатор для микронных частиц. В пылеулавливании фракционная эффективность сепарации частиц в циклонах представляется функцией интеграла вероятности и может

быть записана в общем виде $\eta_{2i} = \Phi(X_{2i})$, где $\Phi(X_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_2} \exp\left(-\frac{X_2^2}{2}\right) dX_2$,

$X_{2i} = \frac{\lg \delta_i/\delta_{50}}{\lg \sigma_{2\eta}}$, $\sigma_{2\eta} = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}} = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}}$, где δ_{84} , δ_{50} – размер частиц улавливаемых циклоном с

эффективностью 84 и 50% [7]. По методу НИИОГАЗ экспериментально определяется диаметр частицы, улавливаемой циклоном с эффективностью 50%, а также определяется дисперсия эффективности $\lg \sigma_{2\eta}$ для других частиц, которая находится с привлечением интеграла вероятности [8], являющегося выражением фракционной эффективности обеспыливания газа в циклоне [7]. При этом для подобных циклонов экспериментально найденная дисперсия имеет одно и то же значение, а диаметр частицы δ_{50} , улавливаемой с эффективностью 50%, пересчитывается на другие условия с использованием числа подобия Стокса. Табличные значения $\lg \sigma_{2\eta}$, δ_{T50} для стандартных циклонов и условий приведены в [7]. $Stk_{50} = 2\tau_{50}W_{\text{ц}}/D$; $\tau_{50} = \rho_{\delta}\delta_{50}^2/18\mu$. При одной и той же эффективности обеспыливания, откуда $\delta_{50} = \delta_{T50} (D/D_T \cdot \rho_{T\delta}/\rho_{\delta} \cdot \mu/\mu_T \cdot W_{\text{ц}}/W_{\text{ц}})^{0,5}$, где динамическая вязкость газа [7] $\mu_T = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с; расходная плановая скорость, например циклона ЦН–15, $W_T = 3,5$ м/с; диаметр цилиндрической части циклона $D_T = 0,6$ м; плотность частиц $\rho_{T\delta} = 1930$ кг/м³.

Оценки классификационных эффектов в циклонных сепараторах

Очевидно, что фракционный унос $\varphi_{\delta}(\delta_i) = \Phi(X_{3i}) = 1 - \Phi(X_{2i}) = \Phi(-X_{2i})$, где

$$X_{3i} = -\frac{\lg(\delta_i/\delta_{50})}{\lg(\sigma_{2\eta})} = \frac{\lg(\delta_{50}/\delta_i)}{\lg \sigma_{2\eta}}. \text{ Величина } \sigma_3^2 = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,16}} = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,50}} \frac{\delta_{0,50}}{\delta_{0,16}} = \frac{1}{\sigma_{2\eta}^2} \text{ также представляет}$$

оценку отклонения процесса от идеальности. В последнем выражении $\delta_{0,84}$ и $\delta_{0,16}$ – размеры частиц, выносимых из циклона на 84 и 16%. Найдем связь

$$\chi_{\varphi} = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}} \text{ с величиной } \sigma_3 = \frac{1}{\sigma_{2\eta}} = \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,5}} = \frac{\delta_{0,5}}{\delta_{0,16}}. \text{ Из табличных значений}$$

$\Phi(X_{3(0,75)}) = 0,75$. Для этого значения $\Phi(X_{3(0,75)}) = 0,75$ [7] имеем

$$X_{3(0,75)} = \frac{\lg \delta_{0,5}/\delta_{0,75}}{\lg(\sigma_{2\eta})} \approx 0,68; \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,5}} = \left(\frac{1}{\sigma_{2\eta}}\right)^{0,68}; \frac{\delta_{0,84}}{\delta_{0,5}} = \frac{1}{\sigma_{2\eta}}; \text{ откуда } \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,84}} = \sigma_{2\eta}^{0,32}. \text{ Аналогичный}$$

расчет показывает, что $X_{3(0,25)} = \frac{\lg \delta_{0,5}/\delta_{0,25}}{\lg(\sigma_{2\eta})} \approx -0,68; \frac{\delta_{0,25}}{\delta_{0,5}} = \sigma_{2\eta}^{0,68}; \frac{\delta_{0,16}}{\delta_{0,50}} = \sigma_{2\eta}^1$. Дальней-

ший расчет показывает, что

$$\chi_{\varphi} = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}} = \sigma_{2\eta}^{-1,36}. \quad (4)$$

Эффективность классификации (1) не учитывает проскок крупных частиц

в мелкий продукт. Пусть $S_3 = \int_0^1 \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta} = 1 - \int_0^1 \eta_2 d\bar{\delta}$, $S_1 = 1 - \int_0^1 \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta} = \int_0^1 \eta_2 d\bar{\delta}$,

$S_2 = \int_1^{\delta_m} \varphi_{\delta}(\bar{\delta}) d\bar{\delta} = \int_1^{\delta_m} \eta_2 d\bar{\delta}$, где δ_m – максимальный размер частицы, попавшей в мел-

кий продукт (рис.2). Очевидно $S_3 + S_1 = 1$. Примем за максимальный размер частицы, размер частицы, улавливаемый с эффективностью 99%, минимальный размер частицы, размер частицы, улавливаемой с эффективностью 1%. Определим эффективность классификации в циклоне, учитывая проскок крупных частиц по отношению к целевому продукту, как

$$\eta_{3\Sigma} = S_3 - S_2. \quad (5)$$

Сравним величины $\chi_{\varphi}, \eta_{3M}, \eta_{3P}, \eta_{3\Sigma}, \eta_{3B}$ в предположении, что распределение эффективности классификации частиц для тонкого продукта в циклоне подчиняется нормально-логарифмическому закону. Сравнение проведем для циклонов ЦН-15у и СДК-ЦН-33 [7]. Схемы циклонов приведены на рис. 3.

Для этих циклонов $(\delta_{T50})_{\text{ЦН}} = 6$ мкм; $(\lg \sigma_{2\eta})_{\text{ЦН}} = 0,283$; $(\delta_{T50})_{\text{СДК}} = 2,3$ мкм; $(\lg \sigma_{2\eta})_{\text{СДК}} = 0,364$ [7].

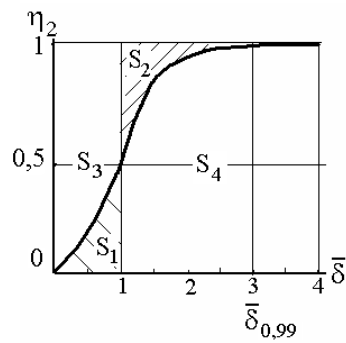


Рис. 2. Интегральные значения эффективностей перераспределения частиц

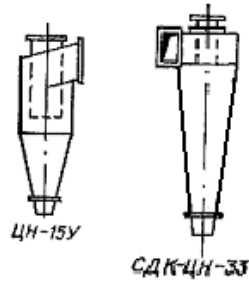


Рис.3. Схемы циклонов.

Парциальные эффективности циклонов в вероятностно логарифмической сетке представлены на рис. 4.

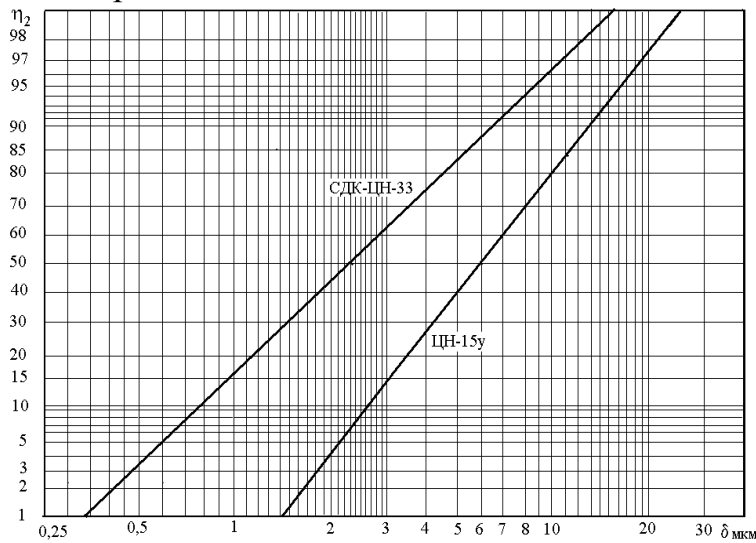


Рис. 4. Парциальные эффективности циклонов в вероятностно-логарифмической сетке.

На рис. 5. те же эффективности представлены в координатах $\eta_2, \bar{\delta}$, $\bar{\delta} = \delta / \delta_{50}$, где δ_{50} – размер частиц, улавливаемых с эффективностью 50 %.

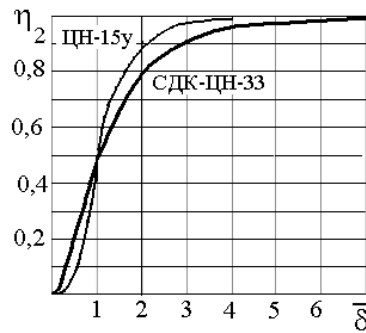


Рис. 5. Парциальные эффективности циклонов от безразмерного диаметра частиц

Формулу (2) в соответствии с рисунком 2 преобразуем в виде

$$\eta_{3P} = 1 - \frac{1}{2} \frac{S_1 + S_2}{(S_3 + S_2) \left[1 - \frac{1}{\bar{\delta}_{0,99} - \bar{\delta}_{0,01}} (S_3 + S_2) \right]}, \quad (6)$$

где $\bar{\delta}_{0,99} = \delta_{0,99} / \delta_{0,5} = \sigma^{2,33}$, $\bar{\delta}_{0,01} = \delta_{0,01} / \delta_{0,5} = \sigma^{-2,33}$. Аналогично формулу (3) преобразуем в виде

$$\eta_{3B} = S_3 - \frac{S_2}{\bar{\delta}_{0,99} - 1}. \quad (7)$$

Запишем, аналогично (6), средне интегральную эффективность пылеулавливания циклоном

$$\eta_{2\Sigma} = \frac{S_1 + (\bar{\delta}_{0,99} - 1) S_2}{\bar{\delta}_{0,99}} = 1 - \frac{S_2 - S_1 + 1}{\bar{\delta}_{0,99}}. \quad (8)$$

Расчет показывает, что $\eta_{2\Sigma\text{СДК}} = 0,80$, $\eta_{2\Sigma\text{ЦН}} = 0,734$.

Сравнение оценок эффективностей классификации мелких частиц в циклонах по приведенным соотношениям представлено в таблице 1.

Табл. 1. Расчетные величины.

Циклон	σ	S_3	S_2	$\chi_\varphi(4)$	η_{3M}	η_{3P}	η_{3B}	$\eta_{3\Sigma}(5)$
СДК-ЦН	2,31	0,80	0,54	0,32	0,80	0,66	0,72	0,26
ЦН-15у	1,91	0,84	0,36	0,42	0,84	0,70	0,76	0,48

Из таблицы видно, что корреляция прослеживается у формул (4) и (5), причем в большинстве случаев при сравнительной оценке эффективности различных аппаратов используют величину $\chi_\varphi = \frac{\delta_{0,75}}{\delta_{0,25}}$ [2]. Для объективной оценки

эффективности классификации следует проскок крупных частиц сопоставлять с целевым продуктом на входе в аппарат (5). В циклонах, чем меньше граница разделения, тем меньше эффективность, и для повышения эффективности классификации требуется перемешивание мелкого продукта. В [9, 10] приведены результаты исследования эффективностей сепарации частиц в спиральных аппаратах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли.– М.: Энергия. 1974, 168 с.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая сепарация порошков. – М.: Химия, 1989. –160 с.
3. Росляк А.Т., Бирюков Ю.А., Пачин В.Н. Пневматические методы и аппараты порошковой технологии.– Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1990.– 272 с.
4. Барский Л.А., Плаксин И.Н. Критерии оптимизации разделительных процессов. М.: Наука, 1967. –119 с.
5. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.В. Гравитационная классификация зернистых материалов. М., «Недра», 1974. –232 с.
6. Барский М.Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. – 237 с.
7. Справочник по пыле- и золоулавливанию //Под ред. М.И . Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. Под общей ред. А.А. Русанова – 2 изд. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
8. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979.– 832 с.
9. Hukki R.T. and Airaksinen T. A study of the improved pneumatic classification on production of micropowder // Fine Particles Processing. Proceedings of the International Symposium on Fine Particles Processing Las Vegas, Nevada, February 24-28. 1980. V1, p. 181–208.
10. Василевский М.В., Мальцев А.А., Перков В.В., Танков Н.К., Богданов А.Л. Эффективность сепарации частиц в вихревых камерах // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции. – Томск: Изд-во Том. ун-та 1998, с. 276 –277.

Научный руководитель: А.С. Разва, к.т.н., доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ МОДЕЛЬНОГО ГПВРД ПРИ ОБТЕКАНИИ СВЕХРЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

В.В. Мацкевич¹, В.В. Фарапонов¹, Е.А. Маслов^{1,2}

Томский государственный университет
ФТФ, ДП¹

Томский политехнический университет
ЭНИН, ТПТ²

Современные исследовательские интересы требуют синергетического развития междисциплинарных отраслей науки. Не остается в стороне и интерес аэродинамического исследования, включающий в себя, например, нахождение эмпирических констант для верного описания физических процессов в таких прикладных областях как теплоэнергетика, авиа и судостроение.

Целью данной работы поставлено изучение и применение аэродинамического эксперимента в условиях натурального (физического) моделирования обтекания гиперзвуковым потоком прямого воздушного реактивного двигателя (ГПВРД) с использованием экспериментальной установки быстрого действия. Экспериментальное исследование предполагается проводить с учетом накопленного опыта аэродинамических испытаний моделей более простой геометрии. Также, как сравнительный аспект работы, рассматривается численное решение задачи обтекания ГПВРД, как одного из перспективных видов двигателей авиационной промышленности.

По результатам проведенного физического моделирования определено, что безразмерное число Маха потока, измеренное сразу за критическим сечением в проточном тракте ГПВРД осесимметричного исполнения, равняется $M=1.87\pm 0.022$ [1]. В целях проведения сравнительной оценки результатов физического и математического моделирования предлагается построение графической зависимости распределения безразмерного числа Маха по проточной части ГПВРД, которая отражена на рисунке 1.

Как видно из сравнения математического и физического эксперимента, полученные результаты безразмерного числа Маха для точки за критическим сечением осесимметричной модели ГПВРД (точки 5-6 на рисунке 1) согласуются с относительной погрешностью $\Delta M = 8.8\%$. Значения распределения безразмерного параметра M по проточному тракту осесимметричной ГПВРД занесены в таблицу 1 [1, 2].

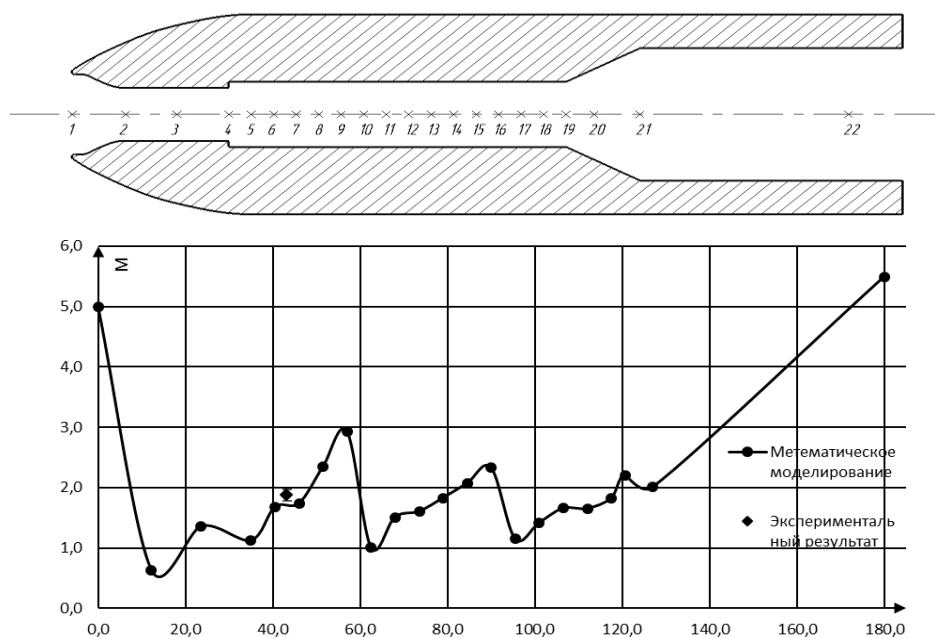


Рис. 1. Сравнение результата математического и физического моделирования распределения числа Маха по проточному тракту ГПВРД.

Визуализация процесса обтекания сверхзвуковым потоком по проточному тракту ГПВРД показана на рисунке 2.

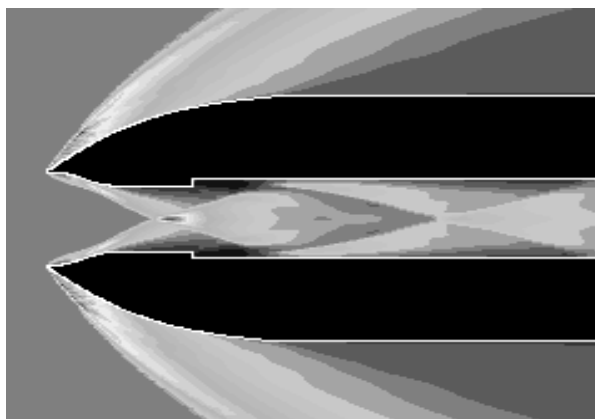


Рис. 2. Визуализация течения сверхзвукового потока по проточному тракту ГПВРД с набором косых скачков уплотнения

Важнейшей целью моделирования гиперзвукового обтекания модели данного типа, как указывалось выше, является получение численных значений параметров рабочего тела (воздуха) по сечениям внутренней проточной части, так как натурным экспериментом получение адекватных полей температур, скоростей не представляется возможными или является трудно выполнимым. Ввиду того, результаты (значение числа Маха за критическим сечением) численного и экспериментального исследования показали приемлемую точность, то последующее определение необходимых параметров по проточной части ГПВРД целесообразно определять посредством более дешевого и менее энергоемкого численного метода.

Поэтому по результатам численного моделирования было предложено измерение параметров рабочего тела ($T_{\text{стат.}}$, $P_{\text{стат.}}$, $P_{\text{дин.}}$, M) в проточной части, в наиболее характерных сечениях. Численные значения фиксировались по оси симметрии. Все определенные численным методом параметры заносятся в сводные таблицы 1.

Табл. 1. Параметры по оси потока осесимметричного случая.

№ точки	x , мм	M	T , К	P' , МПа	P , МПа
1	0,0	5,00	300,0	1,77	0,10
2	12,2	0,60	1721,9	0,76	2,70
3	23,6	1,40	1342,7	1,48	1,15
4	35,0	1,10	1525,4	1,52	1,72
5	40,5	1,67	1388,9	1,60	1,24
6	46,0	1,74	1124,6	1,28	0,60
7	51,5	2,30	872,9	0,90	0,23
8	57,0	2,90	699,2	0,67	0,11
9	62,5	1,00	1778,7	0,90	1,27
10	68,0	1,50	1372,0	1,25	0,78
11	73,5	1,60	1233,8	1,06	0,59
12	79,0	1,80	1165,4	0,97	0,42
13	84,5	2,10	1111,3	0,93	0,31
14	90,0	2,30	1028,0	0,88	0,23
15	95,5	1,10	1859,3	1,28	1,39

№ точки	x , мм	M	T , К	P' , МПа	P , МПа
16	101,0	1,40	1461,8	0,91	0,64
17	106,5	1,70	1279,5	1,06	0,55
18	112,0	1,70	1264,4	0,95	0,49
19	117,5	1,80	1161,4	0,96	0,41
20	120,6	2,20	1010,5	1,15	0,33
21	127,0	2,00	976,5	0,76	0,10
22	180,0	5,50	283,8	0,10	0,048

В результате визуализации процесса физического моделирования, в условиях гиперзвукового обтекания прямого двигателя, показано, что течение потока по проточному тракту диффузор-камера сгорания происходит с набором косых скачков уплотнения. Вывод подкрепляется результатами математического моделирования. Сравнение результатов физического и математического моделирования показало достаточную точность в определении безразмерного числа Маха за критическим сечением проточного тракта ГПВРД, что в свою очередь означает возможность дальнейшего исследования, в частности моделирования, процессов более сложного характера (например, подвод тепловой энергии в результате сгорания твердого топлива в камере сгорания ГПВРД).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Е.А. Maslov. V.V. Klochikhin. I.K. Zharova. Experimental research of supersonic flow around simulating rocket-ramjet. MATEC Web of Conferences 23.01026 (2015)
2. Е.А. Maslov. V.V. Faraponov. N. N. Zolotorev. A.V. Chupashev. V.V. Matskevich. S.Yu. Chizhov. MATEC Web of Conferences 92. 01056 (2017)

Научный руководитель: Е.А. Маслов. к.ф.-м.н.. доцент каф. ТПТ ЭНИН ТПУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ОХЛАЖДЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

К.К. Назаров, Л.Ф. Кадырова
Дагестанский государственный технический университет

В последние десятилетия электроника стала неотъемлемой частью окружающего нас мира. В наше время, с увеличением количества микросхем, их надежность стала ключевой проблемой. Отказ новой музыкальной аппаратуры, может быть терпимым, однако проблема в сложных компьютерах, которые поддерживают жизненно важные системы бизнеса, здравоохранения и обороны

в результате может привести не только к нарушению работоспособности этих систем, но и к событиям, имеющим катастрофический исход. Понимая важность сложившейся ситуации, многое внимание было уделено повышению уровня надежности жизненно важных систем, а также улучшению производительности радиоэлектронной аппаратуры.

Совершенствование технологий сделало это возможным еще в начале 1960-х годов, когда появились интегрированные контуры на кремниевой микросхеме. Производителям электроники удалось построить большое количество маленьких чипов на маленькой контурной плате. За последние 20 лет, размеры чипа снизились приблизительно от 100 до 1 мкм, а количество компонентов на одном чипе увеличилось примерно от 1 до 10^5 (рис. 1).

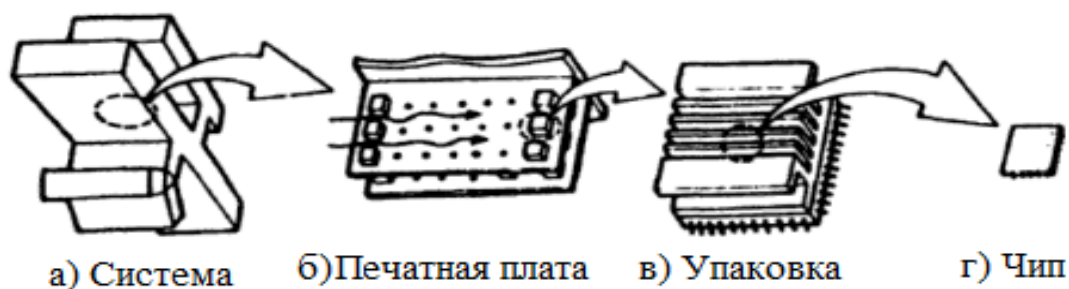


Рис. 1. Структурные уровни размещения радиоэлемента (чипа)

Чип представляет собой прямоугольный кусок монокристаллического кремния, который включает в себя микроскопические электронные контуры. Он располагается в упаковке, которая содержит электрические провода. Упаковки смонтированы на печатной плате, множество которых в свою очередь образуют систему. Для крупномасштабных компьютеров в процессе достижения высоких скоростей обработки данных, отвод тепла от чипов является серьезной технической проблемой [2].

Следовательно, целью исследования специализированного метода охлаждения радиоэлектронной аппаратуры, является обеспечение совершенствования теплового расчета оборудования при отводе тепла от его источников к одному или нескольким приемникам тепла в окружающую среду.

Главная задача исследования заключается в поддержании температурно-скоростного режима охлаждения отдельных радиоэлементов в их функциональных и максимально допустимых пределах. Функционально предельная температура - это диапазон, в котором эффективность радиоэлемента соответствует расчету производителя радиоэлектронной аппаратуры. Если рабочая температура, в определенный момент времени превышает предел, то это способствует появлению большой вероятности деградации производительности радиоэлемента и возникновению в нем логических ошибок [1].

Эффективное управление температурно-скоростным режимом может быть достигнуто за счет оптимальных конструктивных соображений, как и в случае с любой подобной проблемой предусматривающей особое инженерное решение. В нашем случае проводилось исследование методом принудительной внешней конвекции (рис. 2).

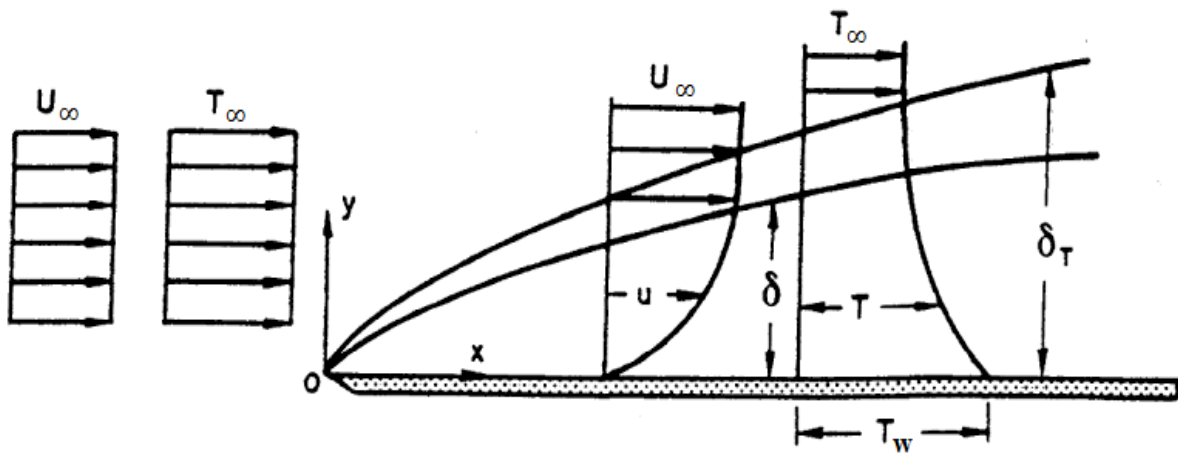


Рис. 2. Скорость и температура изменения процесса теплопередачи с пограничных слоев радиоэлектронной платы

Оценка коэффициента передачи тепла в данном случае определяется формулой:

$$q_n = h(T_w - T_f) \quad (1)$$

где T_w – температура стенки, T_f – температура жидкости, q_n – поверхностный тепловой поток. Исходя из (1) вычисляем h – коэффициент передачи тепла, Вт/м²К:

$$h = \frac{q_n}{T_w - T_f} = \frac{-k_f \left(\frac{\partial T_f}{\partial n_s} \right)}{T_w - T_f} \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопроводности [2].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Термоэлектрическое охлаждение // А.Ф. Иоффе, Л.С. Стильбанс, Е.К. Иорданшвили, Т.С. Ставицкая. - М.: АН СССР, 1956. - 114 с.
2. Кузовлев В.А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. - М.: Высшая школа, 1983. - 335 с.

Научный руководитель: И.А. Габитов, ст. преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, Дагестанский государственный технический университет.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В ХВОСТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА КОТЛА КВТ-116,3-150

А.Р. Надырова

Государственный университет имени Шакарима города Семей

Поверхности нагрева котельного агрегата, расположенные в самом конце газового тракта называются хвостовыми. К ним относятся экономайзеры и воздухоподогреватели. Установка хвостовых поверхностей нагрева способствует

обеспечению высокой экономичности котельного агрегата при его минимальных массогабаритных показателях [1].

Поверхности нагрева работающего котла покрываются со стороны газов горения шлаком, золой и сажей. Отложения уменьшают коэффициент теплопередачи поверхностей теплообмена [2, 3]. Из-за них происходит меньшее охлаждение уходящих газов горения и таким образом, уменьшается к.п.д. и тепловая мощность котла. Внешние загрязнения забивают газовый тракт котла и увеличивают его аэродинамическое сопротивление, вследствие чего увеличивается расход электроэнергии дымососами. Для очистки поверхностей газохода (рисунок 1) применяются обдувочные аппараты.

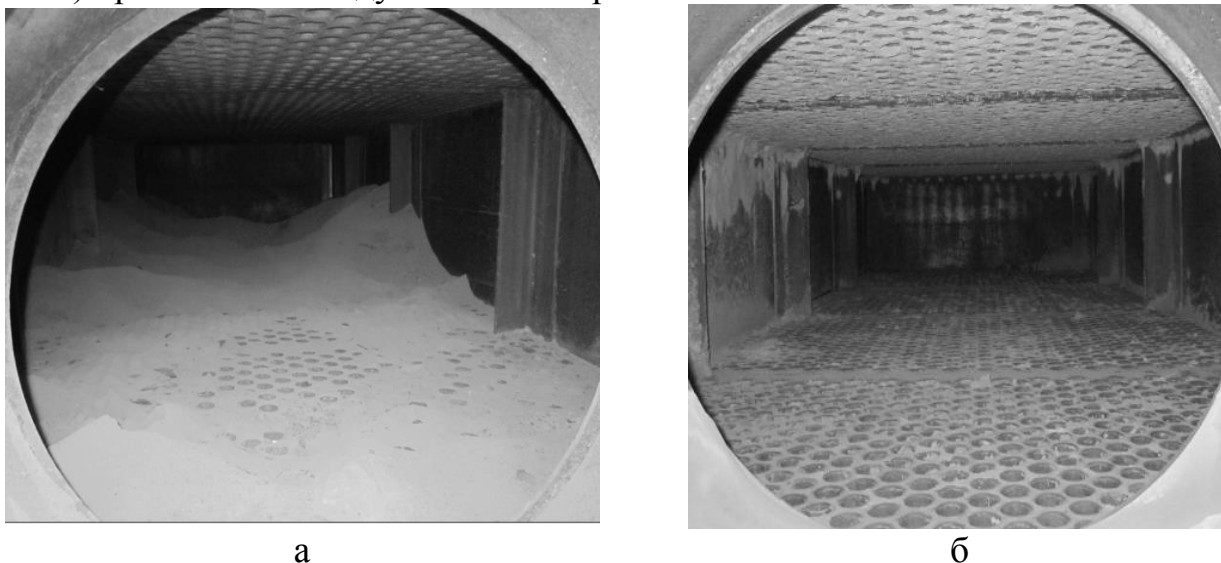


Рис. 1. Загрязненная (а) и очищенная (б) поверхности опускного газохода

В связи с необходимостью увеличения эффективности работы котельного оборудования, улучшения экологической обстановки на прилегающих к нему территориях, исследованию процессов теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева в настоящее время уделяется особое внимание [4].

Объектом исследования в данной работе является процесс теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева котлоагрегата КВ-Т-116,3-150, установленного на ТЭЦ-1 города Семей. Хвостовыми поверхностями нагрева данного котла являются две ступени трубчатого воздухоподогревателя (ВЗП), расположенного в вынесенном опускном газоходе.

ВЗП выполнен по воздушной стороне четырехпоточным трехходовым. Трубы воздухоподогревателя расположены в шахматном порядке. Дымовые газы проходят внутри труб, а воздух омывает их снаружи поперечным током. Направление дымовых газов сверху вниз. С целью увеличения скорости перемещения нагреваемого воздуха воздухоподогреватель по высоте разделен промежуточными перегородками, располагаемыми параллельно трубным доскам.

Проведение натуральных экспериментов осложнено большими затратами на их проведение, сложными процессами в результате передачи теплоты последовательно по всем поверхностям теплообмена, нестационарностью их протекания. Развитие и распространение современной вычислительной техники и теплофизики способствуют значительному ускорению и упрощению исследований процессов, протекающих в элементах энергетического оборудо-

вания. В настоящее время развитие получило моделирование теплообменных процессов в специализированных программных комплексах [5, 6].

В программном комплексе ANSYS Fluent 14.5 была построена модель и исследовано распределение температур дымовых газов и нагреваемого воздуха в загрязненной поверхности ВЗП в зависимости от теплопроизводительности котлоагрегата. Результаты проведенных исследований представлены на рисунках 4, 5 и 6.

При теплопроизводительности 60 Гкалл/ч температура воздуха в первой ступени ВЗП изменяется в пределах от 376 до 403 К, во второй ступени от 525 до 733 К по высоте газохода. Две ступени ВЗП разделены промежуточными газовыми коробами, на которых отсутствуют датчики измерения температур.

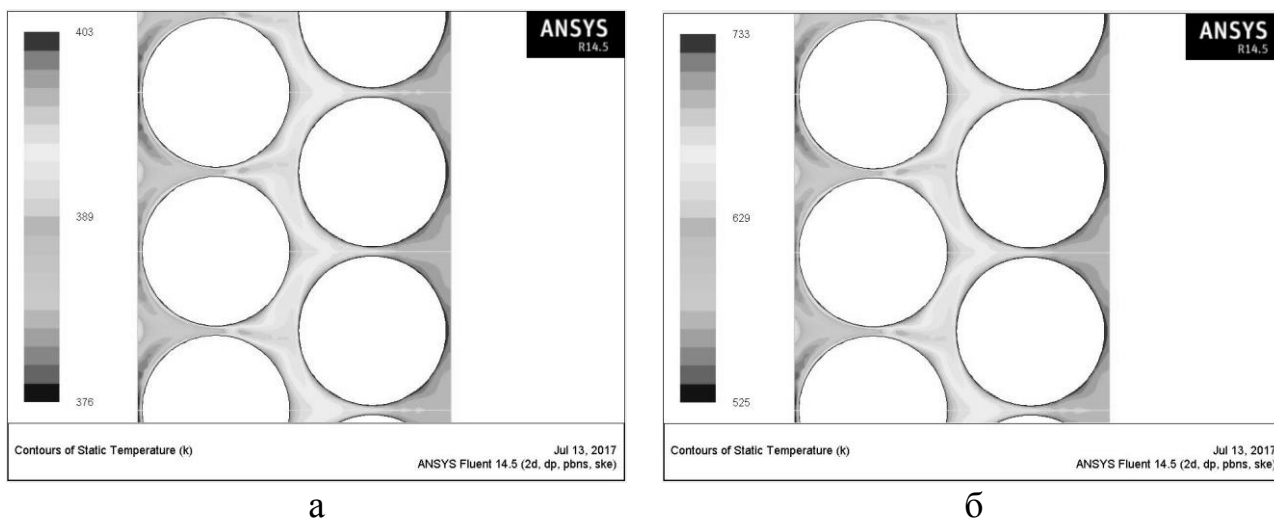


Рис. 4. Распределение температур по трубам в первой (а) и второй (б) ступенях ВЗП при теплопроизводительности 60 Гкалл/ч.

При теплопроизводительности 70 Гкалл/ч температура воздуха в первой ступени ВЗП изменяется в пределах от 370 до 403 К, во второй ступени от 557 до 743 К по высоте газохода.

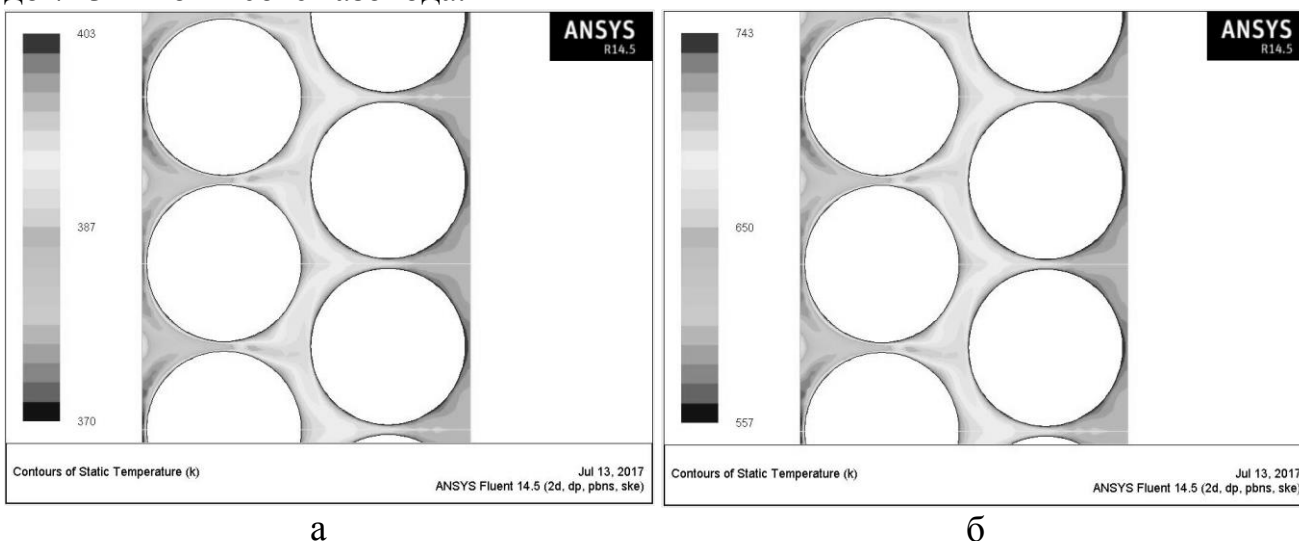


Рис. 5. Распределение температур по трубам в первой (а) и второй (б) ступенях ВЗП при теплопроизводительности 70 Гкалл/ч.

При теплопроизводительности $80\div 100$ Гкалл/ч температура воздуха в первой ступени ВЗП изменяется в пределах от 380 до 413 К, во второй ступени от 593 до 753 К по высоте газохода.

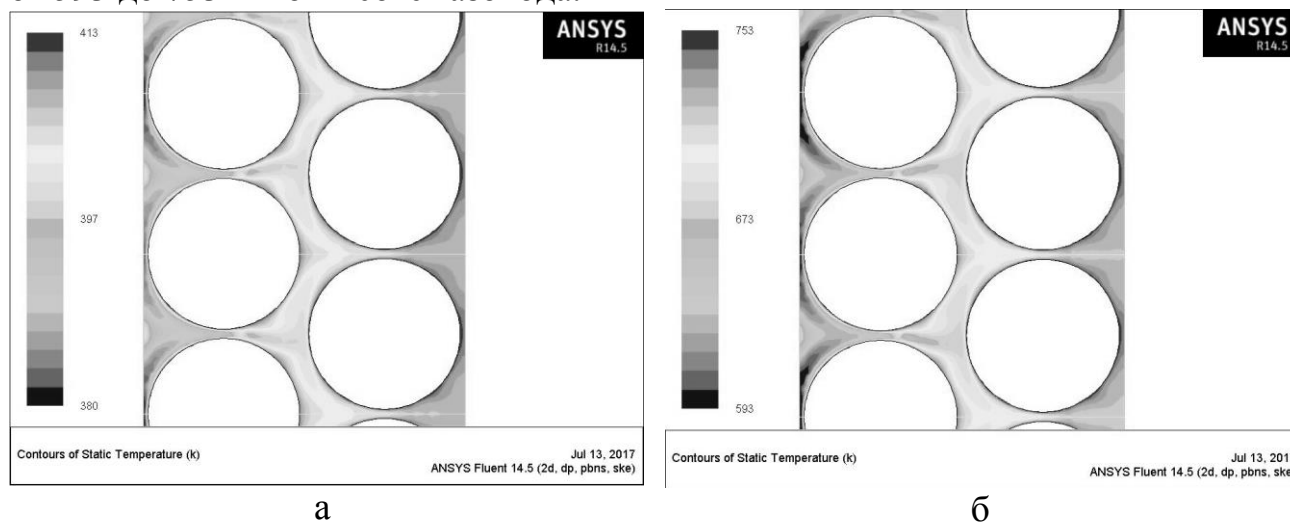


Рис. 6. Распределение температур по трубам в первой (а) и второй (б) ступенях ВЗП при теплопроизводительности $80\div 100$ Гкалл/ч.

Температуры полученные при помощи моделирования процесса теплообмена в программном-комплексе ANSYS Fluent 14.5 соответствуют показаниям контрольно-измерительных приборов котлоагрегата.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что с ростом производительности котельного агрегата процесс теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева проходит интенсивнее, увеличивается его эффективность, что в конечном итоге способствует повышению кпд. Данный метод исследования позволяет прогнозировать распределение температур в воздухоподогревателе. Полученные зависимости позволяют формировать режимные карты работы оборудования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Липов Ю.М. Котельные установки и парогенераторы/ Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»; Институт компьютерных исследований, 2006. – 592 с.
2. Опыт проведения эксплуатационной химической очистки экранов топki котельного агрегата ТГМ-151 М/ Левитина И.В. [и др.]// Электрические станции. – М., 2011. - №9. – с. 21-22
3. Тумановский А.Г. Очистка и пассивация теплоэнергетического оборудования ТЭС/ Энергетик. – М.: 2013. - №7, с.55
4. Баранов В.Н. Проблемы гидродинамики, маневренности, надежности энергетических котлов и их решение – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2013. - 219 с.
5. Leitlmer R., Muller. H. CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics - Cambridge, 2003. - P.172.

6. Amol S. Kinkar, G. M. Dhote, R.R. Chokkar. CFD Simulation On CFBC Boiler. INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 4, ISSUE 02, FEBRUARY 2015. ISSN 2277 – 8616.

Научные руководители: О.А. Степанова, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика» ГУ имени Шакарима города Семей; С.Л. Елистратов, д.т.н., профессор, зав. кафедрой Тепловые электрические станции Новосибирского государственного технического университета.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВОЛЬФРАМА МАРКИ ВЧ-99

Ж.К. Айткалиев¹, А.М. Сахариева, А.Ж. Миниязов²
Государственный университет имени Шакарима города Семей¹
Институт атомной энергии²
РГП НЯЦ РК города Курчатов

Цель работы

Исследование структуры и свойств вольфрама, конструкционного материала термоядерного реактора.

Введение

Вольфрам химический элемент VI группы 6-го периода таблицы Д.И. Менделеева, имеет номер 74, переходный металл светло-серого цвета. Самый тугоплавкий металл, имеет температуру плавления $t_{пл} = 3800$ °С. С точки зрения применения металла вольфрам его наиболее важными свойствами являются плотность, температура плавления, электрическое сопротивление, коэффициент линейного расширения [1]. Благодаря своим свойствам на сегодняшний день вольфрам является одним из самых перспективных материалов контактирующих с термоядерной плазмой элементов реактора.

Объект исследования

В качестве объекта исследования рассматривается материал вольфрам марки ВЧ-99.

Методы и оборудование для исследования

Оптическая микроскопия: метод оптической металлографии, ОМ Метам ЛВ-41 (Ломо).

Обработка и изучение полученных результатов: программа Altami Studio, метод подсчета зерен по ГОСТ 5639-82.

Определение твердости: метод Виккерса, микротвердомер ПМТ-3.

Результаты исследования

Исследование микроструктуры. На рисунке 1 показана микроструктура вольфрама ВЧ-99. Результаты подсчета количества зерен представлены в таблице 1, подсчет зерен был проведен в 3 зонах наблюдения.

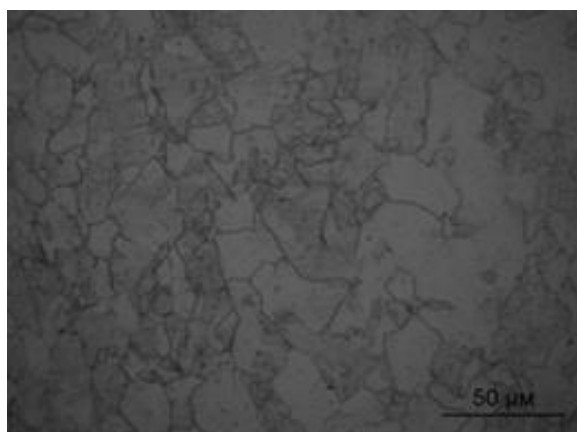


Рис. 1. Микроструктура вольфрама ВЧ-99 при увеличении×200.

Табл. 1. Результаты подсчета количества зерен

Номер поля зрения	Количество зерен		Общее количество зерен на площади 0,5 мм ² $n_{100} = n_1 + \frac{n_2}{2}$	Количество зерен на 1 мм ² $m = 2n_{100}$	Средняя площадь зерен на мм ² $a = \frac{1}{m}$	Средний диаметр зерна мм $d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}$
	Внутри окружности n_1	Пересеченных окружностью n_2				
1	107	44	129	258	0,0039	0,0622
2	111	46	134	268	0,0037	0,0610
3	123	48	147	294	0,0034	0,0583
Ср.зн.	114	46	137	274	0,0037	0,0603

По полученным результатам было обнаружено что зерна имеют более однородные размеры, что соответствует однородность размеров зерен что средней площади зерен 0,0037 мм² и среднему диаметру зерна 0,0603 мм.

Определение микротвердости.

Определение микротвердости осуществлялась на приборе ПМТ-3 путем вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136 °С под нагрузкой 150 гс.

Микротвердость H определяли по формуле:

$$H = \frac{2P}{d^2} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где H – микротвердость, кгс/мм²;

P – нагрузка, кгс;

d – среднеарифметическое из длин двух диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм;

α – угол между противоположными гранями пирамиды.

Для получения более точных данных было проведено несколько измерений (таблица 2). На рисунке 2 показана форма отпечатка четырехгранной алмазной пирамиды.



Рис. 2. Форма отпечатка четырехгранной алмазной пирамиды при увеличении $\times 1000$.

Табл. 2. Результаты измерения микротвердости

№	$HV_{0.15}$
1	478
2	496
3	476
4	487
5	498
6	476
7	481
8	495
9	484
10	481
Среднее значение	485
Стандартное отклонение	8

Выводы

По результатам проведенных работ можно сделать следующие выводы:

- изучена микроструктура материала вольфрама марки ВЧ-99;
- методом подсчета зерен было определено среднее значение количества зерен на 1 мм^2 , а также средняя площадь зерен и средний диаметр зерен;
- методом Виккерса на микротвердомере ПМТ-3 была определена микротвердость образца при нагрузке 150 гс.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зеликман А.Н., Никитина Л.С. Вольфрам. – М.: Издательство Металлургия, 1978 г. - 272 с.

Научный руководитель: Миниязов А.Ж., магистр, научный сотрудник Института атомной энергии, филиала РГП Национального ядерного центра Республики Казахстан города Курчатова.

КИНЕТИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Е. Ниязбеков

Государственный Университет имени Шаккарима города Семей

ИТФ, ТФиТЭ, группа МПТЭ-703

Эффективность и долговечность теплоизоляционных материалов решающим образом зависят от условий эксплуатации. Теплоизоляция подвержена действию переменных температур (в том числе и отрицательных), циклическому намоканию-высушиванию, химической и другим видам агрессии, испытывает действие механической нагрузки. В этих условиях возможно ухудшение функциональных и строительных свойств изделий, вплоть до их разрушения. Поэтому назначение правильных условий эксплуатации или подбор материалов с учетом особенностей их применения очень важны для эффективного использования теплоизоляции в строительстве и промышленности.

Как правило, нерациональные условия эксплуатации приводят к ухудшению всех свойств теплоизоляционных материалов: повышению теплопроводности, снижению прочности, усадки теплоизоляции и т.д. [1].

Среди довольно широкой номенклатуры теплоизоляционных материалов первое место по объему производства занимают изделия на основе минерального волокна. Они негорючи, не подвержены воздействиям грызунов и микроорганизмов, морозостойки, для их производства не требуется дефицитное сырье.

Для производства минераловатных изделий применяют сравнительно небольшое количество исходных сырьевых материалов. Однако имеющиеся значительные технологические разработки позволяют получать теплоизоляционные изделия довольно широкой номенклатуры. Свойства изделий можно регулировать, изменяя технологию обработки, состав материала и характер пористости. Это позволяет выпускать разнообразные изделия с заранее заданными свойствами применительно к различным условиям эксплуатации.

Имеющийся опыт практического применения минераловатных изделий, а также результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что их эксплуатационные свойства, как и многих других материалов, снижаются со временем, причем наиболее интенсивно - при повышенной влажности, вплоть до разрушения структуры еще до их применения в ограждающих конструкциях.

В минераловатных изделиях, как известно, может присутствовать технологическая вода - она остается в них после изготовления (не превышает 1,0 - 1,5%) - и эксплуатационная, приобретаемая не только при транспортировании, монтаже и эксплуатации, но и в условиях хранения, даже если нет непосредственного контакта с водой.

Свойство минераловатных изделий поглощать (сорбировать) влагу из окружающего воздуха называется гигроскопичностью, а достигаемое при этом увлажнение - сорбционной или равновесной влажностью. Сорбционные свой-

ства теплоизоляционных материалов оценивают при разных значениях влажности воздуха (32, 54, 75, 95, 98 %).

В соответствии с действующими стандартами минераловатные изделия выдерживают при 98 % (± 2 %) влажности воздуха. Способность материалов сопротивляться разрушающему воздействию влаги называется влагостойкостью. Ее оценивают по степени снижения упруго-прочностных характеристик минераловатных изделий (прочности или сжимаемости) после выдерживания образцов в течение 3 суток в эксикаторе при температуре (22 ± 5) °С и влажности (98 ± 2) % [2].

При перевозках и хранении вата уплотняется и комкуется, часть волокон ломается и превращается в пыль; ввиду низкой прочности, вата в конструкциях должна быть защищена от механических воздействий; наличие летучих компонентов органических веществ (пары углеводородов), входящих в рецептуру, требует соблюдения определенных правил безопасности при работе с ватой. Перечисленные недостатки рыхлой минеральной ваты частично устраняются при переработке ее в минераловатные плиты - изделия, отформованные при давлении и температуре из смеси волокон минеральной ваты с синтетическим связующим. В процессе эксплуатации минераловатные плиты в конструкциях стеновых ограждений подвергаются сложному комплексу воздействий: замораживанию-оттаиванию, увлажнению-высушиванию, длительному действию отрицательных или положительных температур, нагрузок и агрессивных сред и т.д. Известно, что наиболее тяжелым воздействием для материалов является циклическое замораживание-оттаивание, так как оно вызывает интенсивное развитие деструктивных процессов в материалах, способных удерживать влагу.

Одним из основных критериев эксплуатационной стойкости минераловатных плит является сохранность во времени коэффициента теплопроводности. Данный показатель может изменяться в зависимости от многих факторов, воздействующих на теплоизоляционный материал. В первую очередь он зависит от циклического воздействия температуры и влаги [3].

В работе [4] коэффициент теплопроводности λ определяли с помощью измерительного комплекса «Термоанализатор», используемого для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. Для измерений коэффициента теплопроводности в условиях фильтрации воздуха через образец сконструировали и изготовили установку, позволяющую моделировать обдувание образца воздушным потоком с разной скоростью. Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 1.

Проведенные в работе [4] исследования показали, что циклическое воздействие температуры и влаги приводит к развитию трещин и микродефектов в волокне, а также к возникновению внутренних напряжений в каркасе материала преимущественно в местах сосредоточения групп волокон на границах раздела фаз волокно - связующее, что вызывает ослабление связей между связующим и волокном, нарушение структуры изделия и постепенное его разрыхление. При этом, чем больше плотность минераловатных плит, тем слабее влияние циклов замораживания-оттаивания и скорости фильтрации воздуха в утеплителе на изменение его коэффициента теплопроводности.

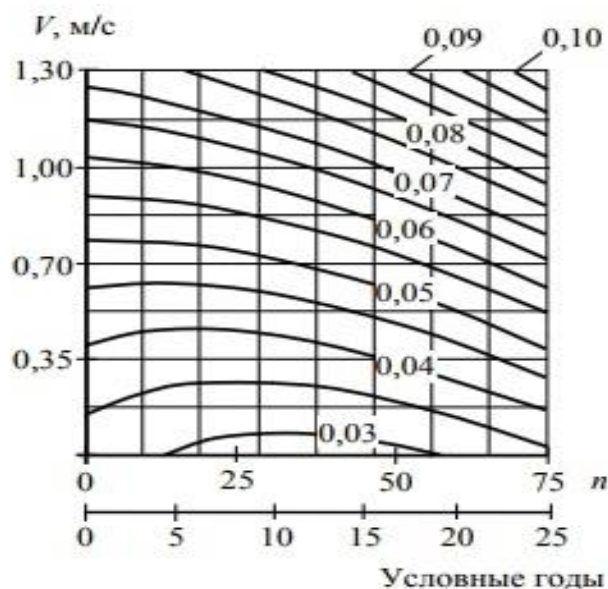


Рисунок 1. Изменение коэффициента теплопроводности λ , Вт/(м·°С) в зависимости от числа циклов замораживания-оттаивания n и скорости потока воздуха V , м/с, обдувающего минераловатные плиты с плотностью 74 кг/м^3 .

Установлено, что в реальных условиях эксплуатации минераловатных плит в вентилируемых конструкциях стен под воздействием циклического замораживания-оттаивания и фильтрации воздуха теплопроводность плит плотностью 74 кг/м^3 может увеличиться в 2,8 раза, а плит плотностью 156 кг/м^3 - в 1,9 раза. Очевидно, что это приведет к значительному понижению термического сопротивления слоя утеплителя [4].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Основные свойства теплоизоляционных и акустических материалов // URL: lib.kstu.kz:8300/tb/books/Terloizolyatsionnye%20materialy/teory/4.htm (дата обращения: 15.09.17).
2. Теплоизоляционные материалы и конструкции // Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. - М.: Инфра-М, 2003. - 268 с.
3. В.П. Ярцев, А.А. Мамонтов, С.А. Мамонтов. Влияние внешних воздействий на теплофизические и длительные механические свойства минераловатных плит // Вопросы современной науки и практики. - 2014. - №1.-с.125-134.
4. Гусев Б. В. Изменение линейных размеров минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий / Б. В. Гусев, В. А. Езерский, П. В. Монастырев. - Пром. и гражд. строительство, 2004. - 32–34 с.

Научный руководитель: М.В. Ермоленко, к.т.н., старший преподаватель, ГУ им. Шакарима г. Семей.

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.М. Хабиев, Б.Е. Ашимов, Д.Қ. Серікбеков
Государственный университет имени Шакарима города Семей
ИТФ, ТФиТЭ ТЭ-618, ХО-604.

В современном мире стоимость энергоресурсов растет с каждым годом, использования теплоизоляционных материалов становится все более актуальным. Также в настоящее время экология имеет немаловажный аспект. Для обеспечения более комфортных условий проживания и рационализации затрат на отопление, спрос на теплоизоляционные материалы растет с большими темпами [1].

Одной из важных задач в строительстве – решение проблемы теплоизоляции. Процент теплопотерь традиционного жилого дома можно рассмотреть на рисунке 1.

Теплопотери

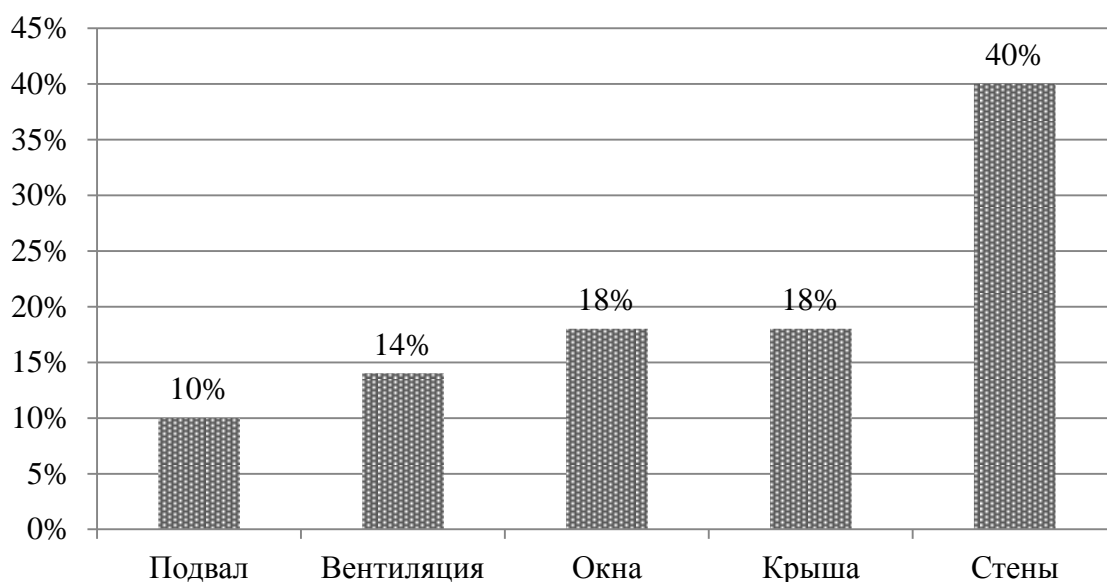


Рис. 1. Теплопотери традиционного жилого дома.

Основные требования к теплоизоляционным материалам:

- теплопроводность;
- плотность;
- паропроницаемость;
- горючесть;
- эксплуатационные характеристики.

Пенопласт чаще всего используется для внешнего утепления стен, так как пенопласт является горючим и выделяет ядовитые вещества. Имеет определенные сложности в монтаже. Пенопласт является хрупким, поэтому необходимо быть аккуратным при нарезке, фиксации на клей.

Минеральная вата довольно быстро слеживается и теряет свои теплоизоляционные свойства. Боится намокания, теряя более 70% КПД. Минеральная

вата является негорючим или слабо горючим. При монтаже возникают затруднения при нарезке и креплении.

Вспененый полиуретан отлично подходит для внутреннего так и наружного утепления объектов. Не горюч, не поддерживает горения, устойчив к химическим веществам. Довольно легко наносится на поверхность, так как для этого не требуется крупногабаритного оборудования [2].

Пенополистирол можно использовать для внутренней так и для внешней отделки, из-за низкой теплопроводности. Пенополистирол обладает высокой пожароустойчивостью, тем не менее, является горючим. Вызывает определенные затруднения при монтаже, поверхность всех стен необходимо очистить от грязи и всего лишнего [3].

Наиболее популярные теплоизоляционные материалы показаны на рисунке 2.

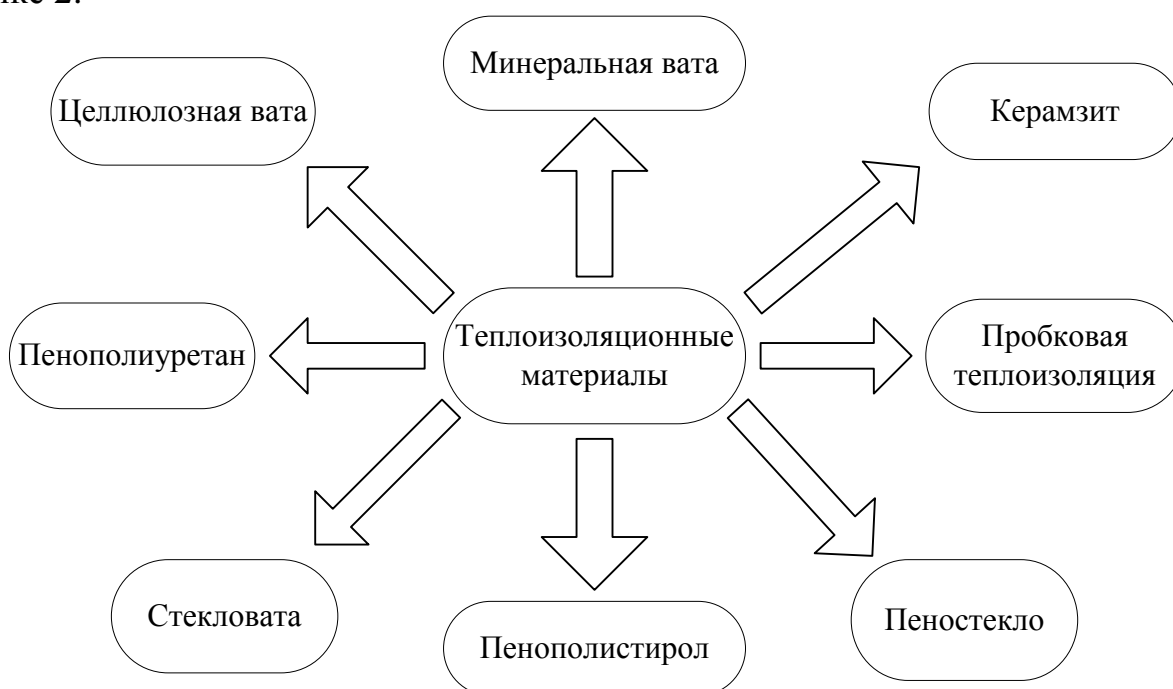


Рис. 2. Виды теплоизоляционных материалов.

Основные характеристики теплоизоляционных материалов показаны в таблице 1.

Табл. 1. Характеристики теплоизоляционных материалов

Виды изделий:	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Паропроницаемость мг/(м·ч·Па)
Пенопласт	33÷150	0,03÷0,05	0,01÷0,2
Минеральная вата	50÷200	0,05÷0,07	0,5÷0,6
Вспененый полиуретан	30÷80	0,02÷0,04	0,05
Пенополистирол	40	0,04	0,05

Основываясь на выше сказанном можно сделать вывод, что использование теплоизоляционных материалов в настоящее время актуально. Теплоизоля-

ционные материалы имеют определенные недостатки, но их преимущества не вызывает сомнения, а для более широкого их использования необходимо совершенствование их производства и более активное внедрение теплоизоляционных материалов для различных отраслей и бытовых нужд. Пирамиду целеполагания можно рассмотреть на рисунке 3.

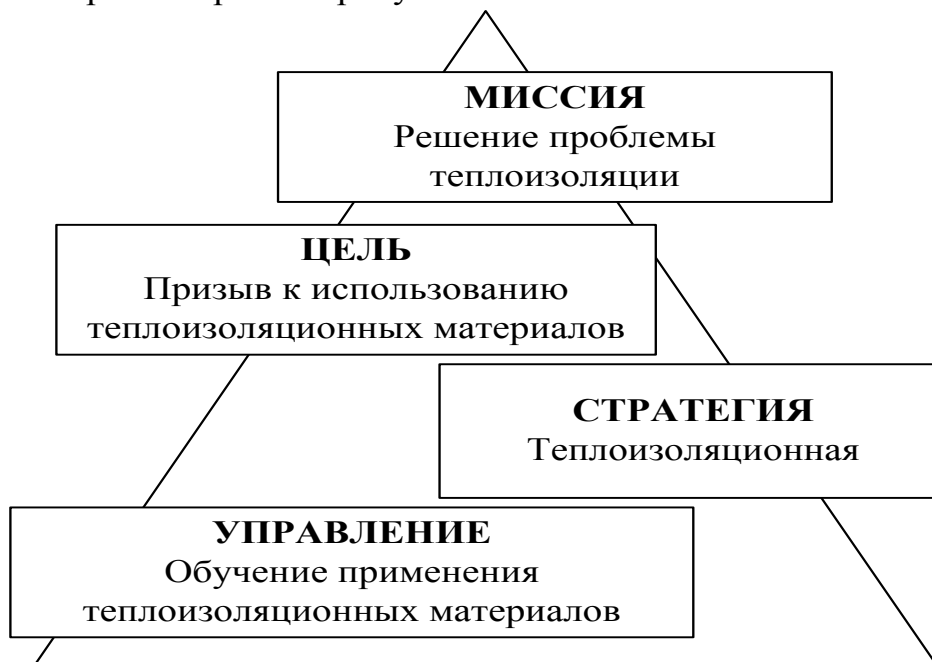


Рис. 3. Пирамида целеполагания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Строительный портал URL: <http://indostroy.ru/> (дата обращения: 01.09.17).
2. Ныпыляемая теплоизоляция URL: ecotermix.ru (дата обращения: 04.09.17).
3. Все об отоплении от А до Я URL: kotel.guru (дата обращения: 14.09.17).

Научный руководитель: О.А. Степанова, к.т.н., доцент, Государственный университет имени Шакарима города Семей.

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДИЛЬНОГО АГЕНТА НА ЭКОЛОГИЮ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

А.Е. Сатыбалдинова, А.Б. Тоимбаев
Государственный университет имени Шакарима города Семей
ИТФ, ТФиТЭ, группы МТФП-701 и ДОТФ-602

Изменение климата стало одним из самых серьезных вызовов, с которым сталкивается человечество. Без всякого сомнения, вопросы охраны окружаю-

щей среды и безопасности являются одними из самых актуальных при разработке холодильного оборудования.

На самом деле, это уже происходит путем внедрения более эффективного оборудования и усовершенствованных алгоритмов управления. Кроме того, в холодильной и климатической технике после освоения требуемого уровня технологий прослеживается глобальная тенденция повышения энергоэффективности систем благодаря возвращению к применению природных хладагентов. Известно, что определяющими факторами, влияющими на выбор рабочего вещества для холодильных систем, являются его стоимость, энергоэффективность, экологичность, безопасность и существующее законодательство.

Рассмотрим основные холодильные агенты, которые используются в настоящее время.

R-134a. R-134a - это бесцветный газ. Его используют для замены R12. Хладон R-134a не токсичен и не воспламеняется во всем диапазоне температур эксплуатации. Однако при попадании воздуха в систему и сжатии могут образовываться горючие смеси. Не следует смешивать R-134a с R-12, так как образуется азеотропная смесь высокого давления с массовыми долями компонентов 50 и 50%. Давление насыщенного пара этого хладагента несколько выше, чем у R12 (соответственно 1,16 и 1,08 МПа при 45°C).

R-134a разлагается под воздействием пламени с образованием отравляющих и раздражающих соединений, таких, как фторводород. Для хладагента R134a характерны небольшая температура нагнетания и находится в среднем на (8÷10) °C ниже, чем для R-12 и невысокие значения давления насыщенных паров.

Применяют данный холодильный агент в холодильных установках, работающих при температурах кипения ниже минус 15 °C, энергетические показатели R-134a хуже, чем у R-12 (на 6% меньше удельная объемная холодопроизводительность при минус 18 °C и холодильный коэффициент). В таких установках целесообразно применять хладагенты с более низкой температурой кипения, либо компрессор с большей холодопроизводительностью. В среднетемпературных холодильных установках и системах кондиционирования воздуха холодильный коэффициент R-134a равен коэффициенту для R-12 или выше. В высокотемпературных холодильных установках удельная объемная холодопроизводительность при работе на R-134a также несколько выше (на 6% при $t_0=10^\circ\text{C}$), чем у R-12. Из-за значительного потенциала глобального потепления GWP рекомендуется применять R-134a в герметичных холодильных системах.

Хладагент R-134a широко используют во всем мире в качестве основной замены R12 для холодильного оборудования, работающего в среднетемпературном диапазоне. Его применяют в автомобильных кондиционерах, бытовых холодильниках, торговом холодильном среднетемпературном оборудовании, промышленных установках, системах кондиционирования воздуха в зданиях и промышленных помещениях, а также на холодильном транспорте. Хладагент можно использовать и для модернизации оборудования, работающего при более низких температурах. Однако в этом случае, если не заменить компрессор, то холодильная система будет иметь пониженную холодопроизводительность.

В водоохлаждающих установках с винтовыми и центробежными компрессорами применение R-134a имеет определенные перспективы. [1]

R-407C. Наилучшим озонобезопасным хладагентом в настоящее время считается фреон марки R-407C. Сравнение R-407C и R-22 представлено в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение R-407C и R-22

R-407C	R-22
Неизотропный	Изотропный
Работает на полиэфирных маслах	Работает на минеральных маслах
Стоимость 1 кг 9937 тенге	Стоимость 1 кг 1622 тенге

В состав R-407C входят три фреона:

- R-134a(52 %);
- R-125 (25%);
- R-32 (23%).

Каждый компонент дает хладагенту часть собственных свойств:

- высокая производительность (за счет R-32);
- отсутствие возгораемости (за счет R-125);
- оптимальный уровень рабочего давления в контуре хладагента (за счет R-134a).

Так как такая смесь фреонов не является изотропной, то если произошла утечка хладагента, его фракции будут улетучиваться неравномерно, меняя оптимальный состав вещества. Для пользователей - это серьезная проблема, так как в случае разгерметизации оборудования невозможна дозаправка, а остатки хладагента удалять и полностью заливать новый фреон. Именно из-за этого недостатка популярность R-407C несколько ниже, чем могла быть.

Еще одним недостатком марки может являться то, что при эксплуатации впоследствии появится дополнительная нагрузка на окружающую среду. Фреон, который будет слит из оборудования, следует утилизировать, однако это требование не выполняется. И хотя никакого урона озоновому слою это не нанесет, в целом фреон может стать одним из самых сильных парниковых газов, разрушающих атмосферу. [2]

Стоимость популярных на сегодняшний день гидрофторуглеродных хладагентов в десятки раз превышает стоимость природных хладагентов, в том числе CO₂. При этом разница в стоимости между природными и искусственными хладагентами продолжает неуклонно расти. Использование дорогостоящих фреонов значительно повышает затраты на первоначальную заправку холодильных установок и существенно увеличивает расходы на их последующее обслуживание. Кроме этого, природные хладагенты остаются самыми доступными во многих странах мира.

CO₂. Экологическое преимущество CO₂ в том, что благодаря природному происхождению оно не влияет на разрушение озонового слоя Земли и оказывает минимальное воздействие на развитие искусственного парникового эффекта. Этот хладагент имеет нулевую озоноразрушающую способность (ODP = 0) и минимальный потенциал глобального потепления (GWP = 1), что в тысячи раз

меньше в сравнении с распространёнными сегодня ГФУ-хладагентами. Помимо этого, ограничение использования опасных для окружающей среды рабочих веществ поддерживается соответствующими международными соглашениями и в ряде случаев национальным законодательством.

Опыт многих холодильных компаний показывает, что традиционные установки с ГФУ-хладагентами уступают по своей энергоэффективности системам на диоксиде углерода как в коммерческом, так и промышленном холодоснабжении. Низкая вязкость, высокая плотность, теплоотдача и объемная производительность, относительно меньшие потери давления и температурные напоры в коммуникациях и аппаратах позволяют повысить энергоэффективность систем на хладагенте CO₂, а также снизить их массогабаритные характеристики.

Безопасность процессов и используемых технологий также играет одну из ключевых ролей в мире искусственного холода. В этой связи предпочтительно использование нетоксичных и негорючих рабочих веществ. Взрывобезопасность и относительная нетоксичность диоксида углерода особенно привлекательны в крупных холодильных системах. Использование современного оборудования и систем управления позволяет упростить монтаж и эксплуатацию таких установок. [3]

Климатические системы на основе данных **фреонов** не представляют угрозы ни для человека, ни для природы. А выбор того или иного **фреона**, зависит от условий и режимов эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фреон R134 a // <http://al-comfort.ru> URL: <http://al-comfort.ru/magazin/product/freon-r134-a> (дата обращения: 10.09.2017).
2. Хладагенты: основные виды и особенности // www.nivey.ru URL: http://www.nivey.ru/hladagenty_osnovnye_vidy_i_osobennosti.ru (дата обращения: 10.09.2017).
3. Преимущества CO₂ как хладагента. // kipiahu.ru URL: <https://kipiahu.ru/preimushhestva-so2-kak-khladagenta/> (дата обращения: 10.09.2017).

Научный руководитель: М.В. Ермоленко, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика» ГУ имени Шакарима города Семей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРЕВЕСНОУГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ

Б.К. Исайнов, А.Т. Сарпеков

Государственный университет имени Шакарима города Семей

Актуальность. На сегодняшний день брикетирование угольной мелочи является актуальной задачей, так как, основным видом топлива, как для дей-

ствующих тепловых электростанций, так и для народного потребления являются бурые угли, доля которых в топливопотреблении составляет около 67 %. При выемке, обогащении и транспортировке ископаемых углей в районы потребления, образуется значительное количество тонких классов. Большая часть мелкодисперсных углей выдувается, просыпается и теряется из вагонов при транспортировке. Угольные брикеты являются удобным видом топлива и имеют ряд следующих преимуществ по сравнению с обычным углем:

- удобство хранения и транспортировки;
- удобство в использовании;
- равномерность горения;
- увеличенное время горения.

Несмотря на то, что в мире ведется поиск и развиваются новые виды источников тепла, уголь остается одним из основных природных ресурсов, используемых во многих областях деятельности человека как топливо. Мировое производство брикетов составляет более 200 млн. т в год, в т.ч. около 40% буругольных. Как минимум 1/4 части добываемого угля - это угольная мелочь, которая идет в отходы. В то же время существует значительная потребность в топливе для бытовых нужд. При этом применение угля для бытовых возможно в виде угольных брикетов. Обычно при производстве брикетов используются достаточно простые технологии, при которых основные механические свойства брикетов достигаются прессованием угля при необходимости с применением особых связующих, добавок. Сравнение вариантов брикетирования угля со связующим и без представлено в таблице 1 [1].

Табл. 1. Сравнение способов брикетирования угля

Брикетирование угля с использованием связующего		Брикетирование угля без связующего	
Годится для любого каменного или бурого угля	+	Применимо только для определенных углей	-
Высокая производительность (до 100 т/ч)	+	Обязательна сушка	-
Низкое удельное энергопотребление	+	Ограниченная производительность (до 25 т/ч)	-
Возможность получать влагозащитные брикеты	+	Высокое удельное энергопотребление	-
Низкая стоимость расходных материалов	+	Высокая стоимость расходных материалов	-
Дороже и сложнее оборудование, требуется связующее	-	Нет связующего, проще и дешевле оборудование	+

Исходя из вышесказанного, можно констатировать, что брикетирование угольной пыли не слишком затратное, но достаточно выгодное производство.

Этапы проведения работы представлены на рисунке 1.



Рис 1. Этапы проведения работы.

Брикетиrowание угольной мелочи древесных отходов. Теоретическое изучение брикетирования каменноугольной мелочи основывается на представлениях физико-химической механики дисперсных систем. Такой подход позволяет выявить закономерности аутогезионных, адгезионных и когезионных взаимодействий и определить причины структурообразования угольных частиц в зависимости от технологических факторов и вещественного состава угля. Все дисперсные системы можно отнести к двум группам – неструктурированным и структурированным. В свою очередь, все дисперсные структуры разделяются на коагуляционные и конденсационные, и, в частности, кристаллизационные. Полагается, что малометаморфизованные и маложесткие угли сохраняют еще многие свойства коагуляционных структур, которые становятся особенно неустойчивыми при удалении из них остатков воды. Молодые каменные угли относятся к этой категории, и поэтому хорошо брикетируются без связующих веществ. Брикетируемость молодых каменных углей изучена достаточно хорошо и представляется как сложный многофакторный процесс образования прочного аутогезионного комплекса за счет высокого давления при прессовании [2,3].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Браун Н.В., Глущенко И.М., Ковтуненко Е.Н. и др. Анализ производства связующих для частичного брикетирования угольных шихт и некоторые направления разработки технологии их получения //Кокс и химия. - 1986.- № 8. -С. 15-19.
2. Шпирт М.Я. Безотходная технология. Утилизация отходов добычи и переработки твердых горючих ископаемых. М.: Недра, 1986. – 255с.
3. Папин А.В. Экологические и технологические аспекты утилизации коксовой пыли в виде топливных брикетов / Папин А.В., Игнатова А.Ю., Солодов В.С.//Безопасность в техносфере. –2013. С. 66-70. 19

Научный руководитель: О.А. Степанова, к.т.н., доцент заведующая кафедрой «Техническая физика и Теплоэнергетика» ГУ им. Шакарима г. Семей

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Н.М. Мартынова, Б.Е. Ашимов
Государственный университет имени Шакарима г. Семей

Теплофизика и входящие в нее разделы являются теоретической основой почти всех энергетических технологий. Именно теплофизика исследует и изучает все тепловые процессы, к которым относятся горение топлива, нагрев и охлаждение теплоносителя и рабочих поверхностей, кипение и конденсация, а также излучение световой энергии нагретым телом. Все перечисленные процессы являются теплофизическими процессами производственных циклов ТЭС, АЭС, ТЭЦ. С развитием науки подробное исследование теплофизических процессов помогает повысить эффективность и производительность энергетических установок, автоматизировать и контролировать производственный цикл, предсказывать развитие экстремальных ситуаций, разрабатывать новые изоляционные и теплопередающие материалы и теплоносители с заранее заданными свойствами. Поэтому изучение теплофизических процессов постоянно требует разработки новых более эффективных методов исследования, их экспериментальной диагностики и математического моделирования.

Сегодня научно-технический процесс постиг все области деятельности человека, а автоматизация, которая подразумевает за собой создание процессов и производств без участия или с частичным участием человека, стала необходимой во всех сферах. Особенно важное значение автоматизация приобретает в энергетике, так как сложные системы вообще не могут работать без автоматизации управления, причем ее роль в будущем будет только возрастать. Довольно большой спектр инженерных задач в настоящее время можно решить на персональных компьютерах, известно достаточно много пакетов прикладных программ, в которых расчеты систем доведены до совершенства. Теперь рассмотрим основные прикладные программы, такие как ANSYS Multiphysics,

Maxwell, COMSOL Multiphysics, ELCUT, Elmer. Весь расчет в таких программах осуществляется в интерактивном режиме и даже доступен студентам и инженерам со знаниями среднего уровня. Все, что нужно для получения результата, так только сконструировать модель, обозначить свойства материалов и граничные условия, начать расчет и вывести результаты в числовом и графическом виде [1].

ANSYS Multiphysics решает задачи в разнообразных областях инженерной деятельности (задачи прочности конструкций, термодинамики, механики жидкости и газа, электромагнетизма, расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, теплообмена, гидрогазодинамику и т.д.). Комплекс содержит специальные междисциплинарные элементы, которые позволяют напрямую решать связанные задачи (термопрочность, магнитоупругость и др.). Приложения ANSYS Multiphysics нашли широкое применение не только в энергетике, но также в автомобилестроении, атомной энергетике, железнодорожном транспорте, судостроении, двигателестроении, строительной отрасли, электромашиностроении. Основными преимуществами программного пакета перед другими являются высокая точность расчетов и широкие возможности использования [2].

Maxwell используется для моделирования низкочастотных двумерных и трехмерных электромагнитных полей методом конечных элементов; переходного нелинейного анализа компонентов, гармонического электромагнитного анализа [1].

COMSOL Multiphysics – это базирующаяся на передовых численных методах программная платформа для компьютерного моделирования физических процессов, которые описываются частными дифференциальными уравнениями [3].

ELCUT – это прикладной программный пакет для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Программа отличается дружелюбным пользовательским интерфейсом, простотой описания моделей, широкими аналитическими возможностями и высокой степенью автоматизации всех операций [4].

Elmer содержит модели динамики жидкости, квантовой механики, структурной механики, электромагнетизма, теплопереноса, акустики и т.д [1].

Программное обеспечение в энергетике очень востребовано, использование компьютерных технологий не только сократит время расчетов, но и финансовые затраты. Для чего нанимать несколько рабочих и платить им заработную плату, если их работу в состоянии сделать компьютер? Все перечисленные выше программы позволяют считать индукционные системы с достаточно хорошей степенью точности и достоверности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских энергосистем АПК //

- URL: <https://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=6869> (дата обращения: 17.09.17);
2. Программный пакет ANSYS // URL: <https://sites.google.com/site/komputernoemodelirovanie/home/stati/programmnyj-paket-ansys> (дата обращения: 19.09.17);
 3. COMSOL // URL: <http://plmpedia.ru/wiki/COMSOL> (дата обращения: 17.09.17);
 4. Программы для моделирования электромагнитных и тепловых задач в 2D и 3D // URL: http://inductor-jmag.ru/programmy_dlja_modelirovanija_jelektromagnitnyh_i_teplovyh_zadach_v_2d_i_3d/ (дата обращения: 18.09.17).

РАЗРАБОТКА БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, МОЩНОСТЬЮ 4 МВт НА ВОДОАММИАЧНОМ РАБОЧЕМ ТЕЛЕ

С.Л. Елистратов, А.Ю. Кулиш

Новосибирский государственный технический университет

В последние годы все больший интерес проявляется к электрическим станциям, где в качестве рабочих тел паросилового цикла используются низкокипящие рабочие тела (НРТ). Технологии, лежащие в их основе, позволяют утилизировать «бросовое» низкопотенциальное тепло теплоэнергетики, металлургии, химических и нефтеперерабатывающих производств в диапазоне температур $90\div 200^{\circ}\text{C}$. Это позволит более эффективно использовать первичные не возобновляемые энергоресурсы. Именно это направление развития энергетики определено одним из приоритетных в «Стратегии развития энергетики России до 2030 г».

Традиционным циклом, реализуемым в паросиловых энергоустановках на НРТ, является цикл Ренкина. Однако этот цикл применим для однокомпонентных рабочих тел, процессы кипения и конденсации в которых имеют изобарно-изотермический характер. Это не позволяет создать эффективно работающие теплосиловые машины для утилизации сбросного тепла во всем диапазоне температур теплоисточников.

В последние годы получили развитие исследования, направленные на поиск и разработку термодинамических циклов на смесевых рабочих телах, которые способны обеспечить работу энергоустановок в широком температурном диапазоне параметров вторичных теплоисточников за счет неизотермичности процессов конденсации и испарения.

Смесевым рабочим телом, которое удовлетворяет условиям энергоэффективности и экологичности, является водоаммиачный раствор. Вода и аммиак – это природные вещества. С помощью изменения концентрации аммиака можно существенно расширить диапазоны температур и давлений рабочего цикла. Во время утечек аммиака можно легко устранить проблему при помощи нейтрализации его водой.

Характерной особенностью двухкомпонентных рабочих тел и, в частности, водоаммиачной смеси является изменение температуры в процессах кипения и конденсации при постоянном давлении. Сначала при более низкой температуре кипит аммиак, по мере снижения концентрации аммиака в растворе температура кипения повышается. При конденсации, наоборот, первой при более высокой температуре конденсируется вода, а для конденсации аммиака требуется более низкая температура. Непостоянство температур позволяет использовать различные регенеративные схемы энергоустановок для повышения их КПД.

Возможность использования водоаммиачной смеси как рабочего тела энергетических и холодильных установок была исследована в монографии; были указаны наиболее эффективные тепловые схемы в зависимости от температуры греющего источника (в зарубежных публикациях для подобных схем используется термин «цикл Калины»).

В своей работе мы опирались на одну из работающих станций по циклу Калины расположенной в городе Хусавик, Исландия. Принципиальная схема (Рис. 1) и принцип работы: водо-аммиачная смесь нагревается геотермальной водой в испарителе -1, затем в сепараторе идет отделение жидкости от пара -2. Пар приводит в движение турбину - 4, расширяется и охлаждается. Насыщенная жидкость из сепаратора охлаждается в низкотемпературном рекуператоре - 5. Затем поток жидкости направляется в высокотемпературный рекуператор - 3, где обогревается паром выходящим из турбины.

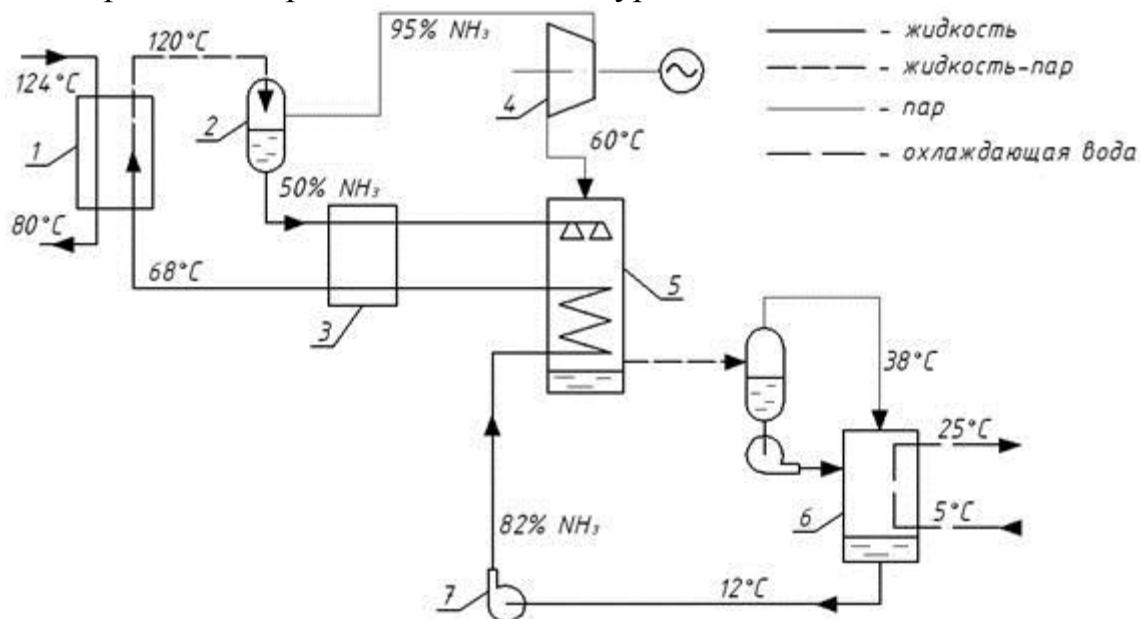


Рис. 1. Принципиальная схема станции в г. Хусавик.

Опираясь на опыт работы данной станции мы решили создать свою энергоустановку, которая работала бы не от тепла геотермальных источников а от тепловых сбросов энергопредприятий тем самым мы решаем вопросы энергосбережения в России. В работе был выполнен расчет эффективности установки, было подобрано самое современное оборудование, а также предложен вариант компоновки оборудования в транспортабельном модуле (Рис. 2) Общий вес составил: 23 000 кг. Модуль с такими весо-габаритными характеристиками явля-

ется транспортабельным всеми видами специального водного, наземного и железнодорожного транспорта.

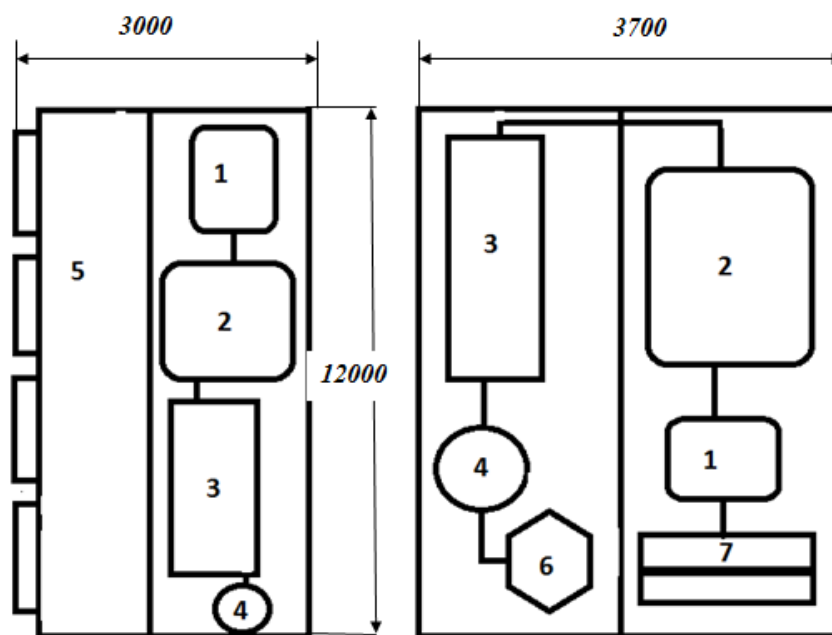


Рис. 2. Вариант компоновки оборудования в транспортабельном модуле. 1 – генератор; 2 – турбина; 3 – испаритель; 4 – питательный насос; 5 – воздушный конденсатор; 6 – ресивер; 7 – электрораспределительные устройства.

В отличие от традиционных ТЭС наша энергоустановка использует для своей работы не теплоту дымовых газов при сгорании органического топлива, а сбросы промышленных предприятий. В этом случае положительные эффекты при выработке электроэнергии могут быть выражены через относительную экономию органических видов топлива [1]. За год энергетический модуль может выдать в сеть при среднегодовой мощности $\bar{N} = 4,0$ МВт количество электроэнергии в размере

$$N_{\text{эл}}^{\text{год}} = N_{\text{уст}} * \tau_{\text{год}} = 4000 * 8760 = 35040000 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \quad (1)$$

где

$N_{\text{эл}}^{\text{год}}$ – количество электрической энергии полученной за год;

$\bar{N}_{\text{уст}}$ – средняя установленная мощность;

$\tau_{\text{год}}$ – количество часов в год

Например, рассмотрим вариант использования нашей энергоустановки на ТООЗ. ПАО «Тольяттиазот» (ТООЗ) – одно из крупнейших предприятий химической промышленности России, входящее в тройку основных производителей аммиака в стране и в десятку мировых лидеров. Единственный в мире химический комбинат, способный производить 3 миллиона тонн аммиака ежегодно.

На сайте компании, в открытом доступе, представлен годовой отчет за 2015 год. В 2015 году потребление энергоресурсов предприятием составило: электроэнергия - 550 556 тыс.квт.ч на сумму 1 436 млн. рублей. Вычислим экономию средств, она составит 8,616 млн рублей.

В заключении хотелось бы отметить, что на основании проведенного исследования разработана блочно-модульная транспортабельная энергетическая установка, был предложен вариант компоновки, подобрано самое современное,

компактное, экологически чистое оборудование. Предлагается использовать результаты проведенных исследований для решения проблемы утилизации бросового тепла с температурой 100÷200°С в теплоэнергетике, металлургии, химических и нефтеперерабатывающих производствах с целью повышения эффективности использования первичных энергоресурсов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Поваров О.А., Саакян В.А., Никольский А.И. и др. Бинарные электрические станции // Тяжелое машиностроение, 2003. №8. С. 13-15
2. Розенфельд Л.М., Ткачев А.Г. Холодильные машины и аппараты. М.: Госторгиздат, 1955.
3. Гринман М.И., Фомин В.А. Перспективы применения энергетических установок с низкокипящими рабочими телами// Сб. докл. Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики-2009» - С.27-30
4. Кочтова Е.В. Перспективы водоаммиачного смесового рабочего тела в энергетике. Наука Инновации Технологии / Е.В. Кочтова, С.Л. Елистратов. Новосибирск 2013. - 3с\

Научный руководитель С.Л. Елистратов, д.т.н., проф., зав. каф. ТЭС, НГТУ.

СРАВНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ РАЗНЫХ МАРОК И ОТХОДОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

Д.П. Шабардин
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП

В настоящее время актуальной задачей является развитие топливных технологий, использующих вместо дорогих традиционных энергоресурсов (угля, мазута, газа) дешевые топливные композиции на основе отходов углеобогащения.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение скоростей горения органоводоугольных топлив на основе углей разных марок и отходов их переработки.

Исследования проводились с составами, представленными в таблице 1

Табл. 1. Исследованные суспензии

	ВУТ	ОВУТ
1	55% уголь К, 45% вода	50% уголь К, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло
2	100% фильтр-кек К	90% фильтр-кек К, 10% отработанное турбинное масло
3	55% уголь СС, 45%	50% уголь СС, 40% вода, 10% отработанное турбин-

	вода	ное масло
4	100% фильтр-кек СС	90% фильтр-кек СС, 10% отработанное турбинное масло

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1. Капля с топливом подавалась в камеру сгорания, при помощи высокоскоростной камеры измерялось время горения капли, а также ее размер.

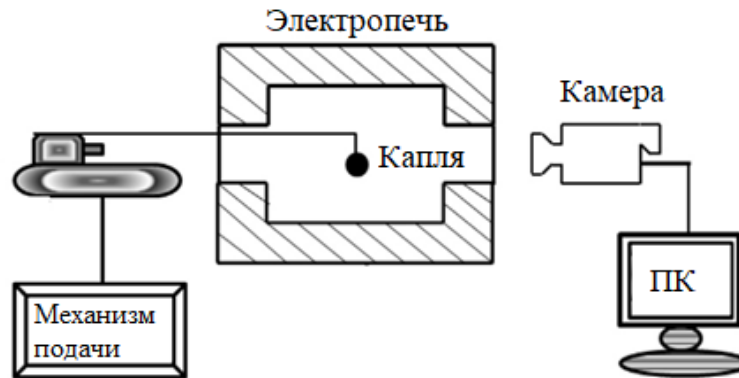


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Скорость горения определялась по формуле

$$v = d^2/t_b$$

где d – диаметр капли, t_b – время полного горения.

Результаты экспериментов представлены на рисунках 2-5. Скорости горения органоводоугольных топливных композиций в 2–3 раза выше, чем водоугольных (рис.2). Это можно объяснить различным режим протекания горения каплей для ОВУТ и ВУТ. Для ОВУТ характерно протекание горения со взрывом (рис. 4б), что, очевидно, увеличивает скорость прогорания капли. Для ВУТ характерно протекание горения без взрыва (рис. 4а).

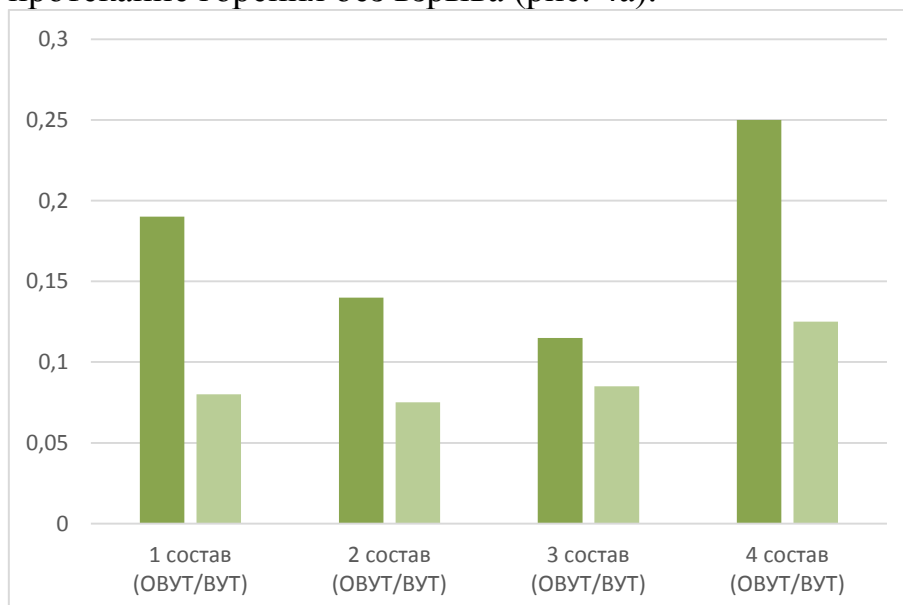


Рис. 2. Сравнение скоростей горения для ВУТ И ОВУТ для разных составов

Скорости горения капель суспензий ОВУТ и ВУТ, приготовленных на основе массовых отходов углеобогащения (фильтр-кеков), близки скоростям горения суспензиям, приготовленным на основе углей, (рисунок 3).

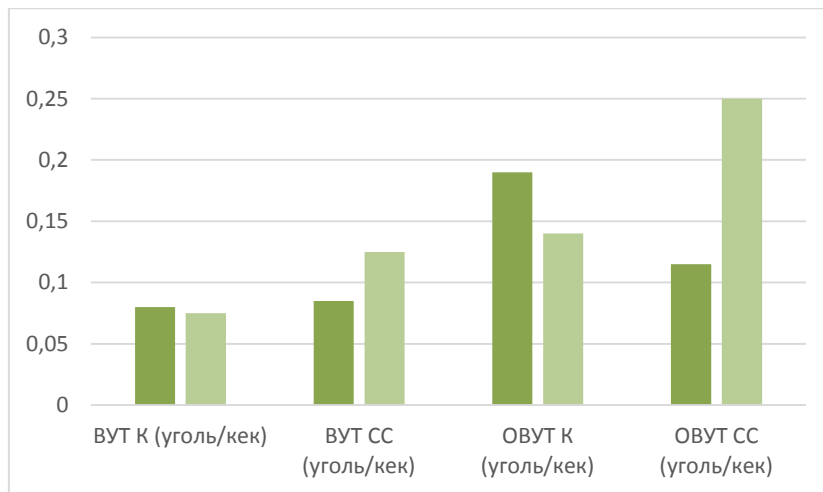
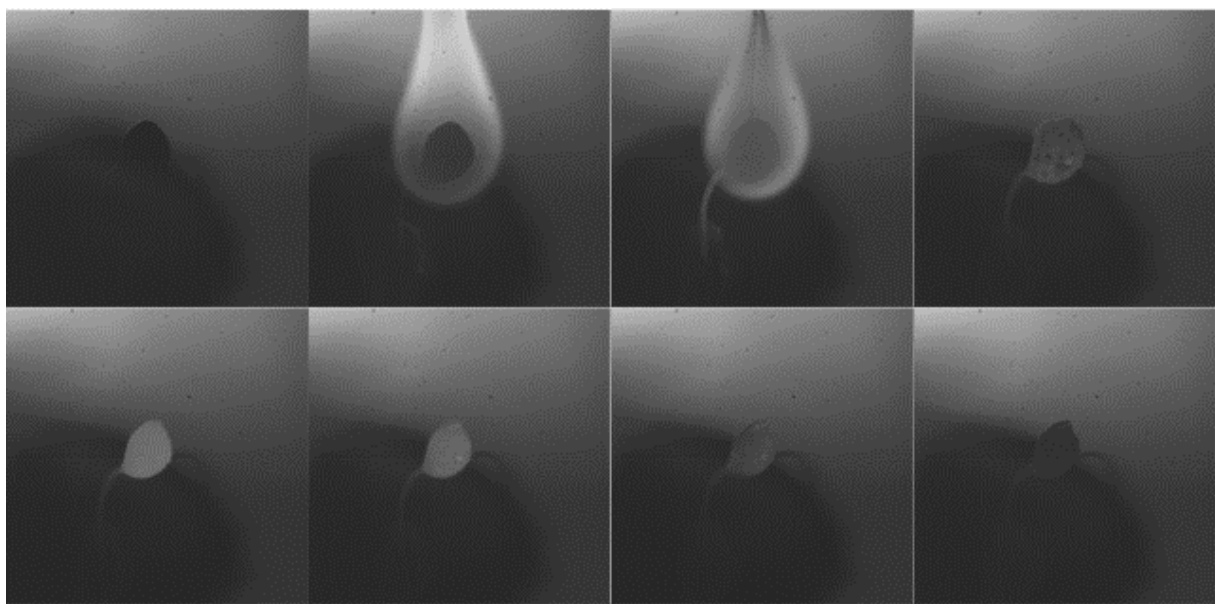


Рис. 3. Сравнение скоростей горения для уклей и отходов переработки для различных составов



a



b

Рис. 4. Кадры видеogramм с установленными режимами зажигания:
a – без взрыва, *b* – со взрывом

С ростом температуры в камере сгорания (рис.5) и размеров капель топлив (рис.6) скорости горения по экспоненциальным зависимостям увеличиваются. В случае водоугольных топлив скорости горения не зависят от размеров капель. Выполненное сравнение с известными результатами [1] позволяет сделать для типичных суспензий ВУТ общее заключение, заключающееся в том, что можно обеспечить идентичную скорость горения топлива при впрыске в камеру сгорания суспензии с разными размерами капель суспензий. В случае суспензий ОВУТ скорости горения можно варьировать в широком диапазоне (в частности, от $0.05 \text{ мм}^2/\text{с}$ до $0.2 \text{ мм}^2/\text{с}$) при изменении размеров капель, температуры в камере сгорания, свойств и концентрации основных компонентов.

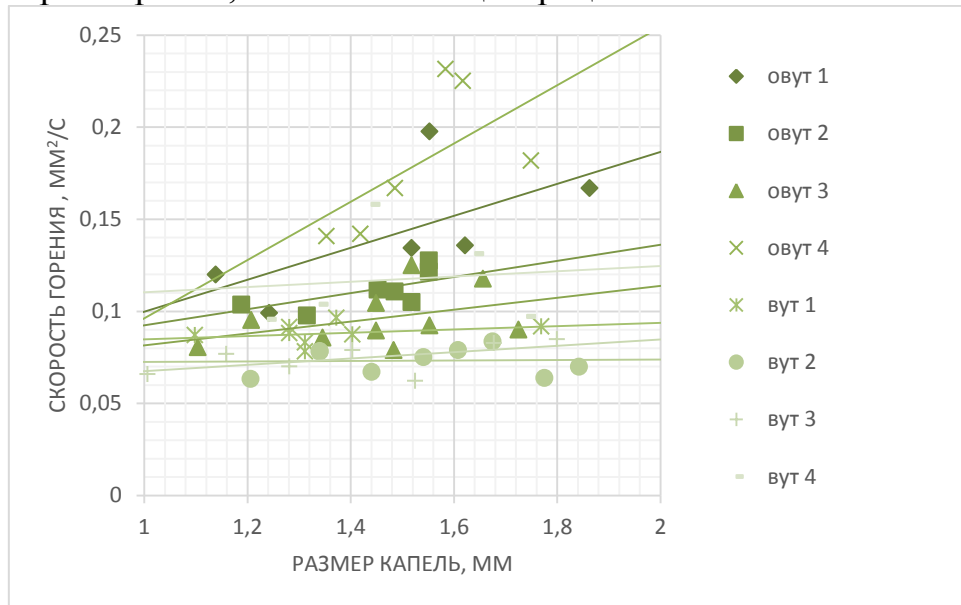


Рис. 4. Зависимость скорости горения от размеров капель для разных составов

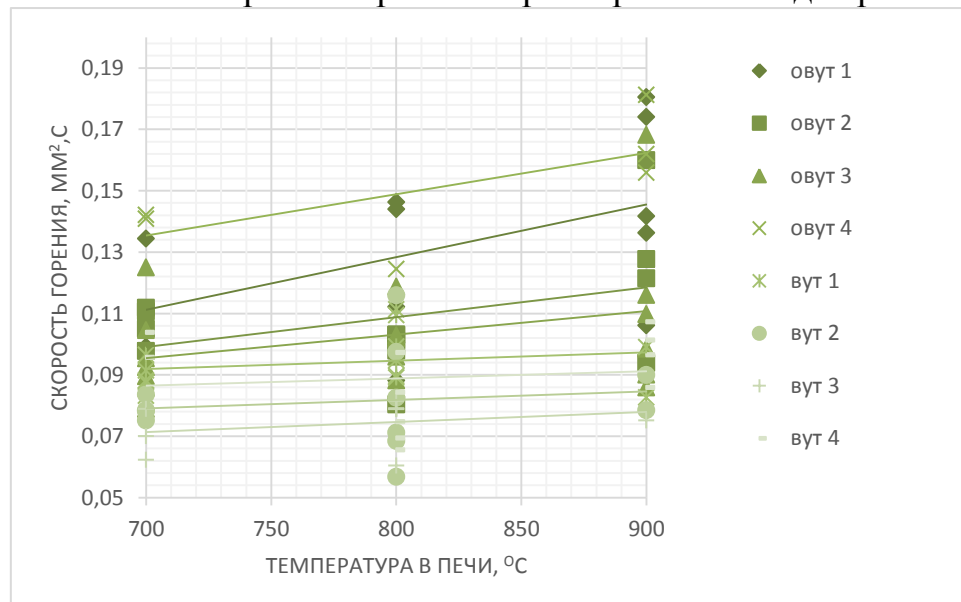


Рис. 5. Зависимость скорости горения от температуры горения для разных составов

По экологическим и экономическим индикаторам отходы углеобогащения привлекательнее, чем уголь. Эти индикаторы при применении отходов углеобогащения вместо угля возрастают в 2–4 раза. Как следствие, можно сделать

вывод о целесообразности широкого применения суспензионных топлив с использованием в качестве основных горючих компонентов типичных отходов углеобогащения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mingming Zhu ↑, Zhezi Zhang, Yang Zhang, Pengfei Liu, Dongke Zhang
An experimental investigation into the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar water slurry fuels in air // Applied Energy 185 (2017) 2160–2167

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

**СЕКЦИЯ 2.
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ
ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ DLA-1200 TA**

Шлегель Н.Е.

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ74

Лесные пожары являются источником колоссальных экологических и экономических проблем [1]. Низовые пожары, как известно, являются основной причиной распространения фронта горения по бореальному массиву. При этом важной составляющей в условиях возгорания надпочвенного покрова является химия стадий деструкции ЛГМ [2], а также кинетика пиролиза горючего материала [3]. Опубликовано недостаточно данных по влиянию теплофизических свойств лесных горючих материалов (ЛГМ) на процесс прекращения его термического разложения в условиях температур, сопоставимых с реальными при низовом пожаре.

Целью настоящей работы является определение теплофизических свойств типичных лесных горючих материалов Томской области в характерном для низового пожара диапазоне температур.

Исследуемые образцы были собраны на территории города Томска и Томской области (п. Самусь). Для измерения теплофизических характеристик ЛГМ использовалась система DLA-1200 TA Instruments (рис. 1), принцип действия которой основан на оценке скорости распространения импульса тепла в толще образца. Систематическая погрешность определения коэффициентов теплоемкости составляет – $\pm 4\%$, теплопроводности – $\pm 5\%$.

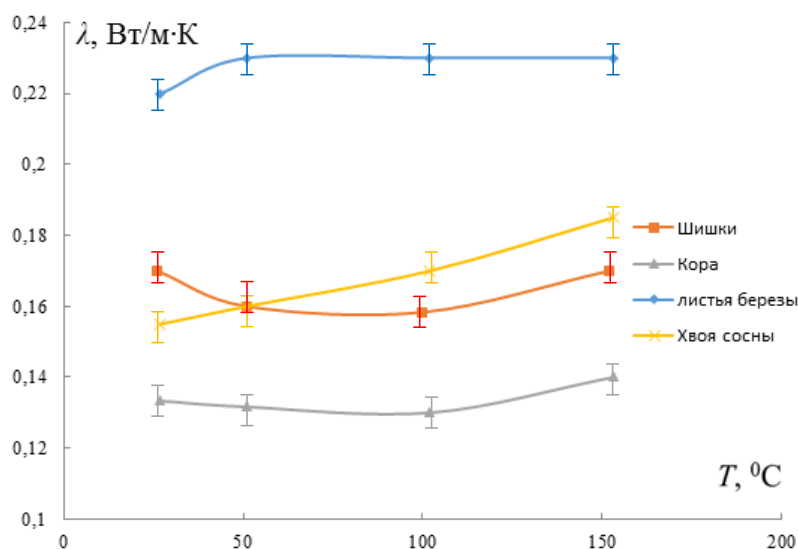


Рис. 1. Схема установки для определения теплофизических характеристик веществ.

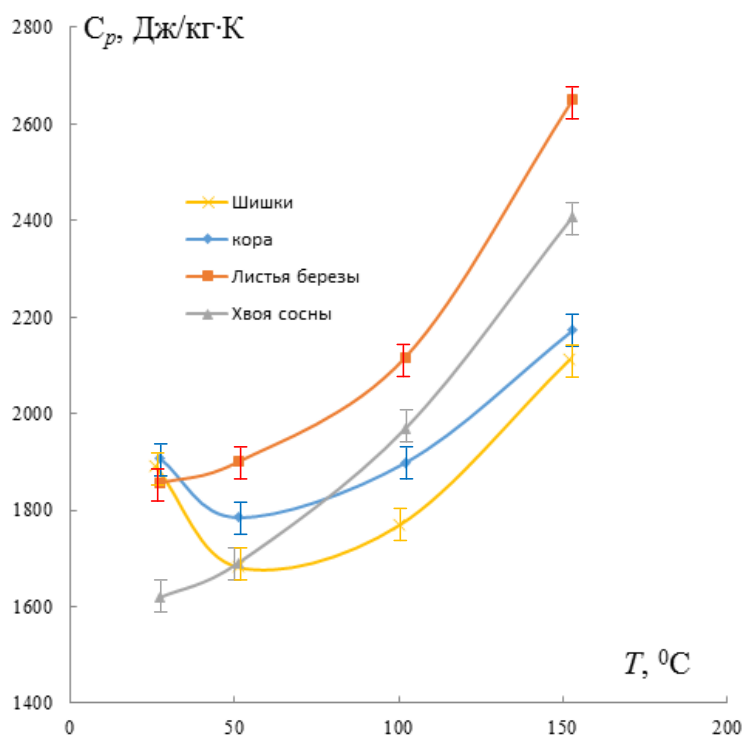
Подготавливалась навеска порошков (средний размер частиц составил около 200 мкм) исследуемых материалов массой около 0,15–0,27 г и при помощи гидравлического пресса навески спрессовывались в образцы цилиндрической формы. Образцы при помощи держателя и специализированной тележки помещались в термостат. Рабочий объем термостата заполняется инертным газом (азотом).

Для проведения измерений обязательно наличие калибровочного образца, загружаемого в модуль термостата одновременно с тестируемыми образцами. В качестве калибровочного образца использовался Pyrex7740 с известными теплофизическими характеристиками. Значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности, удельная теплоемкость определяются при помощи программного обеспечения системы DLA-1200 TA Instruments на основе скорости распространения импульса лазерного излучателя в толще образца. Единновременно в термостат загружались калибровочный образец и 3 образца ЛГМ одной марки. Для каждого образца проводилось 5 измерений, результаты которых усреднялись. Для готовых образцов перед помещением в термостат определяются масса, высота, диаметр основания и плотность. Эти данные заносятся в программное обеспечение системы DLA-1200 TA Instruments.

На рисунке 2 представлены полученные в результате экспериментальных исследований значения теплофизических характеристик в диапазоне температур от 25 до 150 °С для листьев березы, хвои сосны, коры деревьев и шишек.



а



б

Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности (а), удельной теплоемкости (б) образцов хвой сосны, листьев березы, шишек хвойных пород деревьев и коры от температуры.

Заметен (рис. 2) существенный рост удельной теплоемкости, рассмотренных ЛГМ, при увеличении температуры. Анализ опубликованной литературы позволил установить удовлетворительную корреляцию полученных значений теплофизических характеристик. В таблице 1 приведены известные экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости типичных материалов напочвенного покрова смешанных лесов.

Таблица 1. Теплофизические характеристики ЛГМ

Тип ЛГМ	Экспериментальные данные в диапазоне температур 25-150 °С		Данные [2] при температуре 25 °С		Данные [3] при температуре 30-90 °С	
	λ , Вт/(м·К)	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	C_p , Дж/(кг·К)
Хвоя ели	0,15–1,18	1618–2409	0,05-0,1	1300-2500	0,102	1397
Листья березы	0,22–0,23	1856–2651	—————	—————	0,1340	1450
Шишки	0,14–0,17	1681–2112	0,1260	1630	—————	—————
Кора	0,12–0,14	1774–2173	0,1074	2008	—————	—————

Полученные значения могут быть использованы для численного моделирования процессов деструкции ЛГМ в условиях, соответствующих реальным пожарам лесного массива

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-1684.2017.8.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Атлас риска пожаров на территории Российской Федерации – М.: ООО «Издательско-продюсерский центр» «Дизайн. Информация. Картография», 2010. – 640 с.
2. Гришин А.М., Голованов А.Н. О потухании лесных горючих материалов при постоянных и переменных воздействиях потока инертного газа на зону горения // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 5. – С. 75-80.
3. Палецкий А.А., Гончикжапов М.Б., Коробейничев О.П. Исследование пиролиза лесных горючих материалов методом зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии // Сиббезопасность-Спасиб. – 2011. – № 1. – С. 97-98.

Научный руководитель: А.О. Жданова, к.ф.-м.н., старший преподаватель каф. АТП ЭНИН ТПУ.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ НА БАЗЕ ПЛК

В.В. Афанасьева

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ74

Введение

Ключевые слова: автоматическая система регулирования, объект управления, программируемый логический контроллер, климатическая камера, температура.

Климатическая камера предназначена для проведения климатических испытаний, позволяет моделировать агрессивное воздействие окружающей среды и исследовать воздействие параметров (температуры, влажности) на оборудование.

Используется климатическая камера на промышленных предприятиях, в оборонной и авиационной промышленности, в научно-исследовательских учреждениях, в машиностроении.

Объектом исследования является климатическая камера.

Цель работы: разработка автоматической системы регулирования температуры в климатической камере.

В процессе разработки автоматической системы регулирования температуры выбраны технические средства, написан программный код и создана мнемосхема для АСР температуры.

Объект автоматизации

Климатическая камера изготовлена из материала – пенополистирол и имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Изнутри камера полностью покрыта фольгой для улучшения теплоизоляции. Сверху камера закрывается крышкой. В нее помещаются датчики температуры и часть нагнетателя воздуха, который должен довести температуру в климатической камере до 70 °С.

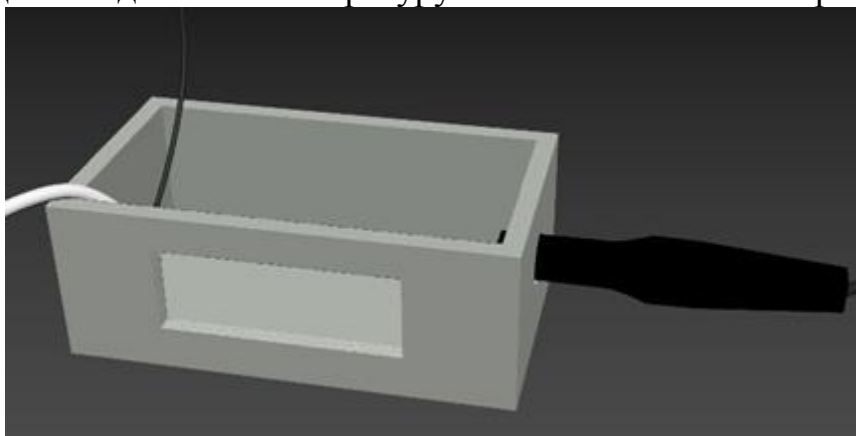


Рис. 1. 3D модель климатической камеры

Структура системы автоматического регулирования

Структурная схема АСР температуры представлена на рисунке 2.

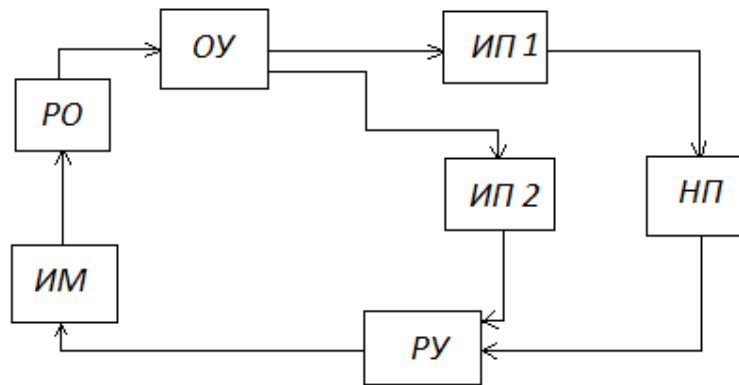


Рис. 2. Структурная схема АСР температуры

Ниже приведены обозначения элементов структурной схемы АСР температуры.

Табл. 1. Условные обозначения элементов структурной схемы

Условное обозначение	Наименование элемента
—	Линия связи
—>	Направление передачи сигнала
ОУ	Объект управления (климатическая камера)
ИП 1	Измерительный преобразователь (датчик температуры DS18B20)
ИП 2	Измерительный преобразователь (датчик температуры ДВТ-03. Т)
НП	Нормирующий преобразователь
РУ	Регулирующее устройство (ПЛК)
ИМ	Исполнительный механизм (реле)
РО	Регулирующий орган (нагнетатель воздуха TNI-U858D)

Программирование в программном обеспечении Step 7-Micro/WIN

Программирование контроллера Simatic S7-200 осуществлялось с помощью программного обеспечения Step 7-Micro/WIN. Использовался язык LAD, так как легко позволяет проследить идущий сигнал между входами, выходами и командами. На рисунке 3 представлена процедура сравнения температуры в климатической камере с уставкой по температуре (70 °C).

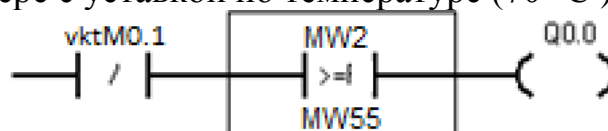


Рис. 3. Процедура сравнения температур в программе на языке LAD

При отсутствии входного сигнала М 0.1 на нормально замкнутом контакте включается блок сравнения «больше или равно». При значении температуры MW2 больше или равной значению уставки MW 55 подается сигнал на Q0.0 и контакты реле размыкаются. Уставка реализуется в программном коде и не изменяется в SCADA.

Разработка SCADA – системы

Для разработки SCADA – системы использовалась программа Simatic WinCC Flexible. В мнемосхеме представлены следующие элементы:

1. кнопки включение и выключение нагнетателя воздуха;
2. шкала для определения температуры в климатической камере;
3. тренд для фиксирования температурных показаний;
4. окно алармов используется в качестве сообщений о текущем состоянии процесса;
5. переключатель режимов «Показать» и «Скрыть» для отображения тренда и алармов;
6. окно задания значения уставки в климатической камере.

На рисунке 4 представлен редактор Simatic WinCC Flexible.

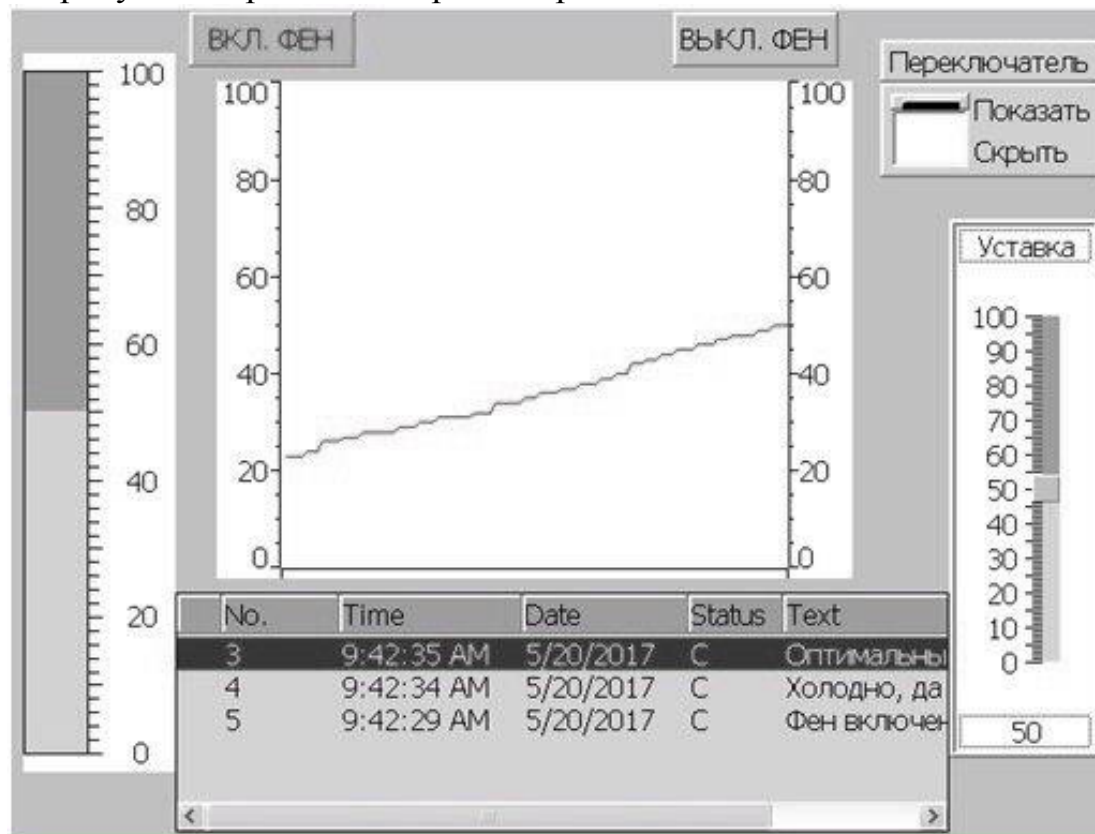


Рис. 4. Окно редактора Simatic WinCC Flexible

Вывод

В результате работы разработана автоматическая система регулирования температуры в климатической камере на базе программируемого логического контроллера, система запущена и налажена.

Основным преимуществом разработанной автоматической системы регулирования температуры является наличие удобной для пользователя SCADA системы и среды программирования Step 7. Благодаря наглядности SCADA,

можно отслеживать процесс и быстро отреагировать на какие-либо изменения системы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Комнатнов М.Е. Обзор ТЕМ-камер, используемых при проведении испытаний на ЭМС // Научная сессия ТУСУР – 2013: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2013. – С. 116–119.
2. Проектирование систем автоматического контроля и регулирования: учебное пособие/ А.В. Волошенко, Д.Б. Горбунов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 109 с.
3. Проектирование систем автоматизации технологических процессов: Справочное пособие/ А.С. Клюев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровский, А.А. Клюев; Под ред. А.С. Клюева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
4. Komnatnov M.E., Gazizov T.R. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing // Proc. of IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio 2014).

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

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ В СИСТЕМЕ ОТОПЛЕНИЯ УМНОГО ДОМА

Т.В. Рябова

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

На данный момент область сложного теплообмена недостаточно хорошо изучена [1,2]. В первую очередь причиной этому являются сложные механизмы переноса энергии, а также трудности вычисления при попытке реализации данных механизмов с помощью математических моделей. В ходе данной работы [1] выполнялось численное исследование конвективно-радиационного теплопереноса в излучающей, поглощающей и изотропно рассеивающей среде в полости квадратного сечения (несопряженная постановка). Известно, что присутствие излучения ведет к увеличению температуры в рассматриваемой среде, а также влияет на режимы течения.

В данной статье [2] численно исследован режим термогравитационной конвекции в сопряженной постановке в замкнутой прямоугольной области с внутренним источником температурной неоднородности. Результаты полученные в ходе исследования характеризуют не только температурные поля стандартного объекта теплоснабжения в исследуемом режиме теплопереноса по истечении семидесяти двух часов, но и динамику процесса теплопереноса.

Основываясь на полученных в [3,4] результатах, можно сделать вывод о том, что имеется необходимость пространственного нестационарного моделирования процессов конвективно - кондуктивного теплообмена в сопряженной постановке на объектах теплоснабжения при выработке технологических режимов как при централизованном, так и местном теплоснабжении.

В [5] указывается, что оптимальное положение нагревателя имеет зависимость как от мощности нагревателя, теплофизических характеристик стенки, на которой он расположен, так и, в значительной мере, от геометрических характеристик области решения.

На внутренней поверхности стенки равномерным образом распределяется тепловой поток. Установлено влияние каждого в отдельности механизма переноса энергии на конечное формирование тепловых и гидродинамических режимов в рассматриваемой полости. Исследование с помощью математических моделей сопряженной естественной конвекции в горизонтальном кольцевом зазоре между тепловыделяющим твердым блоком и изотермическими внешними границами приведено в [6].

Получены распределения местных термогидродинамических характеристик, а также выполнен анализ степени влияния формы твердого внутреннего блока на всевозможные режимы течения и теплопереноса. Численный и экспериментальный анализ сопряженной термогравитационной конвекции в окрестности нагреваемой твердой стенки отражен в [7].

В наше время большое количество авторов занято изучением теплообмена в замкнутой области с различными перегородками, которые оказывают влияние на явление конвективного потока. В статье [8] было рассмотрено явление смешанной конвекции в воздушном охлаждении с дифференциально нагретыми вертикальными изотермическими боковыми стенками, имеющими входное и выходное отверстия при помощи метода конечных элементов с регулируемым объемом. Под исследование попали две различные конфигурации размещения входных и выходных портов на боковых стенках. Самая лучшая конфигурация выбиралась путем проведения анализа эффективности охлаждения полости, которая устанавливает, что подача воздуха через охлажденную стенку было более гораздо эффективнее в отводе тепла, а установка впускного портов в непосредственной близости от дна и выпускного отверстия недалеко от верхней части обеспечивают эффективное охлаждение. В [9] расшириют проведенные работы, рассматривая 6 различных конфигураций размещения входных и выходных отверстий дифференциально нагретого прямоугольного корпуса, в отличие от предыдущей работы, в которой ограничивались только двумя различными конфигурациями входного и выходного портов. В [10] проводятся численные исследования противодействующей смешанной конвекции в вентилируемом корпусе. Было обнаружено, что с возрастанием чисел Рейнольдса и Ричардсона конвективный теплообмен преобладал по теплопроводности проводимости, а скорость теплопередачи от нагретой стенки значительно зависела от положения входного отверстия.

Исследователи в [11] изучают смешанную конвекцию из изолированных источников тепла в прямоугольном корпусе. Далее в [12] проводят необходи-

мые вычисления по смешанной конвекции от локализованного источника тепла в полости с теплопроводящими стенками и 2 отверстиями для применения электронного охлаждающего оборудования. В [13] проводят численное исследование смешанной конвекции в частично разделенном прямоугольном корпусе. Рассматривается разделитель как дефлектор во внутренней части корпуса с двумя различными ориентациями и указывается, что среднее число Нуссельта и безразмерная температура поверхности зависимы от способа расположения и предельной высоты перегородки. Естественная конвекция в горизонтальном слое жидкости с периодической решеткой квадратного цилиндра во внутренней области была приведена в [14]. Исследователи сделали вывод, что переход потока от квазистойчивой к нестационарной конвекции зависит от двух факторов: наличия тел и соотношения размеров конвективных ячеек Рэлея-Бенара.

В статье [15] приводится численное исследование стабильного смешанного конвективного теплообмена в прямоугольном вентилируемом корпусе при ламинарном режиме. Исследование проводилось для ряда соответствующих безразмерных групп, а именно, числа Рейнольдса, числа Ричардсона и соотношения размеров полости. Рассмотрение коснулось четырех конфигураций полостей. Исследование содержит постоянное значение числа Рейнольдса (Re) в 100 и диапазона числа Ричардсона (Ri) от 0,0 до 5,0, представляющее доминирующую вынужденную конвекцию через смешанную конвекцию до преобладания естественной конвекции. Результаты исследования говорят о том, что на структуру потока и распределение температуры значительно влияют параметры смешанной конвекции и пропорции полости. Среднее число Нуссельта на нагретой поверхности является самым высоким для самого низкого значения соотношения сторон, но средняя температура жидкости в полости и температура в центре цилиндра являются самыми низкими для самого высокого значения соотношения сторон.

В [16] проведены анализы влияния амплитуды на конвекцию, вызванную кратковременно периодическим нагревом. Указывается, что интенсивность конвекции внутри оболочки увеличивается линейно с амплитудой нагрева. В [17] проводится численное моделирование периодического колебания потока для малых количеств Прандтля в прямоугольном корпусе. При этом наблюдаются неперидические потоки для прямоугольной полости с соотношением сторон 2,0. В статье [18] была исследована плавучая конвекция с внутренней тепловой генерацией при колебательной температуре боковой стенки полости. Выяснено, что вторичный пиковый резонанс обнаружился для более высокого внутреннего числа Рэлея.

В статье [19] проводится численное моделирование конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутой области с источником тепловыделения при наличии теплопроводных стенок конечной толщины. Получены распределения как локальных характеристик (линии тока, поля температуры), так и интегральных (средние числа Нуссельта на характерных границах), описывающие основные закономерности исследуемого процесса в реальном диапазоне изменения определяющих параметров. Авторы статьи [20] подвергли изучению переходную естественную конвекцию в квадратном корпусе, частично нагретой

со стороны. В начале температура меняется со временем синусоидально, а в другом случае она менялась пульсирующим образом. Результаты указывают на то, что средние значения теплоотдачи и интенсивности потока в значительной мере отличны от значений, получаемых в стационарном режиме.

В [21] была изучена неравновесная модель периодической свободной конвекции. Результаты изучения показывают, что любое увеличение амплитуды и частоты колебательной температуры поверхности ведет к сильному уменьшению скорости передачи тепла.

Проблема – измерение значения температур в комнате в разных точках пространства, которая затрагивается в теме "Математические модели и алгоритмы в системе отопления умного дома", актуальна. В связи с этим были изучены научные статьи, где рассмотрены разные виды теплопереноса в прямоугольной камере, с разными источниками тепла. Наличие теплопроводных стенок конечной толщины, оказывают существенное влияние на режимы теплопереноса. В большинстве представленных выше работ проводится анализ достаточно простых постановок (температура источника постоянная, на внешних границах рассматриваются граничные условия первого рода), что не позволяет использовать полученные результаты при исследовании физических процессов и явлений, имеющих место в реальных промышленных установках. В то же время совместный анализ влияния локального тепловыделяющего элемента и неоднородного теплообмена с окружающей средой может позволить получить результаты, наиболее адекватные реальным рабочим режимам большинства устройств и аппаратов.

Совершенствование алгоритмов управления системы отопления «умного дома», является актуальной проблемой. Данные алгоритмы смогут помочь в решении глобальных проблем таких, как энергосбережение, экономия денежных средств.

Рассматриваемый объект является сложным, поскольку входящие в него переменные величины в данный момент времени имеют разные числовые значения в различных точках. Основные переменные процесса в объекте изменяются и во времени, и в пространстве, такие объекты относят к объектам с распределенными параметрами (ОРП). На современном этапе развития систем автоматического управления возникает проблема рассмотрения таких объектов управления для более детального понимания их функционирования и описания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Tan Z., Howell J.R. Combined radiation and natural convection in a two-dimensional participating square medium // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. 1991. V. 34. P. 785–793.
2. Chiu H.C., Jang J.H., Yan W.M. Combined mixed convection and radiation heat transfer in rectangular ducts rotating about a parallel axis // *Inter. J. Heat and Mass Transfer*. 2007. V. 50. P. 4229–4242.

3. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Сопряженная задача термогравитационной конвекции в прямоугольной области с локальным источником тепла // Инженерно-физический журнал. 2008. Т. 81, № 1. С. 90–96.
4. Кузнецов Г.В., Шеремет М. А. Математическое моделирование термогравитационной конвекции в сопряженной постановке в замкнутой области // 2005. стр. 104–109
5. Nouanegue H., Muftuoglu A., Bilgen E. Conjugate heat transfer by natural convection, conduction and radiation in open cavities // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2008. V. 51. P. 6054–6062. (10)
6. Sambamurthy N. B., Shaija A., Narasimham G. S. V. L., Krishna Murthy M. V. Laminar conjugate natural convection in horizontal annuli // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2008. V. 29. P. 1347–1359. (11)
7. Bilgen E. Conjugate heat transfer by conduction and natural convection on a heated vertical wall // Appl. Thermal Engng. 2009. V. 29. P. 334–339. (12)
8. Omri, A. and Nasrallah, S.B. Control Volume Finite Element Numerical Simulation of Mixed Convection In An Air-Cooled Cavity // Numerical Heat Transfer. 1999. Part A, V. 36. P. 615–637.
9. Singh, S. and Sharif, M.A.R. Mixed Convection Cooling of a Rectangular Cavity with Inlet and Exit Openings on Differentially Heated Side Walls // Numerical Heat Transfer. 2003. Part A, V. 44. P. 233–253.
10. Rahman, M.M., Alim, M.A., Mamun, M.A.H., Chowdhury, M.K. and Islam, A.K.M.S. Numerical Study of Opposing Mixed Convection in a Ventilated Enclosure // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2007. V. 2. No. 2, P. 25-36. (6).
11. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y. Mixed Convection From an Isolated Heat Source in a Rectangular Enclosure // Numerical Heat Transfer. 1990. Part A, V. 18. P. 427–461.
12. Papanicolaou, E. and Jaluria, Y. Mixed Convection from a Localized Heat Source in a Cavity with Conducting Walls: A Numerical Study // Numerical Heat Transfer. 1993. Part A, V. 23. P. 463–484.
13. Hsu, T.H., Hsu, P.T. and How, S.P. Mixed Convection in a Partially Divided Rectangular Enclosure // Numerical Heat Transfer. 1997. Part A, V. 31. P. 655-683.
14. Ha, M.Y., Yoon, H.S., Yoon, K.S., Balachandar, S., Kim, I., Lee, J.R. and Chun, H.H. Two-Dimensional and Unsteady Natural Convection in a Horizontal Enclosure with a Square Body // Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 41, (2002), P. 183–210. (12).
15. Md. Mustafizur Rahman, Md. Elias, Md.A. Alim. Mixed convection flow in a rectangular ventilated cavity with a heat conducting solid circular at the center // International Journal of Engineering. February 2011. V. 24. No. 1. P. 93- 105.
16. B. V. Antohe and J. L. Lage. Amplitude effect on convection induced by time-periodic horizontal heating // International Journal of Heat and Mass Transfer 39. 1996. N. 6, P. 1121–1133.

17. D. W. Crunkleton, R. Narayanan, and T. J. Anderson, Numerical simulations of periodic flow oscillations in low Prandtl number fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49. 2006. N. 1-2, P. 427–438.
18. G.B. Kim, J.M. Hyun, and H.S. Kwak, Enclosed Buoyant convection with internal heat generation under oscillating sidewall temperature, *ASME Journal of Heat Transfer* 124. 2002. N. 3, P. 577– 580.
19. Кузнецов Г.В., Шеремет М. А. Математическое моделирование сложного теплопереноса в замкнутой прямоугольной области // 2009. стр. 123–133.
20. E. K. Lakhal, M. Hasnaoui, and P. Vasseur, Numerical study of transient natural convection in a cavity heated periodically with different types of excitations, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42. 1999. N. 21. P. 3927–3941.
21. N.H. Saeid and A.A. Mohamad, Periodic free convection from a vertical plate in a saturated porous medium, non-equilibrium model, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48. 2005. N. 18. P. 3855–3863.

Научный руководитель: С.В. Шидловский, д.т.н., профессор каф. АТП ЭНИН ТПУ.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СЖИГАНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ, ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

М.А. Курганкина, А.Г. Косинцев
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП

Введение

В течение последнего десятилетия потребление угля в мире растет высокими темпами [1, 2]. В настоящее время доля угля в мировом производстве электроэнергии высока и составляет около 45 % [1, 2]. Устойчивый рост добычи угля в последние годы наблюдается во многих странах, например, Китай, Индия, Индонезия, Австралия, Россия. Этот рост закономерен и обусловлен активным увеличением производственных мощностей. Поэтому увеличивается спрос и на энергоносители.

Сжигание топлива – процесс не только получения энергии, но и загрязнения окружающей среды антропогенными выбросами (летучая зола, частицы негоревшего топлива, сернистый и серный ангидриды, окислы азота, фтористые соединения) [3]. На долю угля приходится более 50 % мировых выбросов оксидов серы (SO_x) и 20 % выбросов оксидов азота (NO_x) [4]. Следует отметить, что большая часть добываемого угля обогащается. В результате чего образуется большое количество высокозольных отходов (фильтр-кеков), масса которых на сегодняшний день оценивается десятками миллионов тонн [5]. Поэтому становится актуальной масштабная утилизация отсевов, шламов, отходов углеобогат-

щения путем их сжигания в составе топливных суспензий. Горючие отходы обогащения угля являются наиболее перспективными компонентами для приготовления водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных топлив (ОВУТ) [6]. В последние годы определены [7] интегральные характеристики зажигания и горения наиболее перспективных суспензий ВУТ и ОВУТ, приготовленных на основе различных компонентов (от низкосортных углей до отходов угле- и нефтепереработки). Однако исследования экологических индикаторов сжигания органоводоугольных топлив освещены не в полной мере, мало обоснованных данных о приемлемых интервалах антропогенных выбросов оксидов серы, азота и углерода.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение экологических последствий сжигания суспензионных топлив на основе углей, отходов и продуктов их переработки.

Изучение экологических индикаторов сжигания углей, ВУТ и ОВУТ

Исследования проводились для трех наиболее распространенных в России и за рубежом марок каменных углей (слабоспекающийся – СС, коксующийся – К, длиннопламенный – Д), а также фильтр-кеков на основе рассматриваемых каменных углей соответствующих марок. Для предотвращения расслоения топливных композиций применялся пластификатор «Неолас» [8]. В качестве жидких горючих компонентов применялись наиболее распространенные и существенно влияющие на свойства суспензий ОВУТ [7]: мазут и отработанное турбинное масло (ОВУТ 1 – фильтр-кек СС 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 2 – фильтр-кек К 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 3 – фильтр-кек Д 89 %, мазут 10 %, пластификатор 1 %; ОВУТ 4 – фильтр-кек СС 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 5 – фильтр-кек К 89 %, СС 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1%; ОВУТ 6 – фильтр-кек Д 89 %, СС 89 %, отработанное турбинное масло 10 %, пластификатор 1 %). Приготовление суспензий ОВУТ осуществлялось в соответствии с методикой [7]. Результаты элементного и технического анализа углей, продуктов их переработки и жидких горючих компонентов представлены в работах [7, 8]. Для измерения газообразных выбросов при сжигании составов ОВУТ использовался экспериментальный стенд [8] с применением муфельной печи (диапазон температур 700–1000 °С) и газоанализирующей системы. Газообразные продукты, выделяемые в процессе нагрева, зажигания и горения топлива в муфельной печи, регистрировались и вычислялись газоанализатором [8]. В таблицах 1–4 представлены измеренные значения концентраций выбросов SO_x и NO_x от температуры в печи при сжигании рассматриваемых топливных образцов.

Табл. 1. Концентрации выбросов NO_x и SO_x от сжигания углей.

$T_g, ^\circ\text{C}$	Уголь СС		Уголь К		Уголь Д	
	NO_x (ppm [*])	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)
700	300	8	220	5	100	1
800	370	10	300	12	250	6
900	450	22	400	28	300	18
1000	550	40	500	50	450	30

* ppm – единица измерения концентрации, 1 ppm=0,0001 %.

Табл. 2. Концентрации выбросов NO_x и SO_x от сжигания фильтр-кеков.

$T_g, ^\circ\text{C}$	Фильтр-кек СС		Фильтр-кек К		Фильтр-кек Д	
	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)
700	30	8,8	100	6	10	6,5
800	120	9,2	220	12	100	7
900	200	10,6	300	15	150	8,5
1000	380	12,5	420	19	350	9,5

Табл. 3. Концентрации выбросов NO_x и SO_x от сжигания ОБУТ 1–3.

$T_g, ^\circ\text{C}$	ОБУТ 1		ОБУТ 2		ОБУТ 3	
	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)
700	282	30	180	21	105	6
800	411	66	280	45	214	40
900	450	83	320	78	274	62
1000	520	118	480	100	300	87

Табл. 4. Концентрации выбросов NO_x и SO_x от сжигания ОБУТ 4–6.

$T_g, ^\circ\text{C}$	ОБУТ 4		ОБУТ 5		ОБУТ 6	
	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)	NO_x (ppm)	SO_x (ppm)
700	453	29	189	18	70	5
800	601	50	420	47	186	14
900	650	70	540	64	250	32
1000	753	88	669	72	301	48

Анализ полученных концентраций (табл. 1–4) показал, что с ростом температуры в печи концентрации SO_x и NO_x возрастают. Процессы образования SO_2 при сжигании угольного топлива в большей мере зависят от содержания органических соединений серы [8] в разных образцах. Высокое содержание серы приводит к сильному загрязнению продуктов сгорания сернистым ангидридом SO_2 [9]. В частности, серосодержание угля марки С (0.868 %) выше, чем у других каменных углей (0.526–0.326 %) [8], что, в свою очередь, и определяет максимальные выбросы SO_x при его сжигании (табл.1). Низкие концентрации SO_x соответствуют углю марки Д, в котором достаточно мало серы и много влаги [8]. Установлено, что интенсивное образование оксидов азота начинается при температурах выше 700°C , обеспечивающих устойчивое зажигание и последующее горение топлива. Обработка экспериментальных данных показала, что выход NO_x зависит от содержания в исходном топливе азота и влаги, которая способствует снижению выхода NO_x [8, 9]. Высоким содержанием азота и невысоким содержанием влаги характеризуется уголь

марки СС, которому соответствуют наибольшие концентрации NO_x . Наименьшие выбросы NO_x характерны для угля марки Д с высоким содержанием влаги (5.17%) [8], что обуславливает нижнее расположение кривой. Снижение выбросов NO_x и SO_x при сжигании фильтр-кеков обусловлено соответствующими химическими реакциями, протекающих при горении топлива, в которых участвует вода, как несущая среда суспензий [8]. Следует отметить, что максимальные концентрации выбросов NO_x для ВУТ на основе отходов углепереработки (фильтр-кеков) на 25 % меньше, чем для углей (табл. 2). Также установлено, что диапазон выбросов SO_x для суспензий ОВУТ (5–120 ppm) несколько шире, чем для каменных углей (0–50 ppm) соответствующих марок. Это обусловлено химическим составом жидких горючих компонентов ОВУТ [8]. В частности, содержание серы в рабочей части мазутов находится в диапазоне 0,3–3,5 %, турбинных масел – не более 1,1 %. Наличие дополнительной серы приводят к повышению показателей выбросов ОВУТ. Добавление продуктов нефтепереработки в целом не приводит к снижению выбросов NO_x (диапазоны изменения выбросов от сжигания ОВУТ и каменных углей сопоставимы между собой). Лишь в отдельном случае концентрации NO_x для ОВУТ на основе фильтр-кека Д ниже, чем для каменных углей.

Заключение

Выполненные эксперименты позволили выделить значимые экологические преимущества суспензий ВУТ и ОВУТ на основе фильтр-кеков в сравнении с каменными углями разных марок. В частности, при сжигании ВУТ выбросы NO_x и SO_x могут быть снижены на 25–50 %. Применение ОВУТ не способствует существенному снижению выбросов NO_x и SO_x , однако, значения концентраций при сжигании ОВУТ и углей сопоставимы между собой, а в некоторых случаях могут быть несколько ниже. Эти результаты еще раз подчеркивают большие экологические перспективы широкого применения отходов углепереработки в теплоэнергетике. Так же было установлено, что с точки зрения экологии, возможно использование всех рассмотренных горючих жидкостей (в качестве компонентов ОВУТ) с равным вкладом в окружающую среду. Выбор той или иной жидкой горючей составляющей для ОВУТ обусловлен в большей степени характеристиками процесса горения (температурой зажигания, теплотой сгорания, инерционностью зажигания и стабильностью суспензий), а также стоимостью и объемами (запасами) сырья для приготовления ОВУТ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 15–19–10003).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Feng Liu, Tao Lyu, Li Pan, Fei Wang. Influencing factors of public support for modern coal-fired power plant projects: An empirical study from China / Energy Policy, 2017, V. 105, P. 398-406.
2. BP Statistical Review of World Energy, 2016, 48 p.

3. Aijun L., Zhang A., Zhou Y., Yao X. Decomposition analysis of factors affecting carbon dioxide emissions across provinces in China / Journal Cleaner Production, 2017, V. 141, P. 1428-1444.
4. International Energy Agency. Emissions of Air Pollutants for the World Energy Outlook 2011 Energy Scenarios, 2011, 666 p.
5. International Energy Outlook with projections to 2040. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2013. 234 p.
6. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Yu. Organic Coal-Water Fuel: Problems and Advances (Review) / Thermal Engineering, 2016. V. 63, No. 10, P. 707-717.
7. D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak, Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / Fuel Processing Technology, 2016, V. 148, P. 224-235.
8. Margarita A. Dmitrienko, Galina S. Nyashina, Pavel A. Strizhak. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / Journal of Hazardous Materials, 2017, V. 338, P. 148-159.
9. Y. Hu, S. Naito, N. Kobayashi, M. Hasatani, CO₂, NO_x and SO₂ emissions from the combustion of coal with high oxygen concentration gases / Fuel, 2000, V. 79, P. 1925-1932.

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

АСР ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ КОТЛА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БЕЗМАЗУТНОЙ РАСТОПКИ

Д.А. Чебочакова
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

Как правило, растопка пылеугольных котлов реализуется с использованием природного газа или мазута. Стоимость этих энергоресурсов выше стоимости угля. Такая разница в силу разных причин будет возрастать. В настоящее время на тепловых электростанциях широко используются топочный мазут с высоким содержанием серы, при сжигании которого в дымовых газах образуется большое количество токсичных веществ (оксид серы, пятиокись ванадия), оказывающих негативное воздействие на окружающую среду [1]. Указанные негативные факторы и высокая стоимость мазута приводят к необходимости снижения объемов его потребления на объектах теплоэнергетики и обеспечения максимально возможного использования твердого натурального топлива.

Наиболее перспективной технологией для решения сформулированной проблемы является плазменная технология безмазутной растопки котла, которая обеспечивает повышение экономических и экологических показателей ТЭС [2]. Плазменный розжиг низкосортных углей проводят после предвари-

тельной электротермохимической (ЭТХПТ) подготовки пылеугольного топлива.

В основе такого метода воспламенения факела лежит ЭТХПТ, заключающейся в нагреве части аэросмеси электродуговой плазмой. Нагрев производится до температуры частичной газификации коксового остатка, также до температуры полного выделения летучих веществ. При смешении электродуговой плазмы с пылеугольным потоком частицы угля испытывают тепловой удар, который приводит к их дроблению и, следовательно, быстрому нагреву частиц. Напряжение на дуге плазмотрона регулируется и поддерживается в заданных пределах автоматическим варьированием расхода воздуха, образующего плазму.

Воздействие плазмы на пылеугольную смесь имеет такие преимущества, как:

1. высокая температура струи воздуха, вводимой в аэросмесь (4000 – 5000 К);
2. высокая концентрация энергии в единице объема;
3. простота управления параметрами плазмы (температурой, мощностью);
4. уменьшение тепловой мощности самой плазменной струи, необходимой для устойчивого воспламенения аэросмеси, по сравнению с мазутным факелом.

Альтернативным вариантом безмазутной растопки котла является замена мазута эквивалентным по тепловыделению пылеугольным топливом, инициирование которого происходит в муфельных горелках. Применение таких горелок на котлах позволяет сжигать уголь с разными теплотехническими характеристиками в одном котлоагрегате.

Муфельная система состоит из следующих основных элементов [3]:

1. муфельные горелки, располагающиеся на боковых стенах топочной камеры на уровне первого яруса основных горелок;
2. делители-пылеконцентраторы, установленные на пылепроводах от центральных мельниц к горелкам второго яруса;
3. пылепроводы от делителей-пылеконцентраторов до муфельных горелок;
4. воздухопроводы от коробов вторичного воздуха котла до муфельных горелок.

Задачей муфельных горелок является предварительная термообработка угольной пыли и подача в топочную камеру высокотемпературного пылеугольного факела. Муфельизированные предтопки, установленные на расстоянии 2 м от осей фронтальных экранных труб, обеспечивают равномерное распределение факела в топке, а также стабильность воспламенения горелок на нижнем ярусе.

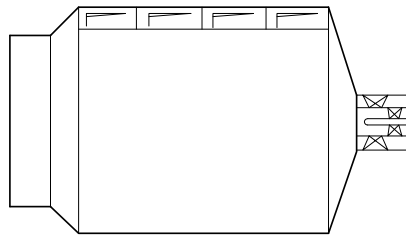


Рис. 1. Эскиз муфельной горелки

Муфельная горелка представляет собой камеру цилиндрической формы, футерованную изнутри огнеупорным материалом. По периметру предтопка 3 сопла равноудалены под углом 120 градусов друг к другу. Вторичный воздух вводится тангенциально, что позволяет обеспечить охлаждение футеровки и равномерное выжигание топлива. Улиточный завихритель разделен на 4 секции и на каждой секции установлен регулирующий клапан, который позволяет регулировать подачу воздуха по всей длине муфеля. С помощью муфельных горелок обеспечивается подача горящего факела в топку с температурой 1200–1350 °С.

Предварительная термическая подготовка топлива перед сжиганием в топке энергетического котла является частичная аллотермическая газификация пыли при температурах 600–800 °С. Поток угольной пыли (рабочее топливо 3), тангенциально поступает в установку, выполненную в виде цилиндра, внутрь которого направляется высокорекреакционное топливо 2 при условии концентрации кислорода, обеспечивающей устойчивое горение. В предтопке поток рабочего топлива прогревается с образованием двухфазного топлива [4]. На выходе газозвесь смешивается со вторичным воздухом и вместе с продуктами сгорания инициирующего топлива поступает в топку котла.

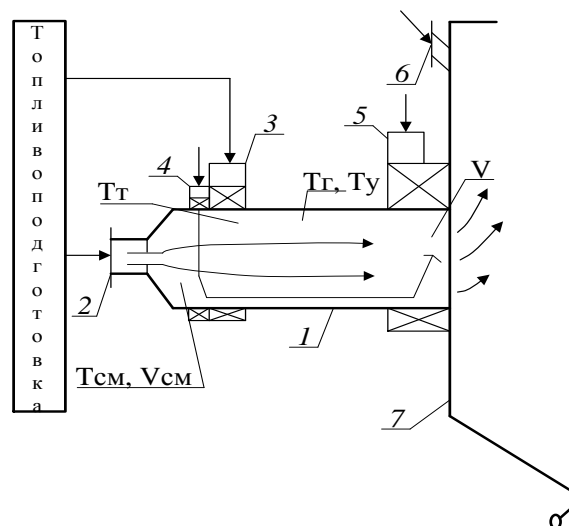


Рис. 2. Схема предварительной термодготовки топлива: 1 – пылеподогреватель; 2 – подача инициирующего топлива; 3 – подача рабочего топлива; 4 – подача пара для частичной газификации; 5 – вторичный воздух; 6 – третичное дутье; 7 – топка котла; $T_{см}$, $V_{см}$ – температура и объем газозвеси на входе в подогреватель; V – объем газозвеси на выходе из подогревателя; $T_{г}$, $T_{г}$, $T_{у}$ – температура горения топлива, газозвеси и частиц

Мазут перед сжиганием должен пройти цикл специальной подготовки. Это необходимо для эффективного сжигания с одновременным обеспечением

надежности топочного устройства, а также уменьшения загрязняющих выбросов в окружающую среду [5]. Подготовка заключается в первичном подогреве, который необходим при транспортировке, фильтрации, обработке присадками, обессоливании, обеспечении рабочего давления перед сжиганием топлива и подогреве до требуемой вязкости.

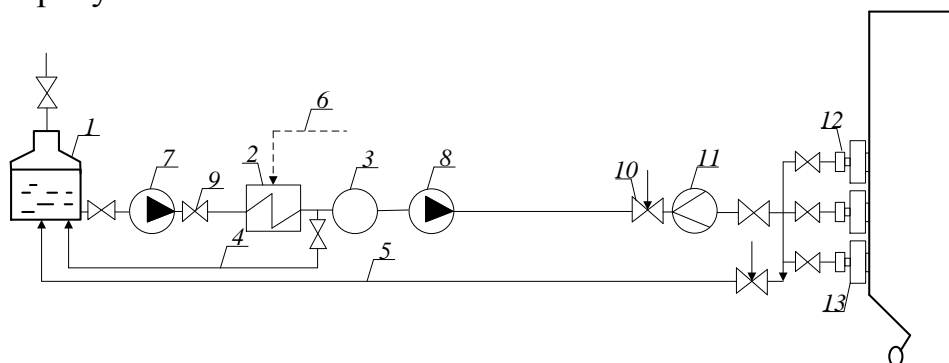


Рис. 3. Схема подготовки к сжиганию мазута: 1 – мазутохранилище; 2 – паровой теплообменник; 3 – фильтр; 4, 5 – линии рециркуляции мазута; 6 – подвод пара к теплообменнику; 7, 8 – насосы первой и второй ступеней давления; 9 – обратный клапан; 10 – регулятор расхода; 11 – измеритель расхода; 12 – ствол мазутной форсунки; 13 – горелка

Температура хранения мазута не должна превышать 90 °С. При его охлаждении до 40 °С включается разогрев с помощью подогревателя. Насосы обеспечивают прием мазута, перекачку в хранилище, подогрев резервуаров паром и подачу мазута к форсункам котлов. После подогревателей, на линии подачи мазута к форсункам устанавливаются фильтры тонкой очистки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стимулом развития новых технологий безмазутной растопки котлов послужило резкое ужесточение требований к повышению эффективности использования топлива и защите окружающей среды от выбросов.

Разработка безмазутного воспламенения углей является актуальной задачей современной теплоэнергетики. Как топливо пылеугольных ТЭС, мазут имеет ряд серьезных недостатков:

1. повышенные требования к технике безопасности (например, при хранении и транспортировке);
2. нестабильный состав каждой партии топлива;
3. высокая стоимость, особенно в последнее время;
4. высокое содержание серы в составе топлива.
5. многоступенчатая подготовка мазута к использованию: разогрев, слив, организация хранения без расслоения на воду и мазут и т.д.;
6. большие затраты на электрическую энергию.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вальцев Н.В., Рыжков А.Ф. Возможность применения углей ультратонкого помола для растопки пылеугольных котлов // Теплофизические основы энергетических технологий. – 2011. – С. 195–198.

2. Жуков М.Ф., Перегудов В.С. О плазменной технологии растопки котлов, работающих на пылеугольном топливе // Теплоэнергетика. –1996. – № 12. – С. 61–64.
3. Цепенюк А.И., Серант Ф.А. и др. Разработка и внедрение муфелизированных предтопок для снижения технического минимума пылеугольных котлов // Энергетик. – 2015. – № 12. – С. 45–51.
4. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки: Учеб. для вузов. М.: Стройиздат, 1986.
5. Кормилицын В. И., Лысков М. Г., Румынский А. А. Комплексная эко-совместимая технология сжигания водомазутной эмульсии и природного газа с добавкой сбросных вод. // Теплоэнергетика.–1996.– № 9.–С. 13 - 17.

Научный руководитель: Д.О. Глушков, к.ф.-м.н., доцент каф. АТП ЭНИН ТПУ.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИНДИКАТОРОВ СЖИГАНИЕ СУСПЕНЗИОННЫХ УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ПРИМЕСЬЮ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДРЕВЕСНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Г.С. Няшина, Н.Е. Шлегель
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа А6-13

1. Введение

Энергетические проблемы являются определяющими во многих экономических, социальных и экологических сферах. Именно от эффективной работы энергетического комплекса в значительной мере зависит экономический потенциал государств и благосостояние населения. Основными источниками энергии на сегодня являются геологические топливно-энергетические ресурсы: нефть, уголь, газ, горючие сланцы, торф, уран и др. По оценкам экспертов [1,2], доля угля в структуре мирового топливно-энергетического баланса составляет около 25–35%. С использованием угля производится 40–45% мировой электроэнергии [1,2].

Одной из основных проблем, связанных с использованием угля, является наносимый природе вред при его добыче, переработке и сжигании. Самые актуальные экологические проблемы (изменение климата, кислотные дожди, общее загрязнение среды) прямо или косвенно связаны с использованием данного энергоресурса [3]. Значительные экологические проблемы связаны с твердыми отходами ТЭС – золой и шлаками.

Рациональное использование собственных энергоресурсов, благоприятный климат и экологически чистая окружающая среда являются ключевыми факторами устойчивого развития любого государства [3,4]. На первый план выступают программы, которые способны без ущерба для быстрого экономического роста, реализовать целый ряд мер по повышению энергоэффективности и

снижению концентраций антропогенных выбросов. В рамках данного направления исследований предложено сосредоточиться на решении основных фундаментальных и прикладных задач в области определения эффективных, в первую очередь, с точки зрения экологических аспектов, условий использования перспективных водоугольных суспензий взамен традиционным энергоресурсам (мазут, газ, уголь). Под водоугольным топливом (ВУТ) понимается смесь измельченного угольного компонента с водой. В качестве горючей основы могут использоваться [5] угольные шламы и отсеvy, отходы углеобогачительных фабрик (фильтр-кеки), низкосортные угли. Для обеспечения необходимого уровня энергетической мощности и повышения энергоэффективности при использовании ВУТ в суспензии добавляется 10–15% жидкого горючего компонента [5]. Таким образом, получаются суспензии органоводоугольных топлив (ОВУТ).

Но применение жидких горючих отходов и низкорреакционных компонентов в составе ОВУТ приводит к неизбежному росту концентраций антропогенных выбросов. Основным направлением решения данной проблемы представляется активное применение растительных добавок [6-8]. Можно отметить, что общая тенденция проводимых в последние годы исследований по рассматриваемой научной тематике заключается в использовании больших объемов растительных добавок для получения энергии и минимизации негативного влияния на окружающую среду. Смешение растительных отходов и угольных топлив приводит к диверсификации источников энергии, так как их сырьевая база обширна и постоянно пополняется [6-8].

Россия располагает свыше 25% мировых запасов леса и занимается активной переработкой древесного материала. Лесами, из которых почти 80% приходится на долю хвойных, занято 2/5 территории страны. Основные запасы леса сосредоточены в Сибири и на Севере Европейской части страны. К категории древесного топлива относятся, кроме собственно деревьев, их растительные отходы (пни, сучья, ветви, вершинные части деревьев) и опады (хвоя, листья, валежник, кора), также промышленные отходы (обрезки, щепы, стружка, опилки, деревянная тара и др.) [8]. Низкий спрос на древесные отходы, образованные в результате лесозаготовки и лесопереработки, объясняется недостаточным развитием предприятий по их переработке и наносит существенный экономический ущерб и экологические последствия.

Цель настоящей работы – экспериментальное определение влияния добавок лесного горючего материала и древесных отходов на концентрации антропогенных выбросов при сжигании суспензионных угольных топлив.

2. Экспериментальная методика

Для изучения концентраций газообразных выбросов, образующихся при горении углей, продуктов и отходов углепереработки, а также перспективных суспензий ВУТ и ОВУТ с соответствующими добавками и примесями, использовался стенд, аналогичный представленному в [9]. Основными элементами экспериментальной установки являются камера сгорания, представляющая собой трубчатую муфельную печь, и газоанализатор. Применение муфельной печи обеспечивает возможность создания воздушной среды с широким диапазо-

ном температур (700–1,000 °С). Для проведения экспериментов топливная навеска взвешивалась при помощи аналитических весов с дискретностью 0.01 грамм. Масса навески в каждом эксперименте варьировалась в диапазоне 0.5–1.5 грамма. Для обеспечения автоматического ввода и фиксации модульного зонда в камере сгорания использовался координатный механизм (аналогично [9]). Модульный зонд осуществлял отбор газообразных проб, которые поступали в корпус газоанализатора.

3. Результаты и обсуждения

На рис. 1 представлены концентрации основных антропогенных выбросов (SO_x , NO_x), образующиеся при сжигании водоугольного топлива (на основе фильтр-кека) в сравнении с органоводоугольными суспензиями с примесями древесных компонентов.

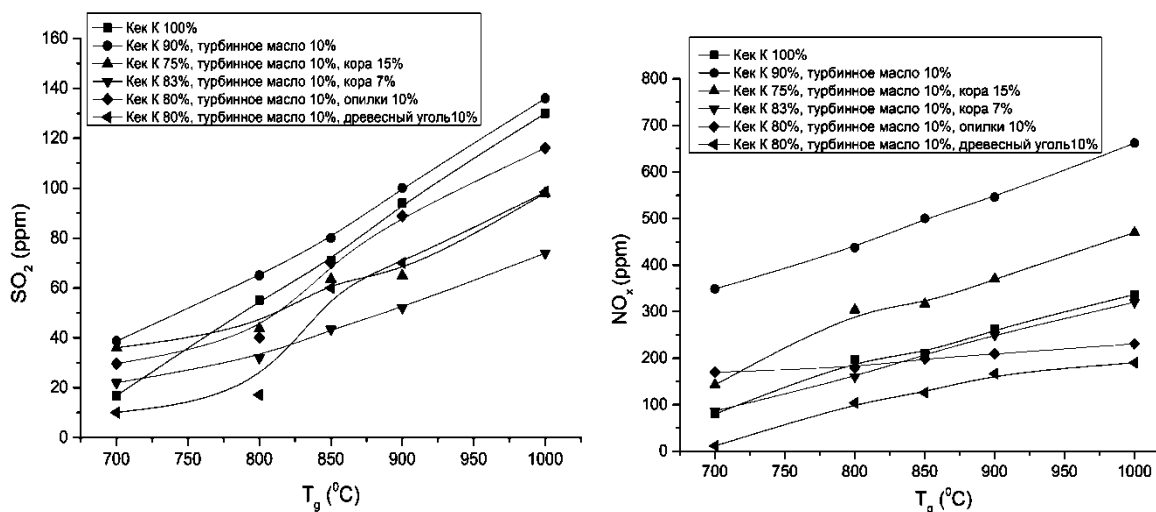


Рис. 1. Экспериментальные зависимости концентраций SO_x и NO_x от температуры в муфельной печи при варьировании древесных компонентов в суспензиях ОВУТ

Уменьшение выбросов диоксида серы в смесях ОВУТ с древесными компонентами можно объяснить малой долей содержания серы в последних, что напрямую оказывает влияние на серосодержание всей смеси. Установлено, что минимальными экологическими показателями по окислам серы (20-65 ppm) характеризуется топливо на основе фильтр-кека, отработанного турбинного масла с 7-15% древесной коры. Щелочно-земельные металлы, присутствующие в дубовой коре в больших количествах, обладают выраженной способностью захватывать SO_x путем образования сульфатов кальция и калия в присутствии кислорода, которого в коре так же достаточно (41.5%). Выбросы диоксидов серы при сжигании ОВУТ и ОВУТ с частицами опилок соизмеримы между собой и не превышают 100 ppm.

Наличие лишь 10% опилок в суспензии ОВУТ привело к снижению концентраций оксидов азота, образующихся при горении топлива, более чем в 2 раза (150–200 ppm в сравнении с 350–650 ppm для ОВУТ на основе фильтр-кека и турбинного масла). Установленное снижение образования топливных оксидов азота обусловлено следующим. Опилки способствуют интенсификации процесса зажигания (температуры термического разложения и зажигания опилок ниже на 200–300 К, чем фильтр-кека) и увеличению выхода монооксида углерода,

который принимает участие в восстановительных реакциях в направлении формирования свободного N_2 ($NO_x + CO = N_2 + CO_2$). Таким образом, с точки зрения выбросов NO_x приоритет суспензий с 10% опилок становится очевиден.

Заключение

По полученным экспериментальным данным можно сделать вывод о том, что древесный уголь, опилки, кора способны повысить экологические индикаторы сжигания органоводоугольных суспензий за счет специфических особенностей их химического состава и интенсифицирующих реакций, протекающих в ходе горения топлива. Несмотря на высокие экологические показатели применения древесного угля в виде добавки к ОБУТ, его производство в мире недостаточно, и использование его в виде компонента к ОБУТ может усложнить и повысить стоимость топлива. Однако масштабы производства предметов из древесины и темпы развития деревообрабатывающей промышленности в мире находятся на высоком уровне. Количество образующихся древесных отходов пропорционально масштабам производства. В этих условиях применение опилок и коры в качестве примесей для композиционного угольного топлива становится перспективным.

Исследования выполнены за счет средств гранта РНФ 15-19-10003.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Feng Liu, Tao Lyu, Li Pan, Fei Wang. Influencing factors of public support for modern coal-fired power plant projects: An empirical study from China // *Energy Policy*. – 2017. – V. 105. – P. 398-406
2. Li H., Yang S., Zhang J., Qian Y. Coal-based synthetic natural gas (SNG) for municipal heating in China: analysis of haze pollutants and greenhouse gases (GHGs) emissions. *J.Cleaner Prod.* – 2016 – V. 112. P. 1350-1359.
3. Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // *Atmospheric Environment*. – 2014. – V. 92. – P. 449-460
4. Chao Zhao, Kunli Luo. Sulfur, arsenic, fluorine and mercury emissions resulting from coal-washing byproducts: A critical component of China's emission inventory // *Atmospheric Environment*. – 2017. – V. 152. – P. 270-278
5. P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals // *Energy*. – 2017. – V. 120. – P. 34-46
6. Guo-qing Liu, Qing-cai Liu, Xiao-qing Wang, Fei Meng, Shan Ren, Zhen-peng Ji. Combustion Characteristics and Kinetics of Anthracite Blending with Pine Sawdust // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2015. – V. 22. – I. 9. – P. 812-817
7. M.V. Gil, C. Pevida, J.J. Pis, F. Rubiera. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion // *Bioresource Technology*. – 2010. – V. 101. – I. 14. – P. 5601-5608

8. Asri Gani, Keiju Morishita, Kunihiro Nishikawa, Ichiro Naruse. Characteristics of Co-combustion of Low-Rank Coal with Biomass // Energy Fuels. – 2005. – V.19. – I. 4. – P.1652-1659
9. Margarita A. Dmitrienko, Galina S. Nyashina, Pavel A. Strizhak. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals // Journal of Hazardous Materials. – 2017. – V. 338. – P. 148-159.

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

ПЕРСПЕКТИВЫ БЕЗМАЗУТНОЙ РАСТОПКИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ. ОСОБЕННОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

О.Е. Ляховская
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

В настоящее время на пылеугольных ТЭС на территории нашей страны используется высококалорийное жидкое топливо (мазут) для повышения эффективности воспламенения, а также для стабилизации процесса горения угля. Мазут ежедневно используют для растопки котлов, стабилизации выхода жидкого шлака и подсветки факела.

Актуальность его замены на ТЭС становится очевидной с каждым годом все больше и больше, по причине неуклонного роста цен на мазут. А также совместное сжигание угля и обладающего более высокой реакционной способностью мазута ухудшает эколого-экономические показатели котлов: повышается механический недожог топлива и уменьшается КПД-брутто, снижается надежность эксплуатации котельного оборудования и возрастает скорость высокотемпературной коррозии экранных поверхностей, появляются выбросы пятиокси ванадия, увеличивается выход оксидов азота и серы. В энергетической стратегии развития России до 2020 г. предусматривается не только рост объемов добычи нефти, но и одновременное увеличение глубины ее переработки, что приведет к ухудшению качества мазута. Вытеснение мазута из топливного баланса низкосортными углями является важнейшей проблемой энергетики.

Известные методы снижения расхода мазута при сжигании низкосортных углей: реконструкция горелочных устройств, отдельное и смешанное сжигание угля и под-светочного топлива – мазута, подогрев воздуха и пылевоздушной смеси, утонение помола, кардинально не решают проблему сокращения расхода жидкого топлива, особенно на стадии растопки котлоагрегата [2, 4, 6].

Мазут применяют не только как резервное топливо для котельных агрегатов средней и большой производительности, но и как растопочное топливо для пылеугольных топок и дополнительное при комбинированном сжигании газа с жидким топливом. В соответствии со СНиП 11-35-76 «Котельные уста-

новки» запасы мазута на котельных должны составлять не менее десятисуточного расхода при доставке по железной дороге и пятисуточного автомобильным транспортом. Работа котельных на мазуте осуществляется очень редко, поэтому его обновление растягивается на длительное время. При длительном хранении мазут постепенно ухудшает свои качества и создает дополнительные технические сложности эксплуатационному персоналу.

В процессе добычи, транспортировки, хранения и глубокой переработки нефти на нефтеперерабатывающих заводах в состав высоковязких тяжелых топочных мазутов попадают твердые минеральные примеси, вместе с которыми в мазут переходят соли щелочных металлов, продукты коррозии трубопроводов, резервуаров и оборудования.

В процессе крекинговой переработки нефти образуются высокореакционные соединения непредельных углеводородов, в том числе асфальтосмолистые вещества, которые могут переходить в первоначальном виде или трансформироваться в процессе термokatалитического крекинга в асфальтены, карбены и карбоиды. Асфальтены являются естественными поверхностно-активными соединениями, которые склонны к коагуляции и оказывают существенное влияние на вязкость мазута.

При хранении и транспортировке мазута по трубопроводам его температура для обеспечения низкой вязкости должна поддерживаться на уровне 50-90 °С. В то же время снижение вязкости мазута только способствует увеличению скорости осаждения грубодисперсных частиц, которые не способны поддерживать во взвешенном состоянии даже тепловое (броуновское) движение молекул дисперсионной среды. Недостаточно эффективная стабилизация дисперсных частиц поверхностно-активными веществами приводит к коагуляции и образованию агломератов, выпадающих в осадок. Карбены и карбоиды, являющиеся основой грубодисперсной части асфальтосмолистых веществ, увеличивают нестабильность мазутов вследствие их склонности к коагуляции и осаждению при отстаивании. Скорость процесса осаждения, обусловленная разностью плотностей твердых коксовых частиц и жидких компонентов мазута, в зависимости от температуры изменяется, увеличиваясь с ее ростом. Осадок накапливается в придонной части емкостей мазутохранилищ, и его прирост составляет от 0,3 до 0,7 м в год и более. При длительном хранении мазута осадок покрывает подогреватели, расположенные в мазутных емкостях, что приводит к существенному увеличению термического сопротивления и снижению эффективности их работы. С другой стороны, выпадающие в осадок асфальтены, карбены и карбоиды включают в свой состав сернистые соединения, в результате чего происходит коррозия трубной системы днищевых подогревателей, что приводит к дополнительному обводнению мазута за счет образовавшихся свисей.

Технология подготовки мазута к сжиганию, существующая на котельной, приводит к повышению скорости полимеризации асфальтосмолистых включений, что приводит к росту коксования, появлению отложений на поверхностях нагрева подогревателей мазута. Как следствие, эффективность работы по-

догревателей падает, ухудшается коэффициент теплопередачи, увеличивается расход топлива и возрастают потери тепла с уходящими газами.

Нефтяной осадок, образующийся на поверхностях нагрева, обладает низкой текучестью, что затрудняет перекачку топливными насосами. При приготовлении водомазутной эмульсии, насосы захватывают вместе с топливом воду. Содержание воды в смеси не контролируется. Из-за предельно-допустимых нагрузок, по причинам переменной плотности и вязкости перекачиваемой среды, насосы начинают работать в неустойчивом пульсирующем режиме. Объемные насосы, которые используют для перекачки мазута, достаточно чувствительны к переменному давлению на всасывающей линии, к изменениям характеристик водомазутной среды и присутствующих в ней механических примесей. Все это влияет на напорные характеристики в топливоподающем трубопроводе и приводит к их снижению с большими перепадами давления. Вследствие чего снижается надежность работы всей топливоподающей системы на котельной.

С снижения экономичности, ухудшения экологии и надежности, уменьшению межремонтного цикла котельного агрегата приводит неоднородность состава мазута. Плотность перекачиваемой среды и переменная вязкость нарушают гидродинамические и тепловые процессы, происходящие в теплообменных аппаратах. Неоднородность эмульсии приводит к повышенной коксуемости мазута, плохой работе горелочных устройств, снижается качество процесса горения в топке котла.

Температура мазута должна поддерживаться в пределах 80-95 °С при транспортировке и подготовке к сжиганию. По традиционной технологии подогрев происходит паровыми подогревателями, которые располагаются на дне мазутной ёмкости. Мазут необходимой вязкости подается в котельную при помощи рециркуляционной линии разогрева выносными подогревателями, после чего остатки мазута поступают обратно в мазутные емкости. Равномерное распределение температур в объеме резервуаров и перемешивание мазута в резервуарах обеспечивается за счет растекание в резервуаре турбулентных затопленных струй и сопутствующих им вихревых токов. Грубая водотопливная эмульсия получается за счет многократного прокачивания мазута. Качество смеси не соответствует требованиям, что приводит к пульсирующему горению в топке. Технология подготовки топлива, существующая на данный момент, не позволяет обеспечить качественный процесс отстаивания и удаления из мазута воды до необходимой степени влагосодержания.

Традиционный метод сжигания жидкого топлива (мазута) в топке котла основан на факельном сжигании при предварительном нагреве. Для распыления топлива используют форсунки с паровым или механическим распыливанием. Также иногда применяют паромеханические форсунки. Механические форсунки не могут обеспечить широкий диапазон регулирования нагрузки требуют и требуют высокого давления. Форсунки с паровым распылом трудно использовать в котельной с водогрейными котлами, так как они требуют расход пара.

Применяемые сегодня в котельных технико-технологические и организационно-технические мероприятия по хранению и использованию поставляемо-

го низкосортного жидкого топлива не только не обеспечивают уровень современных требований по экономическим и экологическим показателям, но и усугубляют их за счет: повышенного образования шлама с резким увеличением термического сопротивления на поверхностях нагрева;

повышенной коксуемости мазута; снижения качества его распыливания, ухудшения функционирования горелочных устройств; снижения качества процесса горения топлива в топках котлов; снижения надежности, маневренности производительности котельного агрегата и уменьшения его межремонтного ресурса в целом; значительных потерь топлива, электроэнергии и воды. Все эти недостатки привели к необходимости применения безмазутной технологии розжига котла.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Жуков М.Ф., Карпенко Е.И., Перегудов В.С. и др. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела. -Новосибирск: Наука, 1995. -304 с.
2. Научно-технические основы и опыт эксплуатации плазменных систем воспламенения углей на ТЭС (безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела). Новосибирск: Наука, 1998. 137 с.
3. Шиляев А.М., Волокитин Г.Г., Дробчик В.В. Системы плазменного розжига низкосортных топлив для теплоагрегатов малой энергетики//Известия Томского политехнического университета. -2002. -Т. 315. -№ 2. -С. 220-224.
4. Перегудов В.С. Расчет плазменной стабилизации горения пылеугольного факела // Теплофизика и аэромеханика. 2003. № 1. С. 123-133.
5. Шиляев А.М., Рекунов В.С., Наумкин А.Б. К методу последовательно установленных циклончиков определения фракционного состава порошков//Архитектура и строительство. Наука, образование, технологии, рынок: Тезисы докл. научно-техн. конф. -Томск: Изд-во ТГАСУ, 2002. -С. 87-88.
6. Применение систем плазменного воспламенения угольной пыли в котлах Таштагольской производственно-отопительной котельной / А.Н. Тимошевский, И.М. Засыпкин, С.П. Ващенко и др. // Новости теплоснабжения. 2002. № 1(17), янв. С. 14-21.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА БАРАБАННОГО КОТЛОАГРЕГАТА

Т.С. Бойкова

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ74

Несмотря на развитые технологии, существуют отрасли, в которых специфика производства вызывает трудности получения результатов измерения от датчиков температуры. Например, такая проблема имеет место при измерении температуры на тепловых электрических станциях, где температура является одним из главных параметров, характеризующих качество и надежность работы станции. Измерение температуры составляет до 50 % от общего числа измерений. Оперативное получение достоверных значений температуры рабочих сред и оборудования важно для контроля процессов, анализа как технических, так и экономических показателей производства, а также для определения надежности и долговечности работы оборудования при различных условиях.

При регулировании температуры на современных электрических станциях к системам предъявляются жесткие требования. Главное из которых, точность поддержания параметра на заданном значении. Превышение температуры пара относительно расчетных значений в течение даже нескольких часов приводит к потере ресурса поверхностей нагрева котла, эквивалентного нескольким месяцам эксплуатации при нормативных параметрах [1].

Целью данной работы является разработка автоматической системы регулирования температуры перегретого пара барабанного котлоагрегата с учетом фактических условий монтажа датчиков.

В рамках настоящей работы рассматривается пароперегреватель котельного агрегата БКЗ-420-140-5.

Часто на практике для парогенераторов барабанных котлоагрегатов применяют способ регулирования температуры пара на выходе при помощи парохладителей. Часть поверхности нагрева пароперегревателя образуется конструктивно участком регулирования перегрева, который включает в себя обогреваемые и не обогреваемые трубы, от места впрыска охлаждающей среды до коллектора, в котором поддерживается заданная температура перегретого пара $t_{\text{пп}}=560^{\circ}\text{C}$.

Для улучшения качества переходного процесса при регулировании температуры пара применяется двухимпульсная система автоматического регулирования. Почти все возмущения, идущие из предвключенных пакетов пароперегревателя в регулируемый участок, можно отфильтровать с помощью внутреннего малоинерционного контура, а с помощью внешнего инерционного контура обеспечивается поддержание температуры на заданном значении. Такая система обеспечивает поддержание регулируемой величины на входе в участок пароперегревателя, а значит и более высокое качество регулирования параметра на выходе из перегревателя [2].

Двухимпульсная схема системы автоматического регулирования представлена на рисунке 1.

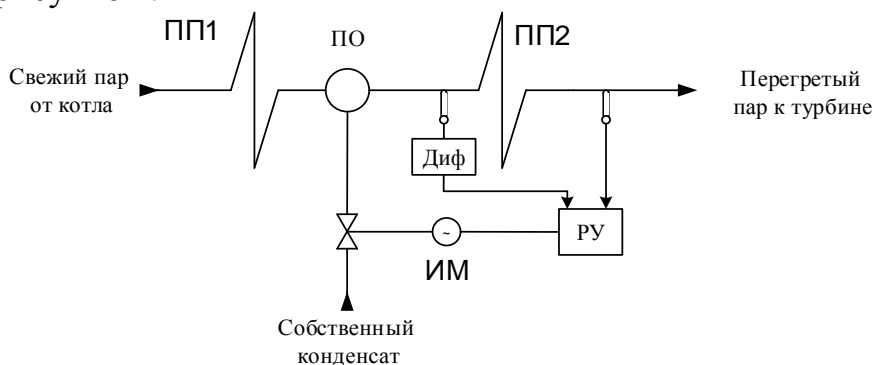


Рис. 1. Двухимпульсная схема АСР температуры перегретого пара:

ПП1, ПП2 – пароперегреватель, ПО – пароохладитель, ИМ – исполнительный механизм, РУ – регулирующий орган, Диф – дифференциатор

Анализ работ, связанных с оценкой качества работы системы регулирования температуры перегретого пара, показал, что на работу системы регулирования существенное влияние оказывает показатель работы измерительной системы температуры.

Для анализа влияния используемых способов установки датчиков в случаях, когда невозможно применять экспериментальные методы исследования, прибегают к разработке прогностических моделей, позволяющих выполнить исследования влияния различных факторов на параметры работы системы измерения [3].

Основным показателем, определяющим быстродействие канала измерения температуры, является показатель тепловой инерции [4]. В большинстве случаев монтаж датчика температуры выполняется в защитные гильзы. Такой способ максимально удобен для установки, замены датчика и защиты чувствительного элемента, находящегося внутри термопреобразователя. Установка в защитную гильзу может быть выполнена в различных вариантах: с воздушным зазором или различными теплопроводящими веществами.

Независимо от используемого вещества, также необходимо учитывать факт наличия зазоров между ТЭП и защитной гильзой, появление зазоров объясняется разными габаритами термопар и конструктивными размерами гильз. В зависимости от выбранного способа будут меняться показатели инерционности, влияющие в дальнейшем на параметры регулирования [5].

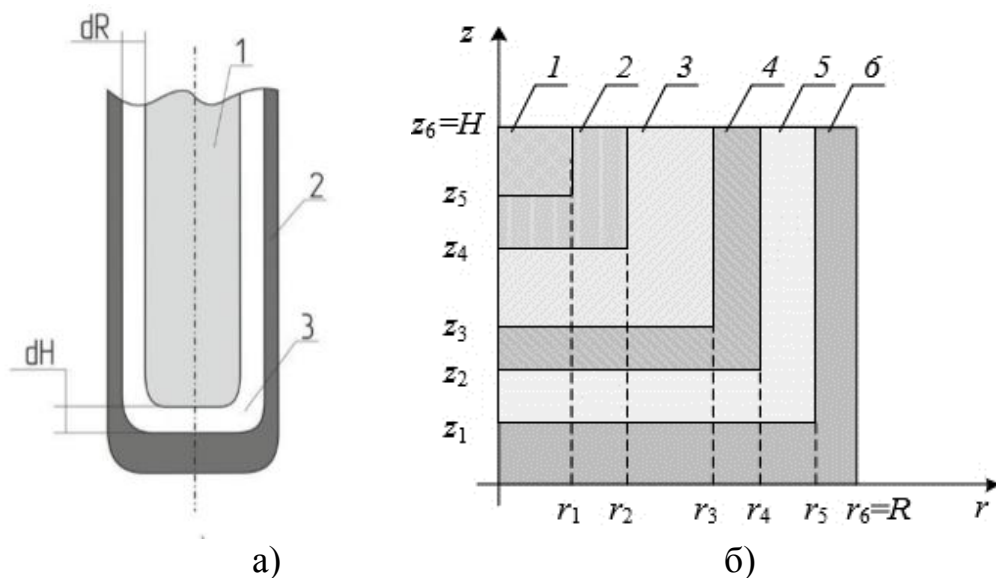


Рис. 2. а) Размещение чувствительного элемента в защитной гильзе: 1 – чувствительный элемент ТЭП, 2 – защитная гильза, 3 – свободное пространство, dR -кольцевой зазор, dH -вертикальный зазор; б) Области решения задач: 1 – спай термопары; 2 – керамический наконечник; 3 – порошок оксида алюминия; 4 – чехол ТЭП; 5 – воздух, медная стружка; 6 – защитная гильза

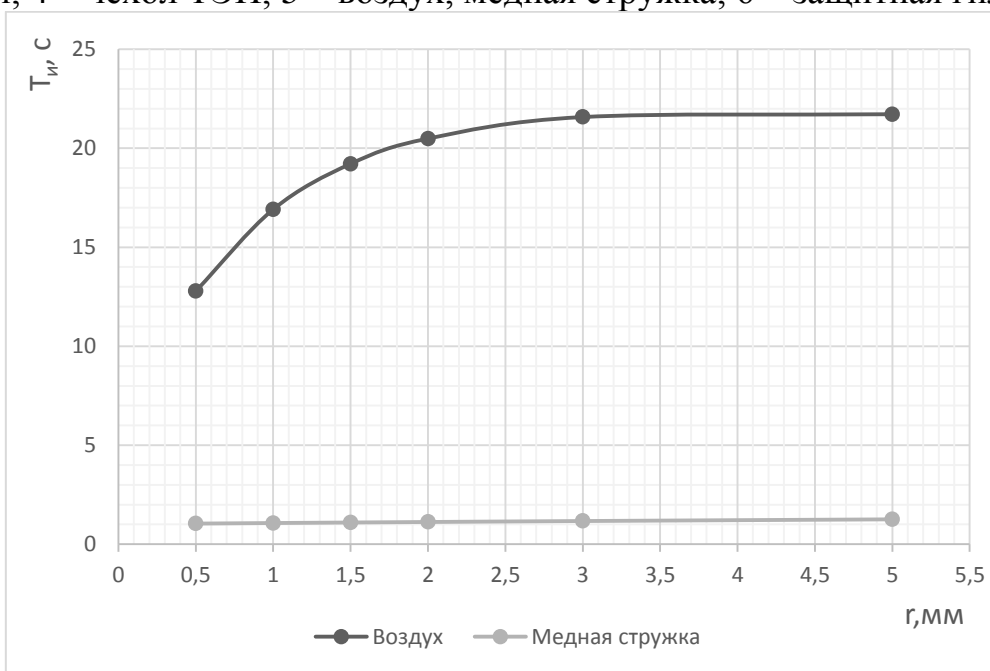


Рис. 3. График зависимостей T_w от изменения зазора между ТЭП и защитной гильзой при изменении кольцевого зазора (тип Е)

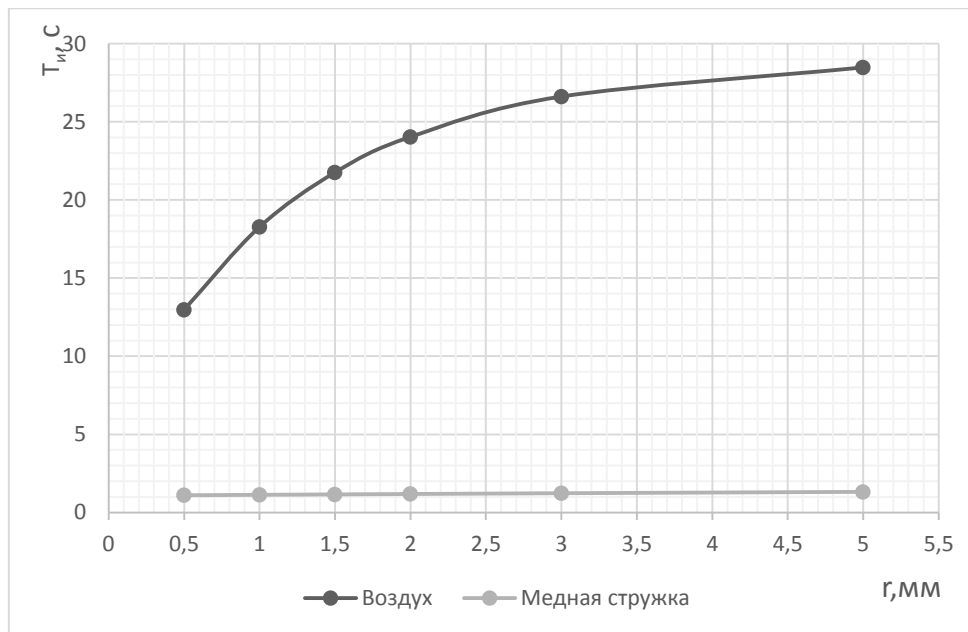


Рис. 4. График зависимостей $T_{и}$ от изменения зазора между ТЭП и защитной гильзой при изменении кольцевого зазора (тип К)

Исходя из полученных графиков следует вывод о том, что большое влияние на инерционность термопреобразователя оказывает материал заполняющий гильзу, а также наличие и толщина зазоров между ТЭП и защитной гильзой.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Atroshenko Y.K., Bychkova A. A., Andyk V.S. About Influence of Operational Temperatures on Reliability of Operation of the Equipment of Thermal Power Plants. – MATEC Web of Conferences. – Vol. 72, 2016. – 01006. – 5 P.
2. Жирнова М.Е., Григорьева М.М. Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара парогенератора Е-270-13,8-510 [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru>. – Загл. с экрана.
3. Atroshenko, Y.K., Strizhak P.A. Numerical evaluation of the measurement error of temperature by surface thermocouples in the conditions of incomplete thermal contact with object of measurement. – EPJ Web of Conferences. – Vol. 76, 2014. – 01034. – 5 P.
4. ГОСТ Р 8.585–2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – М.: Госстандарт России, 2002. – 84 с.
5. Бойкова Т. С. Показатель тепловой инерции термопар в системах регулирования температуры установок подогрева нефти // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – 2017. – Т. 2. – С. 173–175.

Научный руководитель: Ю.К. Атрошенко, к.т.н., старший преподаватель каф. АТП ЭНИН ТПУ.

АСР ВЛАЖНОСТИ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА SIEMENS СЕМЕЙСТВА SIMATIC

Е.Л. Тимошенко

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ74

Введение

Все разнообразие современного испытательного оборудования содержит такое устройство, как климатическая камера. Данные устройства предназначены для проведения исследований различных образцов на влияние тех или иных климатических факторов. Такого рода оборудование содержится в испытательных центрах или же организациях, которые занимаются надзором за качеством товаров. Существует несколько типов климатических камер, в зависимости от требуемого имитируемого климатического параметра. Климатические камеры находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Температурно-влажностным испытаниям подвергаются строительные материалы для возведения дорог, железобетонные конструкции, продукция кабельных заводов и предприятий, изготавливающих электронику, узлы и детали авиа-, авто - и космическую технику, диагностическую аппаратуру для метрологии и геологии.

Цель работы – разработка автоматической системы регулирования влажности в климатической камере на базе программируемого логического контроллера.

Инновационный анализ

Объектом регулирования является настольная климатическая камера.

Существует большое разнообразие типов климатических камер, которые способны имитировать различные климатические условия. Самыми распространенными являются камеры тепла, тепла-холода, тепла-холода-влаги, тепла-влаги, барокамера и широкой разморозки.

На основе существующих типов конструкций климатических камер, и выбрана конструкция способная обеспечивать требуемые параметры. Рабочий объем камеры составляет 2970 см^3 . Она изготовлена из пенополистерола, его толщина составляет 0,38 см. Внутренние стенки покрыты алюминиевой фольгой, а наружные картоном. Внешний вид камеры представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Внешний вид климатической камеры

Разработка системы автоматического регулирования влажности в климатической камере

Регулирование влажности осуществляется прямым способом. На основании существующих схем регулирования влажности была спроектирована структурная схема (рисунок 2).

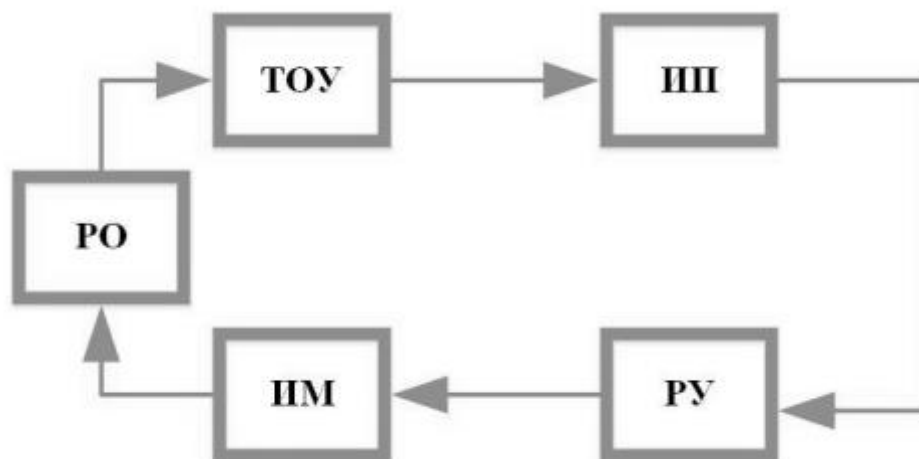


Рис. 2. Структурная схема автоматической системы регулирования влажности в климатической камере: ТОУ - технологический объект управления, ИП - измерительный преобразователь, РУ - регулирующее устройство, ИМ - исполнительный механизм, РО - регулирующий орган.

В процессе функционирования системы на объект управления поступают воздействия возмущения, которые вызывают отклонение регулируемого параметра – значение влажности от требуемого значения. Информация о значениях параметра в текущий момент времени поступает непосредственно в систему управления, где происходит сравнение с заданным для него значением. Как результат, система управления обязана выработать управляющее воздействие, которое необходимо для компенсации отклонений нашего выходного параметра.

Расчет АСР влажности

Экспериментальным путем были определены параметры объекта управления. При значении этих параметров были определены оптимальные настройки регуляторов. На основании математического моделирования в программе MATLAB Simulink было выяснено что для данной системы оптимальными вариантами для реализации являются релейный и ПИ- регулятор. В виду простоты системы на практике решено было осуществить релейное регулирование.

Вывод

Результатом выполнения работы является разработанная АСР влажности для климатической камеры на базе программируемого логического контроллера Siemens S7-200.

Применение контроллера позволяет изменять алгоритмы управления в зависимости от требуемых показателей качества к переходным процессам путем его перепрограммирования.

Для разработанной системы была создана мнемосхема, позволяющая управлять технологическим процессом

Разработанный лабораторный стенд предназначен для выполнения научно-исследовательской и учебной работе студентов.

Для оптимизации процесса регулирования влажности в дальнейшем считается целесообразным добавить в климатическую камеру АСР температуры.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Климатическая камера. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Климатическая_камера/ свободный. – Загл. с экрана.
2. Свистунов В. М., Пушняков Н. К. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. - Спб.: Политехника, 2006. – 432 с.
3. Нимич Г. В., Михайлов В. А., Бондарь Е. С. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха. – Харьков: ТОВ «Видавничий будинок», 2003. – 630 с
4. Котов К.И., Шершевер М.А. Автоматическое регулирование и регуляторы. – М: «Металлургия», 2001. - 382 с

Научный руководитель: М.Д. Кац, к.ф.-м.н., доцент каф. АТП ЭНИН ТПУ.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ИСПАРЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ

Д.В. Антонов, П.А. Стрижак
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП

Введение. Для современного мира актуально то, что во многих странах, в том числе и в России, активно внедряются новые системы пожаротушения. Для повышения эффективности которых разработаны специальные методы распыления и подачи жидкости в пламенную зону горения: «водяной туман», «тонкораспыленная вода» и «паровая завеса» [1, 2]. В зоне горения «тонкораспыленная вода» начинает интенсивно испаряться. Процесс парообразования происходит непосредственно в очаге пожара и развивается по всему объему над очагом горения. Образуется защитный слой пара, который ограничивает доступ окислителя в зону пламени, вследствие чего оно погасает. В качестве одного из способов улучшения интенсификации испарения капель жидкости может быть рассмотрено добавление в них твердых включений графита [3–5].

Цель данной работы – теоретические и экспериментальные исследования высокотемпературного испарения неоднородных капель воды.

Математическая модель и методы решения. Постановка задачи тепло-массопереноса для исследования испарения неоднородных капель воды заключалась в создании 2D модели капли воды с включением графита и моделирова-

нии потока высокотемпературных газов, нагревающего эту каплю. Поставленная задача являлась нестационарной, поскольку необходимо было определить изменяющиеся во времени температурные и концентрационные поля.

Проведение теплового расчета включало несколько этапов:

1. Создание геометрии модели. На данном этапе создается модель для расчета с помощью подпрограммы Ansys Design Modeler.
2. Построение и настройка конечно-элементной сетки. Сеточный генератор Ansys позволяет создать оптимальную в рамках решаемой задачи расчетную сетку.
3. Задание граничных условий. Импортрование конечно-элементной сетки, задание и настройка типа анализа, физических свойств материалов, задание типа решаемой проблемы, назначение среды моделирования и расстановка начальных и граничных условий устанавливается при помощи решателя Ansys Fluent.
4. Запуск решения, просмотр и анализ результатов. Данные операции проводились с помощью специального графического интерфейса, встроенного в Ansys Fluent.

Результаты и обсуждение. В результате проведения численных расчетов были построены зависимости времен полного испарения однородных капель воды (рис. 1) и времен распада (рис. 2) капель с включениями графита от температуры вдуваемых газов ($T_g=550-850$ К). Показана удовлетворительная корреляция экспериментальных и численных исследований [3–5].

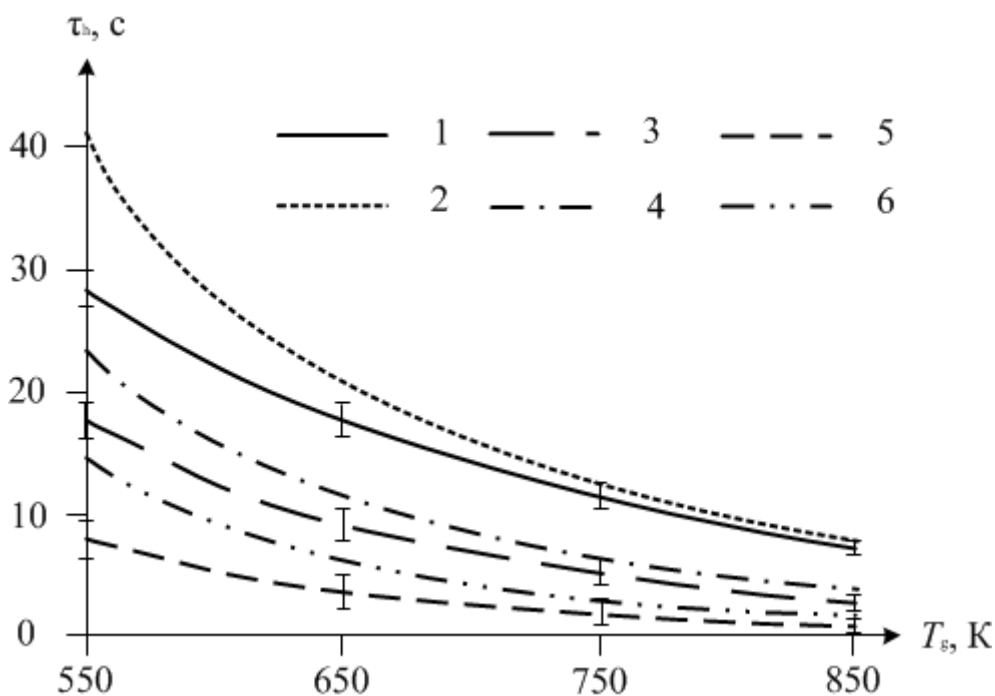


Рис. 1. Времена полного испарения τ_h однородных капель воды от температуры вдуваемых газов (экспериментальные данные и теоретические результаты):

- 1 – эксперимент (15 мкл); 2 – модель (15 мкл); 3 – эксперимент (10 мкл);
4 – модель (10 мкл); 5 – эксперимент (5 мкл); 6 – модель (5 мкл)

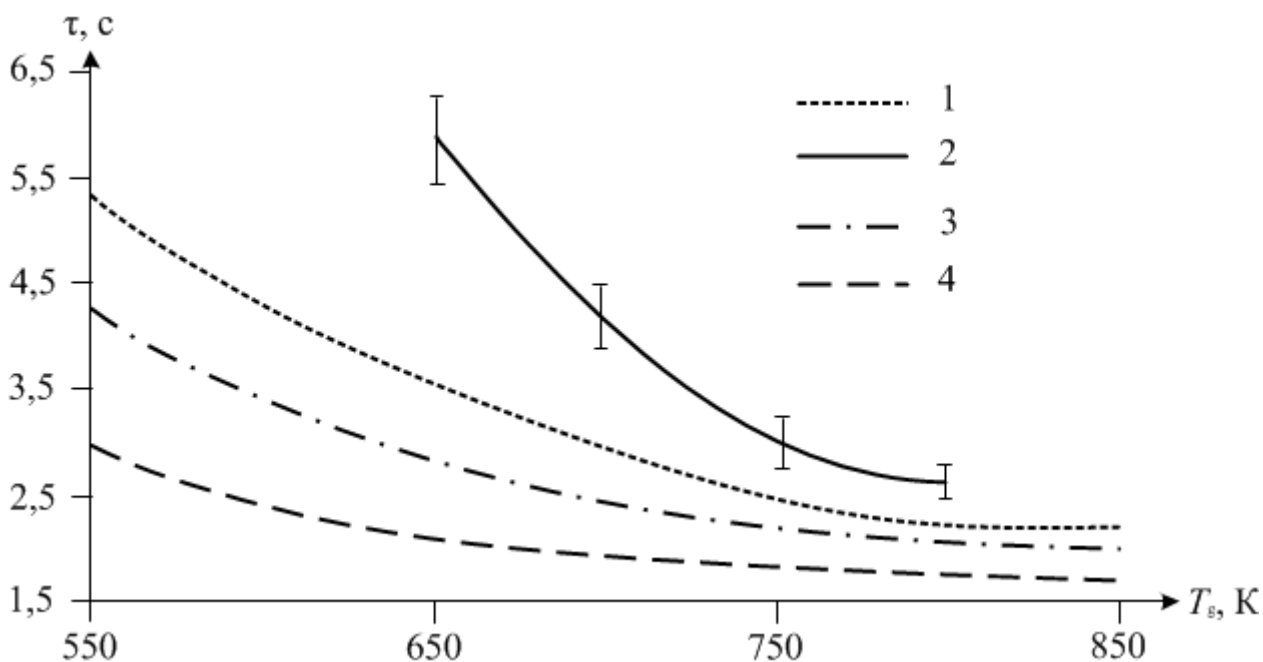


Рис. 2. Времена распада τ неоднородных капель воды от температуры вдуваемых газов: 1 – модель (15 мкл); 2 – эксперимент (10 мкл); 3 – модель (10 мкл); 4 – модель (5 мкл)

Полученные зависимости (рис. 1) иллюстрируют, как и можно было предположить, с повышением температуры газовой среды испарение воды происходит более интенсивно. Характер наклона кривых на рис. 1 в целом хорошо коррелирует с экспериментальными данными, а при повышении температуры газовой среды ($T_g > 750$ К) разность между экспериментальными и теоретическими значениями времен существования стремится к нулю.

Заключение. Разработанная математическая модель и результаты численных исследований являются фундаментальной основой развития прогностического аппарата для расчета характеристик испарения капель воды с твердым включением в газовых средах. Усовершенствование модели с учетом экспериментальных данных позволит повысить эффективность перспективных высокотемпературных газопарокапельных технологий в области пожаротушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МД–1221.2017.8).

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.И. Терехов, М.А. Пахомов. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.
2. А.М. Каган, А.С. Пушнов, М.Г. Беренгартен, А.С. Рябушенко, В.И. Шишов. Характеристики эффективных промышленных насадок для испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 7.
3. И.С. Ануфриев, Г.В. Кузнецов, М.В. Пискунов, П.А. Стрижак, М.Ю. Чернецкий. Условия взрывного парообразования на границе раздела

сред в неоднородной капле // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 16. С. 98–104.

4. М.В. Пискунов, П.А. Стрижак. Отличие условий и характеристик испарения неоднородных капель воды в высокотемпературной газовой среде // Журнал технической физики. 2016. Т. 86, № 9. С. 24–31.
5. R.S. Volkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak. 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.

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

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПЕТРОТЕРМАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Д.И. Латников

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

Существенные обстоятельства и тенденции развития энергетики позволяют предположить, что в первой половине XXI в. начнется активный переход на нетрадиционные источники энергии. Нефть, уголь, природный газ, горючие сланцы и продукты их переработки практически будут исключены из энергетического использования. Энергетический апокалипсис не за горами – в Европе его ждут к 2030 – 2040 гг [1].

На данный момент в России группой российских ученых и специалистов разработан инновационный проект «Развитие петротермальной энергетики России». Проект основан на извлечении и использовании теплоты, аккумулированной в «сухих» горячих горных породах земной коры с целью выработки на ее основе постоянных, экономически доступных электроэнергии и тепла для стабильного обеспечения отдаленных, малоосвоенных и энергодефицитных районов России. Основными проблемами развития петротермальных станций в России является дороговизна, устаревшие технологии бурения, большое количество невозобновляемых источников энергии. Мировая энергетика в настоящее время взяла курс на переход к рациональному сочетанию традиционных и новых источников энергии.

В основных производственных фондах стоимость скважин составляет 70–90%. Глубина скважин определяется петротермальными условиями и требованиями потребителя в энергетике. Для нужд теплоснабжения необходимая глубина скважин на всей территории страны лежит в пределах 3–4,5 км и не превышает 5–6 км. Выработка электроэнергии в широких масштабах вероятно потребует создания циркуляционных систем со скважинами на глубине 7–9 км. Температура теплоносителя для нужд жилищно-коммунального теплоснабже-

ния не выходит за пределы 150 °С, а для выработки электроэнергии оптимально – 220–250 °С [2].

Преимущества петротермальной энергетики следующие: повсеместное распространение, приближенность и приспособленность к потребителю, сравнительно низкие капитало- и трудоемкости при освоении, безотходность, безопасность в эксплуатации, экологическая чистота.

К недостаткам можно отнести сравнительно низкий потенциал на глубине до 3 км, нетранспортабельность, невозможность складирования, отсутствие опыта промышленного освоения в России.

Этот вид энергии может быть доступен для больших и малых территорий на Земле. Особенно на территории России. На глубине до 4 – 6 км горячие породы с температурой 100 – 150 °С распространены почти повсеместно, а с температурой 180 – 200 °С в некоторых районах Российской Федерации. Это вполне достаточно для целей теплоснабжения. На глубине 5 – 6 км в активных геодинамических слоях можно встретить массивы с температурой 250 – 300 °С.

HDR-технологии

Использовать тепловую энергию, скапливающуюся на достаточно больших глубинах, для обогрева зданий, сооружений, получения электроэнергии и использования её для других хозяйственных нужд станет возможным в любых районах земного шара при бурении нагнетательных и эксплуатационных скважин и создания между ними тепловых коллекторов [3]. Для эффективной работы петротермальных циркуляционных систем (ПЦС) необходимо иметь или создать в зоне отбора тепла достаточно большую теплообменную поверхность. Такая поверхность часто встречается, на указанных выше глубинах, пористые пласты и зоны естественной трещиноватости проницаемость которых позволяет организовать принудительную фильтрацию теплоносителя с эффективным извлечением энергии горных пород, а также искусственного создания обширной теплообменной поверхности в слабопроницаемых массивах методом гидравлического разрыва.

Технологии извлечения тепла из горячих сухих подземных коллекторов получили название «Hot Dry Rock – HDR». В настоящее время такие исследования проводятся в 65 странах мира, а в некоторых уже успешно используются для отопления и кондиционирования воздуха (Франция, США, Япония, Германия и др.).



Рис. 1. Схематичное изображение петротермальной станции на HDR-технологии

Принцип реализации HDR-технологии, представлен на рисунке 1. Пробуривается две-три скважины до глубин с температурами, отвечающими требованиям теплоснабжения или производства электроэнергии. Одна из скважин является нагнетательной, подающей под давлением воду в зону нагрева, а другие - эксплуатационными, по которым образующийся пар с необходимой температурой поступает на поверхность.

Если естественная проницаемость раскаленного массива пород недостаточна, то осуществляется его гидроразрыв для образования подземного «котла». Методы гидроразрыва пластов и наклонного бурения скважин хорошо освоены нефтегазовой промышленностью и успешно применены для создания петротермальных циркуляционных систем. Трещины, образовавшиеся в породах в результате гидроразрыва, поддерживаются в раскрытом состоянии гидростатическим давлением жидкости. При этом потери теплоносителя в окружающий массив на практике составляли около 1 % его общего расхода.

Данный метод имеет серьезные недостатки:

- высокая минерализация и загрязненность теплоносителя,
- периодическая потребность в повторном гидроразрыве,
- необходимость использования износостойкого капиталоемкого оборудования и формирования сложных систем фильтрации.

Анализ температурного градиента территории России, описание принципиальной схемы

Большая часть территорий Российской Федерации имеет средний температурный градиент, в районе 20 – 30 °С на глубине 1 километр, но есть зоны с высоким, а в отдельных местах очень высоким температурным градиентом в 70-80 °С. Высокими температурами земной породы обладают юг России, такие города как, Ростов-на-Дону, Краснодар, Нальчик и др. Так же высокий температурный градиент имеет весь полуостров Камчатка [4]. В данной работе была выбрана западная часть России, а конкретно город Санкт-Петербург, с темпера-

турным градиентом 30 – 40 °С на глубину в 1 километр, для создания геотермальной станции.

Ориентировочная тепловая мощность геотермальной станции составляет (25,8 Гкал/ч), задача станции обеспечивать горячим водоснабжением и отоплением, жилой район города Санкт-Петербурга.

Принцип действия геотермальной станции следующий, из продуктивной геотермальной скважины, глубиной 3000 км закачивается теплоноситель с параметрами: температура – 70 °С, расход – 400 м³/ч, давление – 0,6 МПа. Далее теплоноситель проходит водоочистку, после чего поступает в пиковый котёл (ПК) и в систему ГВС, где нагревается до температуры 95 °С и через трёх ходовой клапан идёт на нужды отопления (с температурой 85 °С) и в подмес ГВС (с температурой 65 °С). После системы отопления теплоноситель с параметрами: температура – 45 °С, расход – 300 м³/ч, закачивается в реинжекционную скважину. Запасы теплоносителя на аварийный случай обеспечивают баки аккумуляторы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гнатусь, Н.А. Перспективы извлечения и использования тепла «сухих горных пород» – петротермальная энергетика России // Мониторинг. Наука и технологии. – 2010. – № 2 – С. 6 – 15.
2. Гнатусь, Н.А. Петротермальная геоэнергетика и геофизика // Вестник Московского университета. Сер. 4: Геология. - 2011. - № 3. -С. 3-9.
3. Дядькин Ю.Д. Теплообмен в глубоких скважинах и зонах фильтрации при извлечении тепла сухих горных пород. - Л.: Наука, 1974. -230 с.
4. Геотермический атлас России / Под ред. А.А. Смылова. — Электронная версия составлена ФГУП НППЦ «Недра» и СПбГИ, авторы Э.И. Богуславский, А.Б. Вайнблат, М. Гашева, Л.А. Певзнер, Б.Н. Хахаев. — СПб.; Ярославль, 2000.

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

РАЗРАБОТКА SCADA СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕНТИЛЯТОРОМ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

О.С. Щенникова, В.С. Полех
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5Б4В

В настоящее время ни одна отрасль промышленного производства не обходится без внедрения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Современная АСУ ТП часто входит в состав интегрированной системы управления производством. Интегрированные системы управления производ-

ством строятся по иерархическому принципу и включают в себя ERP-системы (Enterprise Resource Planning), MES-системы (Manufacturing Execution Systems, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), PLC (Programmable Logic Controllers).

Серьезным барьером для интеграции информационных систем различного назначения является отсутствие программного обеспечения, способствующего решению технических проблем. На современном этапе развития автоматизации технологических процессов создается и широко внедряется большое количество типовых программных систем управления ресурсами предприятия. Особенностью всех этих систем является применение современных реляционных баз данных.

Разработка SCADA системы управления вентилятором приточной вентиляции состоит из трех этапов, выполняющихся в данной логической последовательности. Первый этап заключается в написании программного кода, второй - в создании OPC сервера и тегов. А в третьем этапе с помощью кода, сервера и тегов создается мнемосхема вентилятора, который начинает вращаться только когда нажаты все три кнопки «Включить». Когда вентилятор вращается, индикатор справа становится красного цвета, когда вентилятор остановлен, индикатор белый.

Для разработки SCADA в работе использовано программное обеспечение: STEP 7 MicroWIN, Simple-SCADA 2, Item property и PC Access.

Первый этап – создание программного кода – выполняется с помощью программы STEP 7 MicroWIN. В рабочую область окна программы добавляются логические элементы «Катушка» и «Контакт» и заполняется «Таблица символов», результатом вышеперечисленных действий является создание программного кода (рисунок 1).

Созданный программный код работает следующим образом: дискретный сигнал поступает на адрес «M0.0» с символом «start», далее сигнал проходит на контакт «start1» с адресом «M1.0», при поступлении дискретного сигнала на контакт «start2» с адресом «M2.0» происходит замыкание контакта и сигнал проходит на катушку «vent» с адресом «Q0.0».

Далее программный код сохраняется, проверяется на наличие ошибок и загружается в ПЛК.

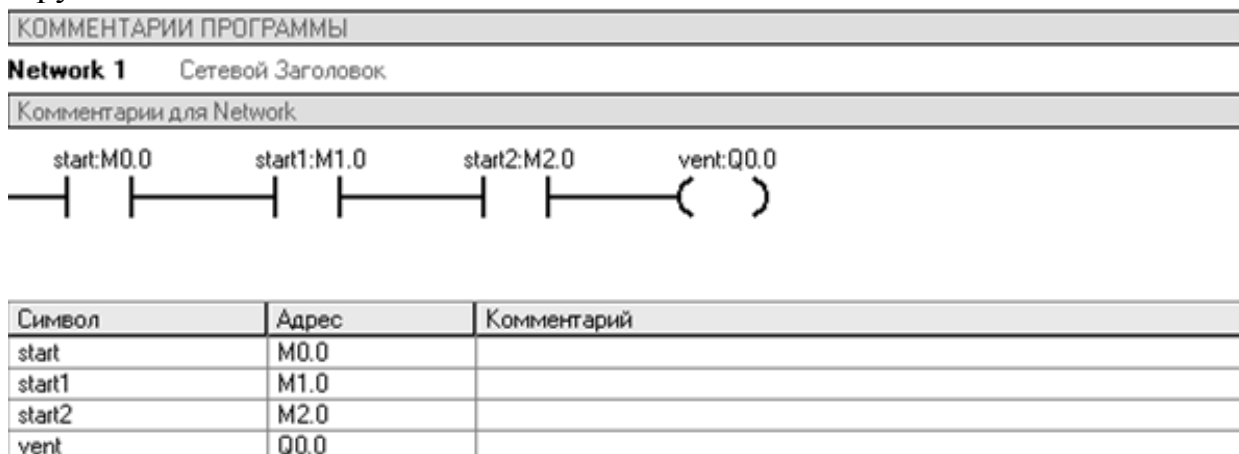


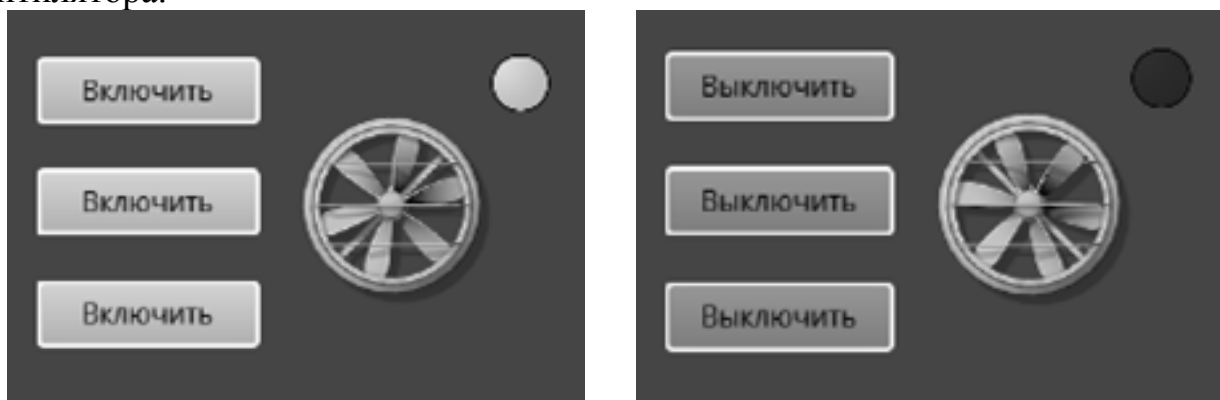
Рис. 1. Элементарный программный код

Вторым этапом является создание OPC сервера. OPC представляет собой семейство программных технологий, предоставляющих единый интерфейс для управления объектами автоматизации и технологическими процессами. Первая часть работы выполняется в программе PC Access, где создается OPC сервер для того, чтобы мнемосхема функционировала. Вторая часть работы – работа в программе «Item Property». С помощью этой программы получают теги (рисунок 2), которые необходимы для использования символов сервера в SCADA-системе.



Рис. 2. Окно программы «Item Property» с тегом

Закрывающий этап разработки SCADA системы управления вентилятором приточной вентиляции - создание мнемосхемы, выполняется в программе Simple-SCADA. Результатом работы в этой программе является мнемосхема вентилятора.



а – вентилятор выключен

б – вентилятор включен

Рис. 3. Включение и выключение вентилятора

Изображению с текстурой «Вентилятор» присвоено значение тега символа «vent», имеющего адрес в программном коде «Q0.0» – катушка (рисунок 1). Данная катушка является дискретным логическим элементом и может иметь значения только логический «0» или логическая «1». Мы создали событие, при котором вентилятор будет вращаться, при поступлении логической «1» на катушку «Q0.0» и будет неподвижен при поступлении логического «0».

При нажатии на все три зелёные кнопки «Включить» (рисунок 3а) они поменяет свой цвет на красный, и надпись изменится на «Выключить» (рисунок 3б).

Таким образом, в результате проделанной работы была разработана SCADA системы управления вентилятором приточной вентиляции. При нажатии кнопок производится включение и выключение вентилятора. При включённом вентиляторе его лопасти начинают вращаться, и индикатор меняет свой цвет на красный, оповещая о включении вентилятора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Елизаров И.А. Интегрированные системы проектирования и управления: SCADA- системы: учеб. пособие для вузов / И. А. Елизаров. — Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. - 160 с
2. Палагута К.А. Интегрированные системы проектирования и управления / К.А. Палагута, А.С. Семенов. - М.: МГИУ, 2008. - 204 с.
3. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. 3-е изд., перераб. и доп. / В.Г. Харазов. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2013. - 550 с.
4. Матвейкин В.Г. Применение SCADA-систем при автоматизации технологических процессов: учеб. пособие для вузов /В.Г. Матвейкин, С.В. Фролов, М.Б. Шехтман. — Москва: Машиностроение, 2000. — 176 с.
5. Simple-Scada // О программе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://simple-scada.com/>

Научный руководитель: Е.В. Кравченко, к.т.н., доцент кафедры АТП ЭНИН ТПУ.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРОМ ПО ОСАЖДЕНИЮ НЕРАСТВОРИМЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА SIEMENS S7-1500

А.Г. Нигай

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа А7-13

Одним из направлений повышения безопасности АЭС является их ориентация на пассивные системы безопасности. Одной из таких систем является система пассивного отвода тепла от защитной оболочки реактора СПОТ 30. Основная функция данной системы – обеспечение непревышения максимального проектного давления под защитной оболочкой в условиях запроектной аварии с целью сохранения целостности последнего барьера безопасности при отказе активных систем [1].

Анализ процессов при запроектной аварии на АЭС позволил выделить четыре характерные стадии аварии, отличающиеся скоростями конденсации, концентрацией и составом аэрозолей, которые способны снизить мощность теплоотдачи теплообменника СПОТ 30 [2].

Целью работы является разработка системы автоматизированного контроля и управления реактором по осаждению нерастворимых аэрозолей на базе программируемого логического контроллера Siemens S7-1500.

На рисунке 1 представлена упрощенная технологическая схема испытательной установки – реактора по осаждению нерастворимых аэрозолей.

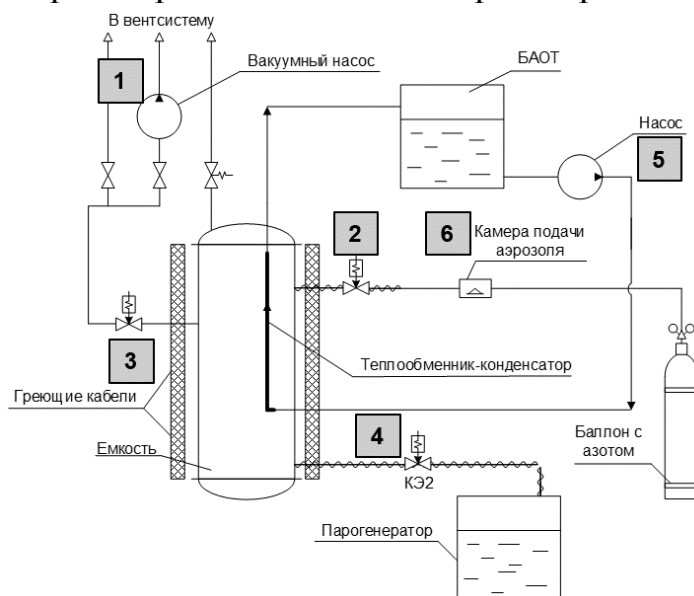


Рис. 1. Упрощенная технологическая схема испытательной установки – реактора по осаждению нерастворимых аэрозолей.

Алгоритм работы установки:

В емкость смонтирован теплообменник-конденсатор.

1. Сначала из емкости откачивается воздух;
2. Затем подается азот;
3. После этого происходит нагрев емкости до заданной температуры;
4. Далее в нагретую емкость подается пар. При достижении заданного давления и температуры емкость выдерживается 10-20 минут для стабилизации всех параметров;
5. Далее в теплообменник конденсатор подается вода;
6. При достижении стационарных условий (температура воды, температура и давление парогазовой среды) в емкость осуществляется напуск модельной смеси порошков в токе газа-носителя – азота. Включается отсчет времени.

Разработанная система автоматизированного управления построена таким образом, что все вышеперечисленные действия выполняются на выбор оператора исходя из условий эксперимента: в ручном или в автоматическом режиме.

Из структурной схемы, представленной на рисунке 2, видно, что система является трехуровневой [3-4].

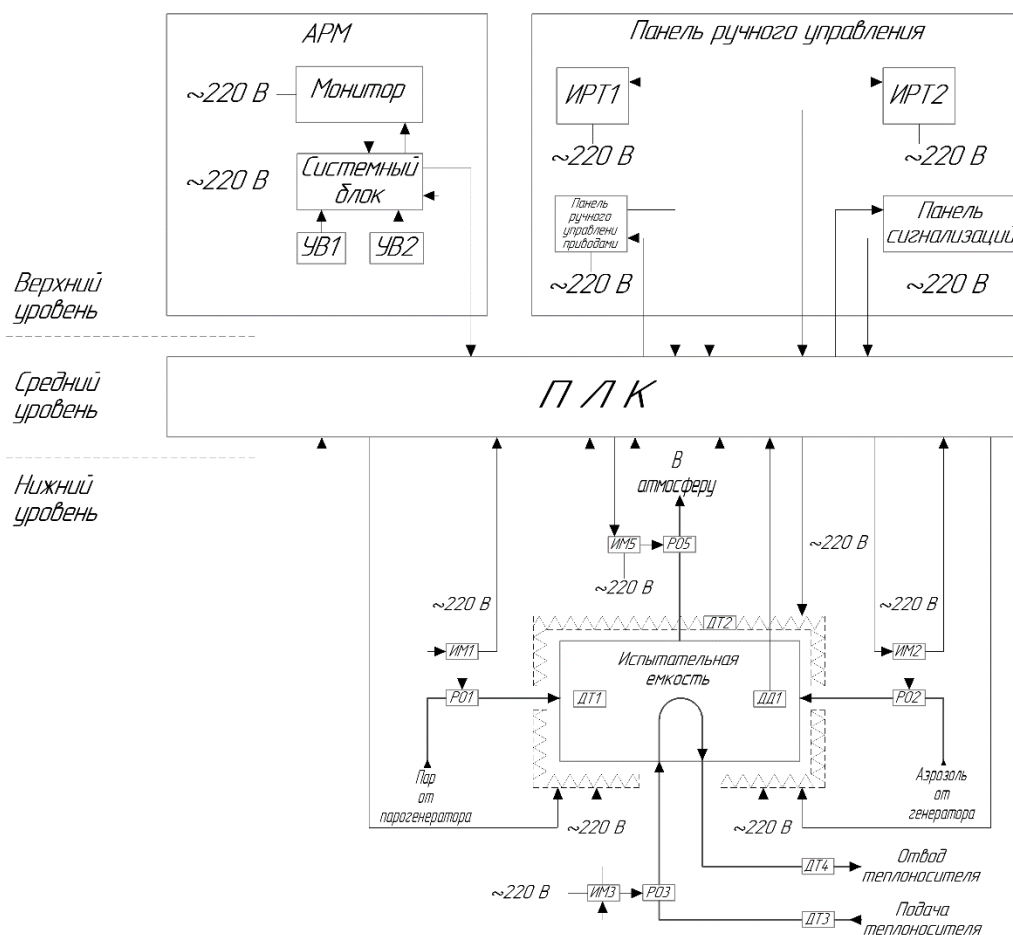


Рис. 2. Структурная схема САУ

Пояснения к рисунку 2: АРМ – автоматизированное рабочее место; УВ – устройство ввода; ИРТ – измеритель-регулятор температуры; ПЛК – программируемый логический контроллер; ИМ – исполнительный механизм; РО – регулирующий орган; ДТ – датчик температуры; ДД – датчик давления.

Пример разработанного математического обеспечения системы автоматизированного контроля и управления реактором по осаждению нерастворимых аэрозолей представлен на рисунке 3, где изображен фрагмент блок-схемы описывающий алгоритм подачи пара в емкость.

Если выбран тип управления «Нормальный», то значение текущего давления в сосуде выводится на мнемосхему и оператору необходимо выбрать режим работы: ручной или автоматический.

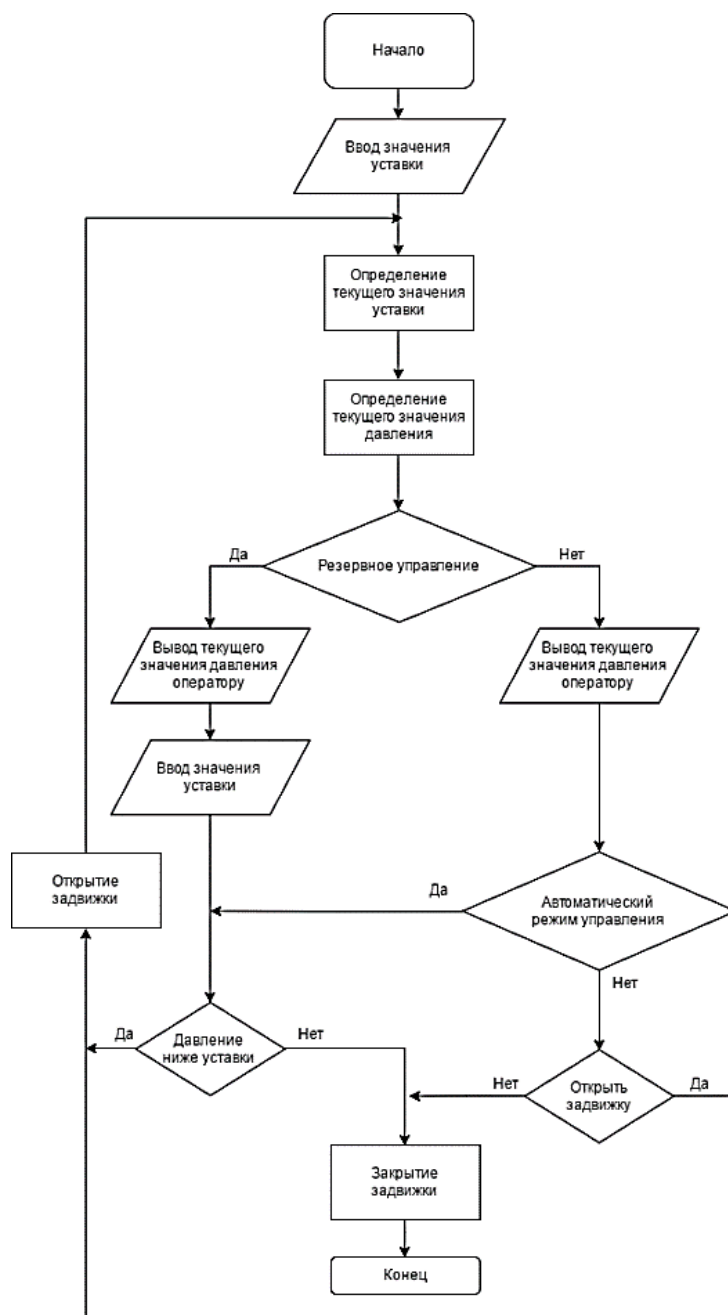


Рис. 3. Фрагмент алгоритма подачи пара в емкость реактора

В ручном режиме предусмотрено нажатие оператором кнопок «Открыть» или «Закрыть» задвижку на мнемосхеме или на панели ручного управления.

В автоматическом режиме управления оператор должен ввести значение уставки на мнемосхеме, которая сравнивается со значением текущего давления в сосуде и если давление выше уставки, то задвижка закрывается, а если давление ниже уставки то поступает сигнал на открытие задвижки и цикл повторяется.

При помощи специализированного программного обеспечения TIA Portal разработана мнемосхема (рисунок 4), на которой в режиме реального времени отображаются текущие значения измеряемых параметров, уставки и состояния задвижек. При помощи данной мнемосхемы выполняется выбор режима управления, управление задвижками и задание уставок [5]. При запуске мнемосхемы

автоматически начинается запись всех измеряемых параметров на жесткий диск в отдельные файлы Excel.

The screenshot displays the control interface for a reactor, titled "РЕАКТОР". It is divided into several functional areas:

- ТЕКУЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ (Current Technological Parameters):** Shows real-time data for water inlet/outlet temperatures (17.000 °C and 21.700 °C), vessel internal pressure (0.240 МПа), vessel surface temperature (98.001 °C), and vessel internal temperature (106.002 °C). It also indicates that the vessel heating is turned on.
- УСТАВКИ (Setpoints):** Allows setting target values for pressure (0.240 МПа) and temperature (100.000 °C).
- ВЫБОР РЕЖИМА (Mode Selection):** Offers "АВТОМАТИЧЕСКИЙ" (Automatic) and "РУЧНОЙ" (Manual) modes.
- УПРАВЛЕНИЕ ЗАДВИЖКАМИ (Valve Control):**
 - Задвижка на подаче ПАРА (Steam supply valve):** Includes a "Режим работы" (Operating mode) section with checkboxes for Automatic and Manual, a position slider (+0 %), and "ОТКРЫТЬ" (Open) and "ЗАКРЫТЬ" (Close) buttons.
 - Задвижка на подаче АЗОТА (Nitrogen supply valve):** Includes a position slider (+0 %), "ОТКРЫТЬ" and "ЗАКРЫТЬ" buttons, and checkboxes for "Открытие задвижки" (Open valve) and "Закрытие задвижки" (Close valve).
 - Задвижка на подаче ВОДЫ (Water supply valve):** Includes a position slider (-100 %), "ОТКРЫТЬ" and "ЗАКРЫТЬ" buttons, and checkboxes for "Открытие задвижки" and "Закрытие задвижки".
- ВЫЧИСЛЕНИЯ (Calculations):** Fields for "Задайте расход" (Set flow rate) in l/h and "Теплосъем" (Heat extraction) in Wt.
- Тренды (Trends) and Выход (Exit):** Buttons at the bottom right for monitoring trends and exiting the interface.

Рис. 4. Мнемосхема

Разработанная автоматизированная система позволяет контролировать и управлять технологическими процессами реактора по осаждению нерастворимых аэрозолей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Арон Д.В., Павлова М.В., Панченко С.В. Оценки масштаба социально-экономических последствий аварии на АЭС в префектуре Фукусима / Известия российской академии наук. Энергетика. 2013. № 5. С. 65-71.
2. Козлов И.Л. Анализ результатов моделирования аварий с повреждением ядерного топлива на АЭС с корпусными ядерными реакторами / Труды одесского политехнического университета. 2015. № 1 (45). С. 65-74.
3. Nigay A.G., Kravchenko E.V. Development Automated System Control Heat Chamber Based on Programmable Logic Controller Siemens S7-200 // MATEC Web of Conferences. - Les Ulis: 2015. - Vol. 37 : Smart Grids 2015. - [01037, 3 p.]. - Title screen. - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20153701037>
4. Нигай А.Г. Система автоматического управления климатической камерой // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых. ТПУ - 2017. - Т. 2. - [С. 197-199].
5. Нигай А.Г., Васильева Ю.З. Разработка программно-технического комплекса мониторинга давления удаленного объекта / Труды IV Международного молодежного форума «Интеллектуальные энергосистемы». ТПУ – 2017. – Т. 3. – [С. 119-123].

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

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СООРУЖЕНИЙ В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ

А.А. Бычкова

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ6Д

В настоящее время пришло понимание того, что северные пространства России обладают большой стратегической важностью, а также, по оценкам специалистов, подо льдами Арктики залегают колоссальные объёмы нефти, газа, и помимо углеводородов в регионе имеются уникальные запасы других природных ресурсов [1].

Условия жизнедеятельности (функционирования объектов и людей) в Арктике во многих отношениях экстремальны. Природная экстремальность также усиливается негативным действием социально-экономических факторов – транспортной недоступностью, высокими производственными издержками и стоимостью жизни, неразвитостью экономики и тенденциями к её монополизации, изолированностью и дисперсностью расселения. Таким образом, вопросам энергосбережения и повышения энерго- и ресурсоэффективности зданий и сооружений уделяют особое значение. Эффективным решением, как показывает практика, становится комплексный подход, включающий проведение энергетического моделирования с целью разработки стратегий энергосбережения и внедрения автоматизированных систем управления зданием в суровых условиях [2].

Одним из таких сооружений являются прочные и надежные блок-контейнеры (рис.1а), которые можно использовать для установки различного оборудования. Основной задачей работы является разработка функциональной модели контейнера, используемого для размещения генераторов, автономных дизельных электростанций, компрессорного оборудования и обеспечивающего стабильную работу оборудования даже в сложных природных условиях [3]. Для изготовления контейнеров применяются высококачественные, долговечные материалы и комплектующие.

Целью данной работы является разработка и изготовления макет теплового объекта для последующей верификации с моделью термодинамических систем, выполненной в Matlab-Simulink/Simscape, и с реальным объектом (блок-контейнером).

Создание теплового объекта подразумевает силовой каркас (как у здания) и наличие теплозащитной оболочки (ТЗО). В качестве силового каркаса была использована алюминиевая рама из алюминиевого профиля. Механическая стяжка алюминиевого каркаса была выполнена болтами и винтами. Основу ТЗО составили стандартные серийные теплозащитные панели (пенополистирол экструдированный). При разработке габаритного чертежа (рис.1б) было принято решение ориентироваться на размер стандартных блоков (1180x580x50).

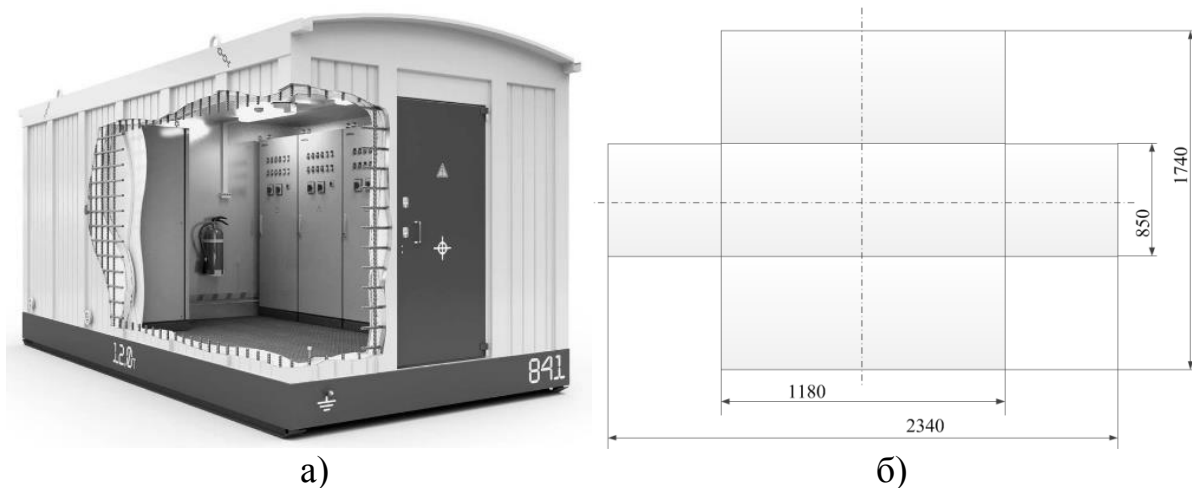


Рис. 1. Разработка экспериментальной установки тепловой модели: а – реальный объект (блок-контейнер); б – развертка с основными габаритными размерами

Стыковка ТЗО, выполненная буквой «Г», перекрывает мостики холода, что сводит к минимуму их влияние на тепловую модель. Герметичность модели экспериментальной установки обеспечивается герметиком изнутри. Особое внимание уделялось месту соединения крышки с каркасом. Инфильтрация воздуха была исключена с помощью D-образного резинового уплотнителя. Дополнительный утеплитель изолон позволяет устранить потери тепла через угловые части между каркасом и ТЗО. Макет также предусматривает деревянные рейки, которые предотвращают повреждение нижней части ТЗО. На основании принятых решений была разработана 3D модель макета, выполненная в программе Autodesk Inventor Professional 2015, (рис. 2).



Рис. 2. Экспериментальная установка: а – трехмерная модель; б – крышка, корпус и каркас в сборке

Экспериментальная установка оснащена системой управления климатом и измерительной системой на основе электрического обогрева с плавным регулированием. Структурная схема представлена на рис. 3.

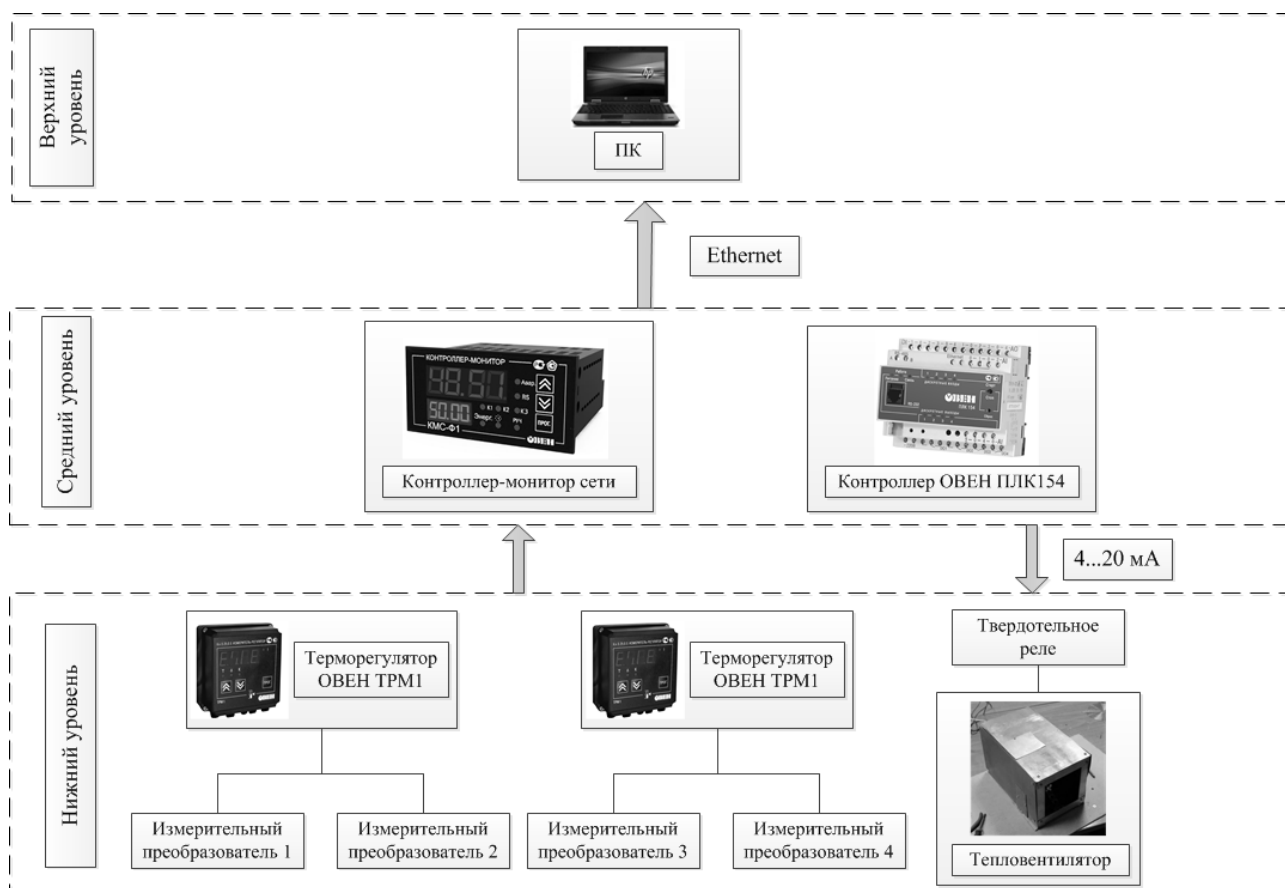


Рис. 3. Структурная схема системы управления климатом экспериментальной установки

Нижний уровень представлен измерительными преобразователями температуры. Опрос датчиков температуры производится термостатами ОВЕН ТРМ1. Нагрев воздуха внутри макета обеспечивается тепловентилятором, который представляет собой вентилятор и нагревательный элемент. Вентилятором осуществляется принудительный обдув нагревательного элемента.

На среднем уровне реализуется сбор данных с измерительных преобразователей и передача их на верхний уровень системы управления с помощью контроллера ОВЕН ПЛК154. Выбранный моноблочный контроллер используется для автоматизации малых систем и предусматривает дискретные и аналоговые входы и выходы. Плавное регулирование мощности тепловентилятора производится с помощью твердотельного реле, на управляющий вход которого поступает унифицированный токовый сигнал 4...20 мА от контроллера. Контроллер-монитор сети (КМС) позволяет измерять и отображать все важные показатели однофазной электрической сети: действующих значений напряжения и тока.

Контроллер посредством сети Ethernet передает полученные данные на верхний уровень, который представлен персональным компьютером.

Одним из требований, предъявляемых к нагревательной спирали тепловой пушки (ТП), является устойчивость при больших температурах. Также необходимо реализовать равномерный разогрев воздуха внутри теплового объекта. Данные требования были учтены с помощью дополнительной стекловаты, проложенной по стенкам ТП, и подобранного оптимального расстояния между

вентилятором и нагревательным элементом. Корпус ТП защищен от физического воздействия алюминиевым каркасом и железными листами по периметру. Со стороны вентилятора расположена защитная сетка, которая предотвращает попадание крупных легковоспламеняемых веществ внутрь ТП. Установка ТП внутри теплового объекта производится на подставку. При этом расположение ТП достаточно далеко от ТЗО, что исключает в случае неисправности соприкосновение нагревательного элемента с корпусом теплового объекта. Также на подставку монтируется вся климатическая система. На основании принятых решений была разработана модель и изготовлен макет экспериментальной установки, представленная на рис.4.

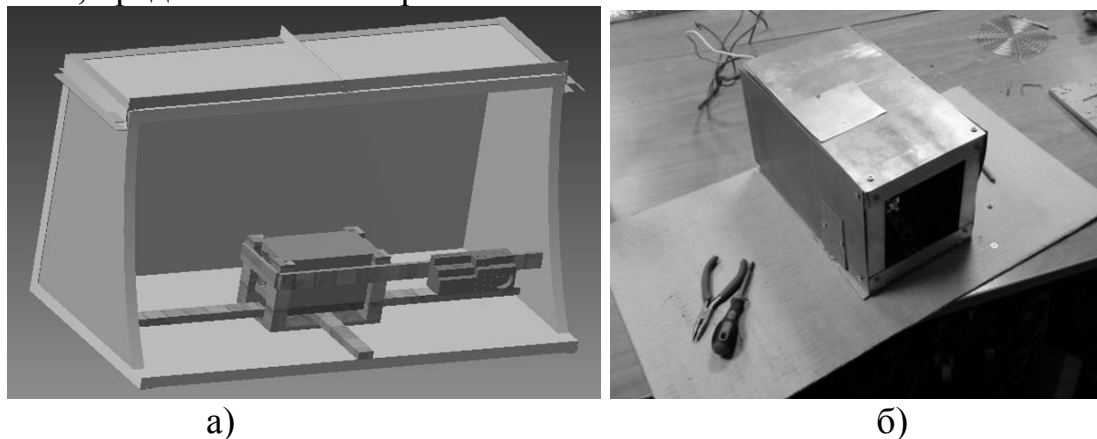


Рис. 4. Макет экспериментальной установки с тепловой пушкой: а – трехмерная модель в разрезе; б – вид тепловой пушки

Таким образом, в настоящей работе изложена разработка и процесс изготовления макета теплового объекта. В дальнейшем планируется верификация с моделью термодинамических систем, выполненной в Matlab-Simulink/Simscape, и с реальным объектом (блок-контейнером).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Актический регион: Проблемы международного сотрудничества: Хрестоматия в 3 томах / Рос. совет по мкжд. делам [под общ. ред. И.С. Иванова]. – М.: Аспект Пресс, 2013 г. – 663 с.
2. Lauenburg P., Wollerstrand J. Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure // Proceedings of the Eleventh International Building Simulation Conference (IBPSA). Glasgow, 2009. – pp. 150–158.
3. Велли Ю.Я., Докучаев В.В., Федоров Н.Ф. «Здания и сооружения на крайнем севере» – Ленинград: Госстройиздат, 1963г.

Научный руководитель: М.Н. Морозов, ассистент каф. АТП ЭНИН ТПУ.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ШАГОВОГО АЛГОРИТМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

А.А. Лукашев
Сибирский федеральный университет

Задача экстремального регулирования состоит в том, чтобы текущее управление обеспечивало минимум целевой функции объекта управления. Для объектов, имеющих одно управляющее и одно внешнее воздействие задачу экстремального регулирования можно записать следующим образом:

$$Q(u(k), z(k)) \rightarrow \min_{u(k) \in U}, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, \dots$ – время, $u(k)$ – управляющее воздействие, $z(k)$ – внешнее воздействие, $Q(\cdot)$ – неизвестная целевая функция объекта управления, $U = \{u(k) : u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}\}$.

Рассматриваются одномерные статические объекты управления вида

$$y(k) = Q(u(k), z(k)) + V(k), \quad (2)$$

где $V(k)$ – помеха, $y(k)$ – измеренное значение целевой функции.

Об объекте управления (ОУ) делаются следующие допущения:

- функция $Q(u(k), z(k))$ унимодальна относительно управляющего воздействия $u(k)$;
- искомая точка минимума задаётся функциями возмущения z : $u^* = u^*(z)$ и $Q^* = Q^*(z)$, которые соответствуют горизонтальному и вертикальному дрейфу целевой функции;
- помеха $V(k)$ – центрированная и имеет дисперсию σ_V^2 .

Для решения задачи предполагается использовать устройство управления (УУ), реализующее адаптивный шаговой алгоритм. Состоящая из ОУ и УУ система экстремального регулирования (СЭР) в общем виде представлена на рис. 1.

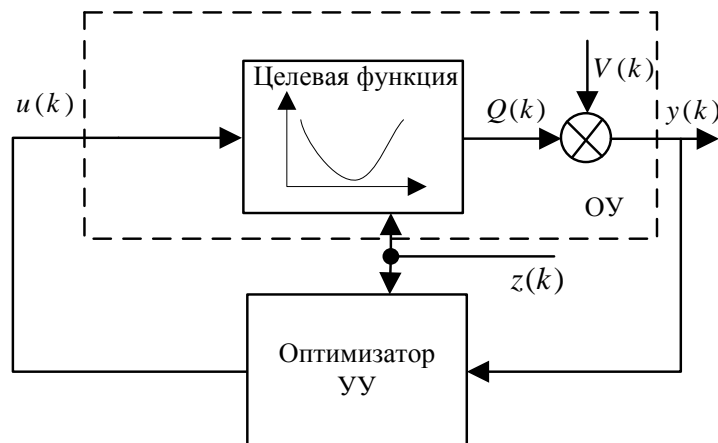


Рис. 1. Система экстремального регулирования

В основе работы УУ лежит шаговый алгоритм экстремального управления, идея которого состоит в изменении управляющего сигнала в соответствии с рекуррентным выражением

$$u(k) = u(k-1) + p(k-1)a \quad (3)$$

где a – размер шага ($a > 0$), $p(k-1)$ – направление шага (1, 0 или -1) в момент времени $(k-1)$.

До начала работы СЭР необходимо выбрать $a(1)$, $p(1)$, $u(1)$.

Алгоритм СЭР в общем виде:

1. измерить $z(1)$;
2. измерить $y(1)$;
3. положить $k = 2$;
4. измерить $z(k)$;
5. выбрать значение $p(k-1)$ (1, 0 или -1) в соответствии с правилами выбора направления;
6. положить $u(k) = u(k-1) + p(k-1)a$
7. измерить $y(k)$;
8. идентифицировать модель $\hat{Q}_k(u, z)$;
9. положить $k = k + 1$
10. переход к п. 4.

В качестве метода идентификации модели в пункте 8 была выбрана и исследована линейная регрессия, входными данными которой служат значения u , z и y за последние $N_0 \geq 3$ тактов:

$$\hat{Q}_k(u, z) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_u u + \hat{\beta}_z z. \quad (4)$$

При условии структурной адекватности этой модели в локальной области функции Q её качество можно оценить ковариационной матрицей:

$$K_{\beta} = \frac{\sigma_V^2}{N_0} \begin{bmatrix} \frac{s_z^2 m_u^2 - 2 \text{cov}_{uz} m_u m_z - \text{cov}_{uz}^2 + s_u^2 s_z^2}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} & \frac{\text{cov}_{uz} m_z - s_z^2 m_u}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} & \frac{\text{cov}_{uz} m_u - s_u^2 m_z}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} \\ \frac{\text{cov}_{uz} m_z - s_z^2 m_u}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} & \frac{s_z^2}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} & \frac{-\text{cov}_{uz}}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} \\ \frac{\text{cov}_{uz} m_u - s_u^2 m_z}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} & \frac{-\text{cov}_{uz}}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} & \frac{s_u^2}{s_u^2 s_z^2 - \text{cov}_{uz}^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

где m_u – среднее выборочное u (по последним N_0 точкам), m_z – среднее выборочное z , s_u^2 – выборочная дисперсия u , s_z^2 – выборочная дисперсия z , cov_{uz} – выборочная ковариация u и z .

Ковариационная матрица содержит дисперсии и ковариации оценок параметров $\hat{\beta}_0$, $\hat{\beta}_u$ и $\hat{\beta}_z$. Следует отметить, что знаменатели элементов матрицы

обращаются в ноль при равенстве корреляции управляющего и внешнего воздействия r_{uz} , равной 1 или -1 .

Направление $p(k-1)$ в пункте 5 выбирается следующим образом:

- $p(k-1) = -\text{sign}(\beta_u(k-1))$, при условии, что на следующем шаге $|r_{uz}| \neq 1$;
- $p(k-1) = 0$ в противном случае.

Результаты имитационного моделирования для объекта управления, целевая функция которого имеет вид

$$Q(u, z) = K(u - A_1 \sin(f_1 z))^2 + A_2 \sin(f_2 z), \quad z = k, \quad (6)$$

представлена на рис. 2. В качестве параметров объекта были взяты значения $K = 1$, $A_1 = 12$, $f_1 = 0,01$, $A_2 = 5$, $f_2 = 0,02$.

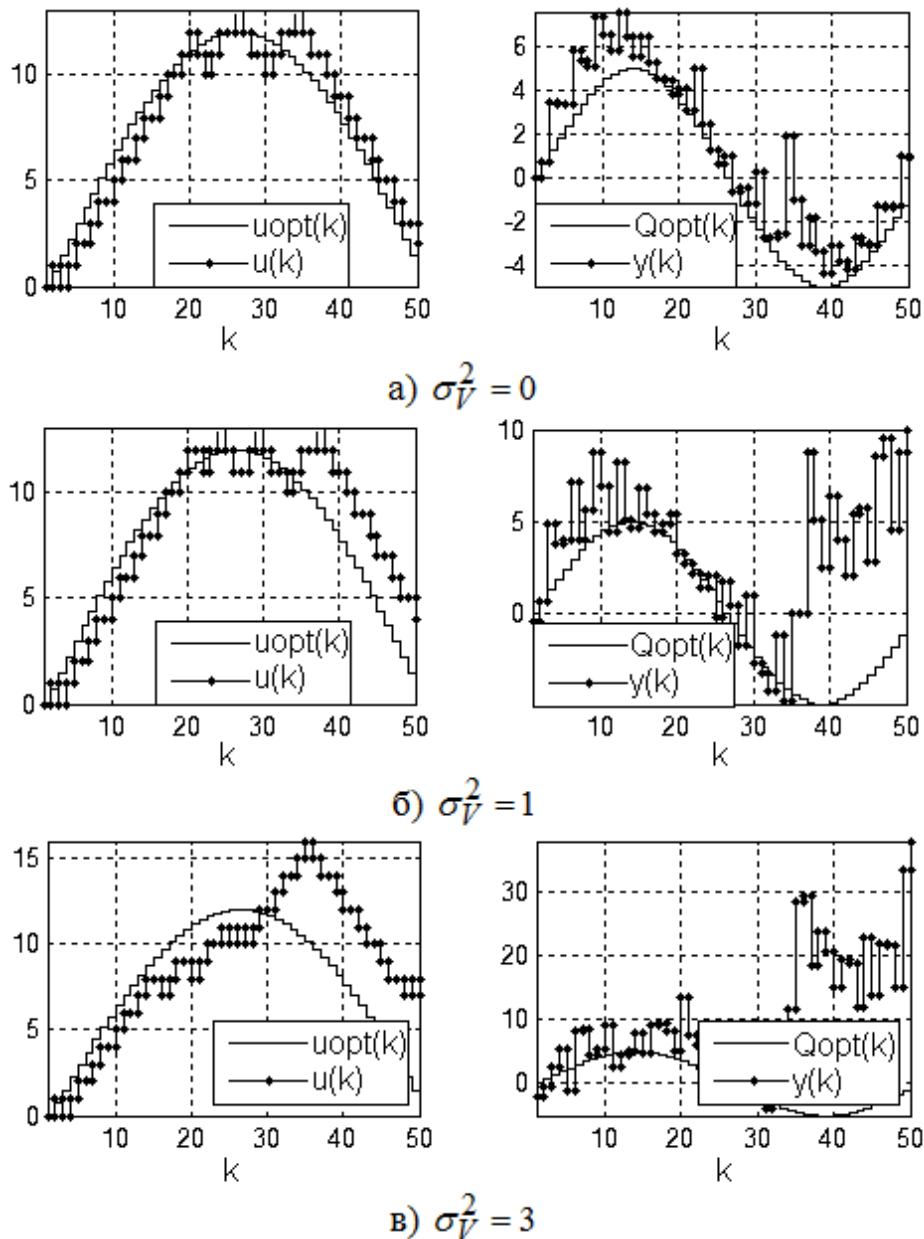


Рис. 2. Результаты работы адаптивного шагового алгоритма

Из рисунка видно, что адаптивный шаговый алгоритм устойчив к вертикальному и горизонтальному дрейфу. Чем больше помехи измерений, тем больше отставание поиска от оптимума объекта управления.

В дальнейшем предполагается использование других методов идентификации, правил выбора направления, а также исследование алгоритма с переменным шагом a .

ЛИТЕРАТУРА:

1. Масальский Г.Б. Основы адаптивных систем: учебное пособие [Электронный ресурс] / сост. Г.Б. Масальский. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 1 диск.
2. Растринин Л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука, 1974
3. Либерзон Л.М., Родов А.Б. Системы экстремального регулирования / Под ред. проф. В.В. Казакевича. – М.: Энергия, 1965.

Научный руководитель: Г.Б. Масальский, к.т.н., профессор кафедры робототехники и технической кибернетики, Сибирский федеральный университет.

МОДЕРНИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЕМ АДМИНИСТРАТИВНОГО ЗДАНИЯ

Н.С. Айкина

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5БМ74

В соответствии с классической схемой теплоснабжения предполагается, что температура теплоносителя регулируется централизованно, и тепло поступает в здание независимо от реальной потребности, в соответствии с выполненными на этапе проектирования расчетами. Вследствие чего нередко наблюдается «перетоп», в особенности осенью и весной. Следствием этого является неэффективный расход тепла в случаях, когда не предусматривается регулирование теплотребления на объекте. Внедрение автоматических систем регулирования (АСР) температуры в контурах отопления, горячего водоснабжения и вентиляции является сегодня основным подходом к вопросам экономии тепловой энергии. Установка систем автоматического регулирования в тепловых пунктах снижает потребление тепла в административных помещениях до 45 %. Максимальный эффект достигается за счет оптимального регулирования в отопительный сезон, когда автоматика центральных тепловых пунктов практически не выполняет в полной мере свои функциональные возможности.

На сегодняшний момент сформулированная проблема имеет решения. Этим вопросом занимается большое число организаций. Предложенные техни-

ческие решения позволяют решить такие задачи как осуществление контроля параметров и автоматическое управление значениями показателей теплоносителя с целью оптимизации потребления тепловой энергии. В то же время установка узлов учета тепловой энергии позволяет контролировать и регистрировать качественные и количественные показатели расхода тепловой энергии, что снижает расходы на оплату энергоресурсов при расчете с теплоснабжающей организацией.

В решении поставленной проблемы заинтересованы объекты различных категорий, такие как нежилые здания, находящиеся в собственности муниципального образования, а также здания, находящиеся на балансе различных организаций: управлений здравоохранения, образования, администрации: жилые помещения, а также заводы и предприятия, так как использование систем учета и регулирования теплопотребления позволяет уменьшить теплопотребление, а, следовательно, снизить затраты на оплату услуг.

Целью работы является модернизация автоматической системы контроля и регулирования теплопотребления административного здания на базе микропроцессорного контроллера.

Объектом регулирования является общественное здание административного назначения по адресу улица Говорова 19Б в городе Томске, тепловая нагрузка которого составляет 0,5884 Гкал/ч, в том числе 0,2414 Гкал/ч – на нужды отопления, 0,3470 Гкал/ч – на нужды вентиляции. В тепловом пункте установлены пластинчатые теплообменники. Нагрузка здания рассчитана на температуру –39 °С. Схема подключения системы горячего водоснабжения – закрытая. Схема подключения системы отопления и приточной вентиляции – независимая. Расчетный температурный график – 150/70 °С со срезкой 125 °С. Давление в точке подключения P1=6,4 кгс/см², P2=4,3 кгс/см². Расход теплового потока на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение, а также технологические нужды приведены в таблице 1.

Табл. 1. Расчетные тепловые потоки

Наименование потребителя	Расход теплового потока, Вт/(ккал/час)				
	Отопление	Вентиляция	Горячее водоснабжение	Технологические нужды	Всего
Административное здание по ул. Говорова, 19Б	280 785	281 600	139 780	—	702 165
	241 432	242 132	120 189		603 753
Нагрузка на перспективу		121 944		—	824 109
		104 853			709 706

В ходе работы выполнен расчёт расходов теплоносителя.

Максимальный расход теплоносителя:

$$G_{\max} = \frac{Q_{\max} \cdot 10^{-3}}{c \cdot (T_{np} - T_{обp})} = \frac{0,5884 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot (125 - 70)} = 10,15 \quad \text{т/час,} \quad (1)$$

где $Q_{\max} = 0,5884$ Гкал/час – расчетная максимальная тепловая нагрузка;

$c = 1$ Ккал/кг – удельная теплоемкость воды;

$T_{\text{обр}} = 70$ °С – температура воды в обратном трубопроводе;

$T_{\text{пр}} = 125$ °С – температура воды в подающем трубопроводе.

Средний расход теплоносителя:

$$G_{cp} = \frac{Q_{cp} \cdot 10^{-3}}{c \cdot (T_{pr} - T_{obr})} = \frac{0,39 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot (125 - 70)} = 7,091 \quad \text{т/час} \quad (2)$$

Средняя тепловая нагрузка:

$$Q_{cp} = \frac{Q_{\max} (T_{вн} - T_{cp})}{(T_{вн} - T_{\min})} = \frac{0,5884 \cdot (20 - (-19,1))}{(20 - (-39))} = 0,39 \quad \text{т/ч}, \quad (3)$$

где $T_{вн} = 20$ °С – внутренняя температура в помещении;

$T_{\min} = -39$ °С – минимальная температура наружного воздуха;

$T_{cp} = -19,1$ °С – температура наиболее холодного месяца (январь).

Минимальный расход теплоносителя вычисляем по формуле:

$$G_{\min} = \frac{Q_{\min} \cdot 10^{-3}}{c \cdot (T_{pr} - T_{obr})} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot (75 - 52)} = 4,35 \quad \text{т/час.} \quad (4)$$

Минимальная тепловая нагрузка:

$$Q_{\min} = \frac{Q_{\max} (T_{вн} - T_{л})}{(T_{вн} - T_{\min})} = \frac{0,5884 \cdot (20 - 10)}{(20 - (-39))} = 0,1 \quad \text{Гкал/ч}, \quad (5)$$

где $T_{л} = 10$ °С – средняя температура летнего месяца;

$T_{\text{обр}} = 52$ °С – температура воды в обратном трубопроводе;

$T_{\text{пр}} = 75$ °С – температура воды в подающем трубопроводе.

Выбор структуры АСР контура отопления здания

Главной особенностью системы регулирования температурой теплоносителя в контуре отопления является его большая тепловая инерционность, тогда как инерционность системы горячего водоснабжения значительно меньше. Поэтому задача стабилизации температуры воздуха в отапливаемом помещении значительно сложнее, чем задача поддержания температуры горячей воды в системе горячего водоснабжения.

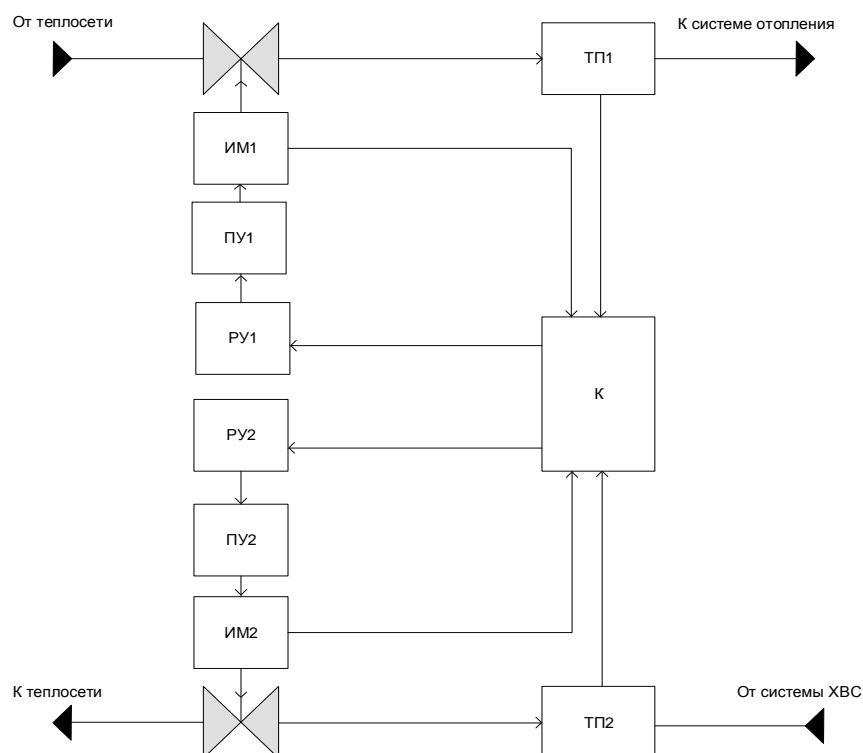


Рис. 1. Структурная схема АСР температуры теплоносителя в контуре отопления здания

Основными возмущающими воздействиями являются внешние метеосостояния, в том числе ветер, солнечная радиация. В работе выбрана схема регулирования по возмущению внешних параметров.

Структурная схема разработанной системы показана на рисунке 1. Условные обозначения, принятые на рисунке 1 приведены в таблице 3.

Табл. 3. Условные обозначения (рис.1)

Обозначение	Расшифровка
ТП	Термоэлектрический преобразователь
К	Контроллер
РУ	Устройство ручного управления
ПУ	Пусковое устройство
РО	Регулирующий орган
ИМ	Исполнительный механизм

ЛИТЕРАТУРА:

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 21.602-2003 «Правила выполнения рабочей документации отопления, вентиляции и кондиционирования» (введен в действие постановлением Госстроя РФ от 20 мая 2003 г. № 39).
2. ГОСТ 21.403-80. Система проектной документации для строительства. Обозначения условные графические в схемах. Оборудование энергетическое. – М: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.

3. ГОСТ 21.408-93. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов. – М: Изд-во стандартов, 1993. – 53 с.
4. Программируемый логический контроллер Элсима. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://elesy.ru/products/products/elsyma/elsyma-m01/ti.aspx>. – Загл. с экрана.

Научный руководитель: Ю.К. Атрошенко, к.т.н., старший преподаватель каф. АТП ЭНИН ТПУ.

РЕКОНСУКЦИЯ СИСТЕМЫ ТОПЛИВОПОДАЧИ ПАРОВОГО КОТЛА ТИПА ТГМ-84 ПРИ ПЕРЕВОДЕ НА АВТОМАТИЧЕСКИЙ РОЗЖИГ

Е.А. Андрианова
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5Б4В

ТЭЦ-1 входит в комплекс предприятий Нижнекамского нефтехимического промышленного узла, который расположен в районе республики Татарстан. Промышленный узел находится юго-восточнее г. Казань. ТЭЦ обеспечивает теплом и электроэнергией промышленный комплекс и г. Нижнекамск. ТЭЦ была введена в эксплуатацию в 1967 году.

Основное оборудование ТЭЦ включает в себя 16 энергетических, 5 водогрейных котлов и 11 турбоагрегатов.

Объектом автоматизации является паровой котел типа ТГМ-84. Его технические характеристики приведены в таблице 1.

Табл. 1.

Технические характеристики котла ТГМ-84	
Паропроизводительность, т/ч	420
Давление перегретого пара, кгс/см ²	140
Температура перегретого пара, °С	560
Температура питательной воды, °С	230
Температура уходящих газов, °С	117
Вид топлива	Природный газ
Расход природного газа на котел, нм ³ /ч	34100
Давление газа перед котлом, кПа	150
Давление газа за регулирующим клапаном, кПа	50
Количество горелок	4

Основными целями модернизации системы автоматического розжига горелок в части управления оборудованием газоснабжения котла являются:

- обеспечение жесткого соблюдения технологии розжига, сокращение или исключение ручных операций, предотвращение ошибок оперативного персонала при выполнении операций по пуску котла;

- обеспечение дистанционного, автоматического, логического управления и автоматического регулирования технологических процессов;
- обеспечение сигнализации положения и состояния управляемого оборудования;
- обеспечение персонала достоверной и своевременной информацией о ходе технологических процессов, включая аварийную и предупредительную сигнализацию, и состоянии оборудования для ведения оперативного управления;
- повышение точности измерения параметров и обеспечение автоматизации их обработки;
- повышение быстродействия, надёжности и качества управления за счёт внедрения интеллектуальных программируемых логических контроллеров;
- замена морально устаревшего или выработавшего свой ресурс оборудования полевого уровня на современное оборудование.

Газоснабжение котла ТГМ-84 производится от общекотельного газопровода-коллектора, который проложен снаружи котельного зала.

На газопроводе-отводе к котлу ТГМ-84 после существующей задвижки с электроприводом предусмотрена установка нового дискового затвора с электроприводом. После поворота в направлении котла предусмотрена установка нового поворотного кольца-заглушки. Далее газопровод поднимается и прокладывается параллельно котлу по существующей площадке, где предусмотрена установка нового дискового устройства подготовки потока «Zanker» и расходомерного устройства. Затем после опуска и поворота к фронту котла предусмотрена установка нового предохранительно запорного клапана и клапана регулирующего, далее газопровод поднимается. Газопровод разделяется на газопроводы, которые прокладываются по фронту котла для подачи газа на горелки № 1, № 2 и для подачи газа на горелки № 3, № 4 соответственно.

Комплект расходомера включает камерную диафрагму и преобразователь разности давлений, установленную согласно требованиям ГОСТ 8.586.2-2005 к прямым участкам. Для сокращения длин прямых участков перед диафрагмой установлено дисковое устройство подготовки потока "Zanker".

Вместо существующей арматуры перед горелками котла, предусмотрена установка блоков газооборудования АМАКС-БГ14-250/150/200 ТУ 3683-002-20652433-2003 производства ЗАО Арматурный Завод "АМАКС".

Для розжига горелок в проекте принимаются запальники, работающие на природном газе и входящие в состав автоматики котла. В качестве прибора контроля основного факела предусматривается установка устройства селективного контроля пламени также входящее в состав автоматики котла.

Отбор газа на запально-защитное устройство (ЗЗУ) предусмотрен от блока газооборудования.

При полном отключении природного газа на станции предусмотрена возможность присоединения баллона сжиженного газа к крану, имеющемуся в составе блока газооборудования.

На котле предусмотрена система продувочных газопроводов и газопроводов безопасности. Отборные устройства на газопроводе-отводе к котлу для продувочных газопроводов предусмотрены перед вторым по ходу газа запорным устройством, поворотной заглушкой, перед ПЗК, из тупиков газопровода-отвода к котлу и перед блоками газооборудования АМАКС-БГ14-250/150/200.

Газопроводы безопасности котла предусмотрены после первого по ходу газа отсечного клапана в блоках газооборудования. Отборные устройства газопроводов безопасности от блоков газооборудования входят в их состав.

Крепление продувочных газопроводов и газопроводов безопасности производится к стенам здания или колоннам котла через каждые 3 метра по месту.

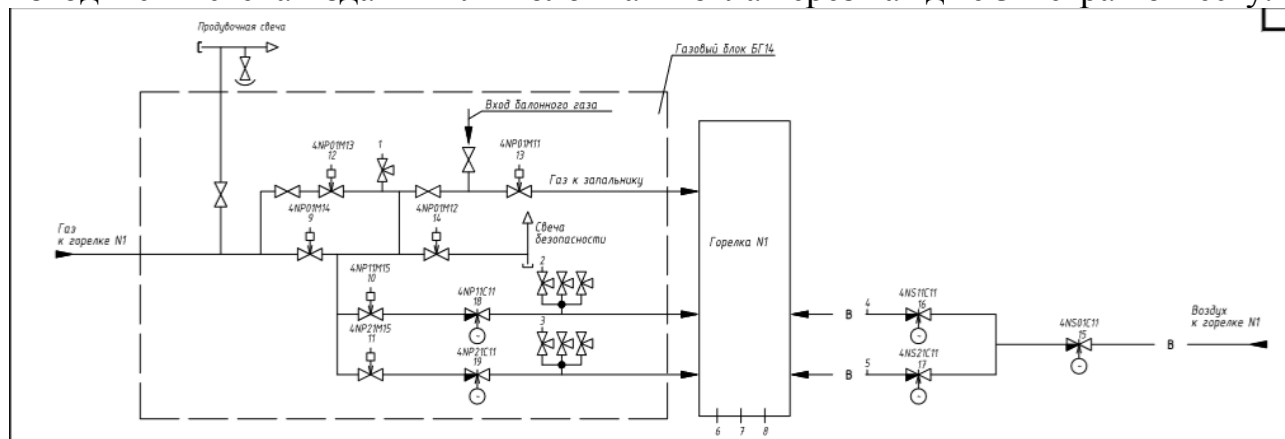


Рис. 1. Схема функциональная газопровода к горелкам

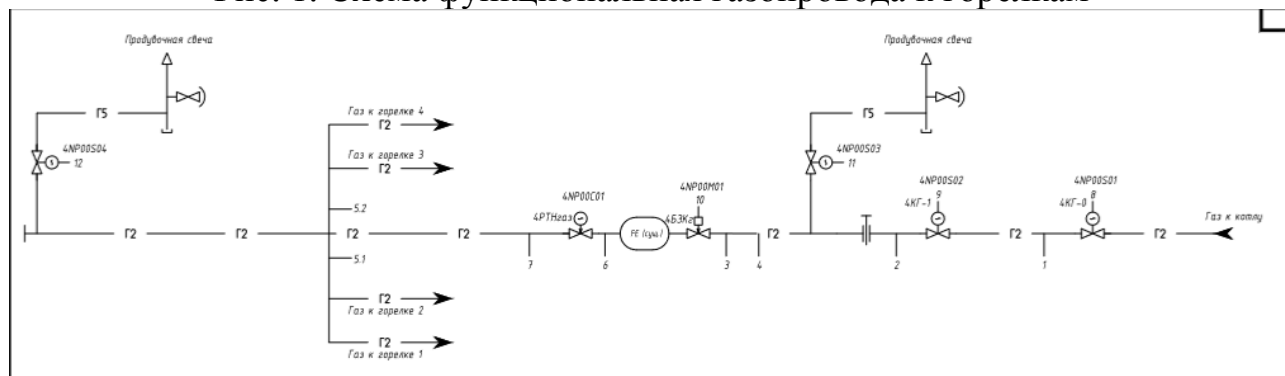


Рис. 2. Схема функциональная газопровода к котлу

Информация от главного контроллера передается на экраны ПК. Используется система «Master-Scada».

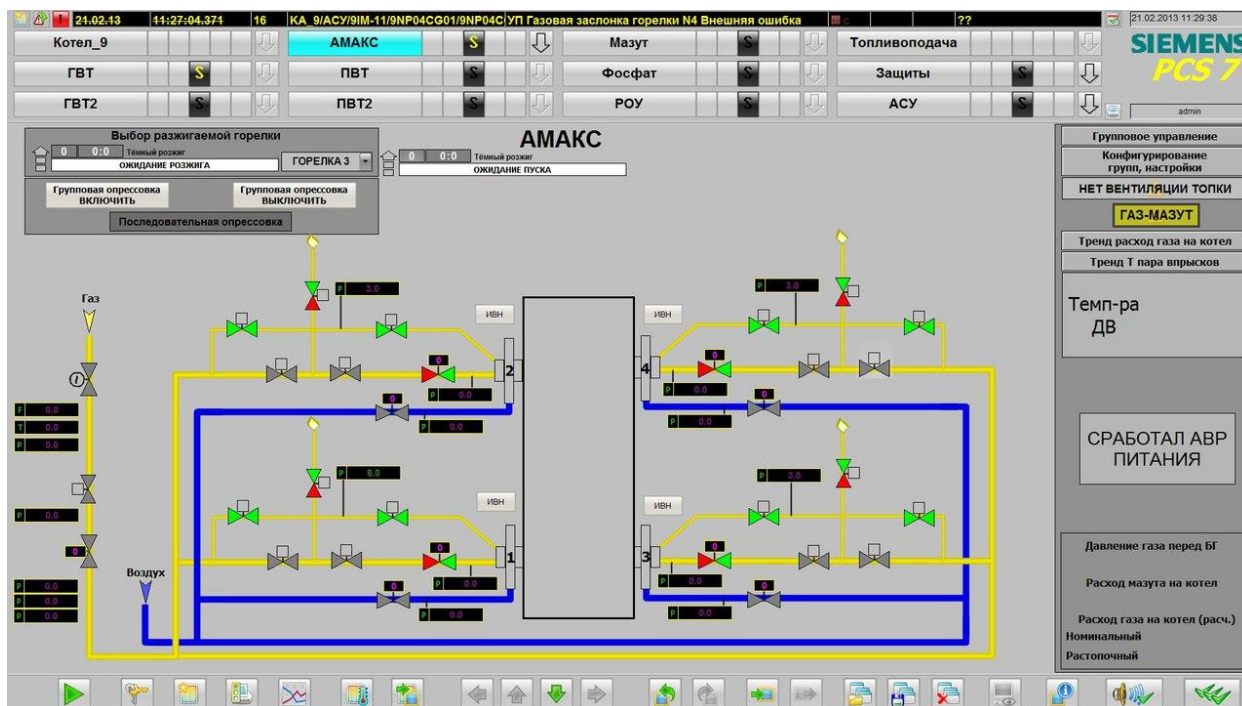


Рис. 4. Интерфейс горелок котла ТГМ-84 в программе диспетчера

В данной работе рассмотрены вопросы автоматизации процесса розжига горелок на котле ТГМ-84. Система САРГ внедряется с целью приведения котлоагрегата и его системы управления в соответствие требованиям федеральных норм и правил в области промышленной безопасности. САРГ позволяет обеспечить жесткое соблюдение технологии розжига, избежать ошибок из-за «человеческого фактора» при выполнении операций по пуску котла. Обеспечивает оперативный персонал достоверной и своевременной информацией о ходе технологических процессов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иванова Г.М. и др. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: МЭИ, 2007. – 458 с.
2. Медведева Р.В. Средства измерений. – М.: КноРус, 2011. – 233 с.
3. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
4. Ключев А.С. Метрологическое обеспечение АСУ ТП: Производственно-практическое издание. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 160 с.
5. Баранникова И.В. Метрология, стандартизация, сертификация в АСУ. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 91 с.
6. Резников М.И., Липов Ю.М. Паровые котлы тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 240 с.

СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ПРОДУКТОВ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

П.П. Ткаченко

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5Б4В

Современный прогресс в технологиях привел ученых к четкому пониманию того, что водород является идеальным топливом с энергетической и экологической точки зрения. Он имеет самую высокую теплотворную способность на единицу массы (142 МДж/кг) вместе с образованием обычной воды в результате сгорания. Энергосистемы, использующие водород в качестве топлива, являются явным будущим тепловой энергетики [1].

Существуют различные термохимические процессы, которые выделяют водород из ископаемого топлива (например, паровой риформинг, автотермический риформинг и термическое частичное окисление), а также производство водорода из биомассы с помощью термохимических и биологических процессов. Типичным продуктом термохимических подходов является смесь CO, CO₂, H₂, водяной пар, метан и другие газы, некоторые из которых могут сжигаться дополнительно при производстве тепла [2]. Соотношение компонентов продуктов конверсии углеводородного топлива сильно зависит от физических условий газификации.

Однако процессы термического разложения в наибольшей степени связаны с непрерывной переработкой сырых углеводородов при высоких температурах (≥ 1200 К) и высоким давлением (до 80 бар) и, следовательно, имеют существенную угрозу пожара и взрыва. Другим ограничением традиционных методов газовой обработки является их низкая пригодность для составов высоковязких отходов топлива (таких как смола), которые становятся проблематичными отходами. С другой стороны, газификация желательна именно для таких материалов, что позволяет осуществлять их превращение в подходящую для практического применения форму [3].

В рамках выполненной работы были получены результаты над светоиндуцированной конверсией отработанной водно-угольной суспензии, легированной отходами нефтехимии (органоводоугольные топлива – ОВУТ), для ее дальнейшего сгорания в нагревателях с выходом газа. Даже первые попытки использования лазерных импульсов для газификации ОВУТ демонстрируют достаточно хороший уровень конверсионной эффективности вязких отходов в синтез-газ [4]. Такой подход позволяет эффективно утилизировать многочисленные отходы самым экологичным способом. Он позволяет плучить вторичное топливо в подходящем фазовом состоянии, которое подходит для большинства промышленных котлов без модификаций. Процесс происходил в нормальных условиях, и, следовательно, предлагаемый подход показывает принципиально более высокий уровень безопасности, чем традиционные методы «горячего» преобразования топлива. В отличие от каталитических методов, для него

не нужны дорогостоящие катализаторы или высокотехнологичные конструкции (например, топливные элементы).

Несмотря на то, что в представленных опытах использовался лазер, для применения аналогичной установки в промышленности нет необходимости в использовании именно лазера. Все, что необходимо для совершения данного процесса, это тепловой эффект мощного импульсного пучка энергии, источником которого могут быть дешевые некогерентные световые приборы (например, светодиоды).

Образец топлива для газификации представлял собой композицию фильтровального осадка из угольного топлива (89 мас. %) и отработанного мазута (10 мас.%). Фильтровальная лепешка содержит сама по себе большое количество воды (40 мас. % – вода, до 36 мас. % – горючие летучие вещества, а весь остаток – твердый уголь [1]). В результате была получена смесь различных углеводородов с 40% массы воды. Первоначальный вес образца топлива всегда составлял около 0,11 г, что контролировалось электронными весами.

Лазер работал в импульсном режиме, для предотвращения интенсивного регулярного нагрева образца вместе с очень высокой скоростью подачи тепла (что является одним из основных требований к эффективному производству синтез-газа). Энергия импульса составляла около 40 мДж, а длительность импульса – 10 нс. Частота повторения импульсов составляла 3-5 Гц, поэтому средняя мощность светового излучения была на уровне 0,12-0,2 Вт. Программное обеспечение привода позволяет генерировать точное количество импульсов, поэтому контроль веса в процессе конверсии топлива сопровождался точным контролем поглощенной энергии.

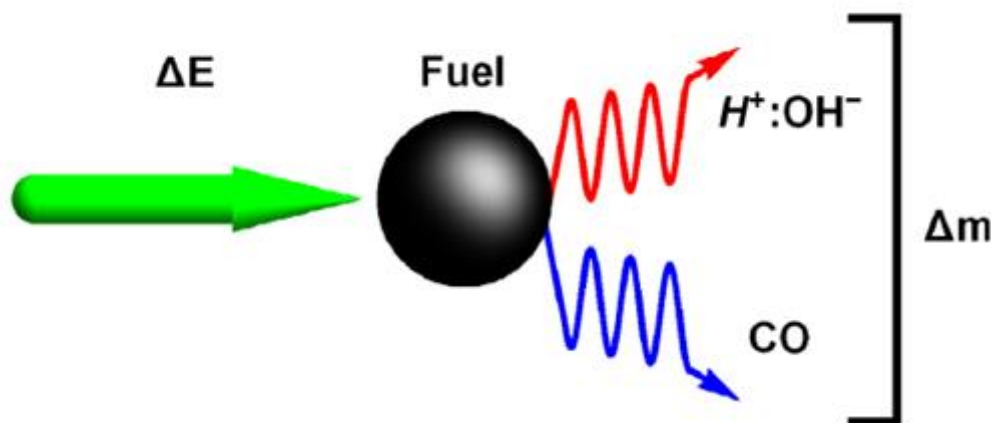


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента.

Лазерный импульс (зеленая стрелка) инициирует газификацию определенной части топлива (с весом Δm), производя смесь газов и пара

Аналитические весы позволяют проводить реальное измерение массы образца с точностью до 10 мг. Этого достаточно для достижения поставленных целей, кроме того, такой уровень чувствительности не приводит к ошибкам обусловленным изменением давления газа внутри камеры равновесия.

Для проведения экспериментов по результатам предыдущих опытов были выбраны 2 состава суспензии:

Смесь 1: КЕК Г – 60 %, вода – 40%.

Смесь 2: Кокс – 60 %, вода – 40%.

Входящий лазерный импульс инициирует испарение воды, которая присутствует внутри тонкого слоя топлива внутри области пятна облучения вместе с углем. Отражение света, а также обратное рассеяние очень малы из-за структуры образца (мелкий угольный порошок, заполненный водомасляной эмульсией). В данном случае интенсивность лазерного импульса больше $0,2 \text{ Дж/см}^2$, т.е. она достаточна для преодоления порога абляции органических материалов. Объем испаряемой части топливной композиции в режиме наносекундных импульсов зависит от энергии импульса и коэффициента поглощения света. Результаты эксперимента показаны на рис. 2.

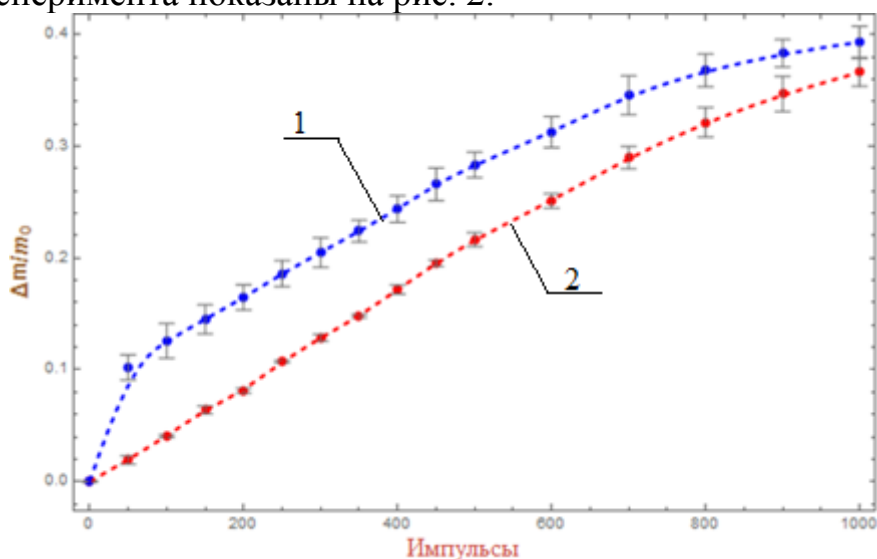


Рис. 2. Зависимость изменения массы образцов от количества отстрелянных импульсов: 1 – кокс +40% H_2O ; 2 – КЕК Г + 40% H_2O

Видно, что первые пятьдесят импульсов дают сильное испарение угля (синяя кривая на рис.). Потом скорость газификации замедляется. Общее количество испаренного топлива составляет около 40% после 1000 лазерных импульсов. Такой результат показывает высокую эффективность для первых опытов без оптимизации условий эксперимента. Кривая 2 на рис. 2 показывает изменение эффективности импульса для ОВУТ (нормированное на его начальный вес) на тысячу импульсов. Из графика видно, что существует пороговое значение после поглощения образцом 1000 импульсов, после чего происходит резкое снижение газифицируемой части образца. Эффективность газификации, по-видимому, снижается с числом поглощенных импульсов, и ее оптимизация является актуальной задачей для будущих исследований.

На рис. 3 видно, что процесс прогрева поверхности образцов проходил практически равномерно. Отклонение красной кривой, соответствующей «Смеси 1», от линейного распределения свидетельствует о полном испарении воды с поверхности пятна облучения после 800 импульсов и начале процесса воспламенения.

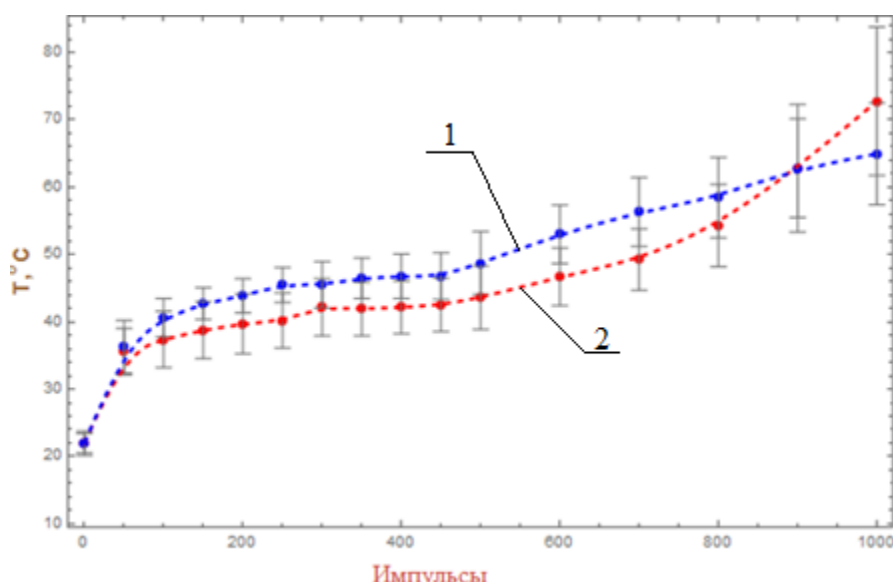


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности образцов от количества отстрелянных импульсов: 1 – кокс +40% H₂O; 2 – КЕК Г + 40% H₂O

В ходе работы была продемонстрирована техника топливной газификации, основанная на световом облучении исходной углеводородной композиции отходов. Представленные результаты показывают хорошую степень испарения отходов вместе с очевидным образованием синтез-газа. Сильное изменение массы «Смеси 2» в сравнении со «Смесью 1» может быть вызвано «выбиванием» части образца при обстреле лазером, из-за более мелких частиц и меньшей смачиваемости их поверхности. В отличие от каталитических методов, представленный подход может быть реализован без дорогостоящих расходных материалов и устройств.

Дальнейшие исследования выявят весь потенциал предлагаемого подхода.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Iegorov R, Valliulin T, Strizhak P. The effect of the petrochemicals at the ignition of the coal-water slurry droplet. *App Therm Eng* 2016;106.
2. Fulcheri L, Schwob Y. From methane to hydrogen, carbon black and water. *Int J Hydrogen Energy* 1995;20(3):197–202
3. Glushkov D.O., Shabardin D.P., Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition // *Fuel Processing Technology*. 2016. V. 143. P. 60–68.
4. Valiullin T.R., Strizhak P.A., Shevyrev S.A. Low temperature combustion of organic coal-water fuel droplets containing petrochemicals while soaring in a combustion chamber model // *Thermal Science - Online First*. 10.2298/TSCI151215221V.

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

СХЕМА АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ СИНТЕЗА КАРБИДА КРЕМНИЯ

О.А. Болотникова

Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПП, группа 5А4Д

Карбид кремния (SiC) является важным неоксидным керамическим материалом, который имеет различные промышленные применения. Он обладает спектром уникальных свойств, такими как: высокая твердость и прочность при повышенных температурах, стойкость к окислению, высокое сопротивление эрозии, уникальными полупроводниковыми характеристиками и т.д. Благодаря этим свойствам SiC имеет широкий спектр применений: в аэрокосмической и химической промышленности где преобладают повышенные температуры и агрессивные среды, в микроэлектронике, в абразивах и режущих инструментах [1].

Традиционно, для получения SiC используют метод Ачесона, который все еще используется для производства поликристаллического SiC, который применяется в качестве шлифовальных и отрезных инструментов. Применяемые в настоящее время методы получения карбида кремния имеют свои недостатки:

- сильное загрязнение получаемого продукта, малый выход SiC;
- неконтролируемое структуро- и формообразование кристаллов;
- выброс в атмосферу огромного количества моно- и диоксида углерода;
- неоднородность гранулометрического состава;
- плохая спекаемость получаемого порошкообразного продукта;
- ручная разбраковка продуктов реакции осуществляется в условиях высокой запыленности рабочего пространства;
- быстрый износ элементов электропечи (например, подовая теплоизоляция);
- печи быстро насыщаются продуктами восстановления, теряет свои теплоизолирующие свойства и требует частой замены);
- затруднено получение продукта наноразмерной дисперсности;
- высокая продолжительность процесса (30 – 40 часов).

В связи с этим был предложен метод получения SiC в плазме дугового разряда постоянного тока. Данный метод решает такие вопросы, как сильное загрязнение продукта, значительная длительность синтеза, отсутствие необходимости в проведении необходимых манипуляций в инертных газах [2].

С целью реализации процесса электродугового синтеза был собран лабораторный экспериментальный плазмохимический реактор постоянного тока (рис. 1).

В качестве источника электропитания использовался выпрямительно-инверторный сварочный трансформатор марки Condor Colt 200 с диапазоном рабочих токов от 20А до 200А, с возможностью плавного регулирования. При помощи силовых линий связи к источнику питания подключались графитовые

электроды, формирующие разрядный промежуток. Дуговой разряд инициировался кратковременным соприкосновением электродов; рабочие ток и напряжение фиксировались в процессе рабочего цикла при помощи цифрового осциллографа.

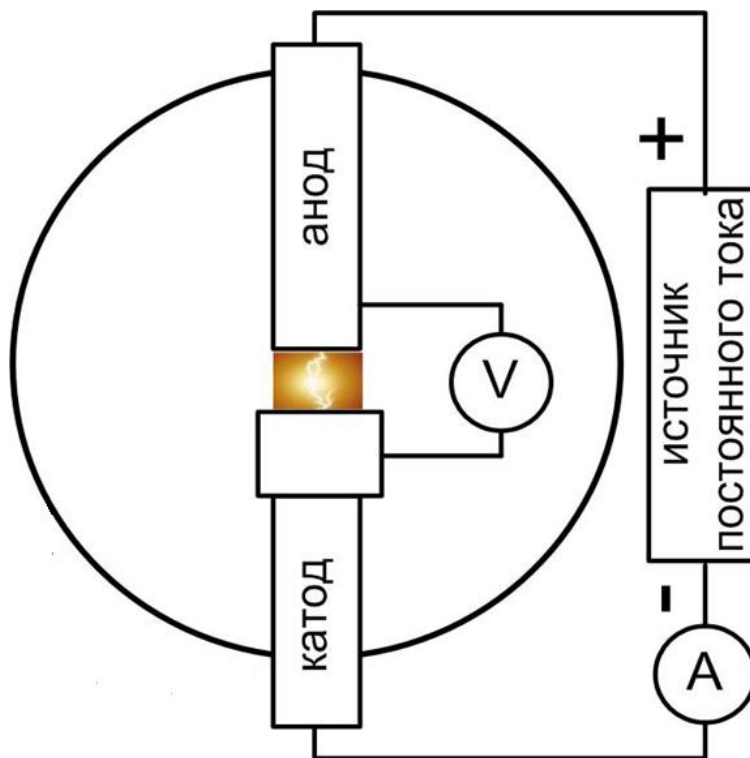


Рис. 1. Схема лабораторной установки

Для обеспечения повторяемости экспериментов и исключения «человеческого фактора» в настоящей работе предлагается схема управления электропитанием системы. Рассмотрим подробнее схему автоматики данной установки.

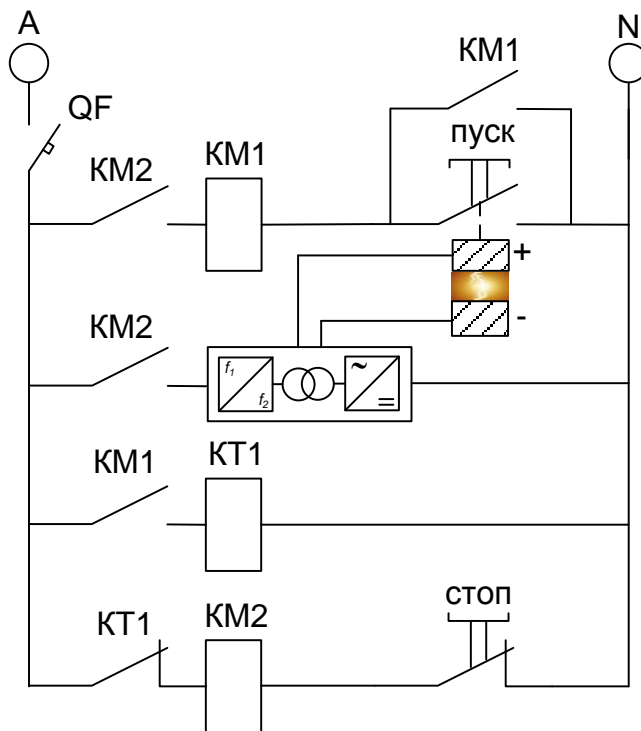


Рис. 2. Принципиальная схема системы управления электропитанием на магнитных пускателях и реле времени

Принцип работы разработанной схемы на магнитных пускателях следующий (рис. 2). Включаем питание автоматическим выключателем QF. Через сработавшие контакты КМ2 подается питание на магнитный пускатель КМ1, приводя его в рабочее положение и на выпрямительно-инверторный модуль. Нажатием кнопки «Пуск», своим нормально разомкнутым контактом замыкаем цепь питания катушки КМ1 - магнитного пускателя, а также приводим в движение электроды электродуговой системы, которые связаны с кнопкой «Пуск». Магнитный пускатель блок-контактом шунтирует кнопку «Пуск» для самоподдержания питания катушки КМ1. Одновременно с срабатыванием магнитного пускателя КМ1 запускается реле времени КТ1, которое по истечении заданного времени размыкает нормально замкнутый контакт КТ1, отключая питание катушки КМ2 и отключая электропитание системы, приводя ее в исходное состояние. Также для отключения системы предусмотрена кнопка «Стоп», включенная нормально замкнутым контактом в цепь питания катушки КМ2.

Автоматизация данного процесса исключает риски травматизма для непосредственного руководителя процессом, а также позволяет повысить производительность.

Использование данной схемы позволит производить управление временем горения дугового разряда постоянного тока, а, следовательно, улучшит повторяемость экспериментов за счет снижения влияния человека на работу системы.

В настоящее время ведется подбор конкретных единиц, входящих в разработанную схему, а также рассматривается возможность ее модернизации за счет введения в систему датчиков тока, освещенности, температуры электродов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Андриевский Р.А. Микро- и наноразмерный карбид бора: синтез, структура и свойства // Успехи химии. – 2009. – №78. – С. 889-900.
2. Болотникова О.А., Пак А.Я. Получение ультрадисперсных материалов на основе графита в плазме дуги постоянного тока // Тинчуринские чтения: материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26-28 Апреля 2017. - Казань: КГЭУ, 2017 - Т. 1 - С. 257-258

Научный руководитель: А.Я. Пак, к.т.н., начальник отдела системных исследований ИК ТПУ

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ЦТП

Ю.Е. Балахнина

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5Б4В

Центральный тепловой пункт (ЦТП) предназначен для круглогодичного обеспечения теплом и горячей водой нескольких совмещенных зданий. Объект исследования расположен в городе Бийск, Алтайского края, по улице Красильникова 227. Включает в себя следующие установки: теплообменники основного и дополнительного контура, насосы, счетчики тепла и воды, электронно-измерительные приборы и запорно-регулирующую арматуру. Центральные тепловые пункты необходимы практически во всех сферах: в жилых и административных зданиях – для горячего водоснабжения и вентиляции, и, пожалуй, самым востребованным является тепловой пункт системы отопления, на промышленных предприятиях – для обеспечения и соблюдения необходимых норм в технологическом процессе.

Уменьшить потери и увеличить эффективность центрального теплового пункта поможет грамотное распределение энергии и автоматизация технологического процесса. Специалистами активно внедряется система удалённого доступа. Данная система позволяет диспетчерам в режиме реального времени видеть параметры теплоносителя (температура, расход, давление) и оперативно принимать меры при отклонении этих значений от нормативных.

Рассматриваемый центральный тепловой представлен на рисунке 1, имеет два контура: первая (основная) и вторая (резервная) очередь. Работает по температурному графику 95/70. Температура подачи воды – 95 градусов, обратной – 70 градусов. Узел ввода и теплоучета представляет собой группу измерительных приборов на входе в центральный тепловой пункт. Для автоматизации была подобрана схема теплового пункта фирмы Danfoss. Стандартные тепловые схемы включают в себя необходимые узлы теплового пункта: узел ввода, узел теплоучета, узел обеспечение гидравлических режимов, узел присоединения горячего водоснабжения и систем отопления, узлы подпитки. Для обеспечения надежной работы оборудования узла ввода, кроме запорного оборудования и грязевика устанавливается дополнительно сетчатый фильтр. При открытой схеме теплоснабжения на обратном трубопроводе ввода устанавливается байпас с грязевиком и фильтром для обеспечения горячего водоснабжения в летний период, когда система отопления бездействует. Компания Danfoss использует в своих схемах теплосчетчики SONOMETER 2000 на базе ультразвукового расходомера SONO 1500 СТ, тепловычислителя СПТ 943.1 и термопреобразователей сопротивления КТПТР-01.

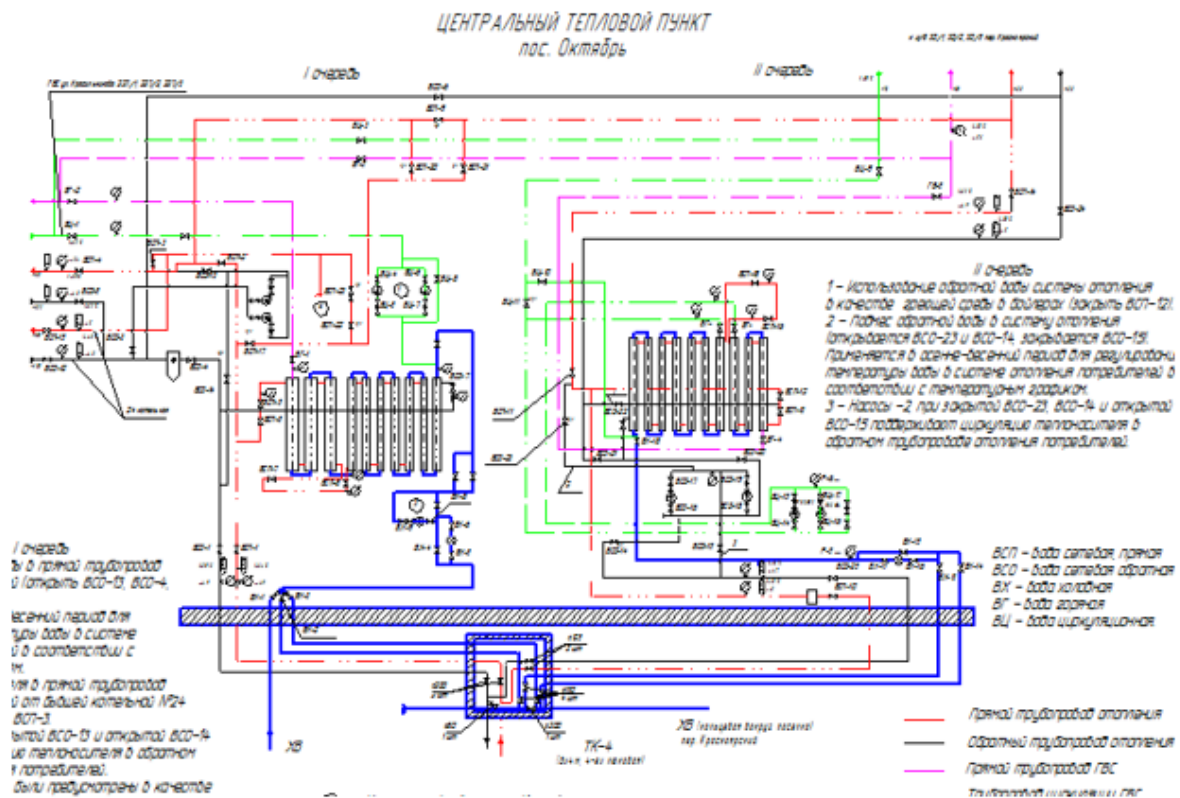


Рис. 1. Схема центрального теплового пункта

Расходомеры устанавливаются на подающем, обратном трубопроводе и трубопроводе системы горячего водоснабжения. Параметры теплоносителя в тепловой сети системы централизованного теплоснабжения центрального теплового пункта:

- Давление в подающем трубопроводе до 1,6 МПа
- Температура теплоносителя в подающем трубопроводе до 150 градусов Цельсия.
- Перепад давлений в подающем и обратном трубопроводе не менее 0,15 МПа.

Также для обеспечения работы теплового пункта необходимо обеспечить гидравлические режимы работы всей системы в целом. Для этого на схеме предусматриваются регуляторы перепада давлений, установленные перед теплоиспользующими системами или регулируемыми клапанами. Эти регуляторы защищают систему теплопотребления от колебаний давлений, обеспечивают оптимальную работу, исключают кавитацию и шумы.

Решения по автоматизации реализуются на электронных, электротехнических и электромеханических средствах. Контроллеры (электронные средства) в автоматическом режиме обеспечивают погодную коррекцию температуры теплоносителя, поддерживают постоянную температуру в сети горячего водоснабжения, ограничивают максимальные и минимальные значения параметров задания температуры теплоносителя, осуществляют мониторинг давлений, архивирования данных и сигнализацию аварийных ситуаций. В качестве таких средств используются контроллеры фирмы Danfoss серии ELC Comfort с различными управляющими ключами. Набор интерфейсных модулей и программ-

ных средств позволит осуществить подключение к большинству современных SCADA-систем.

Электротехнические средства осуществляются в виде электросиловых шкафов и шкафов автоматики и обеспечивают коммутацию электросилового оборудования теплового пункта, индикацию состояния и защитные функции.

Гидромеханические средства обеспечивают поддержание статического давления в системах теплоснабжения, стабилизацию перепада давления и его поддержание.

Щит управления включает в себя элементы индикации, электронный регулятор температуры, элементы питания электросилового оборудования, устройства внутренней логики и кабели. Функциями щита управления будут являться электропитание, управление работой узлов, индикация состояния элементов теплового пункта и переключение между режимами управления. Предложенная схема автоматизации представлена на рисунке 2.

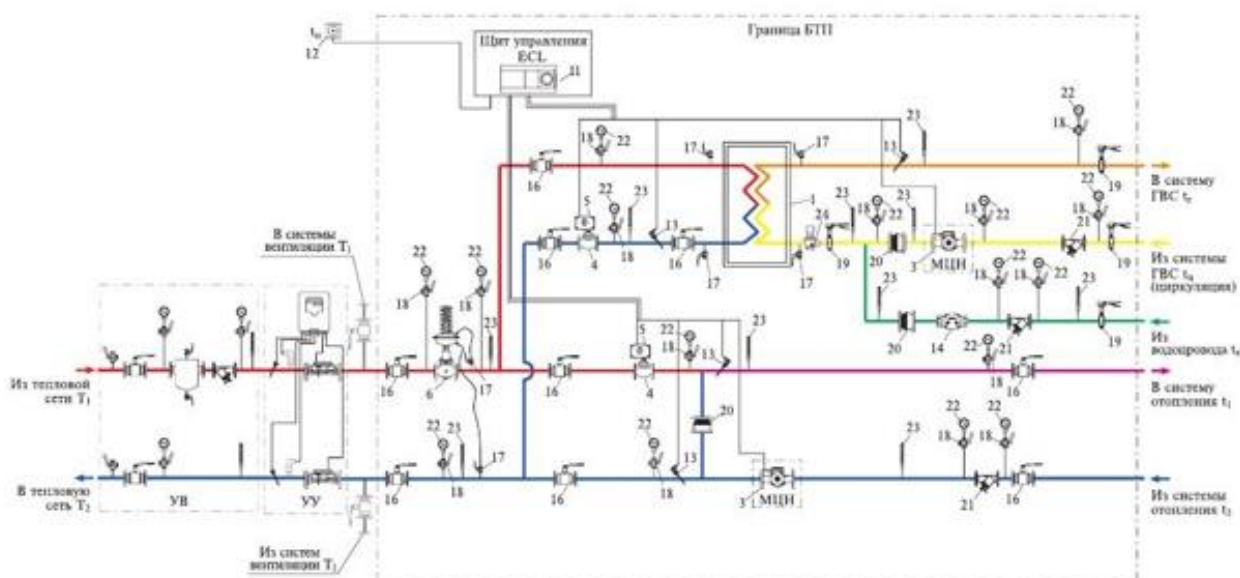


Рис. 2. Схема автоматизации центрального теплового пункта

Заключение

Центральный тепловой пункт – один из главных элементов теплоснабжения зданий, выполняющий функции приема, распределения и учета теплоносителя. Применение автоматизации в производстве способствует решению многих проблем, связанных с повышением качества предоставляемых услуг, обеспечивать существенную экономию тепловой энергии при последующей эксплуатации. Внедрение диспетчерской системы контроля поможет избежать утечек, аварий и потерь на сети. Мониторинг и анализ работы уже действующих автоматизированных тепловых пунктов показал значительное повышение параметров, стабилизацию температуры воды внутри сети, увеличение экономии тепловой энергии в отопительный сезон на 27 процентов, в весенний и осенний период до 40 процентов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Строительные нормы и правила РФ: СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. — М.: Изд. Госстроя России, ФГУП ЦПП, 2004.
2. Правила учета тепловой энергии и теплоносителя. — М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2004.
3. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок. — М.: Изд. Министерства энергетики РФ, 2003.
4. Применение средств автоматизации Danfoss в тепловых пунктах систем централизованного теплоснабжения зданий. RB.00.H5.50. Пособие. — М.: Изд. ООО «Данфосс», 2010.
5. Ключев А.С. Метрологическое обеспечение АСУ ТП: Производственно-практическое издание. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 160 с.
6. Баранникова И.В. Метрология, стандартизация, сертификация в АСУ. — М.: Изд-во МГГУ, 2004. — 91 с.

Научный руководитель: Ю.К. Атрошенко, к.т.н., ст. преподаватель каф. АТП ЭНИН ТПУ.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РОЗЖИГА ГОРЕЛОК КОТЛА ТГМ-84

П.П. Ткаченко

Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа 5Б4В

Котельные агрегаты ТГМ-84 предназначены для получения пара высокого давления при сжигании газообразного топлива или мазута. Котельный агрегат ТГМ-84 вертикально-водотрубный, одnobарабанный, П-образной компоновки, с естественной циркуляцией. Состоит из топочной камеры, являющейся восходящим газоходом и опускной конвективной шахты [1].

Котлы первой модификации ТГМ-84 оборудовались 18 газомазутными горелками, размещенными в три ряда на фронтальной стене топочной камеры. В настоящее время устанавливают либо четыре, либо шесть горелок большей производительности, что упрощает обслуживание и ремонт котлов [1].

Для измерения температуры используются медные термопреобразователи сопротивления ТСМ-50М (по ГОСТ 6651-2009).

Запально-защитное устройство горелок выполнено на базе запальных устройств типа ЗСУ-ПИ-60 и сигнализатора горения типа ЛУЧ-КЭ. Факел горелки контролируется приборами типа ФДСА-3М.

На рисунке 1 изображена структурная схема газопровода с исполнительными механизмами. Данная схема не удовлетворяет требованиям федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности сетей газораспределения и газопотребления» от 15 ноября 2013 года N 542. При данном расположении оборудования нарушаются следующие требования безопасности:

- отсутствуют блокировки взрывобезопасности;
- запорная арматура ГГ-1 и ГГ-2 закрывается более 1 секунды (примерное время закрытия 10 секунд);
- запорная арматура ГГ-1 и ГГ-2 не обеспечивают закрытие при пропадании электроэнергии.

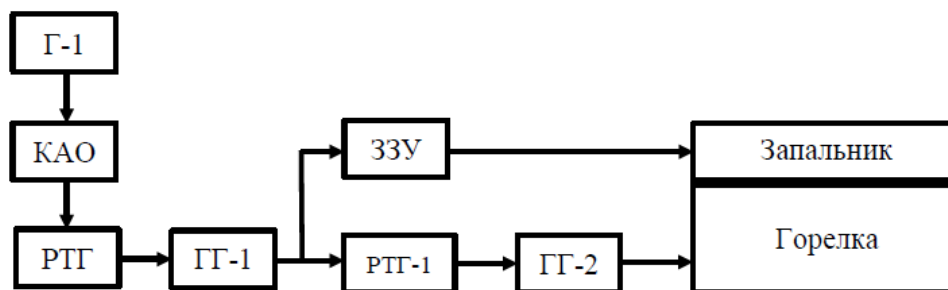


Рис. 1. Структурная схема газопровода с исполнительными механизмами

Основными целями модернизации системы автоматического розжига горелок (САРГ) в части управления оборудованием газоснабжения котла являются:

- обеспечение жесткого соблюдения технологии розжига, сокращение или исключение ручных операций, предотвращение ошибок оперативного персонала при выполнении операций по пуску котла;
- обеспечение дистанционного, автоматического, логического управления и автоматического регулирования технологических процессов;
- повышение точности измерения параметров и обеспечение автоматизации их обработки;
- повышение быстродействия, надёжности и качества управления за счёт внедрения интеллектуальных программируемых логических контроллеров;
- замена морально устаревшего или выработавшего свой ресурс оборудования полевого уровня на современное оборудование.

Управление рабочим оборудованием САРГ осуществляется с автоматизированных рабочих мест (АРМ) расположенных на объединенном щите управления котлов (ОЩУ). Внесение изменений в программное обеспечение в процессе эксплуатации должно осуществляться с АРМ инженера АСУ ТП.

Для сбора сигналов и управления технологическим оборудованием должны быть предусмотрены станции сбора сигналов, которые будут размещены в контроллерных шкафах, располагающихся на ОЩУ, а также в релейном помещении.

Для исключения аварийной ситуации, связанной с отказом программируемых логических контроллеров, должны быть предусмотрены резервированные ПЛК, работающие по принципу горячего резерва с безударным автоматическим переключением. Схема программно-технического комплекса приведена на рисунке 2.

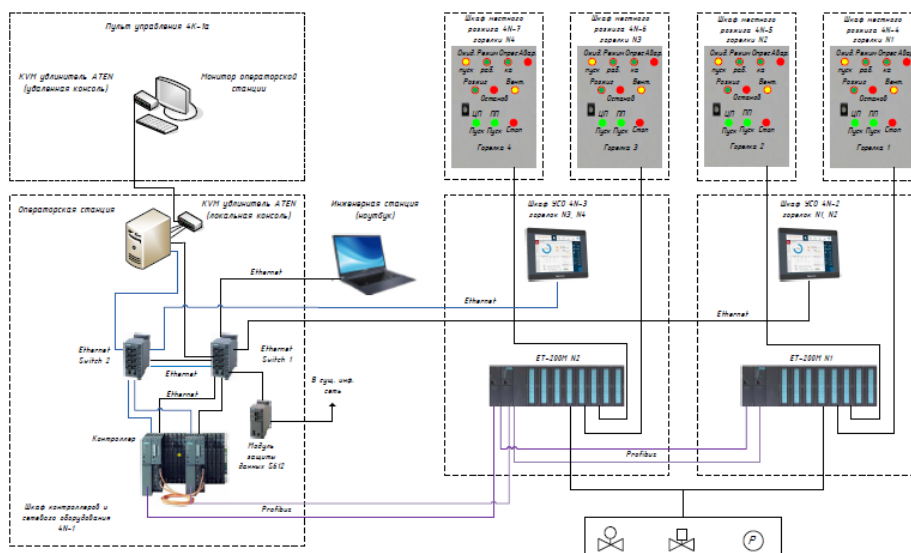


Рис. 2. Структурная схема ПТК

ПТК выполнялся на базе Siemens. Так как на многих объектах уже используются данные контроллеры и модули, которые в реальных эксплуатационных условиях подтвердили свою надежность и качество. Так же уже имеется производственный резерв данного типа оборудования [1].

SIMATIC S7-300 программируемый SIEMENS контроллер стандартного исполнения для эксплуатации в нормальных промышленных условиях для решения задач автоматизации различной степени сложности. Благодаря своим характеристикам этот тип контроллеров был выбран для данного предприятия.

Модули дискретных входов серии 16DI SM321 предназначены для приема входных бинарных сигналов, как правило, от датчиков и их последующей обработки.

Модули дискретных выходов 16DO SM322 предназначены для подачи управляющих бинарных сигналов на исполнительные механизмы или промежуточные реле [3].

Модули аналоговых входов SM331 принимают сигналы от аналоговых датчиков и преобразовывают их в цифровые величины, которые затем обрабатываются центральным процессором. К входам может подключаться пассивные датчики – термопары, термосопротивления и активные датчики с выходными электрическими сигналами в виде напряжения или тока. Модули AI SM 331 имеют настраиваемые входы – могут обрабатывать токовый сигнал, сигнал по напряжению или термопару [4].

Модули выпускаются в пластиковых корпусах. На фронтальной панели имеются:

- зеленые светодиоды – один на каждый вход или выход; отражают, соответственно, состояние входа или выхода;
- красный светодиод – отображает различные ошибки модуля, мигая с разной частотой;
- разъем, в который устанавливается соединитель;
- отделение в крышке, в которое можно установить этикетку с перечнем внешних цепей [3].

Датчики давления выбирались исходя из пределов измерений и необходимых параметров. Датчик серии Метран-150 предназначенный для непрерывного преобразования в унифицированный токовый выходной сигнал и цифровой сигнал в стандарте протокола HART входных измеряемых величин. Этот тип датчика являлся наилучшим решением для поставленных задач.

Расходомер Метран-150RFA предназначен для измерения объемного расхода среды (вода, пар, газ и другие энергоносители) методом перепада давления с использованием осредняющей напорной трубки Annubar 485 в качестве первичного измерительного преобразователя и передачи информации для управления технологическими процессами и использования в учетно-расчетных операциях.

Блок газового оборудования БГ14 ЗАО НПО «АМАКС» в сочетании с системой управления позволяет реализовывать следующие функции:

- обеспечение безопасного розжига с автоматической опрессовкой своих запорных устройств, при котором исключается вероятность загазованности в топке котла и «хлопка» при розжиге;
- регулирование расхода газа;
- отсечку газа без подвода электропитания от внешнего источника при нарушении технологических параметров работы котла, недопустимом отклонении давления газа или воздуха перед горелкой, при погасании факела и др.;
- погорелочное управление котлом;
- рабочая среда – природный газ ГОСТ 5542 с температурой от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура окружающей среды от $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- влажность воздуха до 80% при температуре $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Комплект газооборудования блока БГ14 включает в свой состав:
- два предохранительно-запорных клапана (ПЗК), установленных последовательно;
- опрессовочную гребенку для проверки плотности ПЗК и подачи газа на защитно-запальные устройства (ЗЗУ);
- датчики давления;
- единения продувочного газопровода;
- заслонку дроссельную с электроприводом [5].

Было выявлено, что САРГ позволяет обеспечить жесткое соблюдение технологии розжига, избежать ошибок из-за «человеческого фактора» при выполнении операций по пуску котла. Обеспечивает оперативный персонал достоверной и своевременной информацией о ходе технологических процессов.

Так же несомненным достоинством внедрения САРГ является безопасность, как оборудования, так и персонала, за счет выполнения правил взрывобезопасности. Что приведет к уменьшению количества, аварийных ситуаций и несчастных случаев на производстве.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Калмыков М.В. Конструкция и работа котла ТГМ-84: Метод. указ. / Самар. гос. техн. ун-т; Самара, 2006. 12 с.
2. Автоматизация в промышленности. Каталог Siemens СА01 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sms-automation.ru/distribution/Siemens/catalog/> (дата обращения: 14.07.2017).
3. Промышленные компьютеры SIMATIC IPC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://a2-system.ru/upload/catalogs/siemens/Simatic_IPC_rus.pdf (дата обращения: 04.01.2017).
4. Emerson [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www2.emersonprocess.com/ru-RU/Pages/Home.aspx> (дата обращения: 14.07.2017).
5. АМАКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amaks.ru> (дата обращения 14.07.2017)

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

НЕЙРОСЕТЕВОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ И ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЙ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Т.Н. Круглова, А.С. Власов

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова

При автоматизации и роботизации процесса транспортировки грузов весьма актуальна проблема ориентации мобильного робота в пространстве, а также обнаружение и обход препятствия. В качестве сенсоров обнаружения преград могут выступать лазерные и ультразвуковые дальномеры. Лазерный дальномер обладает большей точностью и высокой стоимостью. Ультразвуковой дальномер доступен по цене, но имеет значительную погрешность, поэтому, для получения адекватного результата управления, произведена его калибровка. Для обхода препятствий целесообразно использовать искусственную нейронную сеть, принцип формирования обучающей выборки которой приведен на рис. 1.

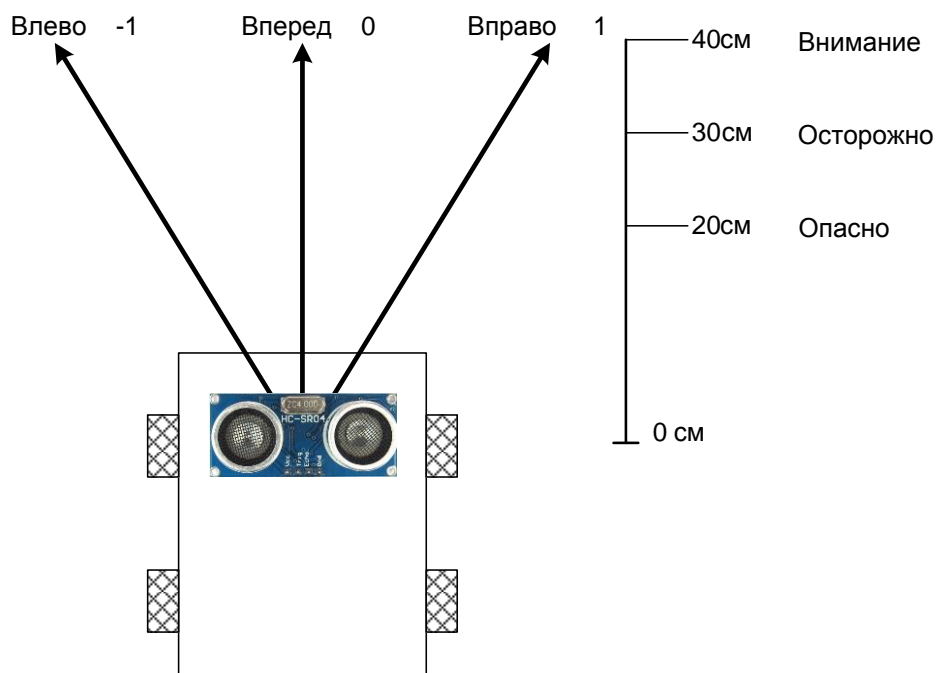


Рис. 1. Определение направлений движения и расстояний до препятствия

В обучении рассмотрены три основных направления движения робота: «Влево», «Вперед» и «Вправо», а также определение расстояний до препятствий:

1. 40 см – это сигнал о том, что мобильный робот приближается к препятствию, и будет иметь обозначение “Внимание”. Этот параметр говорит о том, что скоро нужно будет снизить скорость и произвести поворот, но это расстояние не опасно и можно двигаться с нормальной скоростью;
2. 30 см – этот сигнал имеет обозначение “Осторожно”. Необходимо притормозить и повернуть в сторону.
3. 20 см - этот сигнал имеет обозначение “Опасно”. При этом параметре необходимо затормозить полностью или снизить скорость до минимальной и повернуть.

Для управления объездом необходимо знать скорость и направления движения. Условно скорость задается от 0 до 100, а направление следующим образом:

1. 1 - движение влево;
2. 0 - движение прямо;
3. 1 - движение вправо.

Для реализации поставленной задачи будем использовать сеть прямого распространения сигнала [2], которая имеет 3 входа и 2 выхода. Архитектура искусственной нейронной сети представлена на рис. 2.

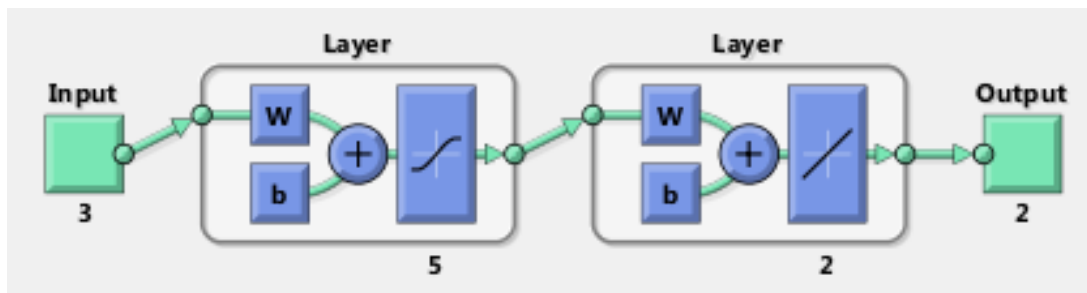


Рис. 2. Архитектура искусственной нейронной сети

Для обучения сети использован алгоритм с учителем Левенберга-Маквардта [1]. В качестве обучающей выборки заданы расстояние до препятствия (вход), скорость и направление движения робота (выходы).

Результат обучения сети приведен на рис 3.



Рис. 3. Результат обучения искусственной нейронной сети

Результаты обучения показаны на рис. 4.

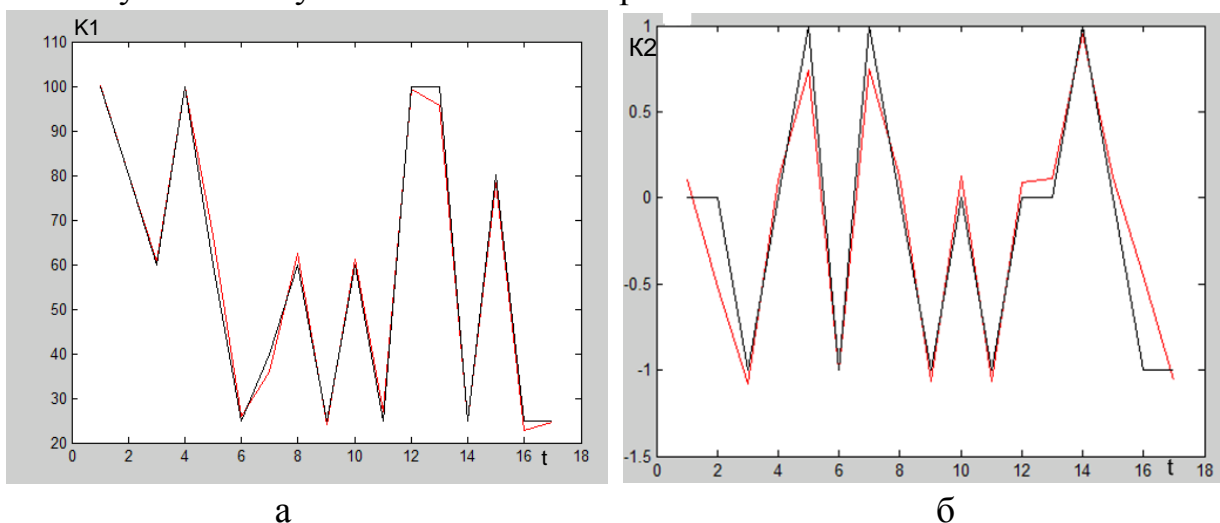


Рис. 4. Результаты обучения сети по установке скорости(а) и определении направления движения(б)

Из приведённых графиков видно, что выход нейронной сети практически повторяет данные обучающей выборки, следовательно, данная нейронная сеть может быть использована для обхода препятствия мобильным роботом, функционирующим в неизвестной среде.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Герман-Галкин. С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. - 368 с.
Нейронные сети. MATLAB 6./Под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.

Научный руководитель: Т.Н. Круглова к.т.н., доцент ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ПРИВОДОМ КОЛЕС И ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОБЪЕЗДА ПРЕПЯТСТВИЙ

А.С. Власов, Т.Н. Круглова

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Применение искусственной нейронной сети для обхода препятствий позволяет разработать систему управления мобильным роботом с дифференциальным приводом колес [1], получив траекторию движения и угол поворота. Эта система показана на рисунке 1.

Общая система управления состоит из:

1. Диаграмм появления препятствий (L, F, R)
2. Искусственной нейронной сети с выходом U и N
3. Модели управления приводом
4. Модели дифференциального привода, состоящего из левого и правого электродвигателя мобильного робота
5. Кинематической модели мобильного робота

Описанная выше система показана на рисунке 1.

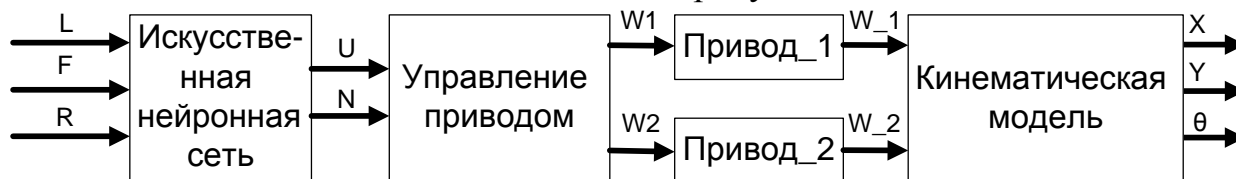


Рис. 1. Общая система управления

На рисунке 1 присутствуют следующие обозначения:

- N – направление движения робота;
- U – скорость движения робота;

W_1 – заданная скорость вращения для привода (Правый);
 W_2 – заданная скорость вращения для привода (Левый);
 W_1 – выходная скорость мобильного робота (Правый);
 W_2 – выходная скорость мобильного робота (Левый);
 X, Y – координаты траектории движения мобильного робота;
 Θ – угол поворота мобильного робота.

Для получения траектории движения и угла поворота была разработана кинематическая модель мобильного робота. В данной модели, робот представлен тремя степенями свободы с вектором:

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}.$$

Тем не менее, мобильный робот может мгновенно перемещаться только в двух направлениях из-за неголономного ограничения. Это ограничение существует в связи с тем, что робот не может иметь скорость параллельную направлению его оси. Таким образом, робот способен двигаться со скоростью V вдоль направления движения колес и вращаться с угловой скоростью ω , но в свою очередь он не может иметь скорость V перпендикулярную скорости движения (проскальзывание). Без учета проскальзывания можно получить следующую математическую модель для неголономного робота:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos\theta, \\ \dot{y} &= V \sin\theta. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \frac{\dot{x}}{\cos\theta} &= \frac{\dot{y}}{\sin\theta} \\ \dot{x} \sin\theta &= \dot{y} \cos\theta. \end{aligned}$$

Таким образом, неголономная система без проскальзывания имеет следующее функциональное ограничение:

$$\dot{x} \sin\theta - \dot{y} \cos\theta = 0.$$

Кроме того, в данном расчете не учитываются внешние силы, такие как трение колес или возможность пробуксовки. Благодаря этому, можно предположить, что робот скользит по поверхности:

$$\dot{x} \sin\theta + \dot{y} \cos\theta = V.$$

Из вышесказанного, кинематическая модель робота выглядит следующим образом:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} & \cos\theta & 0 \\ \dot{y} & \sin\theta & 0 \\ \dot{\theta} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_r \\ w_l \\ 1 \end{bmatrix}$$

Опираясь на данную математическую модель, реализуем ее в среде Matlab [2], где R - радиус колеса, L - расстояние между колесами. И включим ее в общую систему управления мобильным роботом.

Искусственная нейронная сеть имеет архитектуру, показанную на рисунке 2. Она выполняет функцию выбора скорости и направления движения, которую обрабатывает блок логики управления дифференциальным приводом и задает необходимую скорость.

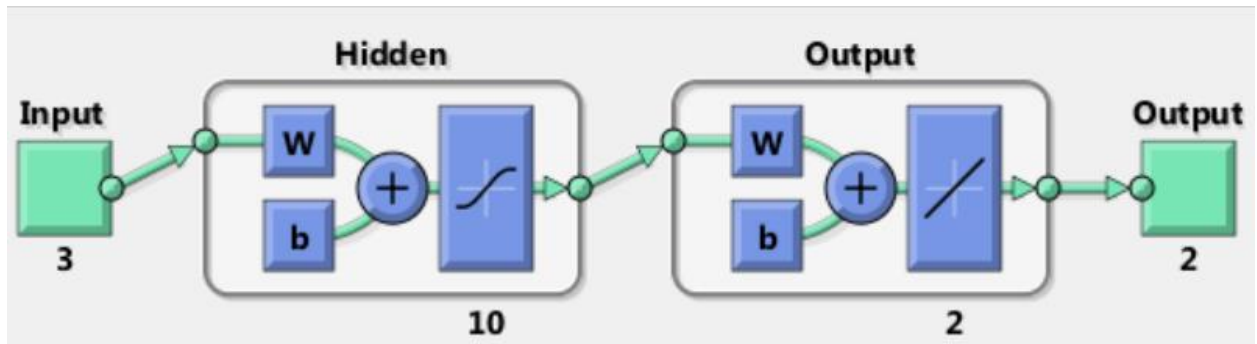


Рис. 2. Архитектура искусственной нейронной сети

На рисунке 3 показана общая модель мобильного робота в Simulink программного пакета Matlab.

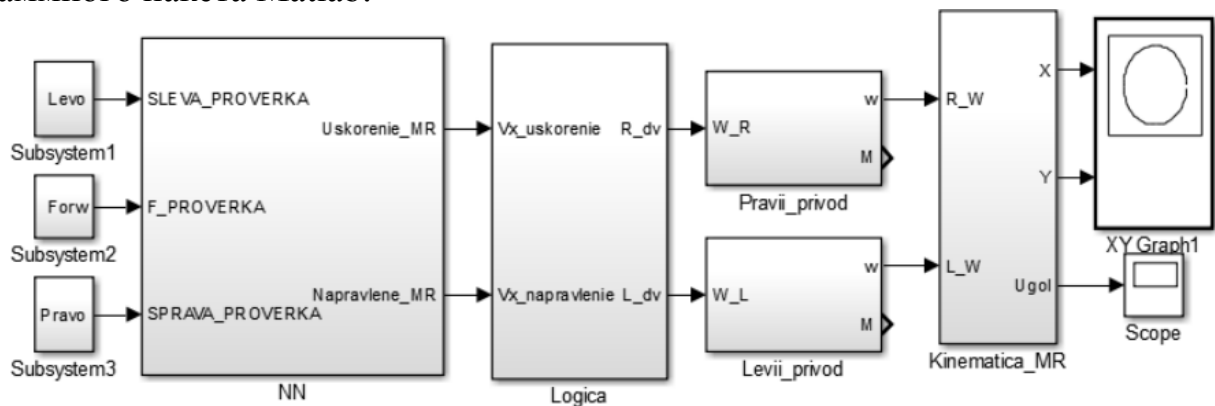


Рис. 3. Общая модель мобильного робота с искусственной нейронной сетью
Результаты моделирования предоставлены на рисунке 4.

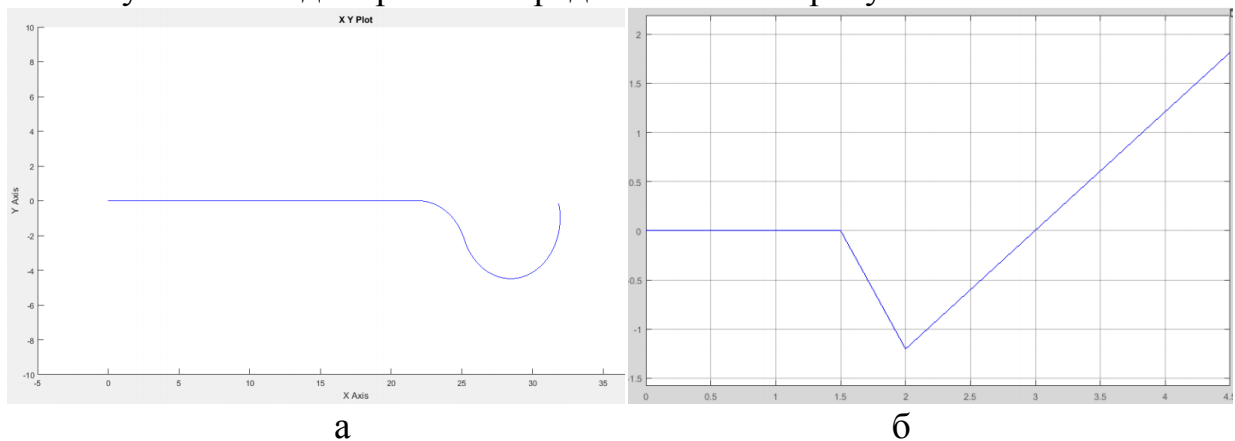


Рис. 4. Результаты моделирования: а)-траектория обхода препятствий; б)- изменения угла поворота

На графике 4(а) показана траектория обхода препятствия, в которой диаграмма появления препятствий описывает появление преграды по центру и слева, а на рисунке 4(б) предоставлен график изменения угла поворота, которые подтверждают работоспособность модели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зенкевич С.Л. Система управления мобильного колесного робота / С.Л. Зенкевич, А.В. Назарова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. 2006. №3. С. 31–51.
2. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. — СПб.: КОРОНА-Век, 2008. - 368 с.

Научный руководитель: Т.Н. Круглова, к.т.н., ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

И.А. Шмелев, С.И. Рыженков, Р.С. Филатов
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова

При автоматизации и роботизации различных технологических процессов весьма актуальна проблема ориентации объектов в пространстве. Для решения этой задачи все чаще используются системы технического зрения (СТЗ), на основе информации от которых формируется алгоритм и программа управления оборудованием.

Современные СТЗ подразделяют по трем основным признакам:

1. по сложности решаемых задач – мощные, средние, малые и персональные;
2. по структуре вычислительного процесса - однопроцессорные, многопроцессорные, системы на базе матричного процессора, системы поточной обработки;
3. по типу первичного преобразователя – одномерные 1D, двумерные 2D, подвижные двумерные K2D и трехмерные 3D.

В настоящее время в зависимости от технической задачи и типа датчиков наибольшее распространение получили 5 вариантов построения СТЗ (табл. 1).

Табл. 1. Варианты построения СТЗ

№ варианта	Тип изображения		Тип вычислительной структуры			Тип датчика	
	плоское	объемное	последовательная	параллельная	смешанная	цветной	черно-белый
1	+	-	+	-	-	-	+
2	+	+	-	М	-	+	+
3	+	-	-	-	МК	-	+
4	+	+	-	К	-	-	+
5	+	+	-	Т	-	+	+

Буквами “М”, “К”, “Т” и “МК” соответственно обозначены архитектуры на базе матричного и конвейерного процессоров, транспьютера, а также использующие смешанный матрично-конвейерный способ обработки данных.

Наиболее распространенной является однопроцессорная структура СТЗ, построения на базе персонального компьютера. Системы такого рода иногда называют персональными или одношинными (рис. 1). Более 80% эксплуатируемых СТЗ относятся к однопроцессорным. В ряде случаев предварительная обработка изображения осуществляется в них аппаратно, с помощью специализированных устройств ввода – фреймграбберов. Однопроцессорная структура имеет существенный недостаток – невозможность обработки сложного (в том числе цветного) изображения в реальном масштабе времени. Относительно низкое быстродействие этих систем обусловлено невозможностью распараллеливания вычислений и отсутствием специальной шины для передачи изображений. Наиболее распространенным путем повышения производительности СТЗ явилась концепция фирмы *Data Translation* (США), предполагающая не только аппаратную фильтрацию изображения, но и использование в устройстве ввода программируемых логических матриц позволяющих изменять алгоритм обработки в зависимости от типа и характера изображения. В большинстве случаев СТЗ на базе персонального компьютера включает в состав управления, а ее обучение осуществляет оператор в ручном или полуавтоматическом режиме.

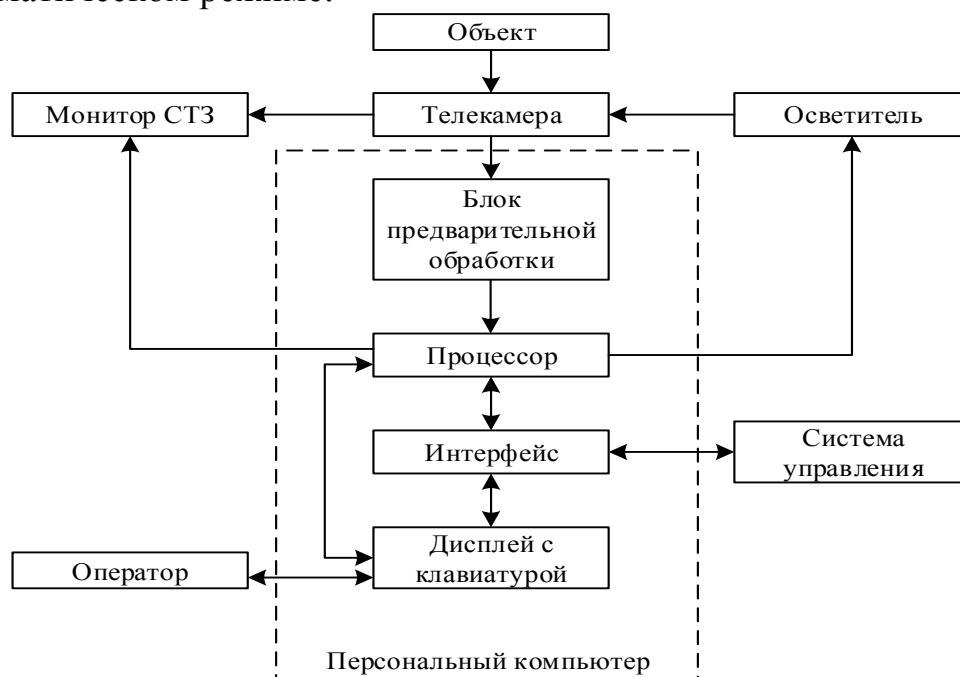
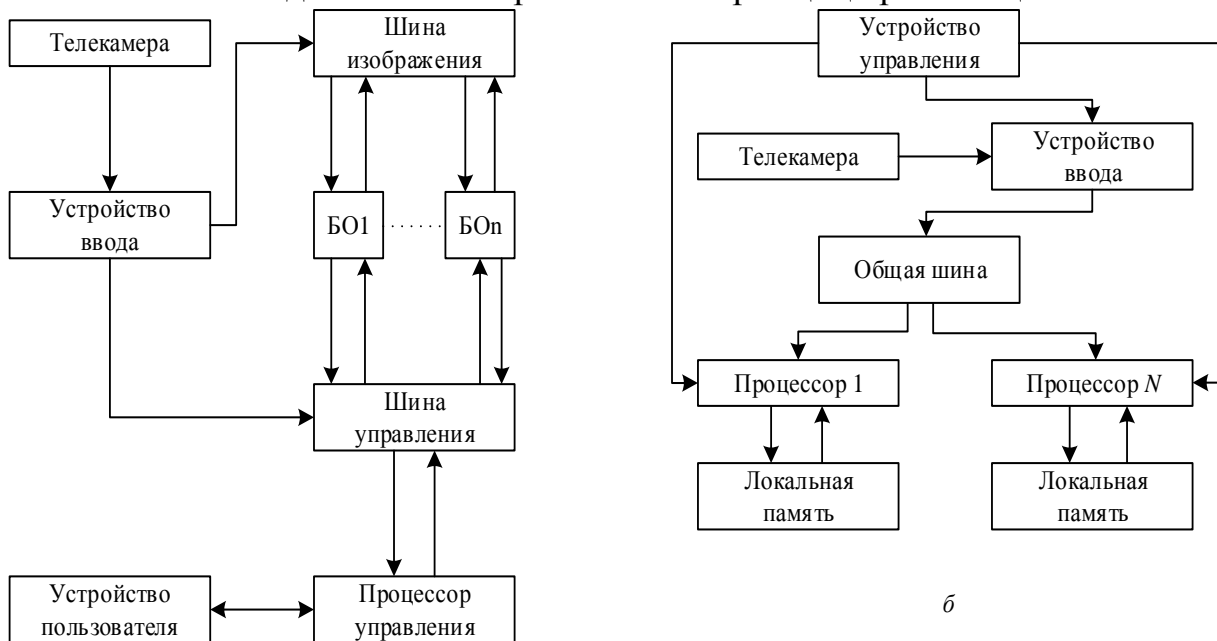


Рис. 1. Структура СТЗ на базе персонального компьютера

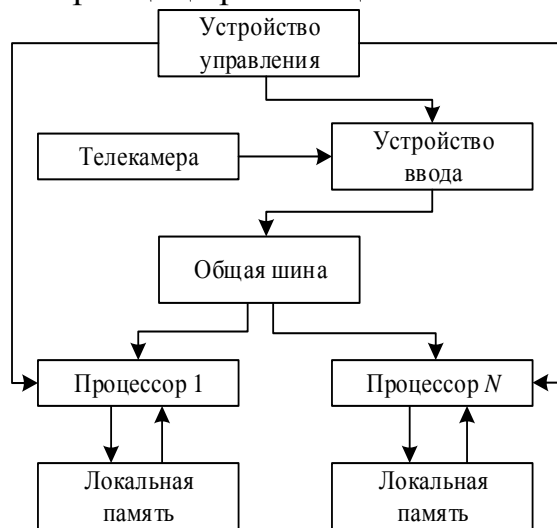
В целях уменьшения времени на пересылочные операции из памяти в процессор и обратно потоки информации разделяют, т.е. создают многошинные структуры. Большинство таких систем имеют две шины (рисунок 2, а) по одной из которых передается видеoinформация (шина изображения), по другой – управляющие сигналы (шина управления). Это позволяет совмещать во времени процесс управления системой и передачу данных. Для повышения

эффективности вычислений СТЗ содержит несколько блоков обработки данных [1].

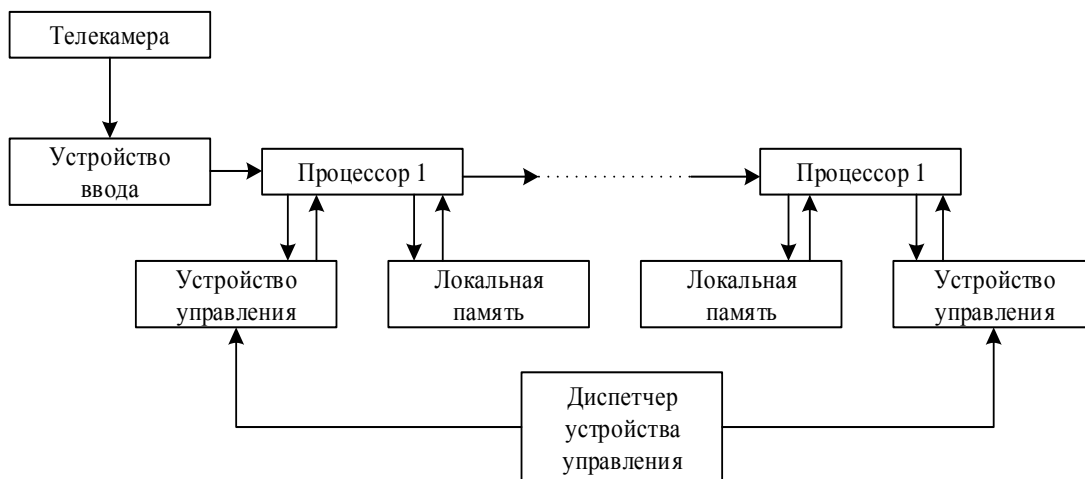
Одно из условий эффективной реализации процесса параллельной обработки – наличие у задачи внутреннего параллелизма, благодаря которому она может быть разбита на отдельные слабозависимые части. В общем случае реализация процесса параллельной обработки требует слишком большого числа вычислительных блоков, поэтому в существующих системах используют смешанный последовательно-параллельный принцип организации вычислений.



a



б



в

Рис. 2. Архитектуры СТЗ: а – двухшинная; б – на основе матричного процессора; в – конвейерная

Система на базе матричного процессора осуществляет параллельную обработку данных при полной загрузке процессоров (рис. 2, б). Такая структура, называемая *SIMD* (*Single Instruction Multiple Data*), представляет собой матрицу процессоров, обладающих собственной локальной памятью и

использующих одно устройство управления. Устройство управления формирует единый поток команд всем подчиненным процессорам, которые одновременно выполняют одну и ту же операцию, но со своими данными. Анализ подобной архитектуры показывает, что для слабозависимых задач она обеспечивает максимальное быстродействие. Очевидным недостатком СТЗ на базе матричного процессора является ее высокая стоимость [2,3].

Системы на базе конвейерной архитектуры, называемой MIMD (Multiple Instruction Single Data), эффективны при обработке массивов данных за длительный период времени (рис. 2, в). В СТЗ конвейерная обработка используется для массивов с большим числом элементов поля и градаций яркости. Конвейер состоит из последовательности процессоров, каждый из которых решает свою группу задач, а конечный результат появляется на выходе последнего из них.

Некоторые модели СТЗ, реализованные в рамках рассмотренных структур, представлены в табл. 2.

Табл. 2. Общая характеристика и области применения промышленных СТЗ

Модель	Уровень СТЗ	Область применения	Тип ЭВМ	Устройство ввода	Размер кадра, элементы
Cybe Icon (США)	Высокий	Космическая съемка	NEC SX-5	Сканер	10000x10000
Magiscan (Англия)	Средний	Биология, медицина	IBM 2900	Специальная телекамера	4096x4096
VS-100 (США)	Средний	Машиностроение, металлургия	IPC-610	Промыш. Телекамера	1024x1024
Камелот-4 (Россия)	Низкий	Охранные системы	IBM PC	Видеокамера	575x767

Обоснование выбора структуры средств СТЗ оказывает существенное влияние на качество работы технологического процесса, позволяет избежать появления брака в производстве, а также аварийных ситуаций в процессе эксплуатации оборудования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. RTCA DO-315 “Minimum Aviation System Performance Standard (MASPS) for Enhanced Vision Systems, Synthetic Vision Systems, Combine Vision Systems and Enhanced Flight Vision Systems”. RTCA, Inc. 2008 [Электрон. текст]. Режим доступа: <http://infostore.saiglobal.com/store/Details.aspx?productID=1113515>.
2. Пряничников В. Е. Алгоритмическое обеспечение дистанционных сенсоров мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008. № 10. - С. 10–21. ISSN 1684-6427.

3. Katalinic B. Industrieroboter und flexible Fertigungssysteme fur Drehteile. 1990, VDI-Verl. Dusseldorf. 246 p.

Научный руководитель: Т.Н. Круглова к.т.н., доцент ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова.

АДАПТИВНОЕ СГЛАЖИВАНИЕ ТРЕНДОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Н.М. Олиферович, М.А. Кашкан, И.Г. Сухорукова, Д.А. Гринюк
Белорусский государственный технологический университет

Существуют два подхода к идентификации первичной информации: параметрический и непараметрический. Параметрические методы основаны на знании модели восстанавливаемой зависимости с определенной точностью. Непараметрические методы идентификации не используют такую модель. Другими словами, для преобразователей с информативным сигналом синусоидальной формы не возникает сложностей с интерпретацией результатов параметрической и непараметрической фильтрации. Временной сдвиг в этом случае можно легко учесть. При сложных моделях динамики сигнала могут возникать погрешности.

Измерительные преобразователи скорости капиллярного впитывания [1] и величины протечки [2] характеризуются сложной динамикой. При использовании конструкции измерительного бумажного конденсатора [3] с чередованием металлизированных и неметаллизированных колец динамика может оказаться еще более сложной. Также бумага имеет стохастический характер расположения каналов движения жидкости, и динамику измерительного преобразователя впитывания трудно прогнозировать. Одним из эффективных методов непараметрической фильтрации может быть метод локальной аппроксимации (МЛА) [4]. Суть этого метода состоит в использовании скользящих локально-параметрических моделей. Для обеспечения максимального качества сглаживания требуется определить порядок локальности и выбрать локально-параметрическую модель.

Наиболее часто на практике для сглаживания применяются фильтры бегущего среднего и низких частот. Практика их реализации хорошо отработана. Фильтры бегущего среднего используются как простейшие формулы

$$y_i = \frac{x_i + x_{i-1} + \dots + x_{i-N+1} + x_{i-N}}{N} \quad (1)$$

так и как формулы с весовыми коэффициентами

$$y_i = \frac{a_i x_i + a_{i-1} x_{i-1} + \dots + a_{i-N+1} x_{i-N+1} + x_{i-N}}{N} \quad (2)$$

при условии

$$a_1 + a_2 + \dots + a_{N-1} + a_N = N$$

где y_i – выход; x_i – текущее измерение; N – порядок (диапазон) усреднения.

Методы локальной аппроксимации могут иметь различные варианты весовых функций. Однако это сопряжено с большими требованиями по мощности вычислений. Для применения в автономном режиме в реальном времени с невысокими требованиями по мощности, приемлемым вариантом является использование прямоугольных финитных функций. В качестве локальных моделей предлагается использовать линейную и квадратичную аппроксимации:

$$y(t)=c_1+c_2t; \quad (3)$$

$$y(t)=d_1+d_2t+d_3t^2 \quad (4)$$

где результат решения системы уравнений

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_2 & w_1 \\ w_3 & w_2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_3 & w_2 & w_1 \\ w_4 & w_3 & w_2 \\ w_5 & w_4 & w_3 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$w_j=(t_1)^{j-1}+(t_2)^{j-1}+\dots+t_N)^{j-1} \quad (7)$$

$$b_j=(t_1x_1)^{j-1}+\dots+t_Nx_N)^{j-1} \quad (8)$$

$$t_k=[0 \Delta t+2\Delta t \dots (N-2)\Delta t (N-1)\Delta t] \quad (9)$$

Δt – время квантования.

Для формирования выходного значения y_i может быть использовано любое значение $t = t_s$ в диапазоне аппроксимации $[0 (N-1)\Delta t]$. В зависимости от величины N и особенности шумов, t_s имеет свое оптимальное значение. Проведенные исследования показали, что

$$|y_i(t_s) - y_s| \quad (10)$$

имеет параболическую зависимость, минимум которой находится в первой половине диапазона аппроксимации, где y_s – истинное значение параметра. При использовании (3) и значении t_s равном половине диапазона аппроксимации, сглаживание будет соответствовать методу бегущего среднего (2).

Зачастую после аналогово-цифрового преобразователя в измерительных данных вместе с шумом первичного преобразователя возникают значения с большими отклонениями. Это является следствием либо внешних импульсных помех, либо наличия паразитивных связей в измерительной схеме. Для борьбы с такими явлениями обычно используют медианный фильтр и т. д. Путем локальной аппроксимации можно также бороться с импульсными помехами типа шпоры. Сравнивая величины отклонения $x_i \dots x_{i-N+1}$ от результатов аппроксимации с некоторыми значениями, можно существенно уменьшить влияние данного типа помех на сглаживание. Обнаруженные плохие значения можно фиксировать и не использовать в последующих аппроксимациях.

Моделирование проводилось с помощью математического пакета MatLab. Генерировались синусоидальный сигнал с разными значениями частоты $[0,0001 \ 0,001 \ 0,01 \ 0,05]$ Гц. Значение времени квантования составляло 1 с. Пер-

вичный сигнал смешивался с шумами различных типов. Сглаживание проводилось с помощью фильтра бегущего среднего, фильтра низких частот, и аппроксимации (3) и (4). В качестве фильтра низких частот (ФНЧ) использовался фильтр Баттерворта 3-го порядка. Частота среза для каждого случая определялась отдельно путем минимизации среднеквадратического отклонения

$$|y_i - y_s| \rightarrow \min. \quad (12)$$

Диапазон для бегущего среднего и аппроксимации выбирался из значений $N = [3, 5, 9, 11, 15, 21, 25]$.

Некоторые из полученных результатов сглаживания различных типов фильтров можно видеть на рис. 1. На графиках представлены варианты работы фильтров с лучшими настройками.

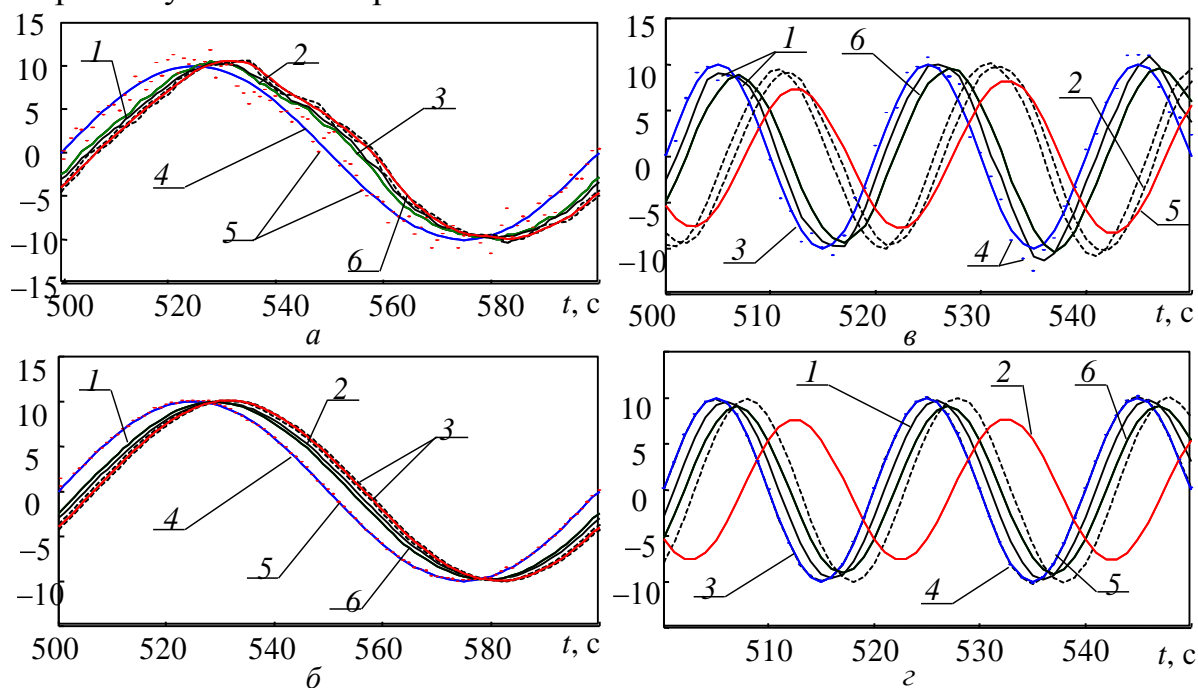


Рис. 1. Сглаживание на частоте 0,01 Гц (а, б,) и 0,05 Гц (в, г) при высоком уровне (а, в) и низком (б, г) уровне шума для различных фильтров: 1 – линейная аппроксимация; 2 – бегущего среднего; 3 – параболическая аппроксимация; 4 – первичный сигнал; 5 - исходные данные; 6 – ФНЧ

Так при минимальной частоте лучшие параметры по сглаживанию дает фильтр низких частот. Но при заметной динамике среднеквадратическое отклонение для параболической аппроксимации становится сравнимым с результатом фильтра низкой частоты. При дальнейшем увеличении частоты, параболическая аппроксимация дает лучшее сглаживание. При компенсации временной задержки отличия от других вариантов становятся значительными. С ростом частоты уменьшается оптимальное окно аппроксимации. Результат линейной аппроксимации дает лучшие результаты на высоких частотах исследованного диапазона и высоком уровне шумов в измерительном канале. Дисперсия отклонения от синусоидальной формы для параболической и линейной аппроксимаций имеет меньшее значение, начиная с частоты 0,001 Гц.

Автономная работа адаптации предполагает проведение постоянных расчетов по линейной или параболической аппроксимации. Результаты моделиро-

вания показали, что окно аппроксимации N не стоит увеличивать более чем на 20. Слежение за коэффициентами d_2 и c_2 позволяет определять текущую динамику и в зависимости от этого осуществлять выбор вида и параметров сглаживания. По причине флуктуации параметров d_2 и c_2 переход на новый вид или параметры фильтра лучше осуществлять с использованием триггерных алгоритмов.

Вычисление величины дисперсии отклонения значений от аппроксимированных кривых не является сложной задачей. Слежение за ней позволяет характеризовать текущие параметры шумов в измерительном канале. Это позволит осуществлять выбор между линейной и квадратичной аппроксимацией и их параметрами. Кроме метода наименьших квадратов могут быть применены другие функции метода МЛА. Использование экспоненциальных и логарифмических зависимостей потребует еще большей вычислительной мощности. Для уменьшения вычислительной мощности может быть использована квадратичная или линейная аппроксимация по методу средних.

Таким образом, использование локальной линейной или параболической аппроксимации позволяет существенно улучшить сглаживание. При этом временная задержка контролируется и может быть исключена при любой форме сигнала. Инструмент линейной или параболической аппроксимации позволяет одновременно следить за динамикой и строить адаптивные схемы. Линейная или параболическая аппроксимации позволяют одновременно контролировать параметры шума, бороться с импульсными помехами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богослав Н.М. Экспериментальное исследование динамики круговой пропитки / Н.М. Богослав, Д.А. Гринюк, И.О. Оробей // Труды БГТУ. – 2013. №6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 99–103.
2. Сухорукова И.Г. Повышение чувствительности измерителя протечек запорной арматуры / И.Г.Сухорукова, Д.А. Гринюк, И.О. Оробей // Труды БГТУ. –2015. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика – С. 132-136.
3. Oliferovich N., Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates / N. Oliferovich, D. Hryniuk, I. Orobei // 2015 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream 2015), Vilnius, Lithuania, 21 April 2015, pp. 1–4.
4. Катковник В.Я. Непараметрическая идентификация и сглаживание данных: метод локальной аппроксимации. – М.: Наука, 1985. – 336 с.

АНАЛИЗ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОШИБОК АЛГОРИТМОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В MATLAB

Д.В. Кузьмицкий, А.В. Косолапов, М.М. Гвоздев
Белорусский государственный технологический университет

В математическом пакете MatLab реализованы различные методы для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Данные методы могут быть как явными, так и неявными. Их реализации названы решателями ОДУ. Решатели реализуют следующие методы решения систем дифференциальных уравнений:

- ode45 – одношаговые явные методы Рунге-Кутта 4 и 5 порядка. Этот классический метод рекомендуется для начальной пробы решения и, обычно, позволяет получить удовлетворительные результаты;
- ode23 – одношаговые явные методы Рунге-Кутта 2 и 3 порядка. При умеренных требованиях к точности решения для нежестких систем метод может иметь преимущество скорости решения;
- ode113 – многошаговый метод Адамса-Башворта-Мултона переменного порядка. Этот адаптивный метод позволяет обеспечить высокую точность решения;
- ode15s – многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5). Этот адаптивный метод обеспечивает высокую точность решения для жестких систем;
- ode23s – одношаговый модифицированный метод Розенброка 2-го порядка. Позволяет обеспечить высокую скорость вычислений для жестких систем при низкой точности;
- ode23t – метод трапеций с интерполяцией. Метод дает хорошую точность при решении жестких задач, описывающих осцилляторы с почти периодическим выходным сигналом;
- ode23tb – неявный метод Рунге-Кутта в начальной стадии решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка в последующем. При низкой точности для жестких систем этот метод может оказаться эффективней, чем ode23s.

Все решатели могут решать системы уравнений явного вида $y' = F(t, y)$. Решатели ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb могут использоваться для решения уравнения неявного вида $My' = F(t, y)$.

Выбор решателя ОДУ зависит от множества факторов. Главный топ - это вид ДУ и его порядок. Также немаловажными являются точность и время. Однако каждый из предложенных решателей в программной среде MatLab дает отклонение от аналитического решения ОДУ. Поэтому очень важно выбрать решатель, который будет давать наименьшее отклонение (ошибку) от аналитического решения ДУ. Рассмотрим отклонение (ошибку) на примере решения ДУ 3-го порядка. Для начала найдем аналитическое решение. Представим ДУ 3-го порядка в операторной форме Лапласа при нулевых начальных

условиях. Для этого используем пакет Simulink программы MatLab. Структурная схема моделирования представлена на рисунке 1.

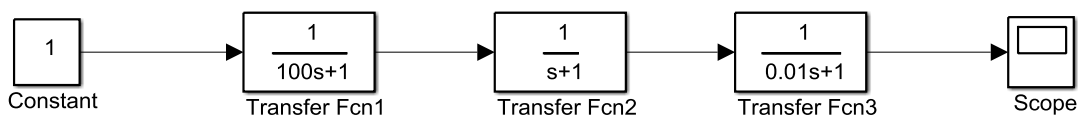


Рис.1. Структурная схема моделирования

Для аналитического решения ДУ воспользуемся изображением и его оригиналом.

Изображение:

$$\frac{1}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)}. \quad (1)$$

Его оригинал:

$$1 - k_1 e^{-\frac{1}{T_1}s} - k_2 e^{-\frac{1}{T_2}s} - k_3 e^{-\frac{1}{T_3}s}. \quad (2)$$

Где коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 найдем по формулам:

$$k_1 = \frac{T_1^2}{(T_1 - T_2)(T_1 - T_3)}; \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{T_2^2}{(T_2 - T_1)(T_2 - T_3)}; \quad (4)$$

$$k_3 = \frac{T_3^2}{(T_3 - T_1)(T_3 - T_2)}. \quad (5)$$

Для представленного ДУ 3-го порядка задавались временем в 1000 с.

Найдем отклонение от аналитического решения ДУ при использовании различных решателей пакета SIMULINK. Отклонения будем искать при точностях: $1e-7$, $1e-5$ и $1e-3$.

Программа расчета

% расчет коэффициентов

$k1=100^2/((100-1)*(100-0.01));$

$k2=1^2/((1-100)*(1-0.01));$

$k3=0.01^2/((0.01-100)*(0.01-1));$

% ряд исследованных погрешностей

$tol0=[1e-7 1e-5 1e-3];$

%Цыкл исследования погрешностей для одного метода численного интегрирования при изменении точности

For $i=1:3$

$tol= tol0(i);$

$sim('eqmMy')$

$Y0=1-k1*exp(-y(:,l)/100)-k2*exp(-y(:,l)/1)-k3*exp(-y(:,l)/0.01);$

%расчет интегрированной погрешности

$err(i)=trapz(y(:,l),(Y0-y(:,2)).^2);$

end

Таким образом, мы получаем три значения расхождения при разных точностях для каждого из решателей. Полученные данные представлены в Таблице 1.

Табл. 1. Значение ошибок для решателей при различных точностях

Решатель	Точность		
	1e-7	1e-5	1e-3
ode23	1,048 1e-5	1,048 1e-5	0,89212 1e-3
ode45	2,83 1e-6	2,83 1e-5	0,24109 1e-3
ode113	1,696 1e-5	1,665 1e-5	1,48766 1e-3
ode15s	1,9 * 1e-11	2,3530 1e-8	0,1381558 1e-5
ode23s	1,5 1e-9	5,835 1e-7	3,79720 1e-5
ode23b	1,1 1e-9	4,528 1e-7	6,69622 1e-5
ode23bt	0,6 1e-8	2,655 1e-7	2,19166 1e-5

Интересным является исследование знака погрешности. Немаловажно в дальнейшем оценить влияние накопления ошибки из-за автоматического выбора системой MatLab шага расчета. Наличие колебательности в передаточной функции, а также элементов переключения может повлиять на адекватность использования того или иного метода в расчетах.

При всех точностях наименьшее отклонение от аналитического решения ДУ 3-го порядка обеспечивает решатель ode15s. Это объясняется тем, что в основе лежит адаптивный метод решения ДУ от 1-го до 5-го порядка. За ode15 следует ode23tb, в основе которого лежит неявный метод Рунге-Кутты. Таким образом, первый шаг при выборе решателя - это вид ДУ и его порядок. Если вид неявный, то используют решатели ode15s, ode23s, ode23t, ode23tb, ode23b. Цифры в названии решателя говорят о том, какого порядка ДУ рекомендуется использовать. Так решатель ode23 и его модификации рекомендуют использовать для решения ДУ 2-го и 3-го порядка. Для решения ДУ 4-го и 5-го порядка рекомендуют использовать решатели ode15 и ode45.

Научный руководитель: Д.А. Гринюк, к.т.н., доцент ХИиТ БГТУ.

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДИСКОВОЙ ПИЛЫ

М.А. Литвиненко, В. Ю. Козловский, Д.П. Шкудун
Белорусский государственный технологический университет

При исследовании динамических систем достаточно часто пренебрегают их размерами, считая, что речь идет о некоторых материальных точках, обладающих определенными физическими свойствами, но не имеющих геометрических размеров. В то же время, существует широкий класс объектов, для которых такое пренебрежение приводит к качественно неверным результатам моделирования. Изучение подобных объектов с распределенными параметрами, должно осуществляться с учетом их пространственной протяженности.

С целью исследования тепловых объектов с рассредоточенными параметрами, был произведен эксперимент с изменением температуры круглой дисковой пилы. Основной задачей проведения эксперимента являлось выявление распределения температурного поля на разогретой круглой дисковой пиле с помощью установки, представленной на рис.1.

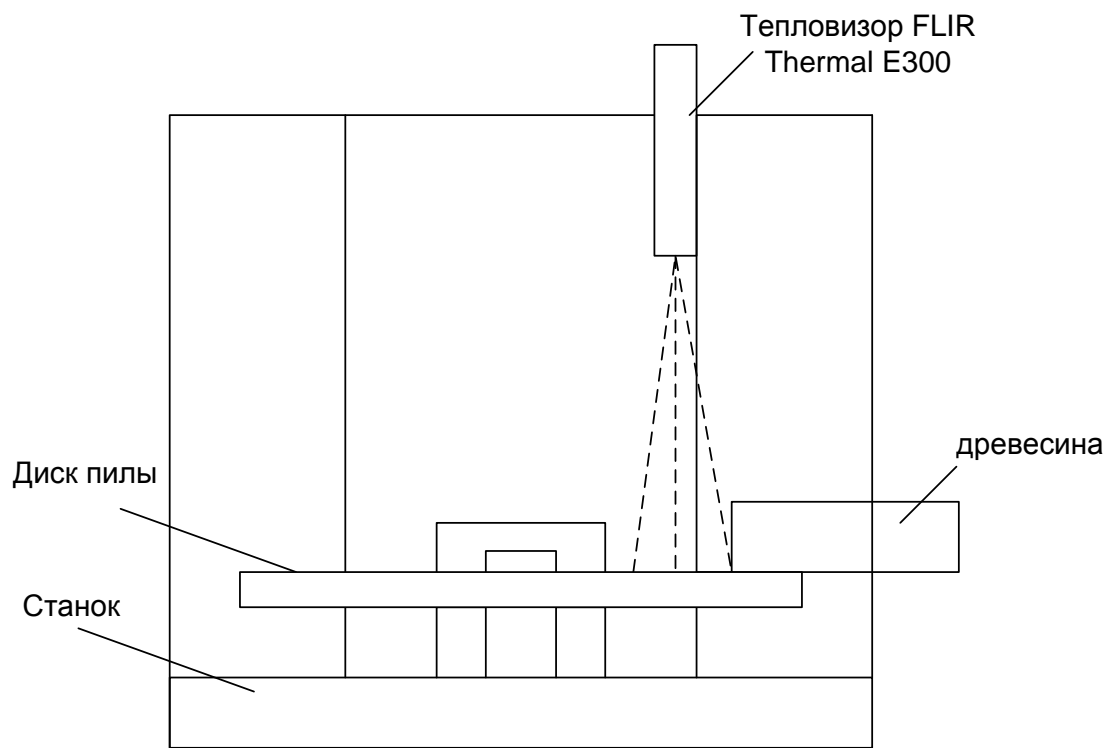


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Установка состоит из станка со специальным шпинделем и круглой дисковой пилы. Станок позволяет регулировать частоту вращения 1000-2000 об/мин. Эксперимент проводился при частоте 2000 об/мин, так как данная угловая скорость является наиболее типичной для реального дереворежущего инструмента

С целью стабилизации температурного режима исследования выполнялись при постоянной скорости. Проводилось два типа экспериментов. В одном случае нагревание происходило только за счет резания, во втором – за счет трения. Результаты распределения температур представлены на рис. 2-3.

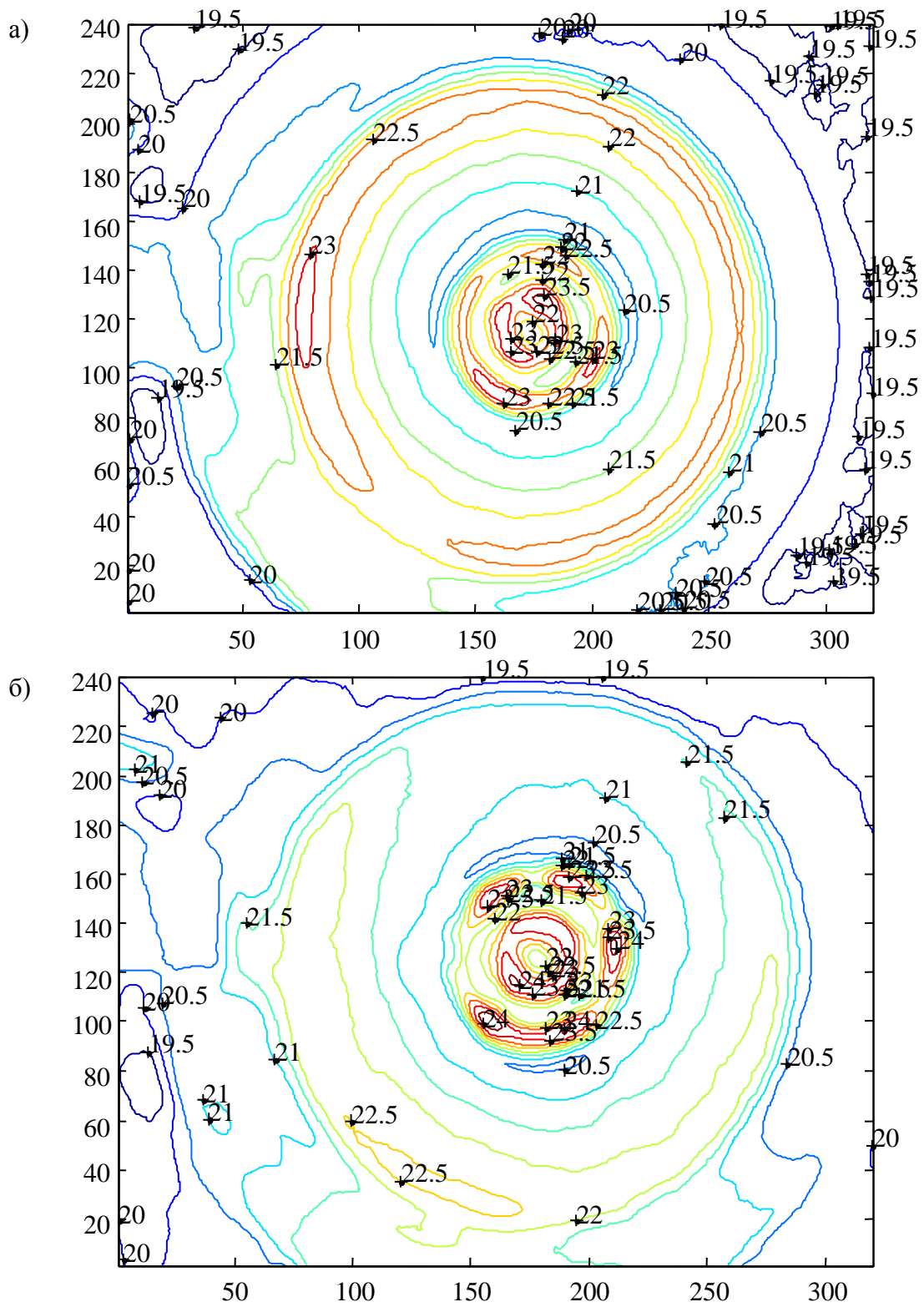


Рис. 2. Трехмерные линии уровня для массивов данных с метками значений (предварительно сглаженные) дисковой пилы в процесса резания:
 а) нагревание и б) охлаждения

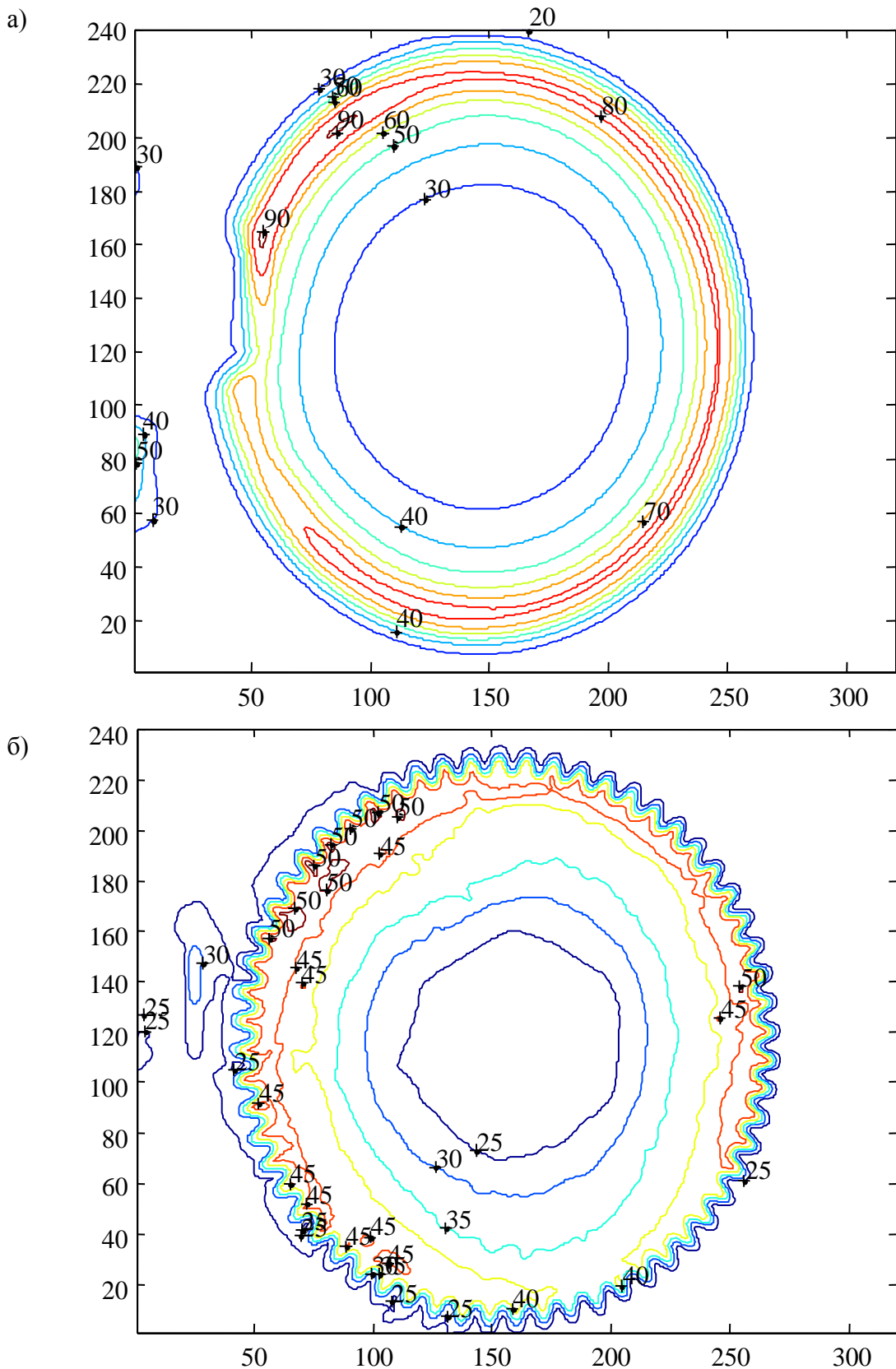


Рис. 3. Трехмерные линии уровня для массивов данных с метками значений (предварительно сглаженные) дисковой пилы в начале процесса трения
 а) нагревание и б) охлаждения

Покадровая расшифровка позволила получить передаточные функции изменения температуры.

Передаточные функции для максимальной и средней температуры в активной зоне, соответственно, при нагревании резанием:

$$W = \frac{3,5}{25p+1}, \quad W = \frac{2}{17p+1} e^{-18p};$$

при охлаждении после резания

$$W = \frac{1,97}{7,25p+1} e^{-15p}, \quad W = -\frac{1,89}{9,75p+1} e^{-15p};$$

при нагревании трением

$$W = \frac{62}{8,5p+1}, \quad W = \frac{45}{16,99p+1};$$

при охлаждении после нагревания трением

$$W = -\frac{23,02}{20p+1}, \quad W = -\frac{22,35}{19,25p+1}.$$

В процессе анализа нагрева и остывания круглой дисковой пилы было установлено, что первый является более динамичным, в то время как второй характеризуется более инерционным процессом.

Полученные передаточные функции также позволяют минимизировать динамическую ошибку в процессе диагностики работы инструмента.

Научный руководитель: Д.С. Карпович, к.т.н., доцент ХТИТ БГТУ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

Г. Токенова, К. Окасова

Государственный Университет имени Шакарима города Семей

Развитие сферы теплоснабжения является актуальным направлением, реализация политики энергосбережения усиливает энергетическую безопасность. В Казахстане развиты централизованные системы теплоснабжения от ТЭЦ, районных, квартальных и групповых котельных и децентрализованное теплоснабжение от местных котельных и печей. [1]

Исследования эффективности работы системы отопления и моделирование условий работы отопительных приборов проводились в лаборатории энергетических систем Государственного университета имени Шакарима города Семей на базе кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика».

Исследования были проведены термографическими методами. Определение температуры воздуха в помещении осуществлялось с помощью гигрометров психрометрических ВИТ-2, которые установлены в каждой учебной аудитории. Для дистанционного определения температуры отопительных приборов

использовался пирометр DT-380-EN-00. Температуры подаваемого и обратного теплоносителя определялись по тепловычислителю, установленному в подвале учебного корпуса. С помощью цифрового термометра периодически определяли коэффициент теплоотдачи наружных стен в разных аудиториях и в разное время суток.

Моделирование условий работы отопительных приборов и системы отопления проводилось на автоматизированной установке «АСО-03» (рис. 1).

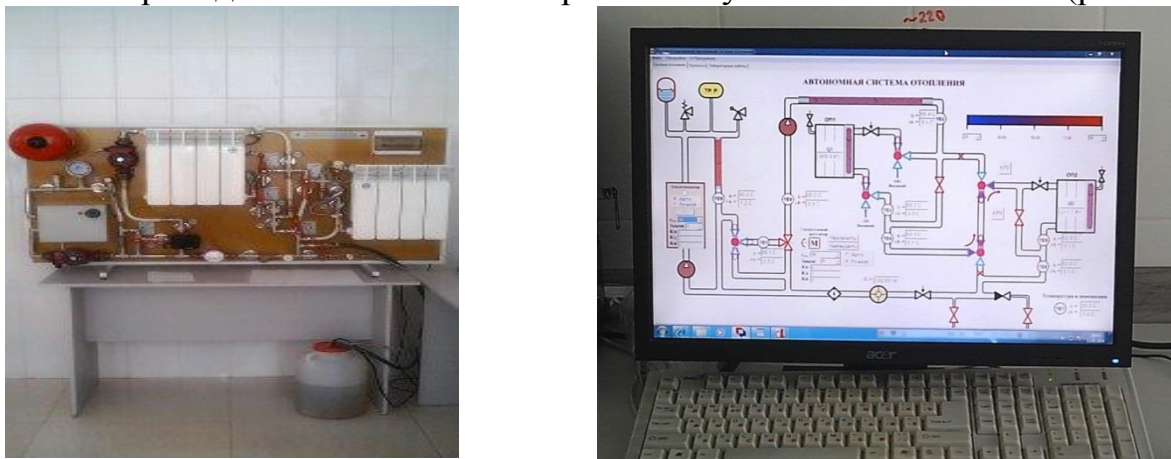


Рис. 1. Экспериментальная установка «Автоматизированная система отопления»

Основными характеристиками любой системы отопления являются номинальная тепловая мощность и температурный график. В экспериментальной установке основными элементами являются: теплогенератор с устройством регулирования температуры, расширительный бак, устройства обеспечивающие безопасность, два отопительных прибора, автоматический регулятор температуры теплоносителя на входе в систему отопления, циркулирующий насос.

На данной установке проводили экспериментальные работы по реализации качественного метода регулирования мощности отопительного прибора и по реализации количественного метода регулирования мощности отопительного прибора.

Отопительные приборы и элементы оборудования соединены трубопроводами и запорно-регулирующей арматурой в схему, позволяющую гибко видоизменять конфигурацию системы в зависимости от постановки задачи эксперимента.

На рисунке 2 представлена гидравлическая схема установки.

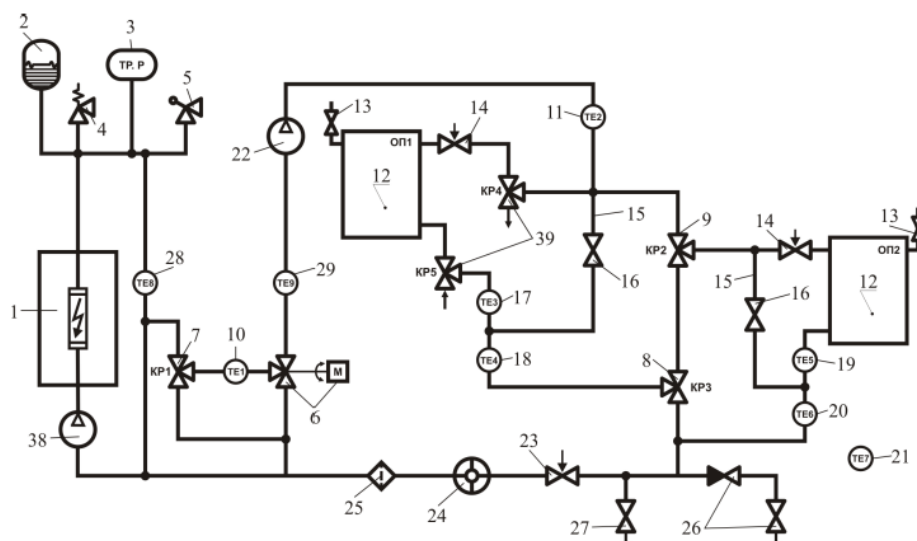


Рис. 2. Гидравлическая схема автономной системы отопления:

1 – теплогенератор с устройством регулирования температуры;

2 – расширительный бак; 3 – манометрический термометр и манометр для измерения температуры теплоносителя на выходе теплогенератора и давление в системе; 4 – предохранительный клапан на 1,5 ати, для аварийного сброса давления из системы; 5 – автоматический паровоздушный клапан поплавкового типа для удаления из воздуха из системы; 6 – автоматический регулятор температуры теплоносителя на входе отопительных приборов смешительного типа с электроприводом; 7 – трехходовой смешительный кран КР1 для ручной установки температуры теплоносителя на горячем входе автоматического регулятора; 8 – трехходовой переключающийся кран КР3, устанавливающий отопительный прибор ОП1 в схему последовательного или одиночного подключения; 9 – трехходовой переключающийся кран КР2, устанавливающий отопительный прибор ОП2 в схему последовательного или одиночного подключения; 10 – датчик температуры ТЕ1 теплоносителя на входе автоматического регулятора 6; 11 – датчик температуры ТЕ2 теплоносителя на выходе автоматического регулятора 6 и на входе отопительного прибора ОП1; 12 – отопительные приборы ОП1 и ОП2; 13 – краны Маевского для удаления воздуха из отопительных приборов; 14 – регуляторы расхода отопительных приборов; 15 – шунтрирующие перемычки отопительных приборов ОП1 и ОП2; 16 – отключающие краны перемычек отопительных приборов ОП1 и ОП2; 17 – датчик температуры ТЕ3 теплоносителя на выходе отопительного прибора ОП1 и внешнего отопительного прибора; 18 – датчик температуры ТЕ4 смеси рабочего и шунтрирующего потоков теплоносителя на выходе отопительного прибора ОП1 и внешнего отопительного прибора; 19 – датчик температуры ТЕ5 теплоносителя на выходе отопительного прибора ОП2; 20 – датчик температуры ТЕ6 смеси рабочего и шунтрирующего потоков теплоносителя на выходе отопительного прибора ОП2; 21 – датчик температуры ТЕ7 окружающего воздуха; 22 – циркуляционный насос контура отопительных приборов; 23 – регулятор общего расхода теплоносителя в контуре отопительных приборов; 24 – счетчик расходомер общего расхода

теплоносителя в контуре отопительных приборов; 25 – фильтр; 26 – узел заполнения системы; 27 – сливной кран со шлангом; 28 – датчик температуры ТЕ8 на выходе теплогенератора; 29 – датчик температуры ТЕ8 на выходе автоматического регулятора температуры теплоносителя в контуре отопительных приборов; 38 – циркуляционный насос контура теплогенератора; 39 – КР4, КР5 трехходовые переключающие краны для включения в систему отопительного прибора ОП1 или внешнего отопительного прибора. [2].

Измерение мощности отопительных приборов заключается в установлении постоянным определенным расходом теплоносителя и в варьировании температурой теплоносителя на входе в отопительный прибор. [2]

Мощность отопительных приборов Q_{np} , кВт, рассчитали по формуле (1):

$$Q_{np} = G_{np} c_p (t_{вх} - t_{вых}) \quad (1)$$

На основании результатов исследований проводились расчеты необходимых величин. Уравнение (3) для определения тепловой нагрузки системы отопления здания $Q_{отопл}$, кВт:

$$Q_{отопл} = q_o a V_n (t_{вн} - t_{нар}) \quad (2)$$

где q_o – удельная отопительная характеристика здания, кВт/(м³·°С);

a – поправочный коэффициент, учитывающий климатические условия района;

V_n – наружный объем здания, м³;

$t_{вн}$ – средняя температура здания внутри помещения, °С;

$t_{нар}$ – расчетная температура наружного воздуха, °С.

Расчетное уравнение (3) для температуры внутреннего воздуха $t_{вн}$, °С, имеет вид:

$$t_{вн} = t_{нар} + \frac{1}{q_o V_n a} \left[Q_{мс} \frac{\left(\tau_1 - \tau_{нар} - \frac{Q_{мс}}{q_o V_n a} \right)}{\frac{1}{2Gc_g} + \frac{1}{k_{co} F_{co}} + \frac{1}{q_o V_n a}} \right] \quad (3)$$

где $t_{нар}$ – температура наружного воздуха, °С;

τ_1 – температура прямой сетевой воды, °С;

G – массовый расход прямой сетевой воды, поступающей из тепловой сети (или теплового пункта) в систему отопления здания, кг/с;

k_{co} – средний коэффициент теплопередачи системы отопления, кВт/(м²·°С);

F_{co} – общая площадь теплоотдающих элементов системы отопления, м²;

$Q_{мс}$ – мощность внутренних тепловыделений (люди, электроприборы, газовые плиты и т.д.), кВт;

c_g – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С).

Автономные системы отопления обеспечены автоматическими устройствами регулирования теплового потока – термостатами. Термостатические

вентили в автоматическом режиме, при отклонении температурных показателей от заданного температурного режима, влияют на качественно-количественные показатели теплоносителя. [3]

Регулирование теплового режима дает возможность избегать резких перепадов температур в помещении и за его пределами. Возможность перенастраивать количество теплового потока важна не только в целях поддержания температурного комфорта, но также можно усовершенствовать процесс нагрева помещения, а во многих случаях и осуществить значительную экономию средств и энергоресурсов. Эффективное использование отопительных приборов, при оперативном регулировании параметров теплоносителя, позволяет также продлить срок их эксплуатации

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алияров Б.К. д.т.н., Алиярова М.Б. к.т.н., Ерекеев О.К. к.т.н. Основные проблемы теплоснабжения в Республике Казахстан // «Новости Теплоснабжения». - 2003. - № 11.
2. Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по курсам «Теплоснабжение», «Отопление и отопительные системы», «Теплотехнические измерения» и «Автоматизация систем отопления» с использованием лабораторного комплекса «Автономная система отопления». Челябинск, 2011 - 30 с.
3. Классификация отопительных приборов // Ремонт и установка систем отопления URL: <http://www.abcotoplenie.ru/> (дата обращения: 31.03.2014).

Научный руководитель: А.Н. Шалаганова, старший преподаватель, Государственный Университет имени Шакарима города Семей.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ

В.А. Стаблецкий, М.П. Морозова, Д.П. Шкудун
Белорусский государственный технологический университет

В современных условиях большое распространение получили непрерывные технологические процессы большой мощности со сложными комплексами энергетических и материальных потоков. Все реальные объекты управления, в которых протекают данные процессы, характеризуются определенной пространственной протяженностью, и как следствие этого, не только зависимостью управляемых величин от времени, но и распределенностью по пространственной области, занимаемой объектом. По сравнению с системами с сосредоточенными параметрами принципиально расширяется класс управляющих воздействий, прежде всего за счет возможности включения в их число пространственно-временных управлений. В роли управляемой величины в такой ситуации

необходимо рассматривать все пространственное распределение функции состояния объекта, т.е. ее значение во всех точках занимаемой объектом пространственной области на всем протяжении процесса во времени. При исследовании динамических систем достаточно часто пренебрегают их размерами, считая, что речь идёт о некоторых материальных точках, обладающих определёнными физическими свойствами, но не имеющих геометрических размеров. В то же время, существует широкий класс объектов, для которых такое пренебрежение приводит к качественно неверным результатам моделирования. Изучение подобных объектов — с распределёнными параметрами — должно осуществляться с учётом их пространственной протяженности.

Основными формами представления распределённых объектов (систем), как и в случае систем с распределёнными параметрами, являются представление в виде дифференциальных уравнений в частных производных, представление в виде передаточных функций, представление в виде временных характеристик, представление в виде частотных характеристик.

Температура является распределённым параметром и часто используемым параметром при управлении технологических процессов. Изучение процесса теплопроводности, т.е. процесса передачи тепла от одной части тела к другой или от одного тела к другому, находящемуся в соприкосновении с первым, по своей сущности требует применения специального математического аппарата.

Методика проведения эксперимента. С целью исследования аспектов управления тепловыми объектами с распределёнными параметрами разработан стенд (рис. 1). Он состоит: из вентилятора, который обеспечивает конвективный теплообмен; железного стержня, помещенного в пластиковую трубу; электрического нагревателя, который может греть один из концов стержня. Центральным элементом электронной части стенда является контроллер Arduino. К нему подключено пять датчиков температуры, четыре из которых контролируют температуру по длине стержня, а пятый температуру воздуха на выходе. В объекте имеются в наличии две возможности изменения гидродинамических и температурных режимов работы объекта: изменения частоты вращения вентилятора, изменения мощности на нагревателе. На базе Arduino была реализована система стабилизации частоты вращения, температуры около нагревателя, которая одновременно позволяла выдавать информации о текущей частоте. Гидродинамику около стержня формировали с помощью компьютерного вентилятора F8015S-3 (1600 об / мин). Информацию о температуре получали с помощью датчиков КТУ 81/110.

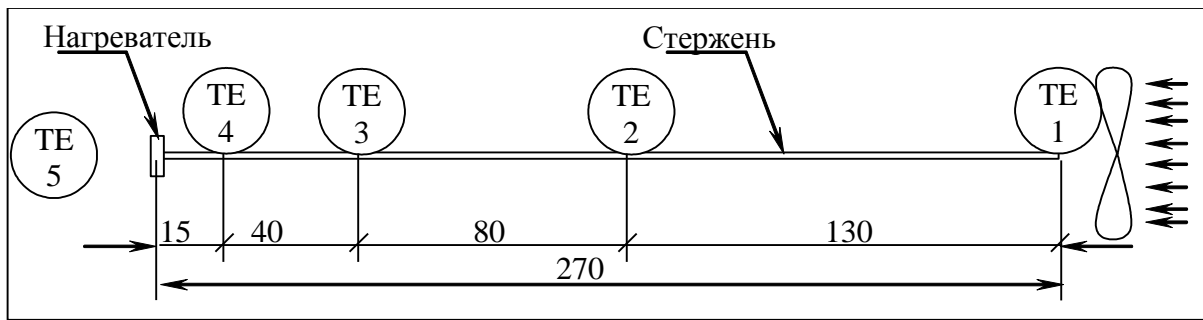


Рис. 1. Геометрия стенда

Поскольку объект является распределенным параметром. Исследования динамики производилось поэтапно для каждого управляющего воздействия с разбиением всего управляющего диапазона на 3-4 отдельных диапазона. Между тактами активного эксперимента делали выдержки времени для установления стационарности процесса. Делались отдельные такты по увеличению управляющего параметра так и по его уменьшению. Результаты проведения активного эксперимента передавались на компьютер для математической обработки и адаптации к модельным решениям. Примеры переходных процессов можно видеть на рис. 2.

Переходные процессы аппроксимировались передаточными функциями вида путем минимизации среднеквадратического отклонения (СКО) поисковым алгоритмом.

$$W(p) = \frac{kp}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)^n} \quad (1)$$

и

$$W(p) = \frac{k}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} \exp(-\tau p) \quad (2)$$

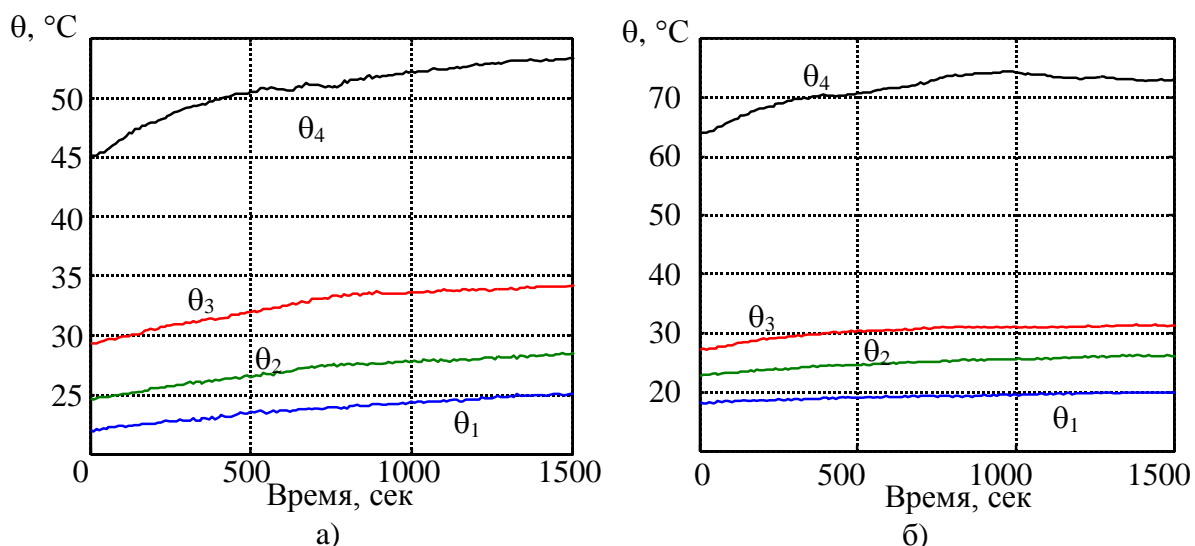


Рис. 2. Динамика температуры в разных точках: при изменении с частоты 0% на частоту 25,5 % (а); при изменении температуры нагревателя с 312 °С до 270 °С

Использование формулы (1) приводило к меньшим значениям СКО чем при (2). При этом, чем больше n тем меньше СКО (таблица 1). Проявление динамики точек в зависимости от расположения относительно нагревателя раз-

личны. Анализ Таблица 2 по соотношению между T_1/T_2 показывает, что передаточная функция (1) не является универсальной. Для датчика у нагревателя вторя постоянная времени практически не проявляется.

Таблица 1. СКО между экспериментальными данными и аппроксимацией.

n	1	2	3	5	9
θ_1	1,516794	1,48784	1,83319	1,48171	1,48363
θ_2	1,860959	1,66836	2,58108	1,55669	1,52769
θ_3	2,041848	1,67723	3,43745	1,51361	1,48421
θ_4	8,110907	8,11090	8,11090	8,11090	8,11090

Таблица 2. Соотношение между постоянными времени T_1/T_2 .

n	1	2	3	5	9
θ_1	14,8790	30,435	70,717	72,7962	137,709
θ_2	7,63766	16,179	42,417	40,5791	72,6777
θ_3	3,22534	7,2336	27,599	19,2987	36,3326
θ_4	1,4304e+09	1,4304e+09	1,4304e+09	6,7047e+08	9,6688e+08

Заключение. Выбор точки контроля температуры существенно влияет на вид оптимальной передаточной функции аппроксимации. Использование нескольких датчиков температуры позволяет восстановить профиль распределения температуры, может позволить проинтегрировать выделяемую мощность и применить данный параметр для использования в системах управления и стабилизации.

Научный руководитель: Д.А. Гринюк, к.т.н., доцент ХтиТ БГТУ.

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ

В.В. Иванов, О.В. Захаров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

В настоящее время координатно-измерительные машины (КИМ) получили широкое применение в промышленности для измерения размеров, формы и расположения поверхностей деталей. Точность и производительность измерения на КИМ зависит от применяемой стратегией выбора числа, расположения точек и последовательности их обхода на измеряемой поверхности. На практике, как правило, требуется измерить одну или несколько поверхностей детали с заданной погрешностью и максимальной производительностью [1, 2].

Научное обоснование для выбора числа и расположения контрольных точек на различных типах поверхностей отсутствует, поэтому имеются сложности в практике измерения. Рекомендации производителей КИМ и программного обеспечения носят общий характер и касаются лишь минимального числа контрольных точек для поверхностей (плоскость, цилиндр, сфера и др.). В связи с этим данный вопрос решается непосредственно оператором КИМ и во многом зависит от его квалификации.

В статье представлена методика анализа влияния числа и расположения точек на точность и производительность измерения, построенная на основе метода статистических испытаний Монте-Карло. Эффективность применения этого метода показана в работе [3]. При стабильном технологическом процессе изготовления деталей закон распределения погрешностей в партии заготовок будет постоянным, а его параметры изменяются незначительно [3, 4]. В качестве объекта исследований выбрана цилиндричность, так как такие поверхности имеются на значительном числе деталей машин и механизмов.

Последовательность моделирования по предложенному методу следующая. На основе экспериментальных данных моделируются погрешности на цилиндрической поверхности. Для этого устанавливается закон и параметры распределения погрешностей, а также при необходимости наличие корреляционных связей между отдельными составляющими погрешности. Для партии деталей проводится многократное моделирование погрешностей с применением генератора случайных чисел и последующего преобразования в требуемый закон распределения. Затем по стандартной методике ISO 12180-2:2011 рассчитывается значение цилиндричности. Рассматриваются четыре варианта расположения контрольных точек. В первом варианте используется равномерная сетка по окружности и длине цилиндра, во втором – разреженная по линейному параметру (длине), в третьем – разреженная по угловому параметру (окружности), в четвертом варианте – равномерно разреженная сетка контрольных точек. Сравнение вариантов проводится по среднему значению и стандартному отклонению цилиндричности в моделируемой партии деталей. Кроме того, при задании допуска на цилиндричность могут быть рассчитаны измерительные ошибки первого и второго рода.

По результатам измерения цилиндра диаметром 50 мм и длиной 100 мм построены отклонения для четырех указанных вариантов (рис. 1). Погрешности увеличены в 500 раз. В варианте 1 были использованы 110 контрольных точек с равномерным разбиением по линейному параметру через 10 мм и угловому параметру через 36° . Остальные варианты были получены путем исключения ряда контрольных точек из варианта 1. Обработка результатов проводилась в программной среде Matlab.

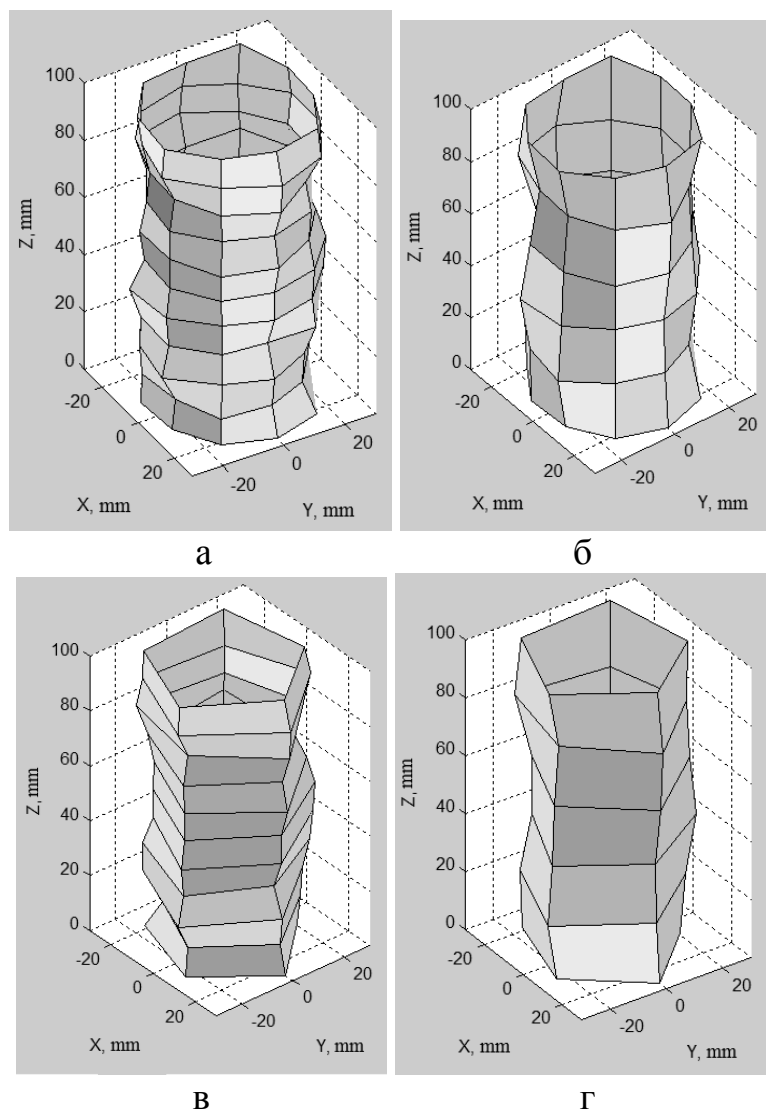


Рис. 1. Контроль цилиндричности: а – 110 точек (вариант 1), б – 60 точек (вариант 2), в – 55 точек (вариант 3), г – 30 точек (вариант 4)

Проведено моделирование контроля цилиндричности для партии из 50 деталей. Результаты показаны на рис. 2, обозначение вариантов расположения измеренных точек на поверхности соответствует рис. 1. Анализ результатов (рис. 3) показал, что контроль по 30 точкам (вариант 4) по сравнению с контролем по 110 точкам (вариант 1) дает заниженное значение среднего арифметического на 21 % и увеличение стандартного отклонения на 16 %. Характерной будет измерительная ошибка второго рода. Если для полученных данных принять, что допуск цилиндричности составляет 11 мкм, то по результатам контроля получаем процент брака для варианта 1 равным 27 %, а для варианта 4 – 4 %. В случае неравномерной сетки наилучший результат дает вариант 3. Расчетная величина брака составляет 10 %. Производительность по сравнению с вариантом 1 повышается более чем в 2 раза.

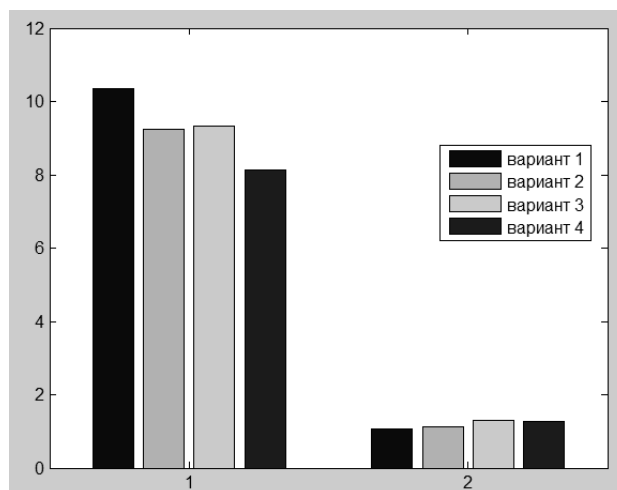


Рис. 2. Сравнительная диаграмма цилиндричности: 1 – среднее арифметическое, 2 – стандартное отклонение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что число и расположение контрольных точек значительно влияет на результат измерения цилиндричности. При уменьшении числа измерений увеличивается вероятность измерительной ошибки второго рода. Рекомендуется использовать неравномерную сетку контрольных точек, что обеспечит выигрыш по производительности при минимальной потере точности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гречников Ф.В., Захаров О.В., Королев А.А. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223-225.
2. Печенкин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В., Янюкина М.В. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 18-23.
3. Štrbac B., Radlovački V., Ačko, B., Spasić-Jokić V., Župunski Lj., Hadžistević M. The use of Monte Carlo simulation in evaluating the uncertainty of flatness measurement on a CMM. JPE (2016) Vol.19. pp. 69-72.
4. Захаров О.В. Формообразование сложных поверхностей с применением адаптивных систем контроля / О. В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2014. - 256 с.

Научный руководитель: О.В. Захаров, д.т.н., профессор ИнЭТМ СГТУ им. Гагарина Ю.А.

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ТРУДНОДОСТУПНЫХ УЧАСТКОВ ДЕТАЛЕЙ НА КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

А.С. Яковишин, О.В. Захаров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Значительное число деталей, в первую очередь, авиационной, ракетной, автомобильной промышленности имеют сложные поверхности, в том числе с труднодоступными участками для контроля. К таким поверхностям относят поверхности с периодическим профилем (зубчатые, шлицевые, винтовые, крыльчатки и др.), валы со ступенчатыми отверстиями и различными выточками. В ракетной технике примерами могут служить детали в виде диска турбины (рис. 1) и вала ротора (рис. 2).

Для контроля сложных поверхностей деталей широко применяют координатно-измерительные машины (КИМ) [1-5]. КИМ позволяют осуществлять комплексный контроль размеров, формы и расположения поверхностей деталей. Однако при контроле труднодоступных участков контактным методом могут возникать следующие проблемы:

1. недоощупывание некоторых участков поверхностей;
2. ложные срабатывания датчика касания при контакте с другими поверхностями при подводе или отводе;
3. сложность подвода датчика касания по нормали к измеряемой поверхности;
4. нерациональная траектория перемещений датчика касания при измерении.

С практической точки зрения первые две проблемы во многом решаются применением щупов большой длины и с малыми диаметрами сферического наконечника. Другие же проблемы требуют совершенствования алгоритмов измерения на основе научного подхода. Если детали имеют достаточно точно обработанные базовые и измеряемые поверхности с малыми отклонениями от 3D-модели, то традиционные алгоритмы обеспечивают хорошие результаты. Например, хорошо зарекомендовали себя алгоритмы с компенсацией расположения поверхностей по минимуму расстояний профилей и значений кривизны для лопаток компрессора ракетных двигателей [4, 5]. В противном случае целесообразно применять адаптивный алгоритм измерения, в котором после определенного числа измерений вносятся коррекция в процесс виртуального базирования и траектории подвода датчика касания [1].

Предлагается следующий адаптивный алгоритм измерения деталей с труднодоступными участками поверхностей (рис. 3). Его основная идея состоит в том, что после некоторого числа измерений проводится повторное виртуальное базирование детали, позволяющее уточнить траектории перемещения датчика касания.

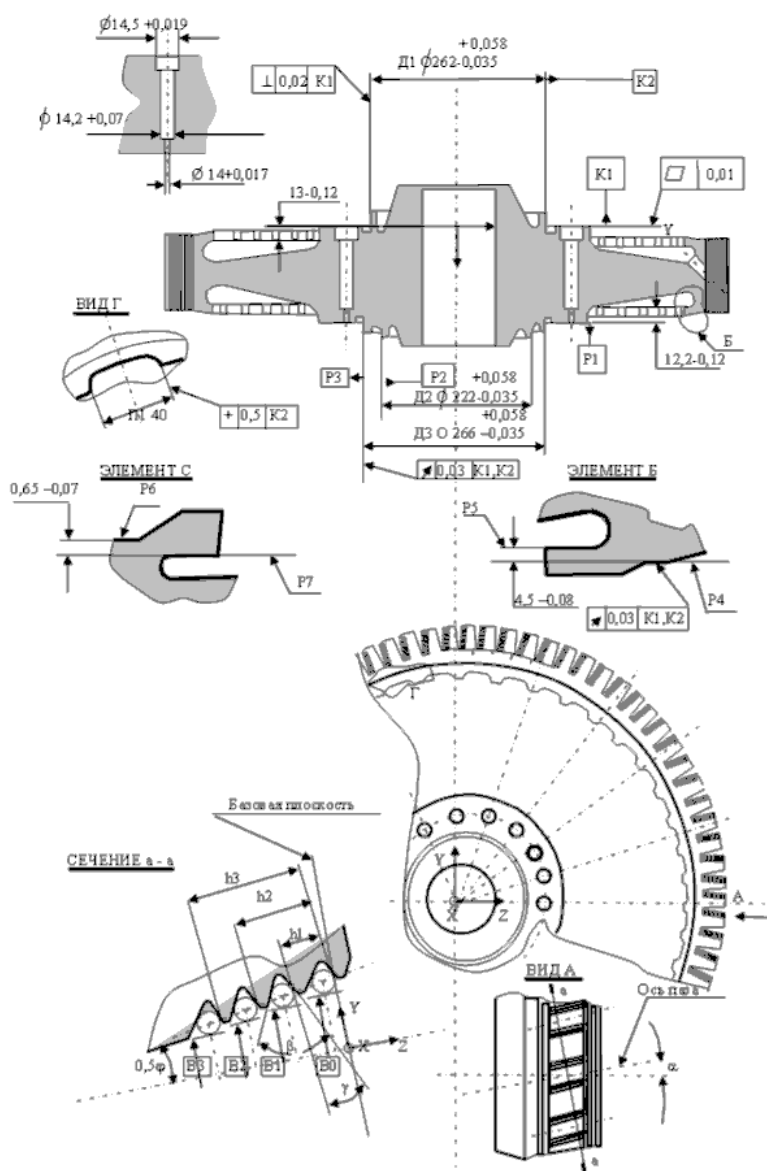


Рис. 1. Диск турбины первой ступени [2]

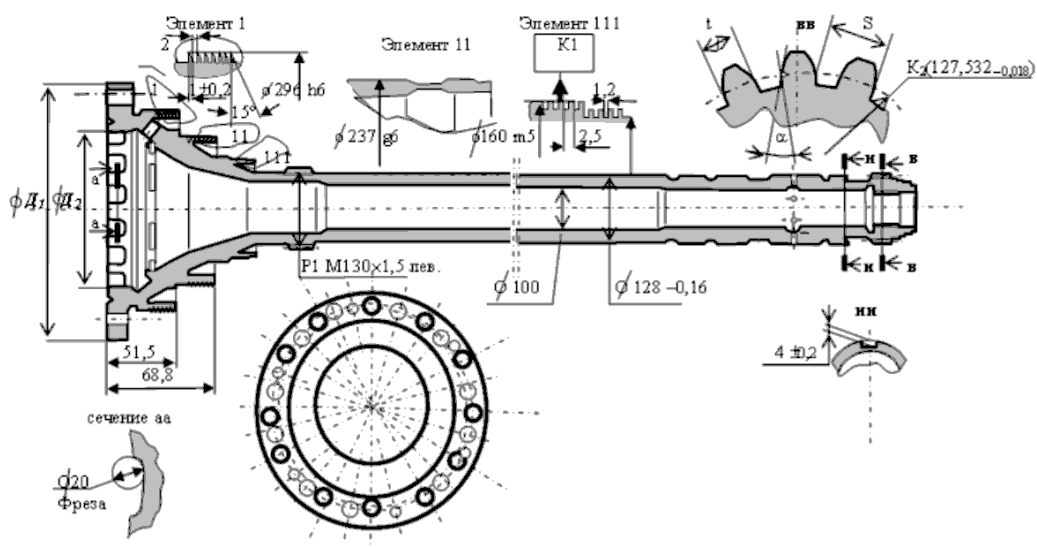


Рис. 2. Вал ротора низкого давления ГТД [2]

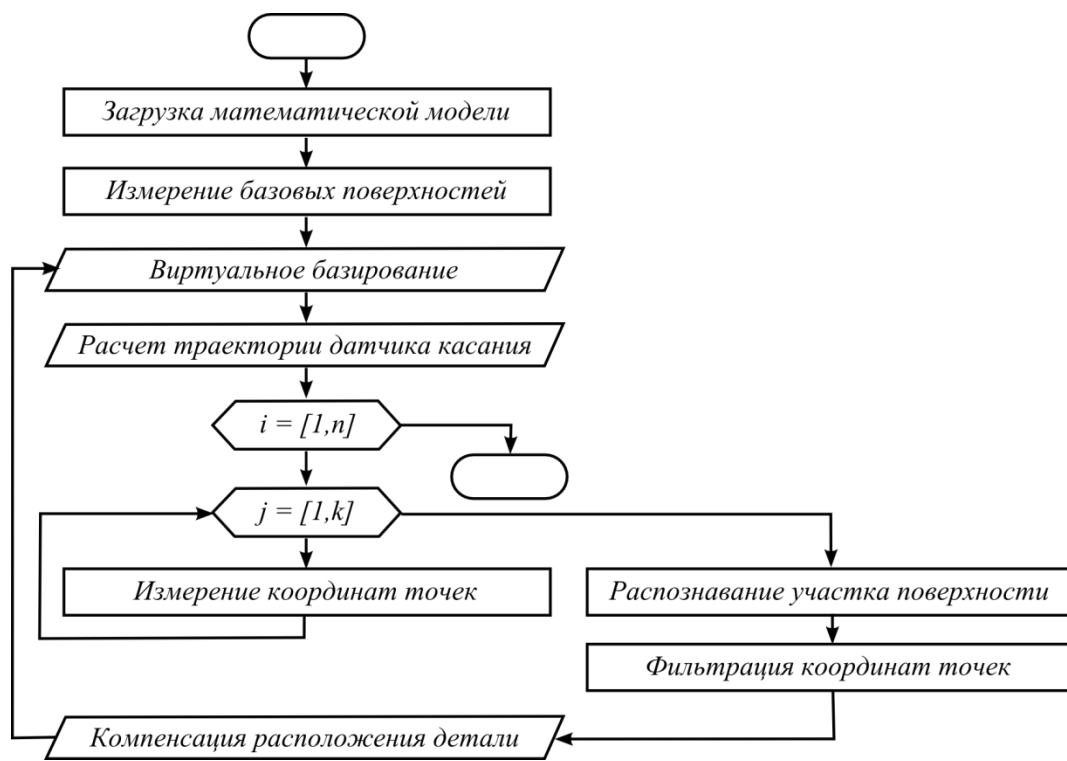


Рис. 3. Схема адаптивного алгоритма контроля

Кластеризация измеренных точек целесообразно проводить по значению их кривизны. После фильтрации и нормирования значений кривизны проводится распознавание элементов профиля. Перед проведением кластеризации осуществляется фильтрация значений кривизны с использованием фильтра Гаусса, позволяющая отсеять точки с выпадающими из общего фона значениями кривизны. Алгоритм k -средних предполагает минимизацию суммарного квадратичного отклонения точек кластеров K от их центров:

$$K = \sum_{j=1}^k \sum_{r_i \in S_j} (r_i - m_j)^2 \rightarrow \min$$

где S_j – полученные кластеры, k – число кластеров, m_i – центры масс кластеров.

Алгоритм k -средних разбивает множество элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров k . Идея алгоритма заключается в том, что на каждой итерации заново вычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы вновь разбиваются на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике [6].

На следующем этапе проводится компенсация расположения поверхностей относительно первоначального виртуального базирования. Для этого последовательно выполняются повороты и перемещения системы координат детали для наилучшего вписывания измеренного облака координат точек. Расчет ведется с помощью векторно-матричных преобразований координат по методике, изложенной в [2].

Далее при необходимости вносятся коррективы в траекторию перемещения датчика касания для минимизации проходимого пути и подвода к измеряе-

мой поверхности по нормали. Эта отдельная задача, решаемая на основе известных алгоритмов координатной метрологии [7].

Таким образом, разработанный адаптивный алгоритм контроля труднодоступных участков сложных поверхностей деталей позволяет распознавать измеряемые участки поверхности, изменять виртуальное базирование детали и корректировать траектории перемещения датчика касания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гречников Ф.В. Направления повышения производительности и точности контроля сложных поверхностей на координатно-измерительных машинах / Ф.В. Гречников, О.В. Захаров, А.А. Королев // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта. Москва: ИПУ РАН, 2016. С. 223-225.
2. Захаров О.В. Формообразование сложных поверхностей с применением адаптивных систем контроля / О.В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2014. 256 с.
3. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей: учебник / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев. Самара: Изд-во СГАУ, 2012.
4. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями / В.А. Печенкин, М.А. Болотов, Н.В. Рузанов, М.В. Янюкина // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 18-23.
5. Болотов М.А. Повышение точности оценки отклонения расположения в координатных измерениях профилей лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5-3. С. 202-211.
6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
7. Кононогов С.А. Координатная метрология / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко. М.: АСМС, 2010. 380 с.

Научный руководитель: О.В. Захаров, д.т.н., профессор ИнЭТМ СГТУ имени Гагарина Ю.А.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПОДГОТОВКИ КОМПОЗИЦИОННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА К СЖИГАНИЮ В ТОПКЕ КОТЛА

Д.П. Шабардин
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП

В настоящее время не существует комплексных установок по производству и сжиганию ИКЖТ, большинство существующих решений представляют собой разомкнутые системы с точки зрения теории управления, а также отсутствуют автоматические системы управления производством и сжиганием ИКЖТ [18]. Однако существуют автоматические системы производства ВУТ, а также системы топливоподачи ВУТ. Рассмотрим некоторые из них с целью выделения наиболее подходящих, а также объединения в одну автоматизированную систему производства и сжигания ИКЖТ.

Приготовление ВУТ осуществляют в несколько этапов. Для начала необходимо получить угольную крошку с фракцией 10–12 мм. Дробление осуществляется на стандартных дробилках (молотковых, щёковых и т.д.). Так как в качестве сырья для приготовления ИКЖТ будем использовать угольный шлам, фильтр-кек или уголь с мелкой фракцией, то данную стадию исключим из системы приготовления ИКЖТ.

Помол до фракции 100–150 мкм осуществляется в присутствии воды в оборудовании мокрого помола. Данный этап является ключевым при приготовлении ИКЖТ, поскольку определяет дальнейшие характеристики ИКЖТ (грансостав, вязкость, стабильность и т.д.). Здесь же в состав ИКЖТ могут добавляться различные отходы производства (такие как отработанные масла) а также пластификаторы и стабилизаторы.

Самым популярным оборудованием мокрого помола являются специально спроектированные вибромельницы различных модификаций, где помол угля осуществляется мелющими телами (шарами, стержнями) в присутствии воды. На сегодняшний день рынок вибромельниц для мокрого помола весьма ограничен единичными моделями. В РФ это в основном мельницы типа ВМ-200 и ВМ-400 производительностью по эталонному продукту до 2,5 т/ч (до 500 мкм), по ВУТ — не более 1,5 т/ч. Основным недостатком вибромельниц являются высокие энергозатраты на приготовление ВУТ [1].

Серьезным недостатком вибромельниц также является крайне неоднородный состав продукта помола, который содержит и переизмельчённые частицы и, напротив, слишком крупные зерна. Поэтому в большинстве технологических схемах производства в основном используется замкнутый цикл помола, когда полученная суспензия подвергается сепарированию с последующим домолом крупных зерен. Все это усложняет технологический процесс и увеличивает себестоимость ВУТ [1].

Сырой уголь дробится на фракции размером до 10 мм и направляется на термообработку при температуре 400 °С. Далее он смешивается с водой и из-

мельчается в шаровой барабанной мельнице, затем поступает в сепарирующее устройство, из которого готовый продукт с фракциями размером менее 200 мкм направляется на обеззоливание и после добавки поверхностно-активных веществ поступает в емкости для хранения. Надрешетный продукт попадает на дополнительное измельчение в мельницу и, пройдя сепарацию, направляется также в технологический цикл на хранение [2].

Очевидно, что данная схема не является наилучшей основой для приготовления ИКЖТ, так как содержит излишнее и энергозатратное оборудование, такие как дробилка, шаровая и стержневая мельницы, что усложняет схему и удорожает продукт.

Помимо вибромельниц в качестве измельчителя можно использовать диспергаторы. Диспергаторы по принципу действия бывают: ультразвуковые, ротор-статор, плунжерные (высокого давления). Диспергатор менее энергозатратное оборудование чем вибромельницы.

Так как вращающиеся шаровые, вибрационные мельницы, диспергаторы, кавитаторы с их эффектом внутренней сепарации реализуют помол истиранием, сопровождающийся большим расходом энергии, нагревом, высоким абразивным износом мелющих тел, с точки зрения рационального использования подведенной энергии для разрушения таких материалов целесообразней использовать быстрый удар.

Один из вариантов реализации данной идеи является гидроударная установка мокрого помола (ГУУМП). В ее состав входит дисковый затвор, шнековый дозатор угля, устройство мокрого помола дезинтеграторного типа, насос на выдачу продукта и устройство вентиляции приемного бункера [3].

Для измельчения минерального сырья в ГУУМП используется свободный удар. Частицы угля, сталкиваясь с ударными элементами корзин-роторов, получают мощные разнонаправленные удары, интенсивность которых увеличивается по мере продвижения материала к выходу камеры помола. Вода в реализуемом способе измельчения является не только проводником кинетической энергии удара, но и снижает прочность твердого тела, облегчая его разрушение.

Поскольку энергия удара пропорциональна массе частицы угля и ее квадрату скорости, по достижении частицами определенных размеров их дальнейшее измельчение прекращается. Таким образом, ГУУМП позволяет получать водоугольную суспензию требуемого гранулометрического состава с минимальным содержанием переизмельченных частиц и полным отсутствием крупных зерен в открытом цикле помола без использования сепараторов.

При производстве ИКЖТ обязательно используют различные добавки (отработанные масла, пластификаторы, отходы мазута и др.). При использовании ГУУМП смешение производится в кавитационном роторно-импульсном аппарате (РИА). Использование РИА позволяет эффективно внести их и перемешать с водой до процесса мокрого помола [3].

Водоугольное топливо является жидким топливом и имеет вязкость, немного превышающую вязкость мазута: примерно 800-1000 МПа·с по сравнению с 400-440 МПа·с (до 44 мм²/с) у мазута. Соответственно, подача КЖТ в топку котла осуществляется аналогично мазуту, но через форсунки, специально

разработанные для суспензионных топлив. Форсунки должны быть устойчивы к абразивному истиранию частицами угля, поэтому имеют специальную конструкцию [3].

Сжигание ВУТ осуществляется в несколько основных этапов: прогрев топки, переход на водоугольное топливо, рабочий режим. При режиме прогрева топки происходит запуск иницирующей топки для доведения значений температуры в топке до уровня, при котором происходит сгорание ВУТ при помощи дизельного топлива. Далее происходит переход на водоугольное топливо: включается компрессор для продувки топливопровода и форсунки, затем происходит подача топлива из емкости ВУТ при помощи насосов. После этого остается только поддерживать заданную температуру путем регулирования подачи воздуха в топку и подачу ВУТ [5].

В данном случае необходим циркуляционный контур, предназначенный для поддержания стабильности состава ВУТ. Так как ОВУТ является более стабильной суспензией, то нет необходимости применения этого контура.

В настоящее время существует несколько способов сжигания ВУТ: в кипящем слое, факельное сжигание в предтопках, комбинированное факельное сжигание с другими видами топлива. Сжигание в кипящем слое является не самым эффективным из-за большого процента недожога, однако в этом случае не требуются специальные мероприятия по модернизации топочной камеры [5].

Факельное сжигание ВУТ осуществляется по классической схеме: топливо подаётся под давлением через распыляющую форсунку, аналогично мазуту. Распыление ВУТ может производиться как сжатым воздухом, так и паром — выбор производится в зависимости от типа котла и условий в котельной. Полностью самостоятельное (автономное) сжигание ВУТ позволяет иметь только один источник энергии (уголь) и, следовательно, снизить затраты на содержание топливного хозяйства. Однако, полностью автономное горение на существующих котлах, как правило, возможно при использовании предтопок. При их использовании удлиняется траектория факела ВУТ, особенно в начальной фазе, где происходит нагрев капель ВУТ. Это позволяет снизить объём зоны горения ВУТ. С целью поддержания стабильного температурного режима, предтопки изготавливают теплоизолированными (адиабатическими).

При использовании факельного сжигания такие параметры ВУТ, как соотношение твёрдое/жидкое, тонина помола, а также вязкость ВУТ должны быть как можно ближе к проектным значениям с целью сохранения стабильного воспламенения и горения ВУТ и сохранения высоких эксплуатационных характеристик котла (КПД, количество выбросов и др.)

Комбинированное факельное сжигание с другими видами топлива наиболее приемлемо при использовании ВУТ на уже существующих объектах, особенно на угольных котлах. ВУТ подаётся в котёл через одну или несколько форсунок. В случае газомазутного котла второе топливо (газ или мазут, а также уголь) подается через другую горелку.

К преимуществам комбинированного сжигания можно отнести простоту схемы, её масштабируемость для использования на котлах малой, средней и большой мощности. Кроме того, комбинированное сжигание характеризуется

минимальными сроками и стоимостью внедрения при одновременной организации стабильного горения ВУТ. Наличие второго топлива снижает требования к качеству подготовки ВУТ [5].

Основываясь на информации, описанной выше, можно создать систему производства и сжигания ИКЖТ, используя наиболее удачные технические решения. Разработанная схема представлена на рисунке 1.

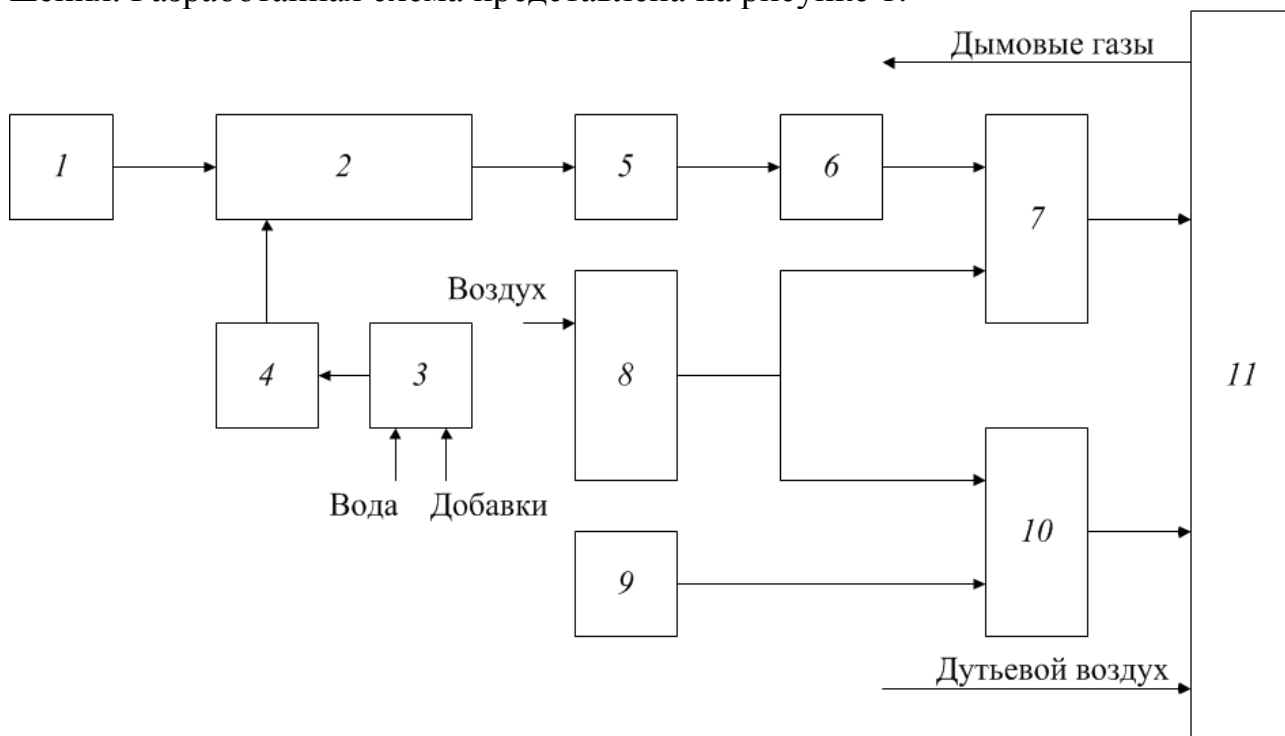


Рис. 1. Схема производства и сжигания ИКЖТ: 1 – бункер дробленого угля; 2 – гидроударная установка мокрого помола (ГУУМП); 3 – кавитационный роторно-импульсный аппарат; 4 – насос; 5 – емкость ВУТ; 6 – насос; 7 – форсунка на водоугольном топливе; 8 – компрессор; 9 – емкость для дизельного топлива, 10 – инициализирующая горелка на дизельном топливе, 11 – топка

Таким образом, была разработана схема, которая обеспечивает наиболее качественное, а также наименее затратное приготовление и сжигание ИКЖТ, на основе существующих технологий и решений. Данная схема не является слишком энергозатратной, обеспечивает производство качественного однородного топлива и эффективное его сжигания, не зависит от другого вида топлива, однако требует небольшой модернизации топочной камеры, а именно установки предтопок.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Назмеев Ю.Г., Мингалеева Г.Р. Системы топливоподачи и пылеприготовления ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 332 с.
2. Делягин В.Н., Иванов Н.М., Батищев В.Я., Бочаров В.И. Система управления теплогенератором, работающем на водоугольном топливе // Труды международной научно-технической конференции энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве №1. - С. 311-315.

3. Кушнир И.С. Автоматизация управления производством многокомпонентного топлива // Обчислювальна техніка та автоматизація 23(201). - 2012. - С. 21-28.
4. Морозов А.Г. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива // Новости теплоснабжения 07(119). - 2012. - С. 21-28.
5. Матузов С.В. Сжигание кавитационного водоугольного топлива в низкотемпературном кипящем слое // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива». - 2012. - С. 61.1-61.5.

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

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ

Н.А. Аманжолова
Томский политехнический университет
ЭНИН, АТП, группа А6-38

Толстостенные резиновые технические изделия даже при постоянной температуре среды (теплоносителя) вулканизируются в неизотермических условиях, различных на разных его участках.

Существуют несколько методов расчета неизотермической вулканизации согласно литературным данным:

- аналитический метод;
- графо-аналитический метод;
- экспериментальный метод;
- расчетный метод.

В [1] приведен упрощенный аналитический метод расчета продолжительности неизотермической вулканизации толстостенных резиновых изделий, основанный на использовании модели квазиэквивалентной пластины, с учетом индукционного периода. Здесь константы скоростей приближенно описывается выражением аналогичным закону Аррениуса.

$$k = k_0 * \exp\left(-\frac{A}{T}\right) \tag{1}$$

где S, A – параметры;
T- температура, К.

Далее определяли такие параметры как оптимум вулканизации, эквивалентное время вулканизации. Недостатком данного метода является то, что некоторые значения параметров вулканизации рассчитывали путем пропорционального пересчета.

В [2] приведен графоаналитический метод расчета. Данный метод заключается в том, что расчетным или экспериментальным путем определяется температурный режим $T=T(\tau)$ неизотермической вулканизации.

Кривая $T=T(\tau)$ ступенчато аппроксимируется временными интервалами ($\Delta\tau$) при различных постоянных температурах T_i .

Продолжительность индукционного периода для изотермического процесса находят экспериментально. А для неизотермического процесса находят суммированием индукционных периодов изотермического процесса. Расчетная кинетическая кривая для неизотермического процесса находят из кинетической кривой изотермического процесса.

В [3] описан экспериментальный метод определения физико-механических характеристик резинотехнических изделий. Для эксперимента изготовили резиновые блоки, проводили вулканизацию при $155\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 мин, для исключения влияния греющей поверхности отрезали по 30 мм с каждого края. В процессе испытания фиксировали условные напряжения при относительных удлинениях 5,10,20,30 и 40%, а также условную прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве. Испытания проводили на разрывной машине Тензомер Т-10 фирмы «Монсанто». Недостатком данного метода является трудоемкость испытаний.

Расчетный метод заключается в получении модели неизотермической вулканизации через модель кинетики изотермической вулканизации

$$\frac{dy}{d\tau} + k(t_i)y = y_{\max}(t_i)k(t_i)I(\tau) \quad (2)$$

Так, изотермической модели (1) ставят в соответствие следующее дифференциальное уравнение неизотермической кинетики.

$$\frac{dy}{d\tau} + k[t(\tau)]y = y_{\max}[t(\tau)]k[t(\tau)]I(\tau) \quad (3)$$

ЛИТЕРАТУРА:

1. Аронович Ф.Д. Упрощенный аналитический метод расчета продолжительности вулканизации толстостенных резиновых изделий // Каучук и резина. - 1976. - №6. - С. 28-32.
2. Лукомская А.И., Сапрыкин В.И., Бобров А.П., Графоаналитический метод расчета кинетики неизотермической вулканизации // Каучук и резина. - 1984. - №4, - С.35-36.
3. Власко А.В., Сахаров М.Э., Парицкая З.А., Швавич М.В., Гамлицкий Ю.А., Басс Ю.П., Влияние неизотермической вулканизации на механические свойства резиновых и резинокордных образцов // Каучук и резина. - 1998. - №6. - С.6-8.

**СЕКЦИЯ 3.
РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ
ТОПЛИВОСЖИГАЮЩИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИЯ НА АКТИВНОСТЬ
АЛЮМОМЕДНОМАГНИЙХРОМОВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ В
РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА**

Н.А. Церешко

Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН

Сжигание топлив в кипящем слое катализатора — один из наиболее перспективных способов получения энергии, поскольку позволяет снизить температуру процесса с 1200-1600 (традиционное сжигание) до 600-750 °С. Благодаря значительному снижению температуры становится возможным уменьшить габариты и вес установок, снизить требования к термохимическим свойствам применяемых конструкционных материалов. Кроме того, при данном способе сжигания могут использоваться различные виды топлива: твёрдое, жидкое, газообразное, а также коммунальные и промышленные отходы, такие как иловые осадки очистных сооружений, отходы нефтедобычи и нефтепереработки. Помимо всего прочего, применение катализаторов глубокого окисления позволяет сократить выбросы токсичных веществ до предельно допустимых значений и ниже [1].

Тем не менее, данный способ имеет ряд недостатков, в частности истирание и унос катализатора в ходе его эксплуатации, фазовые превращения активного компонента из-за термического воздействия. Таким образом, помимо высокой каталитической активности в процессе сжигания, необходимыми требованиями для катализатора кипящего слоя являются термическая стабильность и прочность. Также важным требованием при использовании в промышленных масштабах является относительная дешевизна, что дает преимущество катализаторам на основе переходных металлов перед катализаторами, при получении которых используются драгметаллы.

В качестве модельной реакции при изучении катализаторов для сжигания газообразных топлив в кипящем слое удобно использовать окисление метана, поскольку метан является основным компонентом природного газа, вместе с тем, наиболее тяжело поддающийся окислению [2].

Как известно, введение магния в состав катализатора приводит к увеличению активности в реакции окисления метана [2] и, кроме того, повышает прочность катализатора за счет образования заведомо более прочных шпинельных структур [3].

В данной работе ставилась задача провести сравнительное исследование активности лабораторных образцов оксидных алюмомедномагнийхромовых катализаторов с различным содержанием оксида магния в модельной реакции окисления метана для определения корреляции между активностью катализаторов и содержанием оксида магния в них. Кроме того, исследовать состав, тек-

стурные и прочностные характеристики данных образцов комплексом физико-химических методов, таких как БЭТ, рентгенофлуоресцентный анализ (РФЛА) и др.

Для исследования было взято пять лабораторных образцов оксидных алюмомедномагнийхромовых ($\text{CuO-MgO-Cr}_2\text{O}_3$ на сферическом носителе $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фирмы Sasol Germany GmbH (Германия)) катализаторов с различной массовой долей оксида магния.

Все образцы катализаторов были приготовлены в Институте катализа им. Г.К. Борескова методом пропитки носителя по влагоемкости. Пропитка осуществлялась растворами, содержащими бихромат меди и бихромат магния. После пропитки катализаторы подвергались сушке и прокалке.

Удельную поверхность, объем пор и средний радиус пор носителя и катализаторов определяли методом БЭТ. Состав катализаторов определялся методом РФЛА. Текстульные характеристики и химический состав катализаторов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Характеристики поверхности, пористой структуры и состава катализаторов и исходного носителя

Образец	Удельная площадь поверхности, $\text{м}^2/\text{г}$	Объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Средний диаметр пор, нм	Химический состав катализаторов, масс. %			
				MgO	CuO	Cr_2O_3	Al_2O_3
N1	183	0,44	9,7	1,2	1,5	9,7	остальное
N2	181	0,46	10,1	2,1	1,5	9,5	остальное
N3	172	0,44	10,3	2,9	1,5	9,7	остальное
N4	167	0,42	10,2	3,7	1,5	9,3	остальное
N5	171	0,43	10,1	4,6	1,5	9,2	остальное
носитель	205	0,52	10,3	-	-	-	100,0

Исходя из данных таблицы 1 видно, что в целом значения удельной площади поверхности, объема и диаметра пор соразмерны для всех образцов, поскольку для их приготовления использовался один и тот же носитель. Содержание оксидов меди(II) и хрома(III) во всех образцах различается незначительно, содержание оксида магния увеличивается в ряду от N1 до N5.

Тестирование прочности гранул на истирание проводили по методу ASTM D 4058 96. Согласно методике, образец гранулированного катализатора вращается в цилиндрическом барабане в течение определенного времени. Пыль, полученная истиранием и трением, отделяется просеиванием через стандартное сито. Взвешивание остатка и исходного образца позволяет вычислить потерю при истирании.

При проведении модельных реакций окисления метана использовалась более низкая температура по сравнению с температурами процессов каталитического окисления в условиях кипящего слоя, поскольку температуры достижения пятидесятипроцентной конверсии для всех рассматриваемых в работе образцов находятся ниже 700 °С. Кроме того, использование более низких температур связано с ограничениями в эксплуатации установки. Так, при окислении метана температура составляла 500 °С.

В реактор подавали поток исходной реакционной смеси газов: смесь метана и воздуха. Из реактора выходил поток конечной реакционной смеси, концентрация метана в котором измерялась хроматографически при помощи пламенно-ионизационного детектора. При проведении измерений, температура для газовой смеси составляла 500°С.

Для получения значений удельных скоростей варьировали объем подаваемой реакционной смеси. Значение удельной скорости при фиксированном объеме рассчитывалось по формуле:

$$W_V^* = \frac{X \cdot V}{(100 \cdot m)}, \quad (1)$$

где X — концентрация прореагировавшего CH₄, %;

V — подаваемый в реактор объем смеси газов, мл/мин;

m — масса образца, г.

Навеска образца подбиралась таким образом, чтобы процесс окисления проходил в кинетической области, то есть лимитировался реакцией взаимодействия реагентов с кислородом на поверхности катализатора. Скорость относилась к массе навески образца катализатора.

Для реакции окисления CH₄ справедлива формула:

$$W^* = k \cdot C_1^{a_1} \cdot C_2^{a_2}, \quad (2)$$

где k — константа скорости реакции;

C₁, C₂ — концентрации реагентов в ходе реакции (пусть 2 соответствует O₂);

a₁, a₂ — порядки реакции по веществам.

Прологарифмировав последнюю формулу по основанию e, получим:

$$\ln W^* = \ln k + a_1 \ln c_1 + a_2 \ln c_2 \leftrightarrow \ln W^* = a_1 \ln c_1 + const, \quad (3)$$

После получения значений lnW* и lnCH₄ строился график зависимости (линейная зависимость) первого от второго, представимый как функция вида:

$$a \cdot x + b = y, \quad (4)$$

где a, b — искомые коэффициенты; y и x — значения lnW* и lnCH₄ соответственно при фиксированном в диапазоне крайних точек графика объеме подачи газов (CH₄ — концентрация CH₄, зарегистрированная газоанализатором после реакции).

Далее из полученной функции находили значение удельной скорости 50-процентной конверсии (W*_{50%}) при температуре 500 °С.

Значения удельных скоростей полупревращения метана и прочность образцов на истирание приведены в таблице 2.

Табл. 1. Скорость 50-процентной конверсии метана при 500 °С и прочность образцов на истирание

Образец	$W_{50\%}^*$, мл(г·с)·10 ⁻³	Потери массы при истирании, % (ASTM D 4058 96)
N1	28,0	< 1
N2	26,2	< 1
N3	17,7	< 1
N4	18,2	< 1
N5	19,0	< 1

Из таблицы 2 видно, что образцы N1 и N2 проявляют наибольшие значения скорости, незначительно отличающиеся друг от друга. Значения скорости 50-процентной конверсии метана для образцов N3-N5 также незначительно отличаются друг от друга, однако существенно ниже, чем соответствующие показатели первых двух образцов. Стандартная методика определения прочности недостаточно чувствительна для сравнения данных образцов, поскольку значения потери массы всех образцов при истирании незначительны.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Исследование катализаторов глубокого окисления СО и органических веществ для кипящего слоя / Ю.В. Дубинин, Н.А. Языков, А.Д. Симонов, В.А. Яковлев и др. // Катализ в промышленности. - 2013. - N 4. С. 68-76.
2. Поповский В.В. Закономерности глубокого окисления веществ на твердых окисных катализаторах: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.04 / Институт катализа СО АН СССР. - Новосибирск, 1973. - 324 с.
3. Корябкина Н.А. Научные основы приготовления и разработка способа получения высокопрочных магнийсодержащих алюмооксидных носителей: Автореф. Дис... канд. хим. наук: 02.00.15 / Корябкина, Н.А. Ин-т катализа им. Г. К. Борескова СО РАН - Новосибирск. 1992. - 19 с.

Научный руководитель: Ю.В. Дубинин, кхн, нс, Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДУТЬЯ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ГАЗИФИКАЦИЕЙ ТОПЛИВА

А.Н. Мракин¹, Д.Г. Сотников¹, Р.Б. Табакаев²

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. ¹

Томский политехнический университет²

На сегодняшний день в практике научных исследований все большую популярность приобретают методы термодинамического анализа, основанные на

эксергетическом балансе [1-2], главным достоинством которых является наличие единого безразмерного относительного показателя совершенства, который учитывает не только количество энергии на основе второго закона термодинамики, но и ее качество. Особенно такая методология актуальна для энерготехнологических или энергохимических установок с комплексным использованием топлива, предназначенных для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, а также химических продуктов. Такие установки могут использовать в качестве исходного топлива не только уголь, горючие сланцы, биомассу, но и нестабильный газовый конденсат, и отходы нефтепереработки [3]. Основной процесс газификации топлива в таких установках происходит в реакторе частичного окисления, в который подается топливо, окислитель и дутьевой пар для повышения содержания водорода в продуктах реакции. При этом качество синтез-газа (содержание CO и H₂, его температура) будут находиться в определенной зависимости от режимных факторов.

Происходящие в реакторе частичного окисления термохимические и термодинамические процессы превращения одних видов энергии в другие заканчиваются при наступлении термодинамического равновесия рассматриваемой системы, определяемого вторым законом термодинамики [4].

Представляется целесообразным выполнить обоснование параметров дутья (концентрации кислорода, степени повышения давления, энтальпии и количества водяного пара) подаваемого в реактор частичного окисления энергохимических установок, поскольку они оказывают влияние на общую эффективность получения синтез-газа. Расчетная схема представлена на рис. 1.

В такой постановке задачи эксергетический КПД процесса частичного окисления топлива можно представить в виде

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{c2}}{G \cdot ex_m + G_{H_2O} \cdot ex_{H_2O} + G_{OK} \cdot ex_{OK} + Ex_3}, \quad (1)$$

где $Ex_{c2} = ex_{c2} \cdot G_{c2}$ – эксергия образовавшегося синтез-газа, кВт; G_{c2} – массовый расход синтез-газа, кг/с; ex_m , ex_{OK} , ex_{H_2O} – удельная эксергия потребленного топлива (газового конденсата), окислителя (воздуха) и водяного пара, кДж/кг; G , G_{OK} , G_{H_2O} – расход топлива, окислителя и водяного пара, кг/с; Ex_3 – эксергия топлива, эквивалентная затраченной электроэнергии на привод компрессора окислителя и обеспечение работы воздухоразделительной установки, кВт.

Удельную эксергию синтез-газа будем определять согласно [5] как сумму физической эксергии (являющейся результатом отличия температуры и давления рассматриваемого потока от температуры и давления окружающей среды) и химической (являющейся результатом отличия химического состава или концентрации вещества, находящегося при параметрах окружающей среды, от распространенных в природе веществ или от вещества принятого за начало отсчета), кДж/кг:

$$ex_{c2} = ex_{c2}^{\phi} + ex_{c2}^x = R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} + c_p \cdot \left(T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right) + ex_{c2}^x, \quad (2)$$

где R – индивидуальная газовая постоянная, кДж/(кг·К); p , T – давление и температура, МПа, К; c_p – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К); p_0 , T_0 – давление и температура окружающей среды (начало отсчета), МПа, К; $ex_{c_2}^x$ – химическая эксергия синтез-газа, кДж/кг.

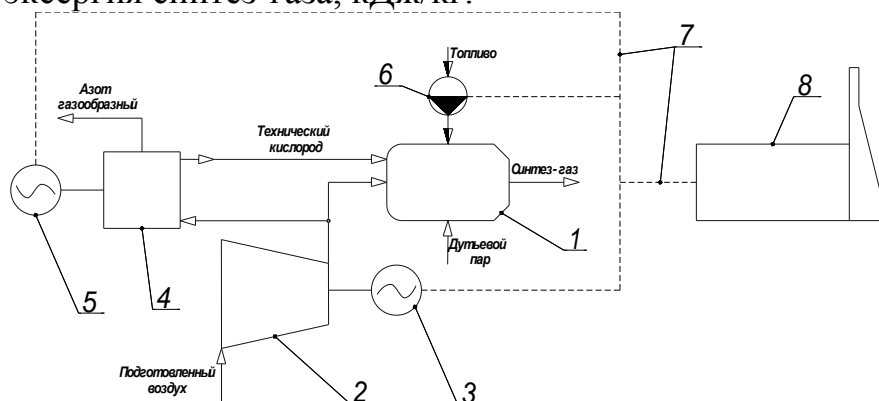


Рис. 1. Расчетная схема материально-энергетических потоков для определения эксергетического КПД: 1 - реактор частичного окисления; 2 - компрессор воздуха; 3 - электродвигатель компрессора; 4 - воздухоразделительная установка; 5 - электропривод воздухоразделительной установки; 6 - топливный насос; 7 - транзитные сети электроснабжения; 8 - электростанция.

Эксергия топлива (газового конденсата) будет определяться только ее химической составляющей, поскольку подогрева топлива перед подачей в реактор частичного окисления не предусмотрено. Расчетную формулу можно выбрать по рекомендациям [5] или [6].

Эксергия пара определяется исходя из его параметров по специальным диаграммам состояния приведенным в [5] или аналитическим путем с учетом рекомендаций [6], кДж/кг:

$$ex_{H_2O} = h - h_0 - T_0 \cdot (s - s_0), \quad (3)$$

где h , s – энтальпия и энтропия пара при его температуре насыщения и соответствующем давлении, кДж/кг, кДж/(кг·К); h_0 , s_0 – энтальпия и энтропия пара при параметрах окружающей среды, кДж/кг, кДж/(кг·К).

Учитывая концепцию системного термодинамического анализа энерготехнологических производств учет эксергии входящих потоков электроэнергии должен проводиться по эксергии первичного топлива расходуемого в энергосистеме на ее получение. Таким образом, можно получить выражение для расчета эксергии топлива затраченного на получение электроэнергии, кВт:

$$Ex_{\text{э}} = B \cdot \frac{ex_m^{\text{эс}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{эс}} \cdot \eta_{\text{тр}}} = \frac{N}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{сн}}} \cdot \frac{ex_m^{\text{эс}}}{\eta_{\text{ex}}^{\text{эс}} \cdot \eta_{\text{тр}}}, \quad (4)$$

где B – расход топлива, кг/с; $ex_m^{\text{эс}} = \beta \cdot Q_6^p$ – удельная эксергия топлива, определяемая согласно [5], кДж/кг; N – электрическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора и работу воздухоразделительной установки, кВт; Q_n^p и Q_6^p – низшая и высшая теплота сгорания используемого в энергосистеме топлива, кДж/кг; β – коэффициент пересчета эксергии топлива; $\eta_{\text{эл}}$ – КПД теп-

лового двигателя, используемого для получения электроэнергии; $\eta_{сн}$ – коэффициент собственных нужд электростанции; $\eta_{ex}^{эс}$ – эксергетический КПД по выработке электроэнергии в рассматриваемой энергосистеме; η_{mp} – КПД, учитывающий потери эксергии электроэнергии при транспортировке.

Параметры начала отсчета приняты: для давления на уровне 0,1 МПа и 15 °С – для температуры, что продиктовано возможностью сопоставить расчеты с номинальным режимом работы газотурбинных установок по стандарту ISO.

В качестве исходных данных принято: газовый конденсат Коптевского месторождения с составом, представленным в [3]; $G=1,0$ кг/с; $\alpha=0,5$; $Q_n^P=31800$ кДж/кг и $Q_6^P=35290$ кДж/кг [7]; $\eta_{эл}=0,53$; $\eta_{сн}=0,95$; $\eta_{ex}^{эс}=0,59$ [8]; $\eta_{mp}=0,98$; $\beta=0,95$ [5]; $p_{в-ха}=0,65$ МПа – давление сжатия воздуха в компрессоре холодильного цикла низкого давления (цикла Капицы), необходимое для получения технического кислорода [9]. Результаты расчетов эксергетического КПД по выражению (1) с использованием (2)-(4) представлены на рис. 2.

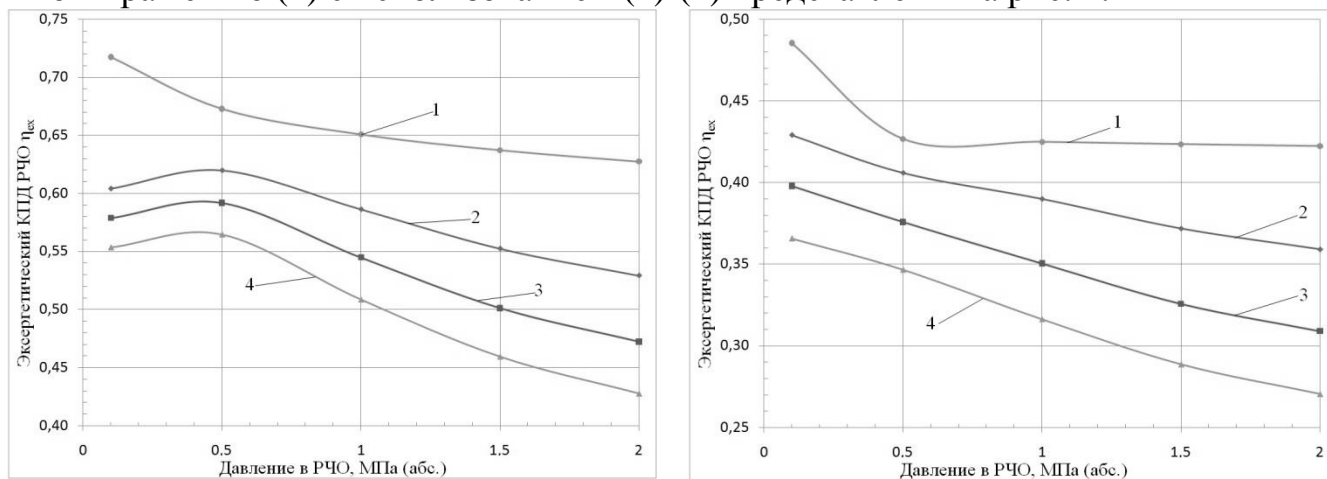


Рис. 2. Зависимость эксергетического КПД реактора частичного окисления а) $g=0$ кг пара/кг конденсата б) $g=3$ кг пара/кг конденсата от давления в реакторе частичного окисления: 1 – $C_{O_2}=21\%$; 2 – $C_{O_2}=46\%$; 3 – $C_{O_2}=71\%$; 4 – $C_{O_2}=96\%$.

Наличие экстремумов на кривых 2-4 (рис. 2 а) объясняется тем, что по циклу Капицы для получения технологического кислорода необходимо повышать давление воздуха до 0,65 МПа, которое в последующем будет снижено до 0,1 и 0,5 МПа без получения полезной работы, что вызывает снижение эксергетического КПД. Также повышение давление в 2 раза с 0,5 до 1,0 МПа как для случая с подачей пара, так и при его отсутствии, вызывает снижение эксергетического КПД на 1,5-2,5 абс. % для всех вариантов содержания кислорода в дутьевом воздухе, что можно объяснить повышением доли затрат энергии на сжатие окислителя. Применение дутьевого пара с термодинамической точки зрения также снижает эффективность процесса получения синтез-газа, что можно наблюдать на рис. 2 б, где отсутствуют экстремумы для кислородного дутья, поскольку абсолютные значения эксергии дутьевого пара превалирует над соответствующим значением для окислителя. При выборе оптимального варианта аппаратурно-технологического и параметрического оформления энерготехно-

логической установки окончательное решение делается на основе технико-экономических расчетов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur // Energy efficiency. 2014. Vol. 8. №2. p. 255-265.
2. Badami M., Mura M. Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system //Energy. 2010. Vol. 35. №6. p. 2535-2543.
3. Мракин А.Н. Построение расчетной модели определения геометрических размеров реактора частичного окисления топлива / А.Н. Мракин, Д.Г. Сотников, А.А. Селиванов // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 8. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы XIII Междунар. научно-техн. конф. Саратов: ИП Беглакова Е.С., 2016. С. 318-322.
4. Симонов В.Ф. Повышение эффективности энергоиспользования в нефтехимических производствах. - М.: Химия, 1985. - 240 с.
5. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. - Киев: Наукова думка, 1991. - 360 с.
6. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 288 с.
7. СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия».
8. Хлебалин Ю.М. Эксергетический метод оценки эффективности бинарных ПГУ-ТЭЦ / Ю.М. Хлебалин // Вестник СГТУ. 2011. №1 (54). Выпуск 3. С. 14-17.
9. Свит Т.Ф. Основы разделения воздуха методом глубокого охлаждения и ректификации: учеб. пособие / Т.Ф. Свит. - Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2005. - 132 с.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10036).

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

М.П. Орлова¹, Т.И. Горбенко
Томский государственный университет¹

Введение:

В ряде технологических процессов целесообразно создание топливных элементов для установок, работающих вдали от источников сырья и в условиях сложного транспортного обеспечения. В качестве таких топливных элементов все чаще применяют тепловые составы [1, 2]. Тепловые составы в процессе их сгорания выделяют значительное количество тепла и передают его нагреваемому объекту. Большое количество тепла с высокими температурами можно получить при прохождении термитных реакций.

Целью данной работы является выявление возможности прохождения реакций горения термитных смесей и определение состава продуктов горения при заданных условиях. В качестве термитных смесей в настоящей работе исследуются: железо-алюминиевый термит и алюминий-титановый термит, включающий никель.

Расчет изобарно-изотермического потенциала:

Для определения возможности прохождения химических реакций в работе проведен расчет изобарно-изотермического потенциала:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

где ΔH – энтальпия образования (кДж/моль), ΔS – энтропия (кДж/моль*К), T – температура (К).

Табл. 1. Результаты расчета изобарно-изотермического потенциала

T, К	Химическая реакция	
	$\text{Fe} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} =$ $= 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	$2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Ni} =$ $= \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{TiO}_5 + \text{Ni}$
	ΔG , кДж/моль	ΔG , кДж/моль
500	-848	-392
1000	-842	-798
2000	-829	-1610
3000	-817	-2422
4000	-805	-3234

Расчет реакции замещения $2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Ni} = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{TiO}_5 + \text{Ni}$ (алюминий-титановый термит, включающий никель) показал, что в рассмотренном диапазоне температур от 500 К до 4000 К энергия Гиббса (ΔG) убывает с ростом температуры, то есть термодинамическая вероятность протекания реакции повышается. Для окислительно-восстановительной реакции $\text{Fe} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (железо-алюминиевый термит) получено, что реакция также термодинамически устойчива и протекает самостоятельно от 500 К до 4000 К, $\Delta G < 0$.

Термодинамическое моделирование:

Расчет термодинамических характеристик термитных составов проведен по программе TERRA (Трусов Б.Г., МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В качестве объектов исследования выбраны системы, содержащие

1. Fe_2O_3 , Al, Fe;
2. Al_2O_3 , TiO_2 , Ni.

Исходные данные для термодинамического моделирования представлены в таблицах 2, 3

Табл. 2. Исходные данные для термодинамического расчета системы 1

Состав системы		Параметры расчета	
Эквивалентная формула, моль/кг	$\text{Fe}_{15,352}\text{O}_{4,227}\text{Al}_{2,780}$	$T_{ад}$, К	2600÷4000
Содержание компонентов в термитной смеси, масс. % [3]	$\text{Fe}_2\text{O}_3 - 22,5$ Al – 7,5 Fe – 70	P, МПа	0,1

Табл. 3. Исходные данные для термодинамического расчета системы 2

Состав системы		Параметры расчета	
Эквивалентная формула, моль/кг	$\text{Al}_{15,300}\text{O}_{25,954}\text{Ti}_{1,502}\text{Ni}_{1,704}$	$T_{ад}$, К	2600÷4000
Содержание компонентов в термитной смеси, масс. % [3]	$\text{Al}_2\text{O}_3 - 78$ $\text{TiO}_2 - 12$ Ni – 10	P, МПа	0,1

Зависимость содержания газообразных компонентов железо-алюминиевого термита от адиабатической температуры представлена на рисунке 1. В узком диапазоне температур (~3000÷3100 К) происходит резкое увеличение содержания газообразного железа от 0 до 15,2 моль/кг. Дальнейшее увеличение температуры практически не влияет на изменение содержания железа. Для оксида алюминия характерно, что в диапазоне 3000÷3800 К его содержание увеличивается от 0 до $17,8 \cdot 10^{-5}$ моль/кг, а при температуре выше 3800 К – снижается, последнее, вероятно, можно объяснить диссоциацией вещества. Содержание Al_2O_3 при температуре 4000 К составляет $3,8 \cdot 10^{-5}$ моль/кг. Полученные расчетные зависимости качественно согласуются с результатами работы [3].

На рисунке 2 представлена зависимость содержания конденсированных оксида алюминия ($k \text{Al}_2\text{O}_3$) и железа ($k \text{Fe}$) от адиабатической температуры. Содержание конденсированного железа в диапазоне температур 2600÷3400 К практически не изменяется и имеет значение около 15 моль/кг. Далее в диапазоне температур 3400÷3800 К происходит резкое уменьшение железа от 15 до 0 моль/кг. Для конденсированного оксида алюминия характерно постепенное

уменьшение содержания от $1,1 \cdot 10^{-5}$ до 0 моль/кг в диапазоне температур 2600÷3800 К.

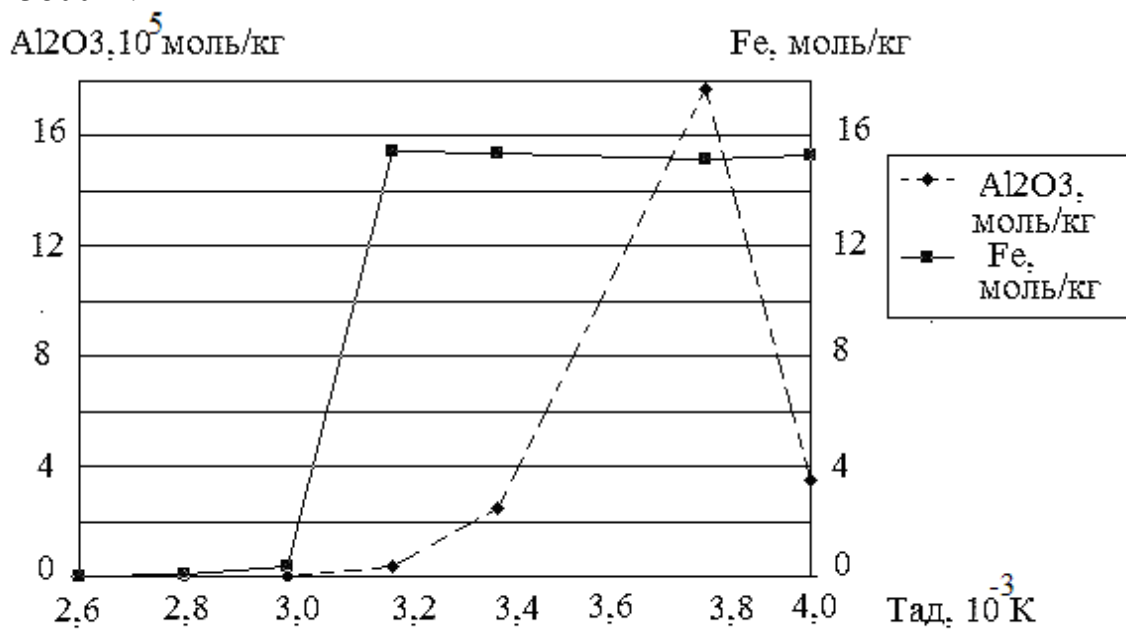


Рис. 1 Зависимость содержания газообразных Al_2O_3 и Fe от адиабатической температуры для реакции $Fe + Fe_2O_3 + 2Al = 3Fe + Al_2O_3$

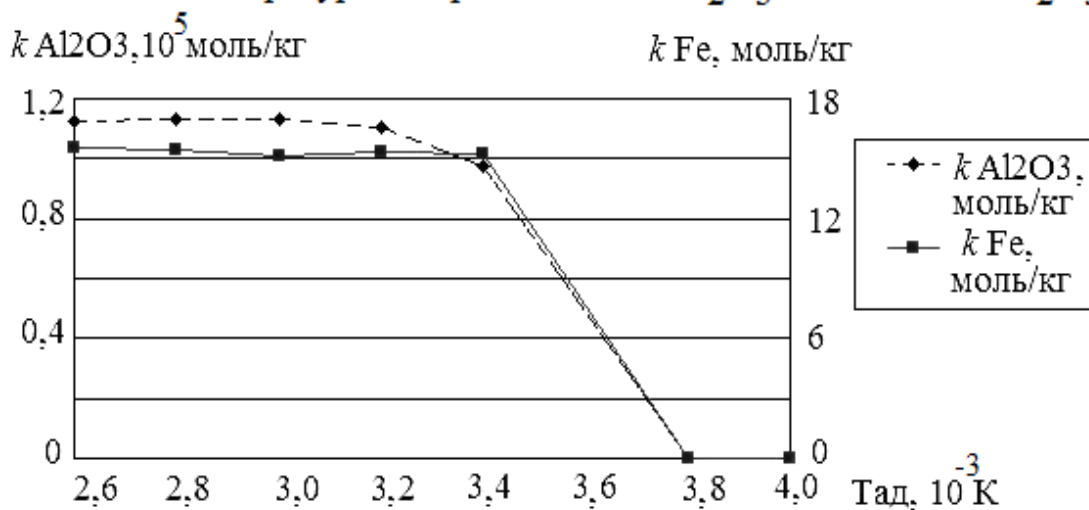


Рис. 2 Зависимость содержания конденсированных Al_2O_3 и Fe от адиабатической температуры для реакции $Fe + Fe_2O_3 + 2Al = 3Fe + Al_2O_3$

Зависимости содержания продуктов сгорания алюминий-титанового термита с никелем качественно совпадают с зависимостями для железо-алюминиевого термита. В рассмотренном диапазоне температур 2600÷4000 К содержание газообразных компонентов (Al_2O_3 ; TiO_2) возрастает. Что касается конденсированных компонентов, то уменьшение содержания конденсированного оксида титана происходит от 1,5 до 0 моль/кг в диапазоне температур 3200÷3400 К. Содержание конденсированного оксида алюминия принимает постоянное значение около $7,5 \cdot 10^{-5}$ моль/кг в диапазоне температур 2600÷3800 К и далее уменьшается от $7,5 \cdot 10^{-5}$ до $5,0 \cdot 10^{-5}$ моль/кг (до 4000 К).

Выводы:

Расчеты изобарно-изотермического потенциала для железо-алюминиевого и алюминий-титанового термитов показали, что для рассмотренных реакции в температурном диапазоне от 500 К до 4000 К $\Delta G < 0$. Химические реакции термодинамически устойчивы и протекают самостоятельно.

Анализ результатов термодинамических расчетов позволил установить, что железо-алюминиевый термит содержит больше как конденсированной (16,600 моль/кг), так и газовой фазы (0,345 моль/кг) в отличие от алюминий-титанового термита (10,850 моль/кг – содержание в продуктах сгорания конденсированной фазы; 0,006 моль/кг – содержание в продуктах сгорания газовой фазы).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Горшков В.А. и др. Химический и фазовый составы продуктов горения смесей термитного типа на основе оксидов хрома, лантана и кальция / В.А. Горшков, А.А. Самборук, В.И. Юхвид // Хим. физика. – 2009.– N 28 (10).–С. 48 - 51.
2. Абдуллин И.А., Белобородова О.И. Тепловые пиротехнические составы. Свойства, технология, применение: Учебное пособие. – Казань: Казан. гос. технолог. ун-т., 2004. –120 с.
3. Ловшенко Ф.Г. и др. Термодинамическое моделирование физико-химических процессов и оптимизация технологии плазменного нанесения покрытий из механически легированных терморреагирующих порошков / Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко, Б.Б. Хина, З.М. Ловшенко, А.С. Федосенко // Литье и металлургия. – 2012.– N 2 (65).–С. 116 –128.

Научный руководитель: Т.И. Горбенко, к.ф.-м.н., доцент ФТФ ТГУ.

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ КРИПТОЛА

Р.А. Вислогузов, А.В. Астафьев
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5ВМ6Б

Энергетика по-прежнему остается главным источником загрязнения окружающей среды [1]. В связи с этим мировое научное сообщество продолжает поиск направлений экологичного энергообеспечения.

Одним из перспективных решений, позволяющим организовывать автономное теплоснабжение за счет утилизации жидких углеводородных отходов, при относительно низких выбросах оксида азота (NO_x) является теплогенератор беспламенного горения [2]. беспламенный режим горения обеспечивается путем сжигания отходов в слое пористого углеродного наполнителя – криптола,

являющегося отходом металлургической промышленности. Конструкторская разработка подобных технических решений требует знания теплотехнических характеристик криптола таких, как теплоемкость, теплопроводность и коэффициент теплопередачи. Задача определения этих характеристик традиционными методами [3, 4] осложняется тем, что в теплогенераторе криптол использован в виде пористого слоя засыпки. Необходима разработка специальной лабораторной базы, позволяющей определять теплофизические характеристики углеродной матрицы криптола.

В связи с вышеперечисленным, целью настоящей работы ставится разработка экспериментальных стендов для определения теплофизических характеристик углеродной матрицы криптола.

Для определения теплофизических характеристик криптола (теплоемкости, теплопроводности, коэффициента теплопередачи) разработано два экспериментальных стенда, изображенных на рис. 1 и 2. Определение теплоемкости и теплопроводности пористой матрицы криптола осуществлялось следующим образом. Изолированная металлическая труба 4 (диаметр 169 мм, толщина стенки 5,5 мм) устанавливалась на нагревательный элемент 1 (рис. 1), после чего в неё засыпался криптол 6. В засыпанный слой криптола устанавливались измерительные термопары 7, соединенные с переключателем термопар 9 и термометром 10. Термопары расположены на трех уровнях (по высоте): первый находится на расстоянии 20 мм от нагревательного элемента, второй – 45 мм, третий – 70 мм. Для проверки точности получаемых данных предусмотрены контрольные термопары 8, расположенные на том же уровне, что и измерительные. Мощность нагревательного элемента составила 1 кВт.

Коэффициент теплопередачи криптола определялся расчетным путем на основе данных, полученных на специальном экспериментальном стенде (рис. 2). Для этого криптол 6 предварительно нагревался в электропечи до температуры 400°C, выдерживался при данной температуре в течение получаса. Нагретый криптол засыпался в изолированную керамическую трубу 4 (диаметр 26 мм, толщина стенки 2 мм). По высоте керамической трубы устанавливались термопары 6: первая на расстоянии 40 мм от начала засыпки, вторая – 100 мм. На входе в керамическую трубу и на выходе из неё (рис. 2, поз. 7, верхняя термопара) измерялась температура воздуха. Расход и напор воздуха определялись при помощи ротаметра и трубчатого манометра.

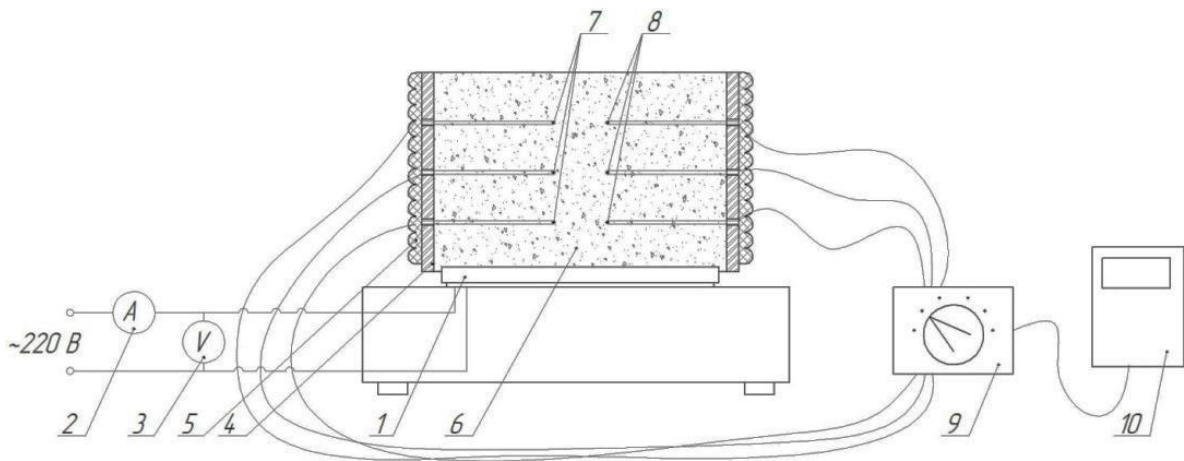


Рис. 1. Экспериментальный стенд для определения теплоемкости и теплопроводности криптола: 1 – нагревательный элемент; 2 – амперметр; 3 – вольтметр; 4 – металлическая труба; 5 – теплоизоляция; 6 – криптол; 7 – измерительные термопары; 8 – контрольные термопары; 9 – переключатель термопар; 10 – термометр.

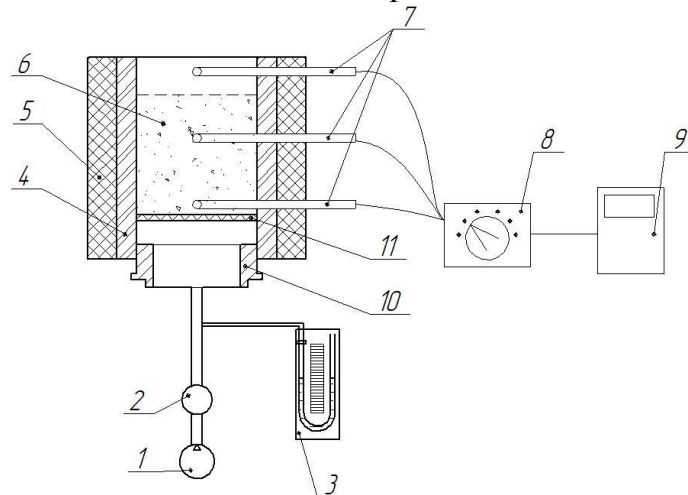


Рис. 2. Экспериментальный стенд для определения коэффициента теплопередачи криптола: 1 – компрессор; 2 – ротаметр РМ-6.3; 3 – U-образный трубчатый манометр; 4 – керамическая труба; 5 – теплоизоляция; 6 – криптол; 7 – измерительные термопары; 8 – переключатель термопар; 9 – термометр; 10 – соединительная муфта; 11 – металлическая сетка

Значения температуры, которая является определяющей величиной для исследуемых параметров (теплоемкости, теплопроводности, коэффициента теплопередачи), существенно изменяются в пространстве и времени. Для установки зависимостей между этими величинами применялись методы математической физики. Изменение температурного поля во времени через дифференциальное уравнение теплопроводности записывается в следующем виде:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho c} \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \frac{q}{\rho c}, \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; ρ – плотность криптола кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности Вт·м·К⁻¹; c – теплоемкость криптола Дж/кг; q – подведенное извне количество теплоты, Вт.

Для численного решения этого уравнения применялись следующие допущения: слой криптола однороден и изотропен; термическая деформация

криптола очень мала по сравнению с его объемом (т.е. плотность криптола постоянна).

При математической обработке данных эксперимента на первом стенде (рис. 1) ставилась задача определения теплоемкости и теплопроводности. На границах расчетной области принимались граничные условия: второго рода со стороны нагревательного элемента и третьего рода – при контакте с окружающей средой. Металлическая трубка считалась термически изолированной, и в уравнении (1) подведенное извне количество теплоты q принималось равным нулю.

Для решения (1) частные производные были заменены конечноразностными аналогами, т.е. выбраны такие бесконечно малые элементарные промежутки времени dT и объемы dx , в пределах которых изменение температуры линейно.

Интегрируя полученные уравнения, получены аналитические зависимости температуры в контрольных точках для всей области интегрирования по времени. Допустим, что функции теплоемкости $c(T)$ и теплопроводности $\lambda(T)$ от температуры будут иметь квадратичный вид, тогда уравнивая полученные зависимости с показаниями термомпар в каждый момент времени, можно по методу наименьших квадратов получить вид функций:

$$c(T) = -0,00163T^2 + 0,834T + 672,8; \quad (2)$$

$$\lambda(T) = 2,54 \cdot 10^{-8}T^2 - 0,000185T + 0,282. \quad (3)$$

Интегрирование дифференциального уравнения теплопроводности (1) с подстановкой в него полученных функциональных зависимостей дало близкие к значениям температуры в точках замеров на первом стенде (рис. 3).

При моделировании эксперимента на втором стенде (рис. 2) ставилась задача определения коэффициента теплопередачи α ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$) от криптола воздуху по уравнению Ньютона-Рихмана $q = \alpha(T - T_{\text{воздуха}})$. Значение q при математической обработке определялось как подведенное извне количество теплоты из уравнения (1), подстановкой в последнее полученных функциональных зависимостей (2) и (3). Коэффициент теплопередачи α считался функцией температуры (рис. 4).

Результаты экспериментальных исследований в сочетании с математической обработкой уравнения теплопроводности позволили установить зависимости изменения теплоемкости и теплопроводности криптола от температуры. Значения, определенные на основе выведенных зависимостей, показали хорошее совпадение с результатами физического эксперимента (рис. 3).

На основе полученных результатов выведена аналитическая зависимость коэффициента теплоотдачи криптола для фракции 5-10 мм от температуры.

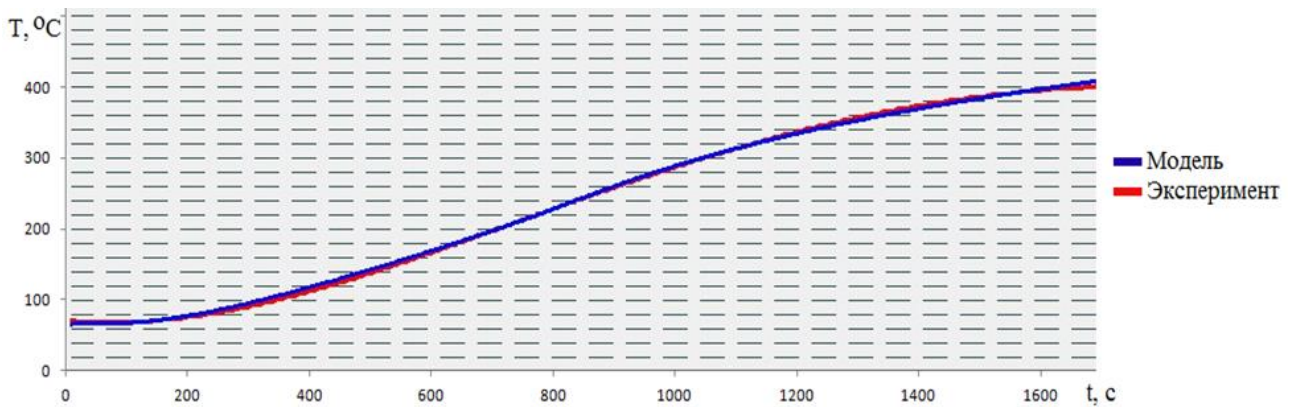


Рис. 3. Динамика изменения температуры в одной из контрольных точек по результатам математического моделирования и физического эксперимента

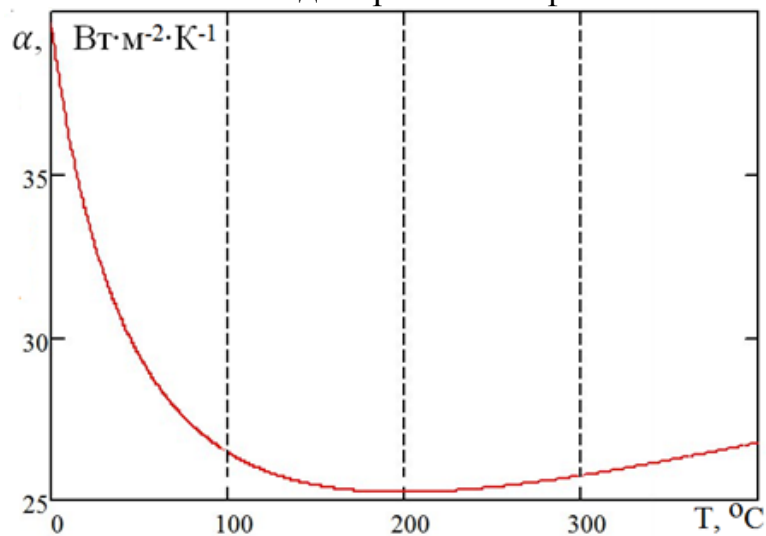


Рис. 4. Аналитическая зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры.

ЛИТЕРАТУРА:

1. World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution. – Paris: International Energy Agency, 2016. – 266 p.
2. Долгов С.В., Хаустов С.А., Табакаев Р.Б. Тестирование конструктивного исполнения технических решений по огневой утилизации жидких углеводородных отходов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 49-56.
3. Ковылин А.В., Фокин В.М. Методика определения коэффициентов теплопроводности, теплоусвоения, тепловой инерции, температуропроводности и объемной теплоемкости строительных и теплоизоляционных материалов методом неразрушающего контроля // Вестник ВолгГАСУ. – 2010. – № 19. – С. 112-117.
4. Шаталова Т.Б., Шляхтин О.А., Веряева Е. Методы термического анализа. – М.: Изд-во Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2011. – 72 с.

Научный руководитель: Р.Б. Табакаев, к.т.н., научный сотрудник каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ОСОБЕННОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ БУРОГО УГЛЯ НА ПРИМЕРЕ КОТЛА П-49

Е.Р. Цибизов¹, М.А. Черкасова²
Томский политехнический университет,
ЭНИИ, группы 5ВМ6А¹, 5ВМ61²

Низкотемпературное вихревое сжигание является современной эффективной технологией использования твердых органических топлив. Такой способ сжигания и топочное устройство для его осуществления разработаны в Санкт-Петербургском техническом университете [1].

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 объем нижней части топки от устья топочной камеры до горелок. Прямоточная зона горения располагается над вихревой зоной в верхней части топки.

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 [2].

Регулирование температуры газов в топочной камере паровых котлов можно выполнить различными способами. Одним из них является рециркуляция дымовых газов, отбираемых за хвостовыми поверхностями нагрева в топку, с условием снижения температуры.

В топке исследуемого котла отбор дымовых газов осуществляется за воздухоподогревателем. Доля газов рециркуляции составляет 0,15, а температура в точке отбора составляет 160 °С.

Произведена оценка влияния рециркуляции газов на топочные процессы. Для возможности сравнения полученных результатов поддерживается постоянный избыток воздуха в топке, равный 1,2. Места ввода газов рециркуляции и скорости представлены в таблице 1.

По данным полученным при проведении моделирования были построены графики (Рисунки 1, 2), на которых представлены средние значения температур и содержание кислорода по высоте топки, в зависимости от места введения газов рециркуляции.

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 tech-

Научный руководитель: Б.В. Лебедев, к.т.н., доцент, каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ И МОДЕЛИРОВАНИЮ КОТЛОВ С ЦКС

О.М. Кокшарев, А.В. Гиль
Томский политехнический университет
ПГС и ПГУ, ЭНИН

Сегодня технология ЦКС (циркулирующий кипящий слой) доказала свою эффективность с технической и экономической точки зрения. Можно выделить такие преимущества котлов с ЦКС как устойчивость к работе в условиях малых нагрузок с отсутствием подсветки мазутом, уменьшение котельной ячейки из-за недостатка средств азото- и серочистки, быстрое изменение нагрузки. Отмечается также и более высокий уровень выгорания топлива (около 99%). В частности, в [1] представлено то, что при эксплуатации котлов с ЦКС, в отличие от котлов с камерным сжиганием твердого топлива, имеется одно большое отличие – в котлах с ЦКС реализована непрерывная горячая система возврата твердых частиц в топку, что представляет много преимуществ (например, к высокому выгоранию углерода и однородному тепловому потоку по всей топке и системе возврата). Благодаря этим и другим технологическим аспектам данная технология сжигания низкокачественных твердых топлив широко применяется в Китае, США и Европейских странах.

В отечественной практике расчетов и проектирования энергетических котлов с организацией факельного сжигания органических топлив накоплен большой опыт, который отражен в нормативных методах теплового, гидравлического и аэродинамического расчетов котельных агрегатов. Однако, до настоящего времени в нормативном методе теплового расчета нет рекомендаций по расчету котлов с кипящим (КС) и циркулирующим кипящим слоем. Это связано с отсутствием отечественного опыта эксплуатации энергетических котлов как с КС, так и с ЦКС. Имеющиеся литературные данные носят разрозненный характер, и не отражают однозначную методику расчета. Среди методик и программ расчета котлов с ЦКС в России можно отметить разработанную в ОАО «ВТИ» математическую модель топочного контура котла с ЦКС, которая описана в [2, 3].

Стоит отметить, что наибольшей эффективностью, с учетом уровня прогресса инновационной вычислительной техники, обладают методы численного анализа. Они имеют ряд преимуществ в сравнении с теоретическими и эмпирическими методами [4].

Тем не менее, на сегодняшний день, моделирование топочных камер котлов с ЦКС с применением методов вычислительной газодинамики обычно ограничено 2-х мерной геометрией, для которой поток частиц моделируется с

использованием стандартного многожидкостного подхода Эйлера-Эйлера, но для большего понимания процессов, происходящих в котлах с ЦКС, необходимо применять трехмерное моделирование [5]. Однако, из-за высокой вычислительной сложности, лишь несколько зарубежных исследований, доступных в открытых источниках, посвящены полному циклу трехмерного моделирования промышленных котлов с ЦКС [6 – 9].

На основании анализа литературных данных разработана методика расчета котла с ЦКС на основании которой получены геометрические размеры топки, циклона и пневмозатвора (рис.1). Также, произведена оценка расходов вторичного и первичного воздуха; расхода топлива; расхода сорбента для улавливания серы. На основании расчета всех потерь данного котлоагрегата, определен КПД, равный 87,7%.

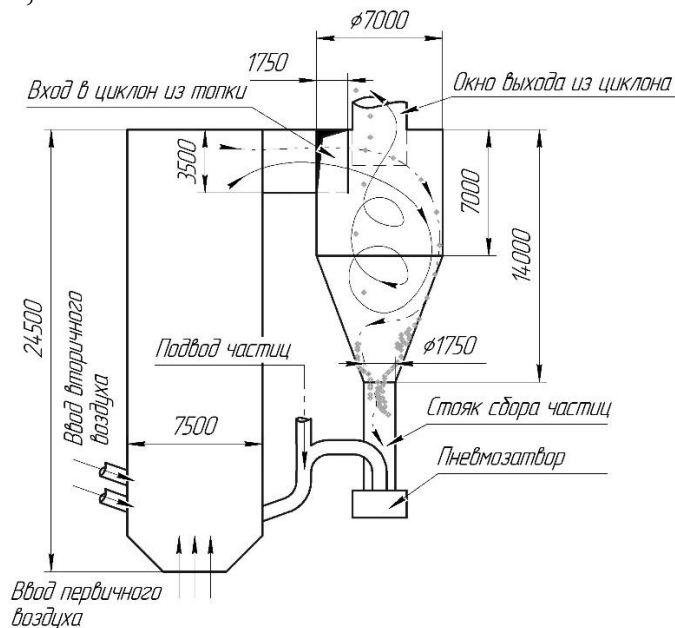


Рис. 1. Схематический чертеж котла с ЦКС. На рисунке дымовые газы и воздух – сплошная линия, поток частиц – прерывистая линия

Объектом исследования является котел с ЦКС, оборудованный двумя циклонами для захвата частиц. Топочная капера оборудована 4 устьями подачи частиц на тыльной стене и 10 устьями трубопроводов вторичного дутья на фронтальной стене в 2 яруса (рис. 2).

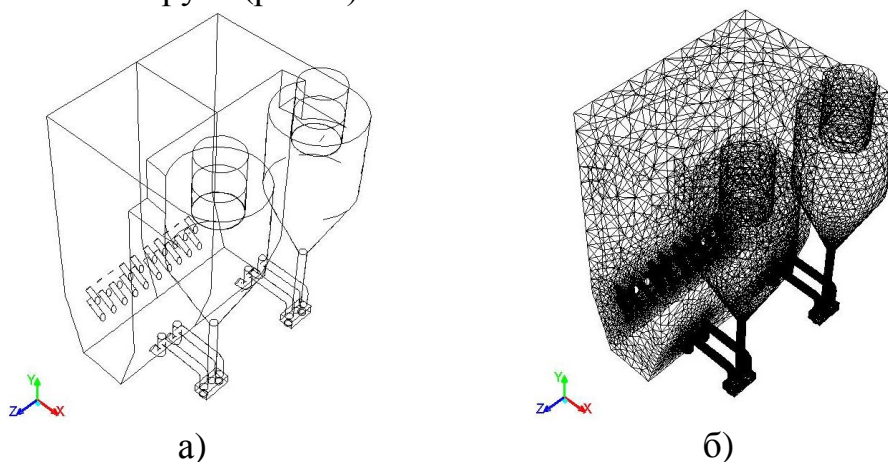


Рис. 2. Объект исследования: а – 3D модель; б – расчётная сетка

Модель, представленная на рис. 2 намеренно имеет грубую дискретизацию расчетной области для быстрой оценки влияния исходных данных на конечный результат, поскольку более мелкая сетка предполагает более точный расчет и, соответственно, затрагивает большое количество временного ресурса (в среднем до 3–4 суток для совершения расчета, при котором можно делать оценочные суждения).

В ходе математического моделирования основными задачами являлись приведение в соответствие геометрических размеров, граничных условий и методов к тем, которые упоминаются в литературных источниках как апробированные, для того, чтобы провести верификацию.

На рис. 3 представлен контурный график распределения частиц песка (кг/кг). Данный график распределения схож с тем, что представлен в [10] и, в целом, соответствует действительности, а именно – видна циркуляция твердой фазы в нижних частях топочной камеры, объем которой снижается по высоте, но все равно присутствует в околостенных зонах топки (преимущественно на фронтальной стене).



Рис.3. Контурный график распределения частиц песка (кг/кг): а – 3D вид; б – вертикальное сечение на расстоянии 2,75 метров от боковой стены и сечение по оси топочной камеры;

На рис. 4 отображены контурные графики скоростей воздуха и частиц песка. В обоих случаях наблюдается следующая зависимость – увеличение скорости от низа (циркулирующий слой) к верху (выход в циклоны). Средняя скорость по сечениям топочной камеры – 7 м/с, а скорость на выходе из топки в циклон – 30 м/с.

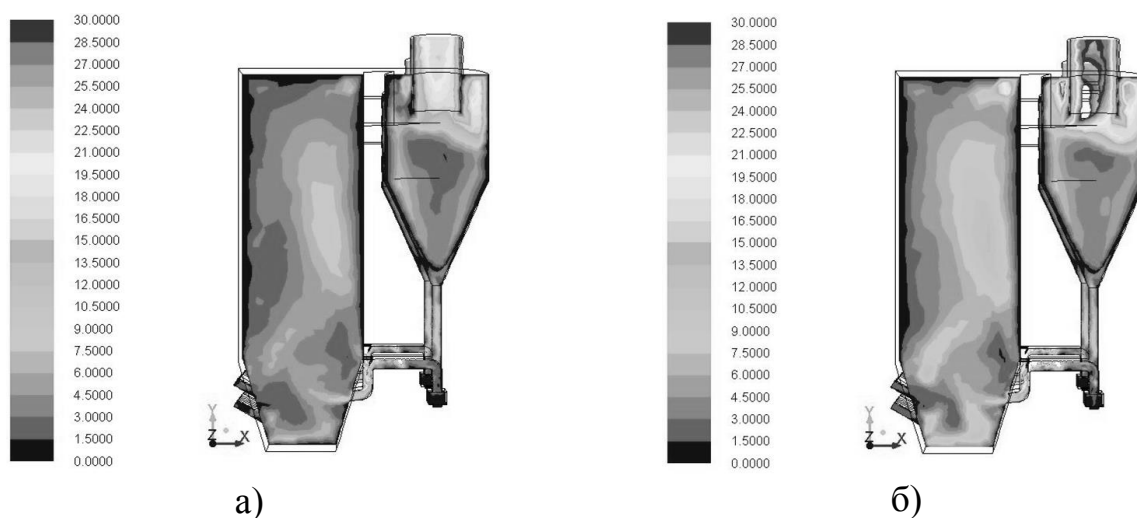


Рис. 4 – Контурный график распределения скорости по объему котла с ЦКС (м/с) в вертикальном сечении на расстоянии 2,75 метров от боковой стены:

а – частиц песка; б – воздуха

Для расчета аэродинамики исследуемого котлоагрегата был применен метод Эйлера–Эйлера, который приводится в большинстве литературных источников как один из основных для расчета подобного вида систем. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, отсутствие пост-анализа по распределению частиц по диаметрам в топочном объеме, а также отсутствие задания условий горения угольных частиц.

ЛИТЕРАТУРА:

1. J. Utt and R. Giglio. Technology comparison of CFB versus pulverized-fuel firing for utility power generation. IFSA 2011, Industrial Fluidization South Africa: 91–99
2. Кадников Б.Л., Давыдов Н.И., Шмуклер Б.И., Рябов Г.А. Моделирование физико – химических процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем// Теплоэнергетика. – 1994. – № 5. – С. 64 – 70.
3. Кадников Б.Л. Переменные режимы работы котла с ЦКС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14/ Кадников Борис Леонидович – М., 1995. – 22 с.
4. Tourunen A., Saastamoinen J., Nevalainen H. Experimental trends of NO in circulating fluidized bed combustion. Fuel 88 (2009) 1333–1341
5. Wojciech P. Adamczyk, Gabriel Wecel, Marcin Klajny, Paweł Kozolub, Adam Klimanek, Ryszard A. Białocki, Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler–Lagrange approach, Particuology 16 (2014) 29–40
6. Hansen, K.G., & Madsen, J. (2001). A computational and experimental study of gasparticle flow in a scaled circulating fluidized bed. In 9th semester project Aalborg University Esbjerg.
7. Myohanen, K., & Hyppanen, T. (2011). A three-dimensional model frame for modelling combustion and gasification in circulating fluidized bed furnaces. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 9(A25) <http://dx.doi.org/10.1515/1542-6580.2571>

8. Wischnewski, R., Ratschow, L., Hartge, E.-U., & Werther, J. (2010). Reactive gas–solids flows in large volumes—3D modeling of industrial circulating fluidized bed combustors. *Particology*, 8, 67–77.
9. Zhang N., Lu B., Wang W., & Li J. (2008). Virtual experimentation through 3D fullloop simulation of a circulating fluidized bed. *Particology*, 6, 529–539.
10. G.X. Yue, H.R. Yang, J.F. Lu, H. Zhang «Latest development of CFB boilers in China», Proc of Int. Conf. FBC20, 18-21 May 2009, Xi'an, China, pp 3-12;

Научный руководитель: А.В. Гиль, к.т.н, доцент, каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

СОСТОЯНИЕ УГОЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РОССИИ И В КИТАЕ И ВОЗМОЖНОСТЬ СОТРУДНИЧЕСТВА В СФЕРЕ ТОРГОВЛИ ТОПЛИВОМ

У Юйпэй

Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ группа 5B5A

Состояние угольной промышленности в России.

Угольная промышленность в России считается важной и значительной, она не только производит огромное количество товаров для внутреннего самостоятельного потребления, но и развивает российскую экономику путем экспорта угля.

Россия в рейтинге по запасам угля занимает второе место. Однако, в результате реструктуризации угольной промышленности, использование угля постепенно уменьшалось. На сегодняшний день, использование угля составляет лишь 12% от структуры использования топлива. Это приводит к возникновению избытка угля, что не выгодно с точки зрения экономики.

Таким образом, расширение масштаба экспорта угля является основной задачей России.

Состояние угольной промышленности в Китае

Угольная промышленность вносит огромную лепту в развитие китайской экономики. Это объясняется тем, что с развитием угольной промышленности, появилась большая потребность в рабочей силе, благодаря этому, количество рабочих мест увеличилось. Кроме этого, угольная промышленность стимулирует развитие смежных отраслей.

В Китае, использование угля составляет около 70% от структуры использования топлива. Для удовлетворения большой потребности в угле было принято решение расширить масштаб добычи угля. В результате этого, Китай в рейтинге по добыче угля лидирует с большим отрывом от конкурента, добывается 3680 млн. тонн угля, что составляет 46% от мировой добычи.

Табл. 2-1: Производство угля в год (млн. тонн)

Страна	2010	2011	2012	2014	Доля	На сколько хватит разведанных запасов
Китай	3240	3520	3560	3874	46,9%	38
США	984,6	992,8	922,1	906,9	12,9%	245
Россия	316,9	323,5	354,8	357,6	4,3%	500+
ЕС	535,7	576,1	580,7	491,5	7,1%	55

Тем не менее, чрезмерная добыча приводит к дефициту угля. Кроме этого, использование угля в большом количестве наносит серьезный ущерб окружающей среде. Изменение структуры использования топлива необходимо. На сегодняшний день, большое внимание уделяется разработке нового чистого топлива и улучшению технологии использования угля, однако это требует много времени. Другими словами, в течение следующих 10 лет, уголь все равно будет использоваться в качестве основного топлива.

Таким образом, чтобы облегчить негативное влияние дефицита угля, каждый год Китай импортирует уголь в большем количестве из других стран.

3. Характеристики угля в России и в Китае

Изучив состояние угольной промышленности в России и в Китае, можно сказать что, существует возможность торговли углем, но для принятия решения проведения торговли требуется еще исследование характеристик угля. Это объясняется тем, что не весь уголь подходит для использования в Китае, ведь оборудование установлено на энергетических станциях специально для сгорания угля с особым требованием, которое связано с безопасностью работ, причем эти требования жестко определяются энергетическими характеристиками угля, которые могут сильно отличаться друг от друга в зависимости от месторождения. В Китае используются только уголь, имеющий аналогичные теплоэнергетические характеристики.

В данной работе были рассмотрены следующие зависимости в качестве примера:

- зависимость теплоты(Q) от зольности сухой массы (график3-1),
- зависимость выхода летучих(V_{Γ}) от зольности сухой массы (график3-2),
- зависимость влажности(W) от зольности сухой массы

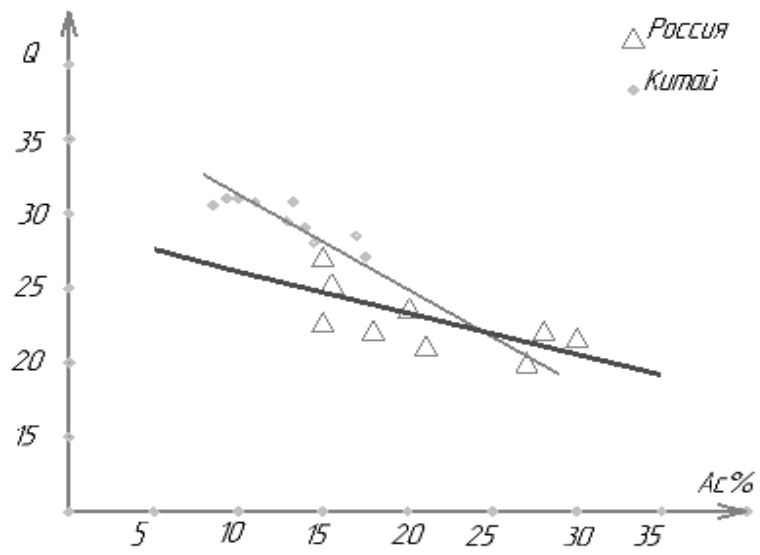


Рис. 3-1. Зависимость теплоты от зольности сухой масс

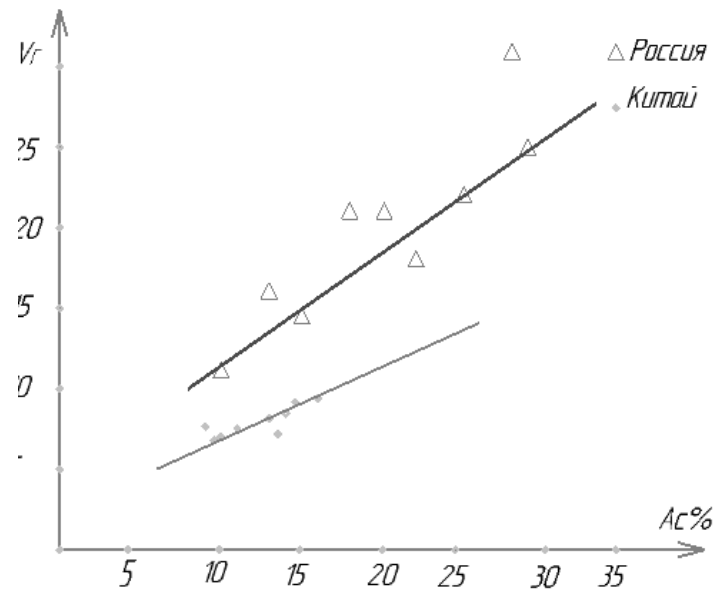


Рис. 3-2. Зависимость выхода летучих от зольности сухой масс

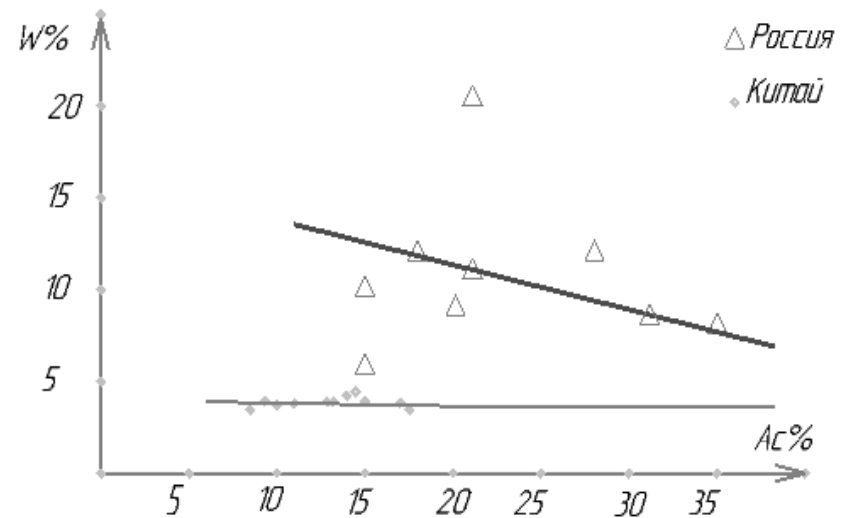


Рис 3-3. Зависимость влажности от зольности сухой масс

Графики показывают, что теплота и влажность имеют прямую зависимость от зольности сухой массы, а выход летучих имеет обратную зависимость от зольности сухой массы, причем зависимость теплоэнергетических характеристик от зольности в Китае и в России имеют одинаковый тип функции.

Таким образом, сотрудничество по торговле углем фактически можно реализовать, что будет иметь хорошие перспективы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Матвеева И.И., Новицкий Н.В., Вдовченко В.С. Энергетическое топливо СССР Справочник - М: Энергия, 1979-128 с, ил.

Научный руководитель: А.С. Заворин, д.т.н., профессор каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ГАЗИФИКАЦИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.С. Зайцев, П.П. Ткаченко, М.В. Белоногов
Томский политехнический университет
ЭНИН

Введение

Глобальный рост энергопотребления человечества в последние десятилетия требует широкого использования нетрадиционных, ранее не используемых, топлив [1, 2]. Различные горючие биомассы, отходы нефте- и углепереработки, низкокалорийные горючие полезные ископаемые, ранее не использовавшиеся в топливном цикле, стали предметом пристальных исследований в поисках оптимальных методов их использования [3, 4]. Такой подход позволяет, с одной стороны, расширить топливную базу энергетики, а с другой, дает возможность утилизировать огромные количества отходов, накопленных за последние десятилетия.

В то же время, многие нетрадиционные топлива обладают совокупностью физико-химических свойств, которые делают неудобным их непосредственное сжигание. Приготовление топливных композиций, в которых свойства одних компонентов компенсируют слабые стороны других, позволяет обойти многие сложности, но этот подход также имеет свои ограничения [4].

Принципиально иной подход к утилизации отходов углепереработки реализован при использовании различных технологий газификации органических топлив [5]. Нагрев выше температуры пиролиза позволяет с высокой эффективностью превратить практически любые органические композиции в смесь горючих газов (CO , H_2 , CH_4 и др.). Продукты газификации (сингаз [5]) могут быть использованы в традиционных камерах сгорания промышленных нагревателей

с минимумом модификаций. Однако, абсолютное большинство известных эффективных методик газификации углей [5, 6] требуют сооружения крупногабаритных установок, работающих при температурах 800-1000°C и высоких давлениях (до 20 атм), что зачастую неприемлемо по соображениям взрывопожаробезопасности.

В данной работе мы предлагаем, использовать лазерное излучение для адресной доставки тепловой энергии к порции топлива, в результате чего, может быть реализована его газификация при низких (до 100°C в случае импульсного излучения) температурах в зоне конверсии и при атмосферном давлении. Одним из преимуществ данного метода в отличие от традиционной газификации (процессы Фишера-Тропша, Лурги и т.п. [5]) является минимальное количество (или полное отсутствие) CO₂ в составе сингаза. Основным предметом исследования является поиск оптимальных условий лазерной газификации, и их влияние на эффективность конверсии топлива в сингаз, а также на состав сингаза.

Газификация водоугольных суспензий и сухих отходов углепереработки.

Исследования процессов газификации углеводородных топлив традиционно проводятся в кипящем слое, когда присутствие воды позволяет скорректировать природное соотношение водорода и углерода в исходном топливе в сторону выравнивания. С другой стороны, в случае лазерной газификации присутствие воды резко снижает паразитный выброс частиц вещества, возникающий при взаимодействии мощных лазерных импульсов с поверхностью топлива. Результаты наших экспериментов свидетельствуют, что применение импульсной накачки энергии имеет смысл при работе именно с водоугольными суспензиями. В случае сухих отходов углепереработки имеет смысл использовать лазеры с непрерывным режимом генерации. Для газификации водоугольной суспензии использовались лазерные источники с длиной волны 533 нм. В частности, импульсный лазер генерировал импульсы длительностью в 10 нс с частотой в 3 Гц.

На Рис. 1а показана типичная зависимость состава сингаза, полученного при газификации капли водной суспензии фильтр-кека каменного угля марки Г (300 мг, 40% вес. воды) от плотности энергии лазерных импульсов.

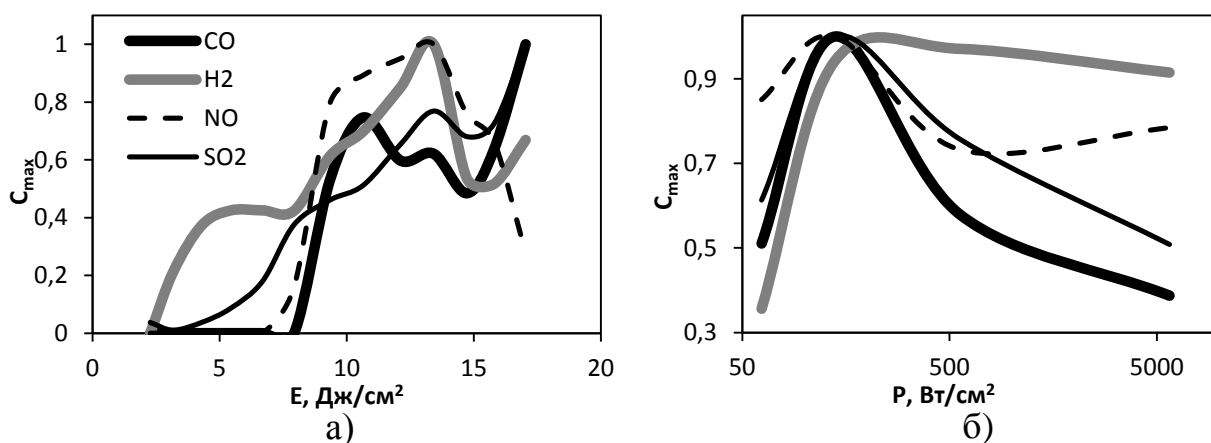


Рис. 1. Зависимость концентраций основных компонентов сингаза от интенсивности лазерного излучения в импульсном (а) и непрерывном (б) режимах генерации.

Табл. 2. Нормировочные факторы для зависимостей Рис. 1.

Режим генерации / топливо	CO, ppm	H ₂ , ppm	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm	CO ₂ , ppm
Импульс. / фильтр-кек + вода	5657	928	16	447	-
Непрер. / фильтр-кек + вода	4936	273	10	26	-
Непрер. / сухой фильтр-кек	30521	713	17	120	6172

На Рис. 1б показана зависимость типичного состава сингаза, полученного при газификации аналогичной капли суспензии от интенсивности излучения непрерывного лазера. На Рис. 2 показаны результаты анализа состава сингаза для случая газификации порции порошка сухого фильтр-кека (300 мг) непрерывным лазерным излучением.

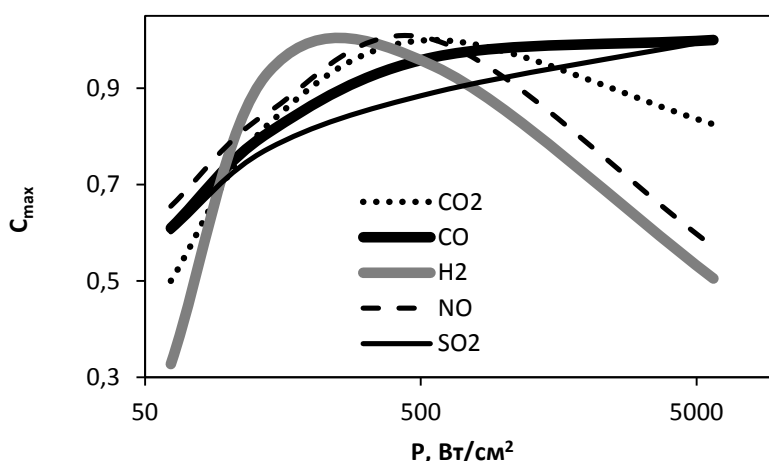


Рис. 2. Зависимость концентраций основных компонентов сингаза от интенсивности лазерного излучения в непрерывном режиме генерации при газификации сухого фильтр-кека. Концентрации газов нормированы. Нормировочные факторы указаны в Таблице 1.

Из рисунков и таблицы видно, что импульсный режим работы лазера позволяет получить сингаз с относительно низкой концентрацией горючих компонентов. Однако, он позволяет реализовать холодный (до 100°C) процесс газификации. В случае применения непрерывного лазера, температура в пятне фо-

кусировки может достигать 600-800°C, однако средняя температура порции топлива не превышает 300°C после двух минут облучения.

Из полученных результатов можно сделать выводы об оптимальных режимах энергетической накачки, позволяющих максимизировать выход горючих газов (CO, H₂) при минимуме вредных выбросов (SO₂, NO). При импульсном излучении, плотность энергии должна превышать 14 Дж/см², когда достигаются существенные концентрации CO при снижении концентраций оксидов азота. Аналогично, при использовании непрерывного лазера для газификации угольной суспензии интенсивность излучения не должна превышать 500 Вт/см². При газификации же сухого фильтр-кека желательно иметь интенсивности лазерного излучения порядка нескольких киловатт на квадратный сантиметр.

Очевидно, что для эффективной газификации нужно воздействовать на порцию топлива сотнями импульсов. Серия наших экспериментов показала, что поглощение ста импульсов ($E_{имп} \sim 100-120$ мДж) типично приводит к испарению 5-6% массы образца. Применение непрерывных лазеров также требует длительного воздействия излучения на топливо (порядка десятков секунд).

Таким образом, для практического применения выглядит логичным использовать многопроходные схемы, когда поток капель топлива последовательно пролетает сквозь «решетку» из нескольких десятков параллельных лазерных пучков, а не испаренные остатки могут быть повторно запущены в газификатор. На современном техническом уровне такие конструкции могут быть реализованы на основе массива достаточно дешевых лазерных диодов большой мощности.

Заключение

Выполненные исследования демонстрируют достаточно высокую эффективность предложенного метода газификации горючих промышленных отходов. Применение лазерных источников для адресной доставки тепла в зону конверсии углеводородов позволяет существенно снизить среднюю температуру топлива (менее, чем 100°C, в случае использования импульсного лазера) и, следовательно, рабочую температуру в камере газификационного реактора. С другой стороны, повышение производительности процесса газификации требует использования существенных мощностей лазерных источников (до сотен ватт в непрерывном режиме), что непременно скажется на рабочих температурах в сторону роста.

Использование непрерывных лазеров позволяет без каких-либо усилий получать сингаз с концентрацией CO до 3-5% (с небольшой примесью водорода и метана). Использование многопучковых схем потенциально позволяеткратно повысить концентрацию CO в составе сингаза без сильного усложнения конструкции газогенератора.

Исследование выполнено в рамках программы стратегического развития НИ ТПУ (проект ВИУ-ЭНИИ-97/2017).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года <https://minenergo.gov.ru/node/1913>
2. A. Bosmans and L. Helsen, Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment // Proc. Venice 2010, Third Int. Sympos. on Energy from Biomass and Waste - 2010.
3. Глушков Д.О., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. // Теплоэнергетика. - 2016 - №10, с. 31-41.
4. Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Стрижак П.А. // Химия твердого топлива. – 2017 – №3, с. 63-69.
5. D.B. Anthon, J.B. Howard, Coal devolatilization and hydrogasification // AIChE J. – 1976 – 22 (4), с. 625-656.
6. Платэ Н.А., Сливинский Е.В. Основы химии и технологии мономеров. - М. Наука, 2002 – 696 с.
7. R.I. Egorov, P.A. Strizhak, The light-induced gasification of waste-derived fuel // Fuel – 2017 – 197, с. 28-30.

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

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

А.А. Курганов

Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа А6-44

Актуальность проблемы состоит в необходимости уменьшения выбросов оксидов азота при сжигании твердого топлива в энергетических котлах из-за отрицательного воздействия вредных веществ на окружающую человека среду. Защита окружающей среды от вредных выбросов - острая проблема, особенно в районах концентрации промышленных предприятий, имеющих значительные отходы токсичных веществ. Без решения проблемы резкого снижения эмиссии вредных веществ невозможно решить задачу дальнейшего роста энергетического потенциала регионов.

Для решения проблемы выбросов оксида азота могут быть использованы некоторые технологические методы сжигания угольной пыли. С целью устранения недостатков общепринятых систем подачи угольной пыли имеет место внедрение системы подачи пыли высокой концентрации под разряжением (ПВКР)[1]. В данной системе транспорт пыли производится за счет разряжения, создаваемого паровым эжектором, установленным непосредственно в горелочных устройствах. Основными элементами системы являются смесители пыли, пылепровод и эжектор. Пар для эжекторов отбирается от промежуточного коллектора пароперегревателя индивидуально для каждого котла и подводится к

пылепроводам. Давление пара перед эжекторами поддерживается регулирующим клапаном. Значительным стимулом к внедрению системы ПВКР является экологическая эффективность такой конструкции. Процесс сжигания пыли в высоконцентрированном потоке характеризуется затянутым смесеобразованием в результате ограниченного доступа кислорода к потоку топлива на начальном участке факела. Дополнительным преимуществом системы ПВКР является увеличение приблизительно на 20 % производительности пылепитателей из-за повышенного разряжения в смесителе пыли, что в конечном итоге позволяет исключить из работы часть горелок с демонтажем пылепитателей. А это, в свою очередь, также является средством снижения образования NO_x и, кроме того, открывает возможность для внедрения ступенчатого сжигания за счет перераспределения подачи пыли и количества работающих горелок по ярусам во всем диапазоне нагрузок котла [2].

В отечественном и зарубежном опыте наиболее эффективным технологическим методом снижения образования NO_x при сжигании различных видов топлива признано ступенчатое сжигание. Сущность метода можно рассматривать как разделение факела на последовательные ступени, имеющие условные границы, где сжигание происходит при различных избытках воздуха и температурах процесса горения [3]. В первой ступени при недостатке кислорода тормозятся окислительные процессы с образованием NO и возникают условия для восстановления образовавшегося NO до молекулярного азота при наличии газов-восстановителей (CO , H_2 , CH_4), а в последующих ступенях NO тормозится за счет снижения температуры факела [4].

Опыт свидетельствует о довольно большом разнообразии вариантов реализации ступенчатого сжигания за счет конструктивных решений, приводящих к разбалансу соотношения «топливо-воздух» по глубине факела и высоте камеры горения. При этом переменным параметром могут быть как топливо, так и воздух в результате ступенчатой подачи топлива или ступенчатой подачи воздуха.

Большинство отечественных разработок и исследований посвящено ступенчатому сжиганию, создаваемому за счет ступенчатой подачи воздуха. Опыт внедрения в ФРГ технологии ступенчатого сжигания свидетельствует о меньшем выбросе NO при ступенчатой подаче топлива по сравнению со ступенчатой подачей воздуха. При этом отмечается возможность появления других технических проблем, таких как затруднение в обеспечении стабильности факела, повышенный недожог. Можно полагать, что внедрение технологии ступенчатого сжигания за счет ступенчатой подачи топлива на действующем оборудовании имеет ограничения, связанные с реакционной способностью.

Так же существенной возможностью снижения выбросов оксидов серы является связывание их в сульфаты и сульфиты в газовом тракте котла.

Известен сухой известковый способ очистки дымовых газов от оксидов серы, по которому к сжигаемому топливу добавляется известняк. Последний под действием высокой температуры подвергается диссоциации на CaO и CO_2 . В дальнейшем происходит связывание SO_2 с CaO с образованием в восстановительной среде сульфита, а в окислительной — сульфата кальция. Значительное

содержание в золе сжигаемого топлива свободного оксида кальция способствует естественному протеканию процесса связывания оксидов серы с различной степенью эффективности протекания процесса сульфатизации в зависимости от уровня температур. Связывание происходит при понижении температуры и протекает наиболее интенсивно в интервале температур 1040-4-1070 К.

Технологии, связанные с впрыском реагентов в газовый тракт котла (топку или газоход), являются одними из ключевых в американской программе «чистого угля» и нашли применение в странах Западной Европы. Наибольшее распространение получили реагенты на кальциевой основе. Эксплуатация таких установок показывает, что при двухкратном превышении количества кальция в сорбентном материале над количеством серы в топливе может удаляться до 70% диоксида серы. Практикой установлено также разнообразие технических решений в выборе мест впрыска реагентов, варьирующихся от горелок до золоуловителей [5].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Израэль Ю. А. Проблемы охраны природной среды и пути их решения. — Л.: Гидрометеонздат, 1984,— 236 с.
2. Котлер В. Р. Технологические методы снижения выбросов окислов азота на тепловых электростанциях (зарубежный опыт): Обзорная информация: Охрана окружающей среды и рациональное использование природных (ресурсов в энергетике, сер. 7, вып. I—М.; Информэнерго, 1987. — 56 с.
3. Котлер В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. — М.: Энерго- до- миздат, 1987. — 141 с.
4. Соколовский В. Г., Гапеев В. В. Экологически чистая ТЭС на угле — будущее электроэнергетики. — Теплоэнергетика, 1989, № 8—с. 2—4.
5. Лебедев И. К., Карякин С. К., Закоурцев Г. Н. Разновидности форм минеральных компонентов в канско-ачинских углях- — В кн.: Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Материалы Всесоюзной конференции т. 1. — Таллинн: ТПИ, 1974. — с. 42—48.

Научный руководитель: А.С. Заворин, д.т.н, профессор, зав. каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

АВТОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ ЗА СЧЕТ СОБСТВЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ

А.В. Астафьев

Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5ВМ6А

Одной из главных проблем энергетики является её пагубное влияние на здоровье живых организмов и состояние окружающей среды [1].

С целью снижения вредного воздействия на окружающую среду мировая энергетика стремится к увеличению доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Одним из наиболее универсальных видов ВИЭ, с точки зрения энергетического использования, является биомасса. Однако до сих пор остаются проблемы, препятствующие её широкому использованию в качестве топлива. К этим проблемам относят низкие теплотехнические характеристики (высокая влажность, низкая теплота сгорания), шлаковую способность золы, неоднородный фракционный состав, хрупкость, крошимость и др., что приводит к высоким эксплуатационным затратам на сжигание традиционными методами [2]. В связи с этим исследования, направленные на повышение эффективности энергетического использования биомассы, являются актуальными в настоящее время.

Одним из наиболее универсальных и перспективных направлений переработки биомассы для последующего её эффективного использования в качестве топлива является пиролиз. Биомасса является высокорекреационным и термически нестойким сырьём, поэтому целесообразно рассматривать низкотемпературный тип пиролиза для её переработки.

Основным сдерживающим фактором широкого использования пиролиза биомассы является необходимость подвода тепла, предназначенного для организации и протекания процесса. Существует мнение о протекании низкотемпературного пиролиза за счет собственных тепловых эффектов [3]. В данной работе исследован тепловой эффект низкотемпературного пиролиза биомассы, на основе которого сделана оценка возможности её термической переработки в автотермическом режиме. Рассмотрено влияние влажности на величину тепловых затрат и автотермичность пиролиза.

Рассмотрены наиболее распространенные в Томской области (Россия) типы биомассы: солома, щепа из различных пород древесины, сосновые опилки, торф Суховского месторождения. Изучаемая биомасса выдержана до воздушно-сухого состояния и проанализирована согласно ISO 5068-1:2007, ISO 1171:2010, ISO 5071-1:3013. Теплота сгорания (Q_i^r) определена в калориметре АБК-1 (Россия), элементный состав – на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия). Содержание в топливе диоксида углерода карбонатов определено ускоренным объемным методом согласно ISO 925-97. Полученные теплотехнические характеристики представлены в таблице 1.

Табл. 1. Теплотехнические характеристики биомассы

Характеристика	солома	щепы	опилки	суховской торф
Влажность W^a , %	7.0	7.8	7.0	9.9
Зольность на сухую массу A^d , %	2.8	1.9	1.6	22.8
Выход летучих веществ V^{daf} , %	78.5	81.5	83.4	74.8
Теплота сгорания на сухую беззольную массу Q^{daf} , МДж/кг	19.6	18.9	19.8	20.1
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	17.7	17.1	18.1	11.8
Элементный состав на сухую беззольную массу, %				
C^{daf}	50.20	50.32	52.5	52.06
H^{daf}	6.36	6.05	6.58	6.31
N^{daf}	1.09	0.24	0.22	3.58
S^{daf}	следы	следы	следы	0.20
O^{daf}	42.35	43.39	40.70	37.85

Проба суховского торфа имела высокое содержание диоксида углерода карбонатов $(CO_2)_M^d$, равное 9,82%.

Для исследования тепловых эффектов пиролиза биомассы проведены термогравиметрический (ТГА) и дифференциальный термический (ДТА) анализы на микротермоанализаторе STA 449C (Netzsch, Германия).

На примере дифференциально-термического анализа соломы (рис. 1 а) видно, что при нагреве от 20 до 120°C происходило испарение влаги (кривая ТГ), содержащейся в соломе, что сопровождалось эндотермическим пиком (кривая ДТА). При температуре 180°C наблюдалось начало термического разложения соломы (кривая ТГ), протекающее без четко выраженных тепловых эффектов. Температура 220°C являлась началом протекания экзотермических реакций, заканчивающихся при 580°C, что иллюстрировалось в виде пика на кривой ДТА.

Результаты дифференциально-термического анализа остальных проб биомассы приведены на рис. 1 (б, в, г). Щепы и опилки аналогично соломе имели экзотермический пик, наблюдаемый в интервале температур от 240-250 до 550-570°C. При термическом разложении торфа наблюдалось два экзотермических пика. Первый экзотермический пик регистрировался при 200-210°C и оканчивался при 320-340°C. Второй экзотермический пик (основной) наблюдался при 370-385°C и продолжался до 530-570°C (рис. 1 г, кривая ДТА). Согласно экзотермическим пикам определены величины тепловых эффектов топлив.

Выход продуктов низкотемпературного пиролиза определен на лабораторной установке, подробно описанной в работе [4].

По полученным материальным балансам и значениям тепловых эффектов проведена оценка возможности автотермического протекания пиролиза согласно методике [4]. Условием автотермичности является необходимость превышения величиной теплового эффекта суммы тепловых затрат, необходимых на

сушку сырья (Q_1), нагрев (Q_2) до температуры начала разложения биомассы, нагрев до состояния углеродистого остатка (Q_3), нагрев летучих продуктов пиролиза – газа (Q_4), паров пирогенетической воды (Q_5) и смолы (Q_6):

$$Q_{ТЭ} \geq Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6. \quad (1)$$

Результаты расчета пиролиза биомассы приведены в таблице 2.

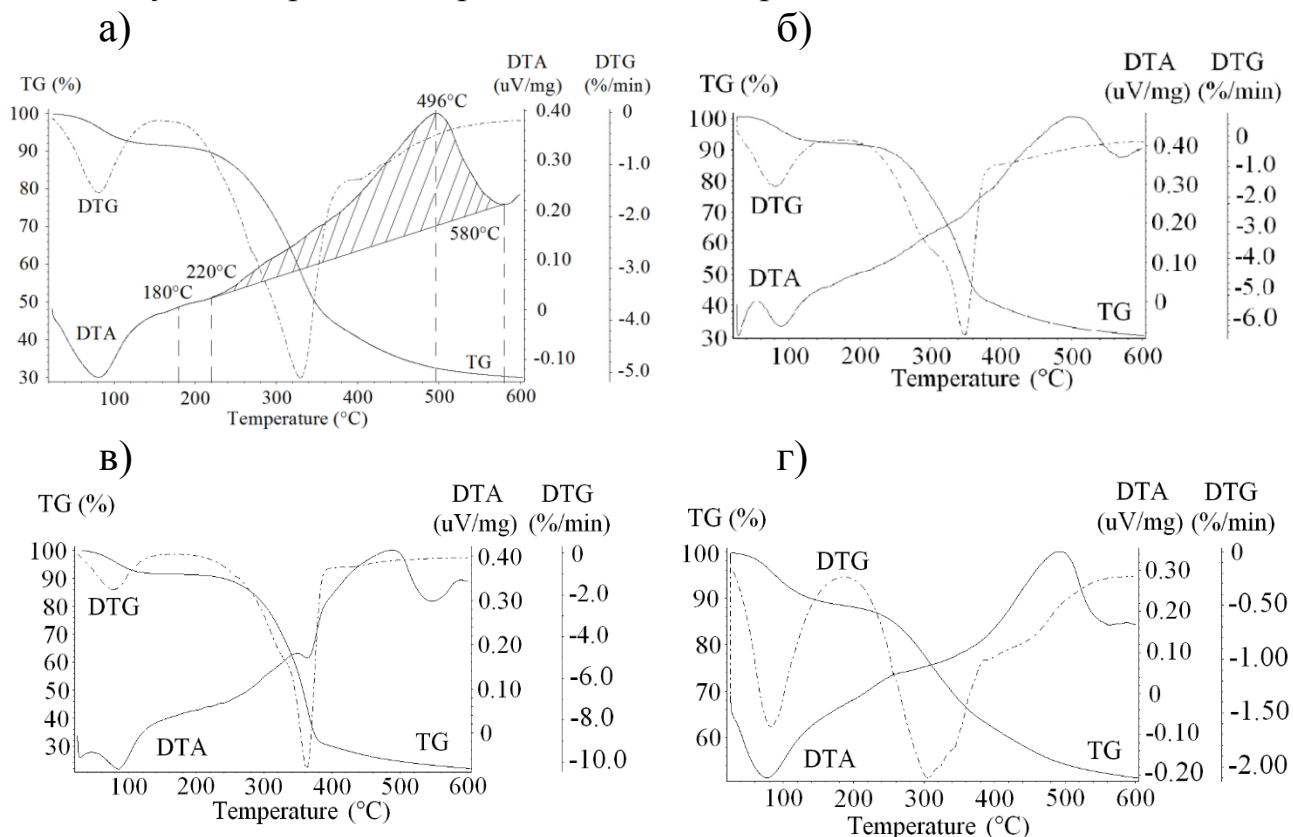


Рис. 1. Кривые дифференциально-термического анализа биомассы: а) – солома, б) – щепка, в) – опилки, г) – суховской торф.

Табл. 2. Тепловые затраты и тепловой эффект пиролиза биомассы

Вид биомассы	Влажность W^a , %	Тепловые затраты на осуществление процесса пиролиза, кДж/кг						Тепловой эффект ($Q_{ТЭ}$), кДж/кг	Суммарный тепловой эффект (Q), кДж/кг
		Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6		
солома	7.0	184.5	113.0	447.4	48.4	121.6	32,7	1371.8	424.2
щепка	7.8	203.9	105.8	435.2	45.8	108.7	41,6	1017.0	76.0
опилки	7.0	183.0	106.7	415.8	32.2	133.1	37,6	987.7	79.3
суховской торф	9.9	258.8	98.0	332.7	28.2	46.1	23,5	776.7	-10.6

Из таблицы видно, что величина теплового эффекта, наблюдаемого при низкотемпературном пиролизе соломы и древесины (щепы и опилок), превышает значение тепловых затрат, необходимых для осуществления процесса. Это свидетельствует о возможности переработки этого сырья в автотермическом режиме при условии предварительной подсушки до воздушно-сухого состояния. Данные результаты подтверждены другими исследователями [5]. Тепловые затраты на осуществление пиролиза у рассматриваемой пробы торфа превышают теплоту, выделяющуюся за счет протекания экзотермических реакций.

Влияние на автотермичность процесса оказывает исходная влажность топлива. В связи с этим была проведена оценка суммарного теплового эффекта при различной исходной влажности топлив (рис. 2).

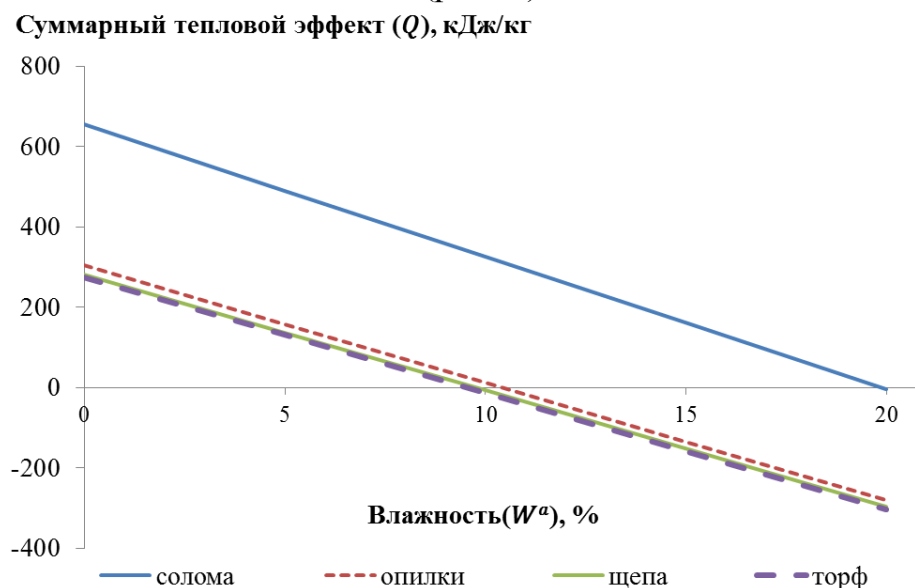


Рис. 2. Зависимость суммарного теплового эффекта (Q) в процессе пиролиза торфа от влажности

Из рис. 2 видно, что переработка суховского торфа может быть осуществлена в автотермическом режиме при условии предварительного подсушивания до значения влажности $W^a = 9,5\%$. Максимальная влажность, при которой возможно автотермическое протекание пиролиза, для соломы равна $19,9\%$, щепы – $10,4\%$, опилок – $9,7\%$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution. – Paris: International Energy Agency, 2016. – 266 p.
2. Вититнев Ю.И., Учитель А.Д., Кормер М.В., Лялюк В.П., Ляхова И.А., Шмельцер Е.О. Проблемы транспортировки угольных концентратов в период отрицательных температур окружающей среды // Кокс и химия. – 2013. – № 5. – С. 13-19.
3. Kulesh R.N., Orlova K.Y. Field Research of Firing Stored Peat Critical Conditions, MATEC Web of Conferences 72 (2016) 01055.
4. Tabakaev R., Astafev A., Dubinin Yu., Yazykov N., Yakovlev V. Evaluation of autothermal pyrolysis of peat realization for power generation // Waste and Biomass Valorization (в печати).
5. M. Amutio, G. Lopez, R. Aguado, J. Bilbao, M. Olazar, Biomass oxidative flash pyrolysis: Autothermal operation, yields and product properties, Energy and Fuels 26 (2012) 1353–1362.

Научный руководитель: Р.Б. Табакаев, к.т.н., научный сотрудник каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ГАЗОГИДРАТЫ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ, КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ЭНЕРГОРЕСУРС

Р.А. Глебов, С.Л. Елистратов

Новосибирский государственный технический университет

Доклад по результатам научного исследования, целью которого являлся поиск ответа на вопросы: возможно ли использовать газогидраты горючих газов в энергетике, какими свойствами оно обладает как топливо, возможно ли его непосредственное сжигание. Что актуально в связи с переходом на энерго-ресурсосберегающие и экологически чистые технологии, а также поиском альтернативных источников углеводородного сырья. Приведены впервые полученные экспериментальные данные по горению газогидратов пропана и метана в диапазоне температур разложения от комнатных до 550°C при атмосферном давлении.

Theses on the results of scientific research, the purpose of which was to answer the question: Is it possible to use the hydrates of combustible gases in the energy, what properties it has as fuel, whether it is possible to direct combustion of gas hydrates. What is important in connection with the transition to the energy-resource-saving and environmentally friendly technologies, as well as the search for alternative sources of hydrocarbons. For the first time the experimental data obtained by combustion of propane gas hydrates and methane in the decomposition temperature range of ambient to 550°C at atmospheric pressure are shown.

В настоящее время гидраты метана находятся в центре внимания широкой научной общественности. Газовые гидраты — это кристаллические соединения клатратной природы, образующиеся при определённых термобарических условиях из воды и газа. Запасы углеводородного сырья (в основном метана) в газогидратном состоянии оцениваются в $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^3$, что превышает все до сих пор известные запасы газа, нефти и угля вместе взятые. Ранее использование газогидратов на прямую в энергетическом оборудовании не рассматривалось. Разрабатываются технологии по получению, транспортировке и регазификации [1], для дальнейшего использования газа в котлах как энергетических, так и теплофикационных. После обзора по газогидратам и газогидратным технологиям, существующим на сегодняшний день, решено поставить несколько задач перед работой: получение газогидрата метана, разработка экспериментальных методик исследования разложения и горения газогидратов горючих газов, разработка рекомендаций по использованию газогидратов и по проведению процессов прямой регазификации или сжигания газогидратов горючих газов в энергетике.

По разработанной методике высокоточного (до 0.01 грамма) весового определения динамики разложения газогидратов в адиабатных условиях и условиях горизонтальной поверхности нагрева, исследованы процессы разложения и горения газогидратов метана и пропана на сухой греющей поверхности температурой 20, 90, 220, 550 °С. Для режимов разложения при 20 и 90°C также были проведены эксперименты по разложению газогидрата на неразрывной пленке дистиллированной воды (Рис. 1 и 2).

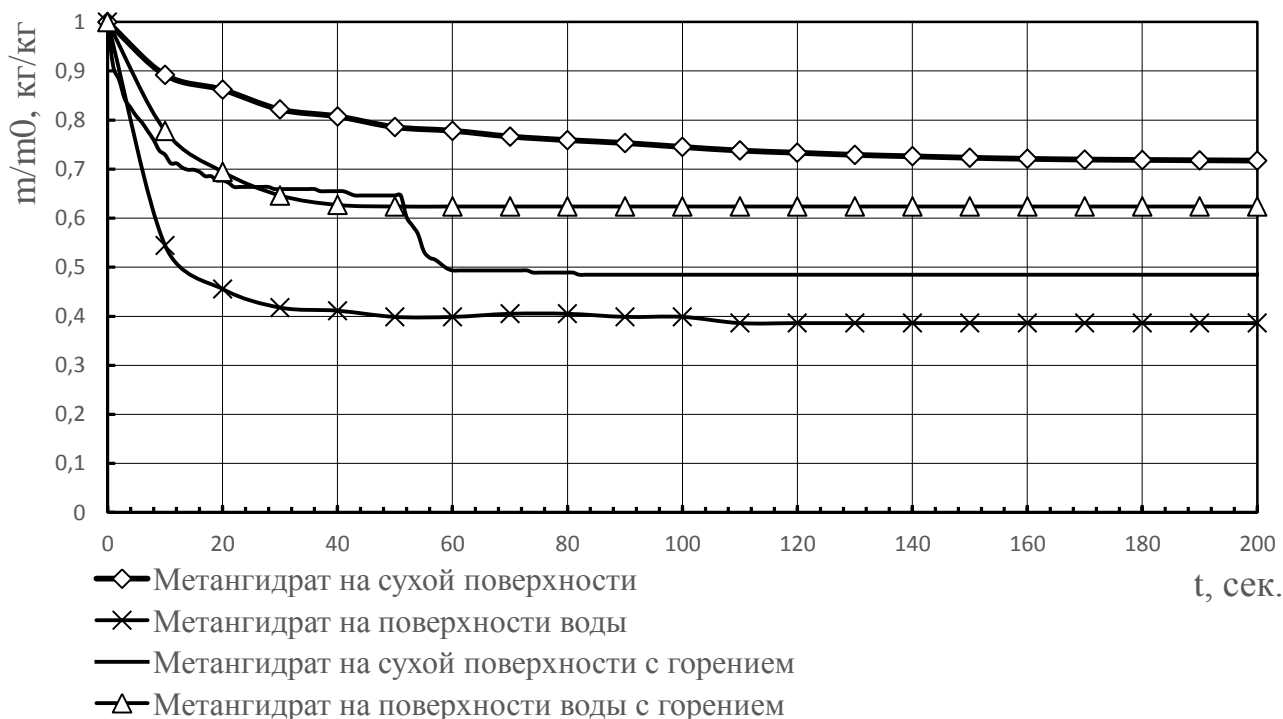


Рис. 1 Разложение метангидрата на поверхности нагрева 20°C

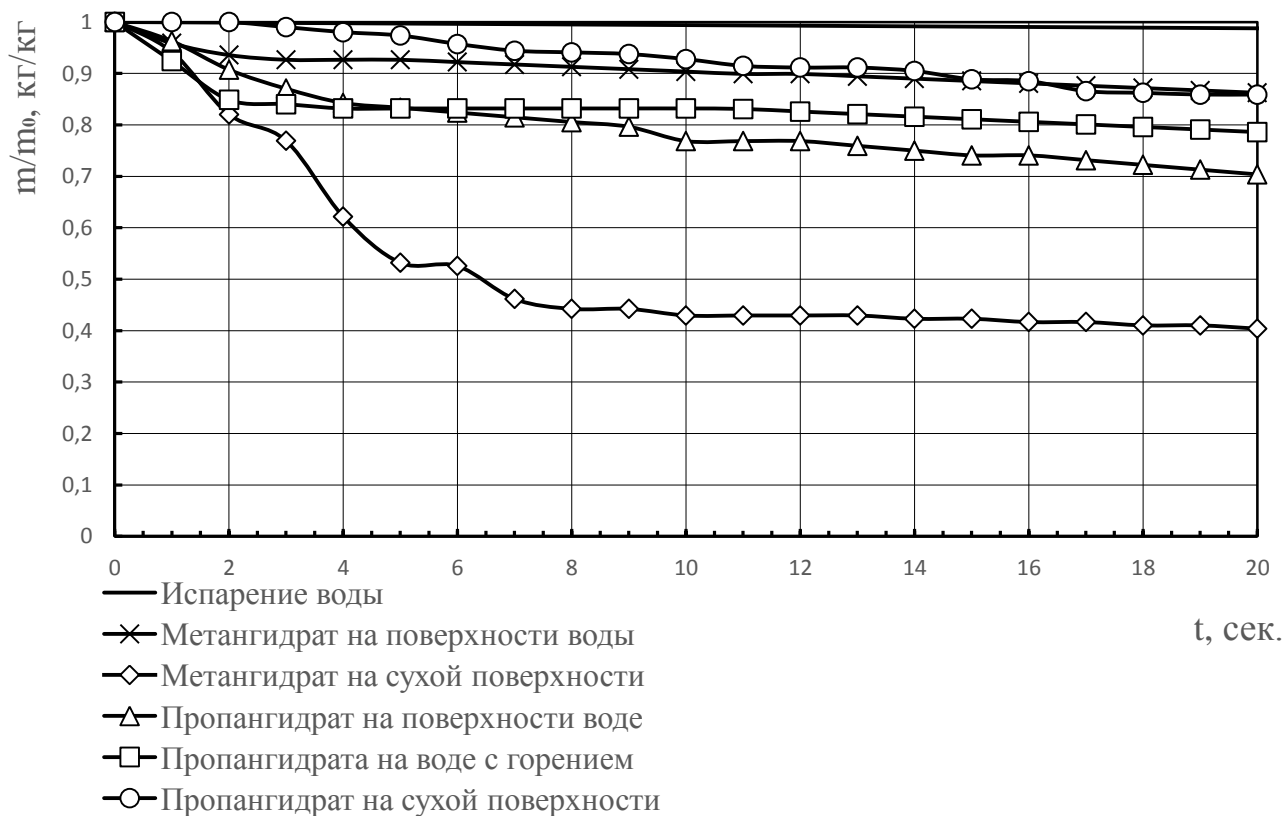


Рис. 2 Разложение газогидратов на поверхности нагрева 90°C

С помощью микротермопар и тепловизионного оборудования определена температура поверхности образца газогидрата в процессе разложения, самоконсервации и горения. В среднем в процессе разложения газогидрата температура его поверхности составляла -50 °С.

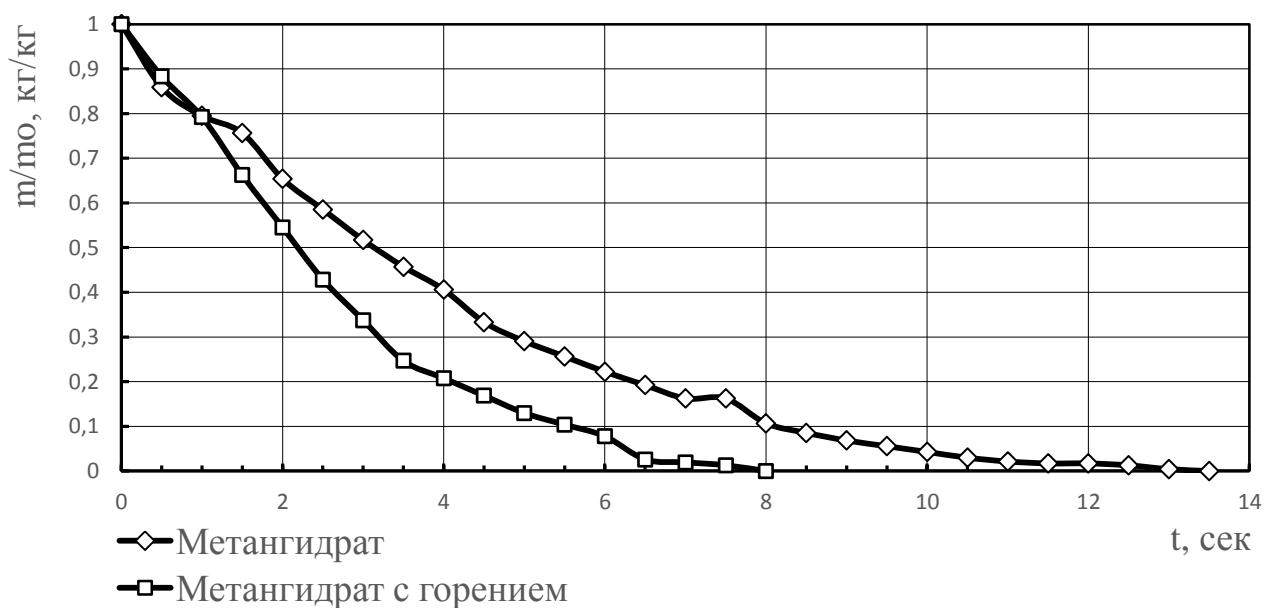


Рис. 3 Разложение метангидрата на сухой поверхности 220°C

Выявлена тенденция по динамике разложения: при росте температуры до точки кризиса кипения пропорционально растет скорость разложения, выше этой точки скорость разложения будет расти незначительно, и по сути максимальная скорость (из проверенных температур) была достигнута при температуре поверхности нагрева в 220 °С (Рис. 3), но при этом наблюдается выделение большого объема пара воды, оставшегося от разложившегося газогидрата.

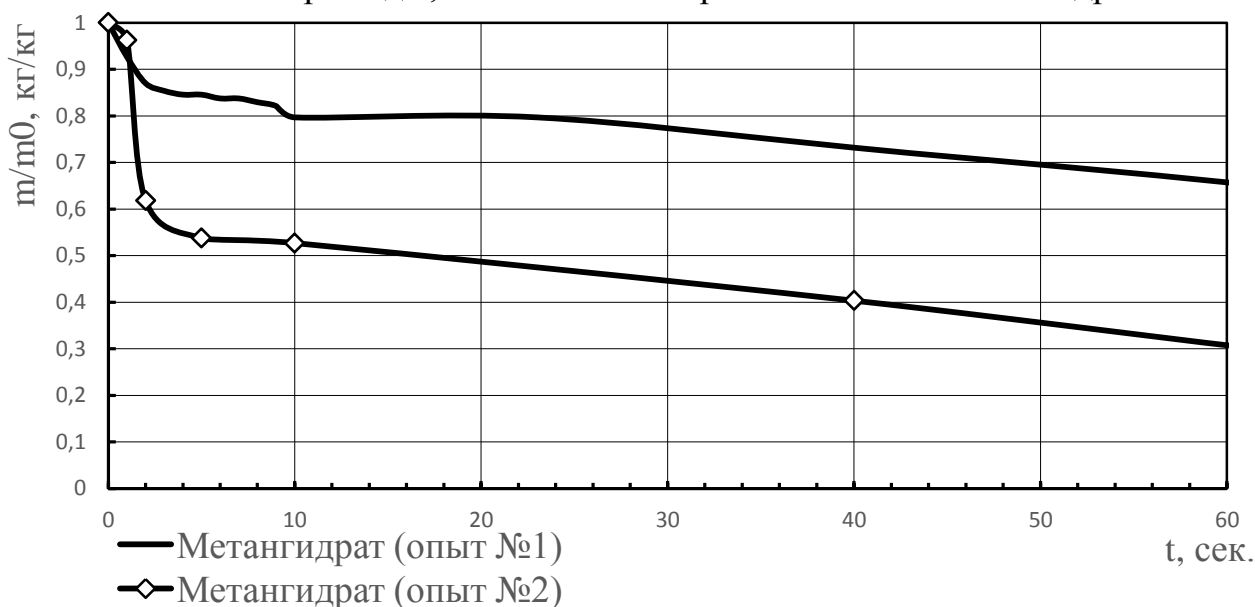


Рис. 4. Разложение метангидрата на поверхности 550°C

Так же при температуре поверхности нагрева в 550 °С (Рис.4) наблюдается очень интенсивное выделение газа из газогидрата, вплоть до его визуального определения и в первые секунды процесса на поверхности нагрева, эффект схожий с эффектом Лейденфроста, парение частиц газогидрата на подушке выделяющегося газа. Что было установлено посредством высокоскоростной съемки.

На всех режимах разложения метангидрата и пропангидрата был произведён поджег образца сразу после его помещения на поверхность нагрева. При горении прослеживается ускорение разложения и равномерный выход горючего вещества из газогидрата, что в свою очередь будет обеспечивать равномерность горения, но его интенсивность будет уменьшаться по мере уменьшения количества, выделяемого при разложении. Фактически, чтобы использовать газогидраты горючих газов как топлива, необходимо лишь обеспечить непрерывную подачу топлива (газогидрата) в зону сжигания, их хранение, производство или же добычу.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Patent EP 2130896 A1, Process for producing mixed gas hydrate / Nobuyasu Kanda, Masahiro Takahashi, Toru Iwasaki; declared 08.03.2008, published 9.12.2009
2. Sloan E.D. Clathrate hydrates of natural gases. Third Edition. – New York: Marcel Dekker, 1998.

Научный руководитель: С.Л. Елистратов, д.т.н., зав. кафедрой ТЭС НГТУ.

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ): СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ.

Н.С. Кузьменко

Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ, группа 5В61

Актуальность проблемы

Энергетическое снабжение Республики Саха (Якутия) достаточно развито, но в связи с тем, что численность населения Якутии по данным Госкомстата России составляет 962 935 человек, а плотность населения не превышает 0.31 чел./км² значительная часть республики обеспечивается электроэнергией децентрализованно [1]. В зонах децентрализованного электроснабжения, к которым относятся северные улусы и труднодоступные районы, нет крупных производственных предприятий, поэтому энергообеспечение потребителей осуществляется за счёт автономных дизельных электростанций (ДЭС). По данным на 2010 год в Якутии функционирует 126 ДЭС, которые снабжают электричеством 139 тысяч человек, проживающих в 17 районах [2].

Из-за дальности доставки дизельного топлива и труднодоступности некоторых районов себестоимость топлива возрастает, приводя к высокой стоимости для потребителя. Экономически обоснованный тариф в зонах централизованного электроснабжения составляет 3-4 руб./кВт·ч, в то время как в децен-

трализованных районах республики себестоимость электроэнергии в 10-15 раз превышает «централизованные» значения [2].

В связи с этим промышленные предприятия несут бремя перекрестного субсидирования [2,3]. В последние годы промышленные потребители стали уходить на оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) в пользу низких цен, так как на рынке существует конкуренция, и тарифы существенно ниже. А при уходе крупных потребителей нагрузка распределяется на оставшиеся мощности, способствуя повышению тарифов [2].

Местные ресурсы низкосортного топлива

Биологические отходы. На территории Якутии насчитывается большое количество крупного рогатого скота, большая часть которого содержится в фермерских (крестьянских) хозяйствах по 10, 20 или 50 единиц. К примеру, в Чурапчинском районе насчитывается около 30 тыс. коров, а в Мегино-Кангаласском районе около 25 тыс. коров. Одна корова в сутки в среднем производит 35 кг навоза, следовательно, только с двух районов можно получать приблизительно 700 тыс. т навоза в год [4].

Сланцы. Кроме того, в Ленском бассейне также располагаются залежи горючих сланцев, а именно в Курейско-Котуйском, Оленёкском и Алдано-Ленском районах, потенциальные запасы которых составляют не менее 500 млрд т. Есть возможность извлекать из горючих сланцев газ, состоящий преимущественно из метана [5,6].

Торф. На территории Табалахской впадины в Якутии в общем выявлено около 50 объектов с мощностью торфяного пласта более 0,5 м. Наибольший интерес представляет 14 объектов, расположенных по правобережью реки Табалах на расстоянии не более 10 км друг от друга и вблизи поселка Эге-Хая [7].

Древесина. В Якутии, как и по всей России активно ведётся лесозаготовка. Отходы от данного вида производства образуются в большом количестве и, как правило, не утилизируются. Эти отходы также могут быть рассмотрены в качестве потенциальных ресурсов для энергообеспечения.

Бурый уголь. В настоящее время разработка бурого угля ведётся в Кангаласском бурогольном месторождении и на разрезе «Кангаласский» открытым методом. Суммарные запасы действующего разреза составляют более 17 млн т [8].

Проведенная оценка ресурсов низкосортного сырья республики показывает, что потребности в энергетическом топливе может быть полностью или частично покрыта за счет вовлечения местных сырья в топливно-энергетический баланс. Однако, специфика децентрализованного энергообеспечения, заключающаяся в том, что установки по выработки электроэнергии работают на жидком или газообразном видах топлива, требует переработки рассмотренных низкосортных топлив в жидкие или газообразные продукты.

Перспективные технологии переработки низкосортных топлив в газообразные и жидкие продукты

В работе [9] описан синтез биогаза из биологических отходов путём анаэробного перегрева (ферментации), в результате которого получают обогащенный метаном газ (биогаз) с высокой теплотой сгорания 5340-6230 ккал/м³

(22400-26200 кДж/м³), пригодный для использования в газотурбинных установках и переведенных на газовое топливо ДЭС.

Другим способом является «синтез Фишера-Тропша», подробно описанный в источнике [10]. Данный способ заключается в использовании катализаторов (никель, кобальт и др.), что позволяет перерабатывать СО и Н в углеводородные топлива и машинные масла.

В работе [11] определены оптимальные условия конверсии торфа с получением смеси горючих газов. Установлено, что добавление бентонитовой глины позволяет ускорить процесс.

В [12] предложено техническое решение (газогенератор) для переработки древесины в газ. Газогенератор работает на принципе термохимической реакции твердого органического топлива с выделением генераторного газа. В результате переработки получается газ, пригодный для использования в газопоршневых когенераторах для выработки электроэнергии и тепла.

Другой метод переработки древесины представляет собой процесс, состоящий из двух стадий: древесина методом термического разложения перерабатывается в парогазовую смесь и уголь, далее осуществляется переработка полученных продуктов при 450-500°С в течение 1-2 сек. методом быстрого пиролиза. В результате получают парогазовую смесь, после конденсации которой образуется пиролизная жидкость – биотопливо [13].

Заключение

Проведенный анализ децентрализованного энергоснабжения Республики Саха (Якутия) показал, что основным энергетическим оборудованием, используемым для автономного энергообеспечения потребителей, являются дизельные электростанции. Работа дизельных электростанций осуществляется на привозном дизельном топливе, что из-за дополнительных транспортных затрат приводит к экономически-обоснованной себестоимости выработки электроэнергии в 10-15 раз выше, чем при «централизованном» энергоснабжении.

В регионе присутствует широкий спектр низкосортных топлив, в число которых входят биологические отходы, сланцы, торф, древесные отходы и бурый уголь. Учитывая то, что дизельные электростанции работают на жидком топливе или после модернизации – на газообразном, необходима переработка перечисленных видов низкосортного топлива в жидкие или газообразные продукты котельного качества.

Приведенные способы по переработки низкосортных топлив позволяют получать высококалорийное газообразное и жидкое топлива, что в перспективе позволит перевести существующие ДЭС на местные ресурсы и, тем самым, снизить себестоимость энергоснабжения в отдаленных районах Республики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парников Н. М. Повышение энергетической эффективности комплексов децентрализованного электроснабжения на примере Республики Саха (Якутия): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.03 / Н. М. Парников ; Том-

- ский политехнический университет (ТПУ) ; науч. рук. Б. В. Лукутин. — Томск, 2009. — 23 с.: ил.
2. Программа оптимизации локальной энергетики Республики Саха (Якутия) // <http://www.rushydro.ru/upload...> (дата обращения: 08.09.2017).
 3. Постановление Правительства Республики Саха (Якутия) №600 от 29 декабря 2010 года.
 4. Петров Н.В., Друзьянова В.П. Перспективы получения и применения биотоплива для ДВС в Якутии // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. - 2012.- №9-2.- С. 45-52.
 5. Гудзенко В.Т., Вареничев А.А. Теоретические аспекты в геологии // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. - 2014. - №9. - С. 45-55.
 6. Агафонов И.А. Перспективы использования сланцевого газа // Экономика, организация и управление организациями, отраслями, комплексами. - 2014.- С. 40-43.
 7. Панов В.В., Протопопов А.В. Торфяники Табалахской впадины Республики Саха (Якутия) // Труды Инсторфа. - 2012. - №5. - С. 9-11.
 8. Гаврилов, В.Л. Оценка состояния открытой разработки угольных месторождений центральной и северной Якутии / В.Л. Гаврилов, С.А. Ермаков, Д.В. Хосоев // Горный информационно-аналитический бюллетень. -2010. -№ 11. -С. 29-36.
 9. Передерий С. Метан из биомассы // Леспром информ. - 2010. - №8. - С. 164-167.
 10. Синтетические моторные топлива // Энциклопедия техники [2017-2017]. URL: <http://enciklopediya-tehniki.ru/tehnologiya-dobychig..> (дата обращения: 21.09.2017 г.).
 11. Алферов В.В. и др. Каталитическая активность природных и искусственных цеолитов в процессах газификации и пиролиза торфа // Катализ в промышленности / Алферов В.В., Мисников О.С., Кислица О.В., Сульман Э.М. - 2006. - №6. - С. 42-46.
 12. Тимербаев Н.Ф. и др. Газификация органических видов топлива // Вестник Казанского технологического университета / Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Хисамеева А.Р. - 2011. - №1. - С. 326-329.
 13. Забелкин С.А. и др. Переработка древесины в жидкое топливо и его энергетическое использование // Вестник Казанского технологического университета / Забелкин С.А., Грачёв А.Н., Башкиров В.Н. - 2011. - С. 40-42.

Научный руководитель: Р.Б. Табакаев, к.т.н., научный сотрудник ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРИЗОНТАЛЬНОГО БЛОЧНОГО ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА

Н.А. Захарушкин, И.Ю. Абашев
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ

Описание динамических характеристик с распределенными параметрами тепловой системы жаротрубного котла необходимо решать через систему уравнений с частными производными. Кроме того, некоторые дополнительные алгебраические уравнения требуют введения дифференциальных алгебраических уравнений, которые являются сложными для решения. Помимо этого, возникают некоторые нелинейные уравнения при моделировании механизма теплопередачи, например – излучение. Температура, давление, расход участвующих жидкостей являются независимыми переменными. Для безопасной эксплуатации котла необходимо принять во внимание некоторые ограничения и упрощения. Следовательно, предлагается комплексная модель, чтобы уменьшить сложность и время вычислений, обеспечить приемлемые результаты. Цель работы – предложить модель для моделирования характеристик горизонтального блочного жаротрубного котла с некоторыми упрощениями для использования на практике.

Общая схема расчета для разработанной модели показана на рисунке 1. Модель жаротрубного котла была создана с использованием MathCAD. Чтобы построить модель для системы по физическим принципам, необходимо определить т.н. входы (англ. input – варьирующие параметры) и выходы (англ. output – варьируемые критерии). Для жаротрубного котла входами являются конструктивные параметры (геометрия котла и элементов, которые могут быть включены в тепловую схему: например, экономайзера, пароперегревателя, деаэрата и др. [1]) и эксплуатационными параметрами, такими как расход воды, расход топлива и воздуха, температура и давление топлива и окружающей среды, положение парового клапана. Выходами являются параметры производительности, такие как температура (котловой воды, дымовых газов, насыщенного и перегретого паров), давление (внутри котла с водяной фазой и парового котла), расход пара, уровень или объем жидкости, состав дымовых газов и КПД котла. Кроме того, могут быть другие выходы, зависящие от дополнительных элементов, расположенных в качестве рекуперации тепла путем продувки, дегазатора, теплообменника, кондиционирования пара через пароперегреватель или питательной воды с помощью экономайзера. Ниже подробно рассмотрены два тракта жаротрубного котла. Перед запуском моделирования устанавливаются все константы, конструктивные и режимные параметры.

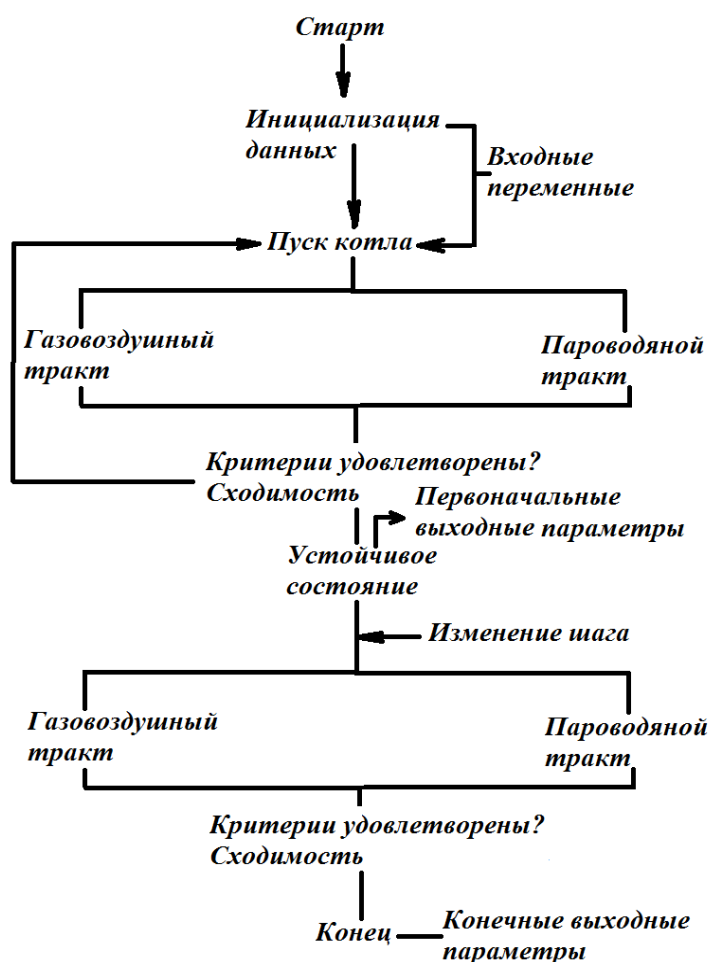


Рис. 1. Общая схема расчета разработанной модели

Моделирование запускается после того, как заданы начальные условия работы котла – характеристики топлива, воздуха, питательной воды. Когда сходимость достигнута и желаемое устойчивое состояние получено, могут быть внесены некоторые изменения, чтобы получить динамическое поведение котла, для достижения нового устойчивого состояния.

Для верификации модели произведено сравнение с результатами других авторов, во время которого дополнительные элементы, рассмотренные в [1], не учитываются, т.е. моделируются только газовоздушный и пароводяной тракты котла. Основными входными переменными являются расход топлива, воздуха, расход питательной воды и открытие парового клапана, температуры топлива, воздуха и питательной воды. Будет проиллюстрирована динамика изменения давления пара, расхода пара, температуры воды и водяного пара и объема воды.

Процесс моделирования сначала выполняется до достижения устойчивого состояния. Затем в течение некоторого времени представляется стационарный режим. После чего происходит изменение расхода топлива (следовательно, расход пара) в виде внезапного увеличения (путем изменения шага). Это значение поддерживается в течение некоторого времени. За это время меняются выходные параметры.

Испытания в работе [2] велись в шести различных режимах работы с расходом топлива от 14,6 до 37,9 кг/ч; расход воды колеблется от 181 до 465 кг/ч; давление пара от 3,8 до 7,3 кг/см². [2], а также в работе Карстенсена [3] для

котлов, применяемых для эксперимента, использовался жаротрубный котел на мазуте производителя «Aalborg Industries». Соренсен [4] проводил ступенчатый ввод расхода топлива с 80 до 230 кг/ч в течение примерно 400 с. Он получил квази-линейное увеличение давления пара с 6 до 8 бар. Расход пара увеличился с 750 до 1250 кг/ч квази-линейным образом. Карстенсен [3] проводил испытания при 50-процентной нагрузке с давлением 7 бар. Когда изменялся расход топлива, давление пара увеличилось с 6 до 8 бар за 150 с, а при изменении расхода пара путем закрытия парового клапана давление пара увеличилось с 5,5 до 8,5 бар в течение около 700 с.

Родригес Васкес [5] провел эксперимент со ступенчатым вводом в отверстие топливного клапана, в котором регистрировался исследуемый выпуск (давление пара) с целью получения динамического поведения котла в отношении этих двух переменных. Разработанная математическая модель показывает качественное согласование результатов с аналогичными для вышеперечисленных работ.

В результате проделанной работы разработана динамическая модель на базе законов сохранения массы, энергии и импульса для анализа производительности котлов, а MathCAD был применен для её интеграции. В модели присутствуют газовоздушный и пароводяной тракты котла, экономайзер, пароперегреватель. Разработанная модель описывает работу котла в динамике, чтобы разработать и апробировать модель управления котлом в режиме реального времени. Такая модель дает полное представление о производительности котла при номинальных и переходных режимах его работы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Gutiérrez Ortiz F.J., Modeling of fire-tube boilers // Applied Thermal Engineering. – 2011, vol. 31, pp. 3463–3478.
2. Huang B.J., Ko P.Y., A system dynamics model of fire-tube shell boiler, // J. Dyn. Syst – T ASME. – 1994 vol. 116, pp. 745–754.
3. Sorensen K., Karstensen C.M.S., Condra T., Houbak N., Modelling and simulating fire tube boiler performance // Proceedings from SIMS 2003–44th Conference on Simulation and Modeling on September 18–19, Session 2b, Lecture 7.
4. Sorensen K., Karstensen C.M.S., Modelling of a one pass smoke tube boiler // Proceedings from SIMS 2004–45th Conference on Simulation and Modeling on September 23–24. – 2004, pp. 365–372.
5. Rodriguez Vasquez J.R., Rivas Perez R., Sotomayor Moriano J., Peran Gonzalez J.R., System identification of steam pressure in a fire-tube boiler // Comput. Chem. Eng. – 2008, vol. 32, pp. 2839–2848.

Научный руководитель: С.А. Хаустов, к.т.н., ассистент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЖАРОТРУБНОГО КОТЛА

И.Г. Сурасманов, С.С. Данилов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ПГС и ПГУ

Идентификация разрушения эксэргии гарантирует базу для увеличения эффективности. Первые предложения об использовании эксэргии для экономической оценки эффективности были выдвинутыми А. Андрющенко [1, 2], З. Рантом [3, 4], Я. Шаргутом [5, 6]. Воздействие температуры горения воздуха и избытка воздуха, воздействие возобновления тепловых потерь в паровом генераторе и влияние температуры дымовых газов на разрушение эксэргии в камере сгорания, парогенератор и дымовая труба могут быть смоделированы с применением современных программных продуктов.

В настоящей работе проведена оценка эксплуатационных затрат при эксплуатации котельной и выявлены следующие экономические аспекты экономии эксэргии топлива: стоимость топлива, стоимость подготовки котловой воды, стоимость перекачивания котловой воды, и стоимость подачи воздуха на горение. Произведен термозкономический анализ жаротрубного котла, учитывающий текущие эксплуатационные и оптимальные эксплуатационные расходы. Было установлено, что тепловой и эксэргетический КПД исследуемого котла были неоптимальными из-за чрезмерных потерь в камере сгорания, в парогенераторе и в дымовой трубе. Эксплуатационные расходы также были высокими из-за высокой скорости разрушения эксэргии. Подход внутренней стоимости соответствующей текущей эксплуатации котла и маргинального номера стоимости соответствующей оптимальной работе привело к ежегодной экономии 5561214 млн.руб. Также моделирование показало, что оптимальное значение температуры горения воздуха, избытка воздуха и температура дымовых газов составляет 135 °С, 10% и 150 °С соответственно.

Табл. 1. Исходные данные для экономической оценки эксплуатации

Параметр	Значение	Единицы
Природный газ	4,12 до 7,29	руб/м ³
Стоимость единицы энергии	0,0003	руб/кДж
Стоимость единицы Эксэргии	0,0003	руб/кДж
Электричество	6,8396	руб/(кВт*ч)
Рабочих часов	7900	час/год

Для повышения эффективности котла была проведена оптимизация температуры горения воздуха, избытка воздуха, рекуперации в конвективных поверхностях нагрева и температуры уходящих дымовых газов. Было отмечено, что оптимальное значение температуры горения воздуха, избытка воздуха и температура дымовых газов, в результате минимальной эксэргетических потерь и эксплуатационного расхода были 135 °С, 10 % и 150 °С соответственно.

Было установлено, что в результате параметрической оптимизации, требуемая эксэргия топлива в процессе эксплуатации котла (5648,2 кВт) была сокращена на 10,66 % по сравнению с текущей (6322,3 кВт). Также были сокращены потери с термодинамической необратимостью на 3,9 % и 1,3 % в камере сгорания и дымовой трубе соответственно.

Табл. 2. Параметрическая оптимизация на основе термозкономики

Параметры	Единица	Перед оптимизацией	После оптимизацией
КПД	%	74,16	79,17
эксэргетический КПД	%	31,76	35,33
издержки на топливо	млн.руб/гкалл	790,76	706,61
стоимость подготовки котловой подачи воды	руб/гкалл	302,064	302,064
стоимость перекачки котловой подачи воды	руб/гкалл	8,9	8,9
стоимость подачи воздуха	руб/гкалл	23,89	20,17
сумма эксплуатационных расходов	руб/гкалл	1125,72	1037,80

В таблице 2 показано сравнение исследуемого котла с оптимизированным вариантом. Оптимизация позволила повысить тепловой КПД на 5,01 %, что привело к увеличению эксэргетического КПД на 3,57 %, экономия топливных затрат и электроэнергии составила 10,6 % и 11,3 % соответственно. Таким образом, ежегодно можно сохранить 5561214 млн. руб., что, в свою очередь, эквивалентно повышению производительности на 11,79 %.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.И. Андриященко, Техническая работоспособность термодинамических систем, Саратовский автомобильно-дорожный институт, Саратов, 1956.
2. А.И. Андриященко, Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций, Госэнергоиздат, Москва, 1963.
3. Z. Rant, Exergie, ein neue Wort // Technische Arbeitsfähigkeit, Forsch. Ing. –Wes. – 1956, vol. 22, №2, p. 212.
4. Z. Rant, Exergiediagramme, für Verbrennungsgase // BWK. – 1960, vol. 12, №7, p. 297–301.
5. J. Szargut, Bilans eksergetyczny procesow hutniczych // Archiwun Hutnictwa. – 1961, vol. 6, №1, pp. 23–60.

6. J. Szargut, Bilans eksergetyczny procesow cieplnych // Energetyka Przemysłowa. – 1961, vol. 9, №3, pp. 73–79.

Научный руководитель: С.А. Хаустов, к.т.н., ассистент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Е.Ю. Шадрин, И.С. Ануфриев
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Введение

Качественное диспергирование жидкости – одна из актуальных научно-технических проблем. Генерация аэрозолей с малым разбросом параметров по концентрации и дисперсному составу является важнейшей задачей при создании различных теплоэнергетических устройств, разработке технологий нанесения покрытий, систем охлаждения и пожаротушения и многих других. Одним из направлений, использующих распылительные форсунки, является создание эффективных горелочных устройств для утилизации некондиционных углеводородных топлив и горючих производственных отходов. Исследования, проведенные ранее сотрудниками ИТ СО РАН на оригинальных автономных горелочных устройствах испарительного типа [1-3], показали, что процесс сжигания таких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара. При этом улучшаются экологические характеристики процесса. Однако использование горелочных устройств испарительного типа не позволяет достичь высокой производительности.

В данной работе экспериментально исследуется перспективный способ распыла жидкого углеводородного топлива струей перегретого водяного пара [4]. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар предварительно не смешаны друг с другом: пар подается из форсунки в виде струи, на которую натекает распыляемое жидкое топливо. На практике это является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой. Это предотвращает коксование поверхностей и сбой в работе горелочного устройства.

Экспериментальная методика

Для исследования характеристик распыла жидкого топлива паровой струей был использован интерферометрический метод определения диаметров капель (IP1) [5]. Метод основан на регистрации расфокусированных образов капель, освещаемых лазером. Согласно теории рассеяния Ми [6, 7], свет, отраженный и однократно преломленный сферической поверхностью капли, создает на образах капель интерференционные полосы, частота которых напрямую зависит от диаметра капли. Цифровой анализ полученных изображений позво-

ляет определить положение и размер капель, взвешенных в потоке. Данный метод позволяет измерять частицы с размерами от 10 мкм.

Экспериментальный стенд представлен на рисунке 1. Методика эксперимента заключается в следующем. В поток перегретого водяного пара, истекающего через форсунку (диаметр форсунки – 0.5 мм), свободно натекает дизельное топливо. Струя топлива распыляется, взаимодействуя с высокоскоростной струей перегретого пара. Газокапельный поток освещается импульсным лазером в заданной плоскости (лазерный нож). Образы капель в момент лазерного импульса регистрируются цифровой камерой, на которую установлены: блок оптического сжатия и расфокусированный макро-объектив. Полученные изображения сохраняются на компьютере для дальнейшей обработки с использованием специализированного программного обеспечения.

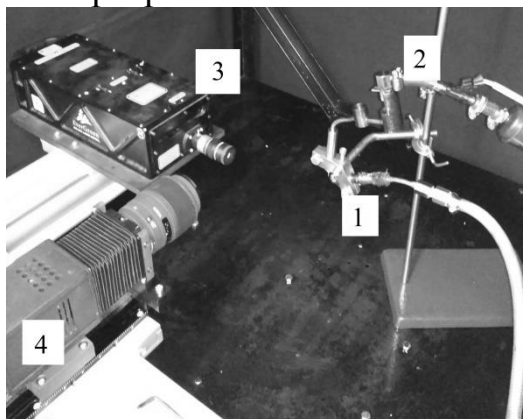


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда: 1 – паровая форсунка, 2 – система подачи топлива, 3 – импульсный лазер, 4 – цифровая камера с блоком оптического сжатия.

В экспериментах использовалась IPI-система «Полис». Для регистрации изображений применялась CCD камера Видеоскан 4021 (с разрешением 2048×2048 пикселей, частотой съемки до 1.25 Гц, временем экспозиции 28 мс) и макро-объектив SIGMA 105mm F2.8 DG MACRO. Источник света – импульсный лазер Nd:YAG QuantelEVG (длина волны – 532 нм, энергия в импульсе – до 145 мДж, длительность импульса – 10 нс). Блок оптического сжатия использовался для уменьшения образов капель по одной координате с целью увеличения максимальной плотности частиц в исследуемом потоке. Для проведения калибровки камеры и расфокусировки объектива использовался длинноходовой транслятор Edmund 59-336, позволяющий изменять расстояние между объективом и регистрирующей матрицей цифровой камеры. Для подачи перегретого пара использовался электрический парогенератор, позволяющий варьировать расход пара в диапазоне 100-600 г/ч и температуру пара в диапазоне 150-550°C. Система подачи топлива позволяла варьировать расход в диапазоне 300-600 г/ч.

Для обработки полученных изображений использовалось специализированное программное обеспечение ActualFlow с пакетом IPI Kit, в котором реализованы следующие алгоритмы [7]:

- Алгоритм поиска образов капель.
- Алгоритм вычисления частоты интерференционных полос.
- Алгоритм отсева ложных образов.

- Алгоритм определения размеров капель.

Результаты

В результате обработки изображений получена информация о дисперсном составе капель топлива при различных режимах распыления. В экспериментах варьировались: температура пара (150-550°C); расход пара (100, 300 и 600 г/ч); расход топлива (300 и 600 г/ч). На рисунке 2 представлены гистограммы, характеризующие зависимость размера капель от расхода пара, имеющего на выходе из парогенератора температуру 250°C, при расходе топлива 300 и 600 г/ч.

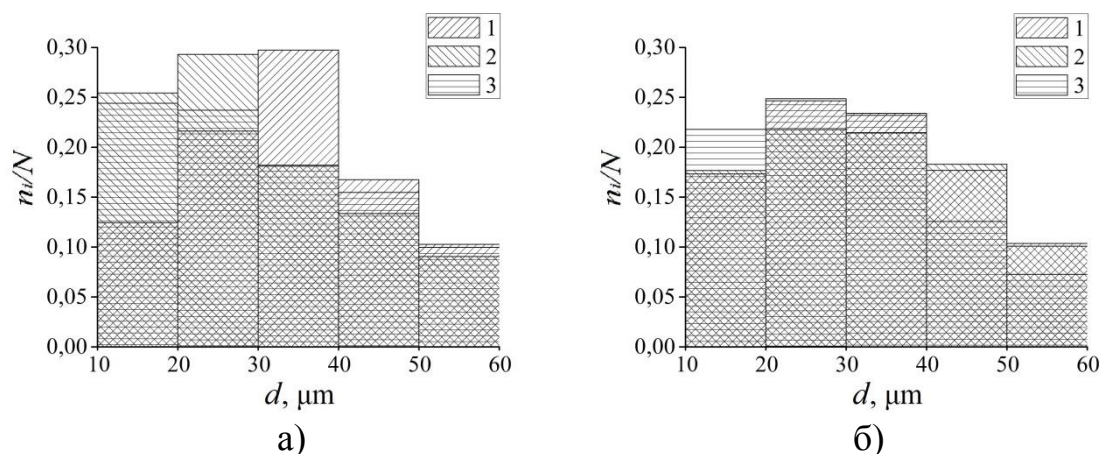


Рис. 2. Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении дизельного топлива струей перегретого водяного пара в атмосфере (температура пара 250°C; расход пара: 1 – 100 г/ч, 2 – 300 г/ч, 3 – 600 г/ч): (а) расход топлива 300 г/ч; (б) расход топлива 600 г/ч (n_i – количество капель с размерами из определенного диапазона, N – общее число идентифицированных алгоритмом капель).

Полученные результаты показывают, что количество мелких частиц (10-20 мкм) увеличивается с ростом расхода пара, и, наоборот, с уменьшением расхода растет количество более крупных частиц (более 30 мкм). При расходе пара выше 300 г/час и расходе топлива 300 г/час характерный размер капель лежит в диапазоне 10-30 мкм. При расходе топлива 600 г/час характерный размер капель увеличивается и лежит в диапазоне 20-40 мкм. Распределение частиц по размерам слабо изменяется при увеличении расхода пара более 300 г/ч, что говорит об эффективности распыла, начиная с указанного значения.

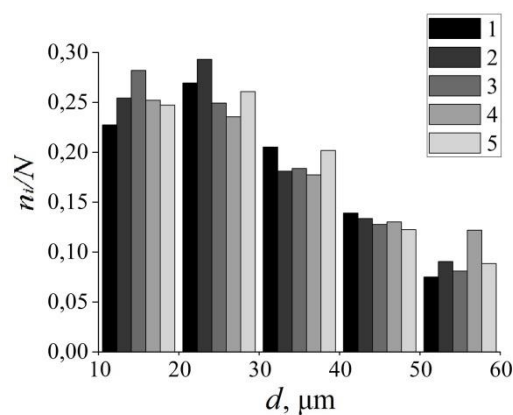


Рис. 3. Дисперсный состав капель топлива, распыляемого перегретым водяным паром, расход пара и топлива – 300 г/ч, температура пара: 1 – 150°C; 2 – 250°C; 3 – 350°C; 4 – 450°C; 5 – 550°C.

Для анализа влияния температуры распыляющей среды была проведена серия экспериментов при различной температуре подаваемого перегретого пара. На рисунке 3 представлены распределения размеров частиц в зависимости от температуры перегрева пара при одинаковом расходе пара и топлива 300 г/ч. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что характеристики распыла не зависят от температуры распыляющей среды и определяются соотношением расходов топлива и пара.

Заключение

С использованием интерферометрического метода определения диаметров капель проведено исследование характеристик газочапельного потока при распыле жидкого углеводородного топлива струей перегретого водяного пара в широком диапазоне параметров. При расходе пара от 300 г/час достигается высокое диспергирование топлива с характерным размером капель 10-40 мкм для расходов топлива 300 и 600 г/ч. Такой результат диспергирования на практике обеспечивает эффективное сгорание топлива. В то же время, влияние температуры перегретого пара на характеристики газочапельного потока не обнаружено.

Прикладные научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (шифр заявки «2017-14-576-0053-1566»).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner with injection of a superheated steam jet // Combustion, Explosion, and Shock Waves.- 2016.- Issue 52, No. 3.- P. 286-293.
2. Anufriev I.S., Baklanov A.M., Borovkova O.V., Vigriyanov M.S., Leshchevich V.V., Sharypov O.V. Investigation of soot nanoparticles during combustion of liquid hydrocarbons with injection of a superheated steam jet into the reaction zone // Combustion, Explosion, and Shock Waves.- 2017.- Issue 53, No. 2.- P. 140-148.

3. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Loboda E.L. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // Proceedings of SPIE 9292.- 2014.- № 929226.
4. Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В. Патент РФ на изобретение № 2579298 от 10.04.2016.
5. Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Investigation of the structure of a polydisperse gas-droplet jet in the initial region. Experiment and numerical simulation // Thermophysics and Aeromechanics. - 2014.- Issue 21, No. 3.- P. 293-307.
6. Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. - New York: Wiley, 1957.- 496 p.
7. Руководство пользователя: Интерферометрический метод измерения диаметров частиц (PI). - Новосибирск, 2013.- 34 с.

Научный руководитель: О.В. Шарыпов, д.ф.-м.н., зам. директора, ИТ СО РАН.

ГОРЕНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ

С.С. Арсентьев, Е.П. Копьев
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Предварительные исследования, проведенные на оригинальных горелочных устройствах мощностью 10–50 кВт [1, 2], показали, что горение жидких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара (~400°C), сажа в окончательных продуктах сгорания практически отсутствует. Данный способ сжигания [3] может оказаться перспективным для утилизации низкокачественных топлив и опасных промышленных отходов с производством тепловой энергии. Создание горелочных устройств [2, 4], работающих на некондиционных топливах, нуждается в научном обосновании новых технических решений для обеспечения энергоэффективности и экологической безопасности технологии.

В развитие предыдущих исследований [5] предложенного способа сжигания топлива [2], в которых использовалось автономное горелочное устройство с нерегулируемыми параметрами пара, в данной работе используется новое горелочное устройство (10 кВт), оснащенное электрическим парогенератором (средняя потребляемая мощность 1,5 кВт), позволяющим получать поток перегретого пара в широком диапазоне значений расхода и температуры. По принципу работы исследуемая горелка является испарительной. В основе процесса лежит газификация продуктов термического разложения жидкого топлива. Хотя процессы газификации углеводородов (в том числе, паровой) достаточно известны [6-8], тем не менее, обоснование оптимальных методов управления процессом горения жидких органических топлив (и производственных отходов) с

целью обеспечения устойчивого эффективного сгорания при соблюдении экологических норм является сложной и актуальной научной задачей.

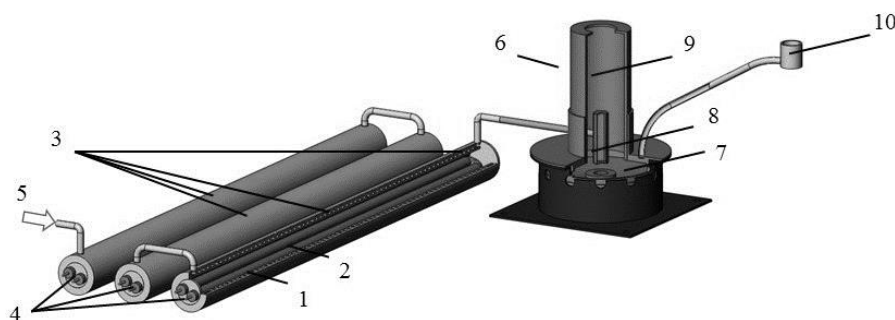


Рис. 1. Схема горелочного устройства и парогенератора: 1 – нагревательное устройство; 2 – тепло электрические нагреватели (ТЭН); 3 – место установки датчиков температуры; 4 – клеммы питания ТЭНов; 5 – подача воды; 6 – горелочное устройство; 7 – топочная камера; 8 – паровая форсунка; 9 – камера газогенерации; 10 – топливоприемник

Основными элементами нового горелочного устройства являются (рис.1): цилиндрический корпус, топочная камера, паровая форсунка и камера газогенерации. В топочной камере имеются отверстия для подсоса воздуха из атмосферы. Топливо в топочную камеру подается через топливопровод. Стабильный расход топлива задается топливной форсункой и насосом и контролируется при помощи электронных весов. Паровая форсунка установлена соосно над топочной камерой у основания камеры газогенерации, и ориентирована вертикально (наружный диаметр 0,5 мм). Паровая форсунка соединена с внешним парогенератором. Массовый расход воды (пара) задается плунжерным дозирующим насосом и контролируется при помощи электронных весов. Температура пара регулируется за счет изменения мощности нагревателей. Давление в парогенераторе регистрируется цифровым датчиком давления. Созданный лабораторный электрический парогенератор позволяет получать перегретый водяной пар в диапазоне температуры 100 – 550 °С и расхода 0.25 – 1.5 кг/ч (давление до 10 атм).

Удельная теплота сгорания топлива (q) определяется по измерениям в проточном калориметре, состоящем из пяти последовательно соединенных секций (общая длина 12 м). Каждая секция состоит из двух коаксиальных стальных труб (толщина стенок 4 мм). Внутренний канал (с диаметром 68 мм) предназначен для потока воздуха и продуктов сгорания, а кольцевой канал (с шириной 10 мм) – для подачи теплоносителя (воды) (см. рис.2).

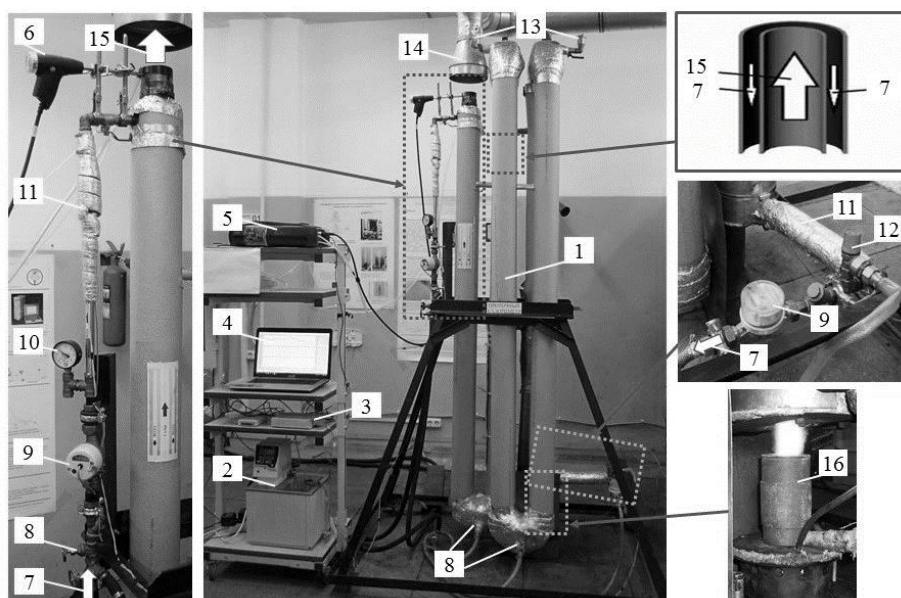


Рис. 2. Фотография проточного калориметра: 1 – проточный калориметр, 2 – термостат, 3 – АЦП, 4 – ноутбук, 5 – блок газоанализатора, 6 – зонд газоанализатора, 7 – направление движения теплоносителя, 8 – запорный кран, 9 – расходомер, 10 – датчик давления, 11 – термопара хромель-алюмелевая, 12 – предохранительный клапан, 13 – воздухоотводчик автоматический, 14 – вентиляция, 15 – направление движения отработанных газов, 16 – горелочное устройство

Измерение выделяемого количества тепла основано на определении разности температуры теплоносителя на входе и выходе, расхода теплоносителя и топлива в стационарных условиях эксперимента [5]. Калориметр оснащен контрольно-измерительными приборами: датчики давления и температуры; расходомер; автоматизированная система сбора и обработки данных на основе АЦП LCard. Факел горелочного устройства вводится во внутренний канал калориметра при равенстве температуры воды на входе и на выходе калориметра. Измерение тепла продуктов сгорания производится после установления стационарного теплового режима в калориметре (характерное время тепловой релаксации составляет ~ 12.5 мин). Методика обеспечивает измерение количества тепла, выделяемого при сгорании топлива с точностью до потерь тепла с уходящими газами, температура которых на 2–4 К выше температуры окружающей среды. Наряду с этим, имеются потери тепла за счет теплоотдачи в окружающую среду от поверхности горелочного устройства, имеющей температуру не выше 100°C . Суммарная оценка этих потерь тепла (в расчете на 1 кг топлива) составляет не более 1.2% от высшей теплотворной способности дизельного топлива. Используемая методика обеспечивает определение значений q с относительной погрешностью $\sim 2.5\%$ [5]. Для контроля состава газообразных продуктов горения (O_2 , CO , NO , NO_2 , SO_2 , CO_2) использовался газоанализатор TESTO 350. Исследования проводились одновременно с калориметрическими измерениями. Забор проб охлажденных до комнатной температуры продуктов реакции осуществлялся на выходе калориметра.

Измерения проводились при различных режимах работы горелочного устройства. При постоянном расходе топлива $F_f = 0.8$ кг/ч величина $\gamma =$

$F_w/(F_w+F_f)$ варьировалась в диапазоне 0.25 – 0.65 (с шагом 0.1), где F_w – средний массовый расход водяного пара. Для каждого значения F_w варьировалась температура пара в диапазоне $T_w = 150 – 550^\circ\text{C}$ (с шагом 100°C). Результаты calorиметрических исследований показаны на рис.3. При различных температурных режимах максимальное значение q соответствует диапазону значений $\gamma = 0.35 – 0.4$ (высшая теплота сгорания дизельного топлива ≈ 46 МДж/кг). Понижение q при $\gamma < 0.35$ может быть связано со снижением вклада в тепловой баланс от подаваемого водяного пара. Также видно, что до значений $\gamma = 0.44$ наблюдается выраженная зависимость тепловыделения от температуры пара.

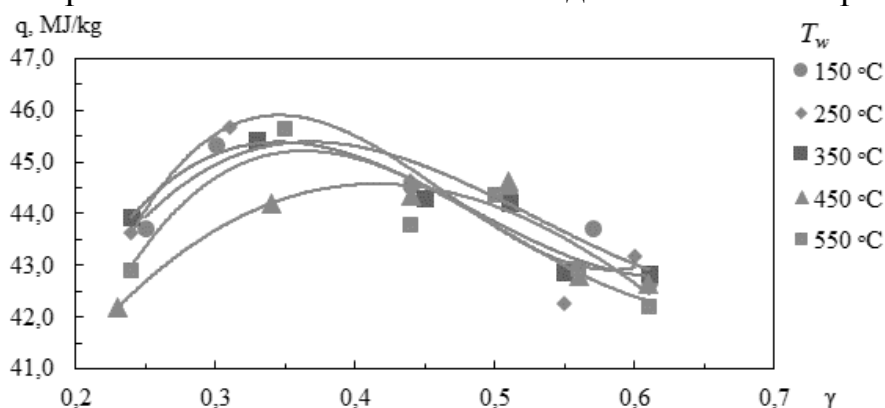


Рис. 3. Количество тепла, полученное от продуктов сгорания в калориметре, в расчете на 1 кг топлива при различных расходах пара

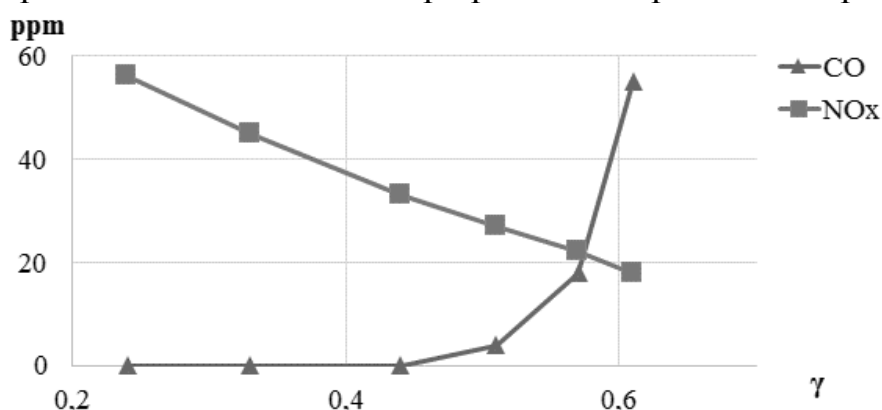


Рис. 4. Концентрации CO и NO_x при различном расходе пара ($T_w = 250^\circ\text{C}$)

Для всех исследуемых режимов измеренное содержание токсичных компонентов (CO и NO_x) в уходящих газах ниже уровня предельно допустимых концентраций (см. рис.4). Однако, при $\gamma > 0.5$, концентрация CO резко возрастает (более, чем в 10 раз). Это можно объяснить неполным сгоранием углерода вследствие понижения температуры в зоне реакции при высоком расходе пара. Этому соответствует уменьшение значения q на рис.3. При $\gamma < 0.35$ значения концентрации CO – ниже порога чувствительности прибора (2 ppm). В пределах погрешности измерений концентрация CO и NO_x не зависит от T_w . Концентрация NO_x понижается с увеличением γ .

Прикладные научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (шифр заявки «2017-14-576-0053-1566»)

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411-414.
2. Пат. 2523591 Российская Федерация, 09.04.2013. Горелочное устройство / Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В.
3. Пат. 2219435 Российская Федерация, 11.02.2002. Способ бесплажного сжигания топлива / Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеенко С.В.
4. Пат. 2579298 Российская Федерация, 03.03.2016. Горелочное устройство / Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В.
5. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. 2016. Т.52. № 3
6. Jones J. C. Hydrocarbon Process Safety. – Whittles Publ., 2003.
7. Higman C., Burgt M., van der. Gasification. – 2nd ed. – Gulf Professional Publ., 2008.
8. Liu K., Song Ch., Subramani V. Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies. – Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

INCREASE OF OPERATING EFFICIENCY OF SHIP ELECTRICAL GENERATING PLANT WITH SHAFT GENERATOR

B.A. Avdeyev, A.V. Vyngra
Kerch State Maritime Technological University

Energy efficiency is one of the most important issues for research in shipping and shipbuilding. Shipowners suffer from high energy costs and make efforts to reduce fuel consumption by investing in new vessels and upgrading existing vessels. It is necessary to take into account that a previous analysis of system performance which will lead to successful application and guaranteed economy is required for the implementation of any technological solution [1].

One solution is to use a shaft generator driven by a propeller shaft and serving to supply ship consumers with uninterrupted power supply. Depending on the type of vessel and the power plant, various configurations of ship power plants are used. The use of a generator for supplying of receivers with power when the vessel is underway makes it possible to reduce the number of operating generating sets of the electric power plant and the number of operating hours, significantly reducing herewith the operating costs on fuels and lubricants of individual actuating mechanisms [2,3].

There are three main types of generators:

1. GCR (gear constant ratio) consists of a flexible coupling, a step-up gear and an alternator.
2. RCF (RENK constant frequency) consists of a flexible coupling, a step-up gear, a torsion rigid toothed coupling, a constant frequency gear and an alternator.
3. CFE (constant frequency electrical) consists of a low-speed alternator with electrical instrumentation.

The GCR system is the simplest and cheapest of all, and it includes a standard synchronous alternator and a simple gear. Its simplicity is attractive, and many ship owners use it to produce all the electrical energy at a constant electrical frequency during the voyage. Due to the fact that the frequency of rotation of the propeller changes (rough sea, altering of the current, speed, depth, course of the vessel, etc.), the frequency of the electrical network will change. In this regard, the synchronization of the shaft generator with the ship's power plant is problematic in terms of reliability, so the shaft generator is used to supply low-level receivers independent of the main network of a ship.

The second and third types of shaft generators include various frequency control systems that allow them to produce electrical energy with a constant electric frequency at a variable engine speed [4,5].

The RCF system generates electrical energy with a constant electric frequency over a wide range of propeller speed. The rotor speed of the shaft generator is controlled by an epicyclic gearbox with a hydrostatic motor, which guarantees a constant speed over a certain range of propeller speed. However, the efficiency of this solution is very low, that leads to higher fuel consumption, so the gain obtained by the generator from the main engine is lost on the transmission.

The CFE system generates electrical energy with a constant electric frequency over a wide range of engine speeds. The shaft generator can be used in combination with fixed-pitch propellers and continuous operation in parallel with the generator sets. A frequency converter is used to provide for a fixed network frequency and voltage level. The pulse width modulation of the transducer allows power on ships to be supplied without a synchronous condenser and thus simplifies the installation process and further maintenance.

The CFE shaft generator system is suitable for ships with a fixed pitch propeller. The overall efficiency of the slow-speed CFE type varies from 89% up to 91%.

Figure 1 presents an approximate generation of electrical energy from shaft generators operating on ships with a pitch changing mechanism.

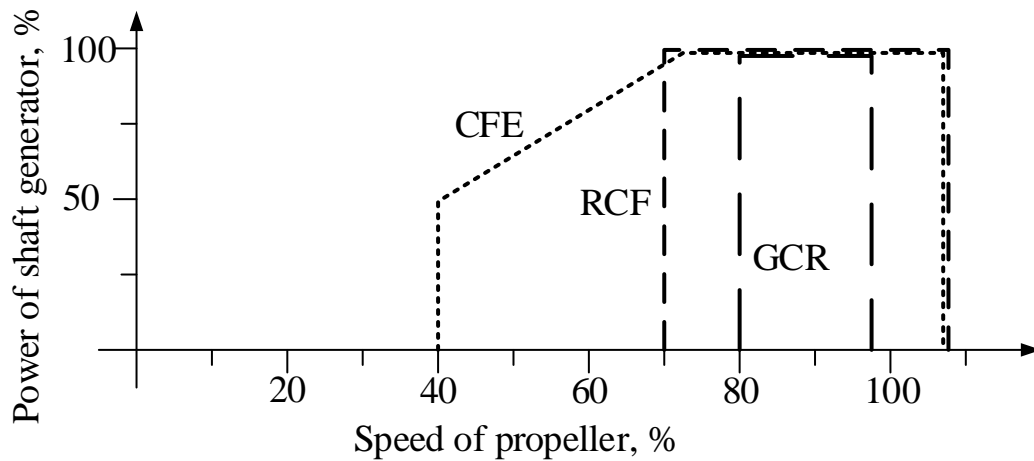


Figure 1. An approximate generation of electrical energy by shaft generators.

The block diagram of the PTO / CFE shaft generator is represented in Fig. 2.

The circuit operates as follows.

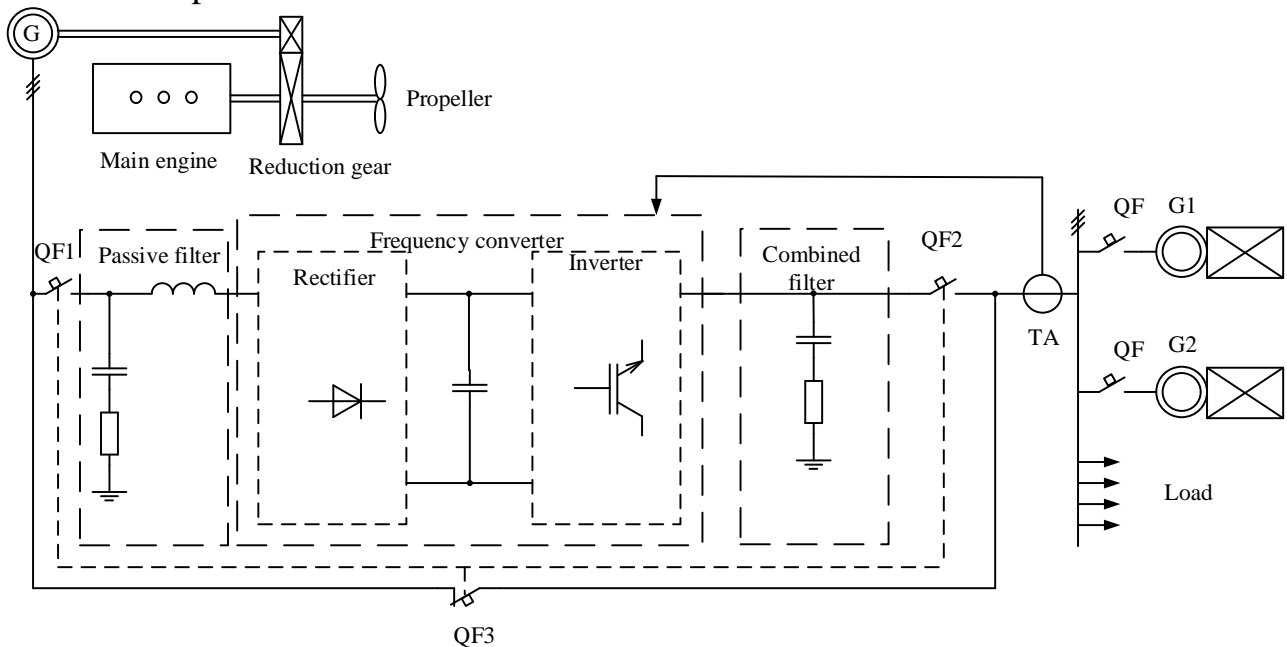


Figure 2 – Shaft generator

The main engine operates for controllable pitch propeller with minimal deviations from the rated speed. The shaft generator is connected to the line of shafting through the gear, and takes off some power from the main engine. The electric power is transferred from the shaft generator via the QF1 circuit-breaker to a frequency converter, which consists of 3 parts - rectifier, DC filter and inverter based on IGBT transistors. The current transformer TA deenergizes on each phase of the main switchboard and transfers its value to the frequency converter control system, which generates the voltage of the required value and frequency by feeding pulses to the IGBT transistors.

The voltage from the output of the frequency converter enters the main switchboard, through the circuit-breaker QF2, from which it is distributed to various consumers through feeders. A simple passive filter is to protect the generator from high frequencies on the side of the frequency converter. A combined filter is used to protect against high frequencies.

In the event that the speed of the main engine is stable, and the voltage and frequency at the shaft generator clamps correspond to the values on the bus bars of the main switchboard, then QF1 and QF2 are turned off and QF3 is turned on.

Power, taken off by the shaft generator from the main engine:

$$P = \frac{K_1 \cdot K_2}{\eta_1 \cdot \eta_2} \cdot P_{SG} \quad (1)$$

where $K_1=1,1\dots1,3$ – coefficient taking into account power losses due to equipment aging; K_2 – power reserve coefficient; η_1 – efficiency coefficient of shaft generator; η_2 – efficiency coefficient of gear; P_{SG} – rated power of shaft generator, kW.

In percentage terms:

$$p = \frac{P}{P_{ME}} \cdot 100\% \quad (2)$$

In the event that the amount of taken off power does not exceed 15%, the use of a shaft generator will not significantly affect the running properties of the main propulsion plant and the taking off of excessive power from the main engine will increase the overall energy efficiency of the entire complex as a whole.

Conclusion

It is advantageous to use shaft generators in some cases, allowing taking off some power from the main engine to increase the efficiency of the use of fuels and lubricants. It will allow to reduce the number of operating generating sets, to increase the load of the electric power plant, reduce fuel consumption and increase the their operation life. The use of a frequency converter with a shaft generator allows using it even with a wide deviation of the frequency of the main engine from the nominal value.

REFERENCES:

1. Sarigiannidis A., Patsios C., Pittaras A. and Kladas A. Geometry optimization of synchronous machines used on ship shaft generator systems // Materials Science Forum, 2014. - Vol. 792. - Pp. 245-250.
2. Zhelezniak, A.A. Model of evaluation of the efficiency of the ship's diesel generator control system // Vibroengineering Procedia, 2016. – №8. – Pp. 196-200.
3. Schøyen H, Sow H. A. decision making tool concerning retrofit of shaft-generator frequency converter // Ocean Eng., 2015. - Vol. 109. – Pp.103–112.
4. Nyrkov, A., Shnurenko, A., Sokolov S. [and others]. Some Methods of Increasing the Efficiency of River Transport System. Procedia Engineering, 2017. - Vol. 178. - Pp. 543-550.
5. Grigoryev A.V., Zainullin R.R. Analysis of operation modes of ship shaft generator sets with frequency converters and synchronous compensators // Admiral Makarov State University of maritime and inland shipping, 2015. - No. 3 (31) - Pp. 164-171.

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

М.В. Пятыгина

Казанский государственный энергетический университет

Проведение анализа технологической схемы позволяет учесть затраты электроэнергии и теплоты на процесс переработки твердого топлива, начиная с процесса подготовки и заканчивая получением энергетического газа для сжигания в ГТУ.

Оценка тепловой эффективности технологической схемы переработки твердого топлива проводится на основании составленных тепловых балансов для отдельных участков и системы в целом. Новизна подхода в том, что для получения значений тепловых потоков используется методика расчета теплоты химических реакций индивидуальных органических соединений, входящих в состав твердого топлива.

Разложение органической массы угля происходит благодаря реакциям с участием водорода, образовавшегося из испарившейся физически связанной влаги [1].

Для определения массы образующегося при выделении физически и гигроскопически связанной влаги водорода $m(\text{H}_2)$, участвующего в разложении угольной частицы по реакции $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$, необходимо найти массу углерода $m(\text{C})$ и массу влаги $m(\text{H}_2\text{O})$.

С точки зрения теплового баланса и кинетики, процесс образования водорода проходит в два этапа:

- испарение влаги с поверхности угольной частицы;
- взаимодействие испарившейся влаги с поверхностью угольной частицы с выделением водорода.

Так как в первую очередь испаряется физически связанная влага, тепловой баланс и кинетические параметры находим для нее.

Кинетические параметры процесса испарения физически связанной влаги находим из уравнения Аррениуса, предполагая, что реализуется чисто кинетический режим взаимодействия между компонентами:

$$k_{\text{исп}} = k_0 e^{-\frac{E_{\text{исп}}}{RT_{\text{исп}}}}, \quad k_0 = \frac{N_{\text{H}_2\text{O}_{\text{физ}}}}{S_{\text{уг.ч.}}} \quad (1)$$

где $E_{\text{исп}}=14,4$ кДж/моль [2] – энергия активации процесса испарения влаги (сушки); $T_{\text{исп}}$ – температура начала процесса испарения влаги с поверхности угольной частицы, равная 120°C ; $N_{\text{H}_2\text{O}_{\text{физ}}} = \nu_{\text{H}_2\text{O}_{\text{физ}}} \cdot N_{\text{A}}$ – число молекул физически связанной влаги; $S_{\text{уг.ч.}} = S_{\text{пов.}} + S_{\text{пор}}$ – площадь поверхности угольной частицы, равная сумме поверхности угольной частицы и поверхности пор угольной частицы; $N_{\text{A}}=6,02 \cdot 10^{23}$ – постоянная Авогадро.

Кинетические параметры взаимодействия испарившейся влаги с поверхностью угольной частицы с выделением водорода можно найти аналогично

уравнению (1), где $E_1=181,4$ кДж/моль [2] – энергия активации процесса выделения водорода; T_1 – температура начала процесса выделения водорода в результате взаимодействия испарившейся влаги с поверхности угольной частицы, равная 300°C .

Затраты теплоты на испарение физически связанной влаги находим из уравнения

$$Q_{\text{H}_2\text{O}\phi} = q_{\text{исп}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}}^\phi \quad (2)$$

где $q_{\text{исп}}$ – теплота испарения влаги, которая определяется по справочным данным.

Теплота парогазовой смеси $H_{\text{ПГС}_{\text{уг.ч}}}$ равна сумме произведения массовой доли i -компонента ПГС на его теплоту сгорания; Дж/кг

$$H_{\text{ПГС}_{\text{уг.ч}}} = \sum \omega_i \cdot Q_{\text{H}_i}^p \quad (3)$$

Теплоту химических реакций $\Delta H_{\text{х.р.}}$ можно найти из уравнения

$$\Delta H_{\text{х.р.}} = \Delta H_{\text{уг.ч}} \cdot N_{\text{уг.ч}} \quad (4)$$

$$\Delta H_{\text{уг.ч}} = \sum H_{\text{х.р.}i} \quad (5)$$

где $N_{\text{уг.ч.сл}} = \frac{V_{\text{н.сл}}}{V_{\text{уг.ч}}}$ – число угольных частиц в кипящем слое в аппарате;

$V_{\text{сл}} = F_{\text{сеч.ап.}} \cdot H_{\text{сл0}}$ – объем кипящего слоя, м^3 ; $\Delta H_{\text{уг.ч.}}$ – сумма тепловых эффектов реакций разложения угольной частицы, в том числе, испарения влаги и ее взаимодействия с поверхностью угольной частицы, Дж/кг.

Выход парогазовой смеси $\omega_{\text{ПГС}}$, кокса $\omega_{\text{к}}$ и i -го компонента ω_i находим исходя из времени пребывания частиц в слое $\tau_{\text{н}}$.

$$\omega_{\text{ПГС}} = \sum \omega_i \cdot 100 = \sum \frac{m_i}{m_{\text{уг.ч}}} \cdot 100 \quad , \% \quad (6)$$

$$\omega_{\text{к}} = \sum \frac{G_{\text{к}} - m_i}{m_{\text{уг.ч}}} \cdot 100 \quad , \% \quad (7)$$

где m_i зависит от агрегатного состояния образующихся веществ и относится либо к твердой фазе – коксу, либо к парообразной – парогазовой смеси.

Кинетику процесса и время разложения i -го компонента органической массы угольной частицы (взаимодействия водорода с ОМУ), и как следствие, время разложения всей угольной частицы определяем аналогично уравнению (1) из следующих зависимостей:

$$k_{0i} = \frac{N_i}{(S_{\text{пов.}} + S_{\text{пор}}) \chi_i} \quad (8)$$

$$\chi_i = \frac{m_i}{m_{\text{уг.ч.}}} \quad (9)$$

$$N_i = \frac{m(\text{H}_2)_i}{M(\text{H}_2)_i} \cdot N_A \quad (10)$$

$$m(\text{H}_2)_i = \nu(\text{H}_2)_i \frac{m(\text{H}_2)_{\text{физ}} + m(\text{H}_2)_{\text{гиг}}}{80} \quad (11)$$

где $(S_{\text{пов.}} + S_{\text{пор}})\chi_i$ - доля площади угольной частицы, приходящейся на i -ый компонент.

Процесс разложения включает два характеристических времени, определяемых в ходе расчета:

- время разложения по реакции $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \uparrow \rightarrow \text{CO} \uparrow + \text{H}_2 \uparrow$:

$$\tau_{\text{p1}} = \frac{\nu(\text{H}_2)}{k_1^{\text{ОМУ}}} \quad (12)$$

- наибольшее время разложения i -го компонента угольной частицы:

$$\tau_{\text{pmax}} = \tau_{\text{pi}} = \frac{\nu(\text{H}_2)_i}{k_i^{\text{ОМУ}}} \leq \tau_{\text{p1}} \quad (13)$$

где ν_{H_2} , $\nu(\text{H}_2)_i$ - количество водорода, образовавшегося в результате взаимодействия физически связанной влаги с поверхностью угольной частицы и необходимого для разложения i -го компонента, соответственно; E_i – энергия активации [2] процесса выделения i -го компонента; $k_1^{\text{ОМУ}}$, $k_i^{\text{ОМУ}}$ - константы скорости реакций разложения ОМУ.

Для расчета времени образования компонентов и их количественного выхода используем следующие исходные данные:

1. расход топлива на пиролиз в аппарате-пиролизере. $G_{\text{тп}}=226,67$ кг/час=0,063 кг/с;
2. продолжительность процесса нагрева материала в кипящем слое $\tau_{\text{н}}=832$ с;
3. температура кипящего слоя $T_{\text{сл}}=800^\circ\text{C}=1073$ К.

Тогда константа равновесия i -того компонента $k_i^{\text{ОМУ}}$ будет равна:

$$k_i^{\text{ОМУ}} = k_{0i} e^{-E_i / RT_i} = k_{0i} e^{-E_i / RT_{\text{сл}}} \quad (14)$$

Время пиролиза (разложения) вычисляем по формуле

$$\tau_{\text{п}} = \tau_{\text{p1}} + \tau_{\text{pmax}} \quad (15)$$

Выводы:

Результаты расчетов времени разложения ОМУ применительно к угольной частице и к количеству угля, находящемуся в аппарате за время $\tau_{\text{н}}$ при разных температурах показали, что при высокой температуре (800°C) на образование большинства веществ необходимо несколько секунд. Разложение основной массы твердого топлива в аппарате происходит в следующем порядке: карбоновые кислоты - i -пропилфенолы – азотсодержащие – метилпроизводные ароматических углеводородов – крезолы. В интервале времени $\tau_{\text{н}}$ не происходит

разложение дибензофурана, так как его константа скорости значительно ниже, чем у остальных компонентов ОМУ.

В результате расчетов времени разложения ОМУ в аппарате были выявлены следующие особенности. При нагреве до 500°C происходит распад карбоновых кислот, серосодержащего дибензосульфида и *i*-пропилфенола с выделением производных бензола (метил-, диметилтолуолы и т.п.), нафталина, фенола, а также компонентов горючего газа - оксида углерода, сероводорода, и небольшого количества воды, что говорит о возможности отведения образующихся продуктов на более ранних стадиях нагрева топлива (500°C) с целью экономии энергоресурсов для последующего разложения.

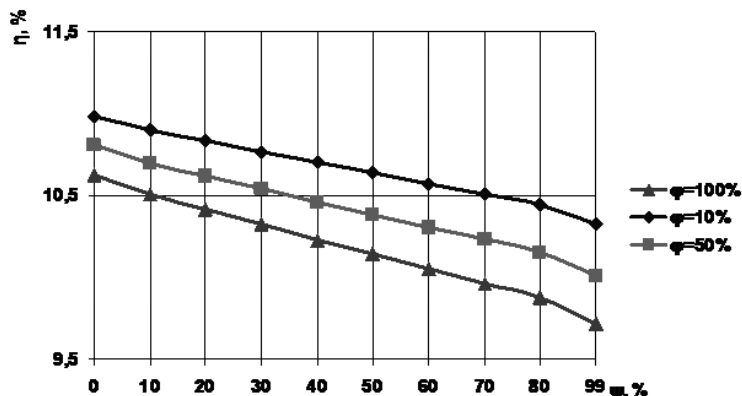


Рис. 1. Оценка влияния содержания влаги в топливе на тепловой КПД

На основе полученных данных было отмечено, что на тепловую эффективность процесса пиролиза в типовой схеме существенно влияют такие параметры как участие влаги топлива ϕ в процессе разложения, а также степень отвода парогазовой смеси ψ из аппарата (рис. 1). Значительно снижает тепловую эффективность отсутствие целенаправленного отвода продуктов и последующего использования их в данной схеме при обычной переработке твердого топлива. Негативное влияние на работу схемы оказывают загрязнение нафталином аппаратов, большие затраты воды на охлаждение парогазовой смеси и выделения из нее конденсата (смола), а из-за значительной разницы в температуре на выходе из реактора пиролиза (800°C) и охлаждения до 85°C в газосборнике тепловой КПД составляет 17% за счет компонентов тяжелой смолы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пятыгина М.В., Мингалеева Г.Р. Моделирование процесса образования продуктов термохимической переработки угля // Теплоэнергетика. №9. 2010. С. 67-70
2. Бойко Е.А., Пачковский С.В. Кинетическая модель термохимического превращения твердых органических топлив // Журнал прикладной химии. 2004. №9. - С. 1558-1567.

Научный руководитель: Г.Р. Мингалеева, д.т.н., зав. кафедрой Энергетическое машиностроение КГЭУ.

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОПЛИВА ПУТЁМ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ «ПЕЛЛЕТЫ»

М.М. Хабиев, Т.Н. Умыржан, Д.Қ. Серікбеков
Государственный университет имени Шакарима города Семей

Мировые лидеры озабочены подступающим кризисом топлива, в связи с чем, ведется активный поиск альтернативных источников энергии в целом, и альтернативного топлива в частности. С этой проблемой отлично справляются топливные пеллеты [1]. Классификация пеллет представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Классификация пеллет.

Подробные характеристики пеллет класса А2 «Стандарт», А1 «Премиум», В «Индустриальные» показаны в таблице 1.

Табл. 1. Характеристика пеллет

Пеллеты:	А2 «Стандарт»	А1 «Премиум»	В «Индустриальный»
Теплоотдача, (кВт)	4,5÷5,3	4,6÷5,3	4,4÷5,3
Зольность, (%)	1,5	0,7	3
Содержание влаги, (%)	10	10	10
Содержание азота, (%)	0,3	0,3	0,3
Содержание хлора, (%)	0,2	0,2	0,2

Пеллеты являются отличным топливом для отопления. Они более безопасные и экологичные. В более развитых странах пеллеты являются одним из наиболее популярных средств отопления, как на промышленных предприятиях, так и в частных домах. В странах СНГ этот вид топлива пока не так популярен.

При сжигании пеллет получают высокий КПД. По данному показателю пеллеты уступают только при использовании электроэнергии и природного газа [2]. КПД установок при сжигании разных видов топлива представлено на рисунке 2.

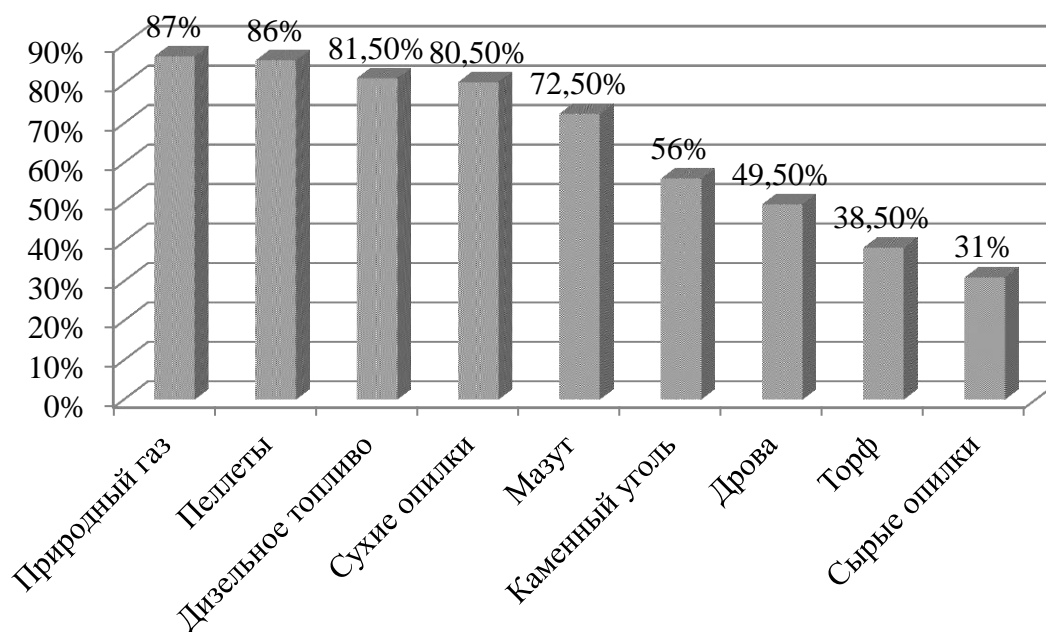


Рис. 2. Сравнение КПД установок при сжигании разных видов топлива.

Древесные гранулы опережают многие первичные виды твердого топлива в аспектах безопасности для окружающей среды. Для окружающей среды самыми вредными являются продукты нефтяной промышленности (масса выделяемого углекислого газа равна около 70% от массы сожжённого топлива). Также стоит отметить каменный уголь, выделяющий 60% углекислого газа от своей массы. Выделение углекислого газа при сжигании древесных гранул и пеллет почти равно нулю.

Анализ показывает, что стоимость сжигания древесных гранул более выгодны, в отличие от других видов топлива. Пеллеты – самый доступный вид топлива, его себестоимость еще ниже [3].

Сравнительная характеристика пеллет с другими видами топлива показана в таблице 2.

Табл. 2. Сравнительная характеристика топлива

Вид топлива	Теплотворная способность, ккал/кг (ккал/м ³)	Количество вырабатываемой энергии, кВт*ч/кг	Теплота сгорания, МДж/кг	Усредненный КПД установки
Электричество	860	0,9976	3,60	0,98
Природный газ	8500	9,86	35,6	0,94
Дизельное топливо	10500	12,18	43,97	0,96
Пеллеты	4500	5,22	18,8	0,9
Мазут	9370	10,87	39,2	0,9
Каменный уголь	5100	5,916	21,3	0,75

Вид топлива	Теплотворная способность, ккал/кг (ккал/м ³)	Количество вырабатываемой энергии, кВт*ч/кг	Теплота сгорания, МДж/кг	Усредненный КПД установки
Бурый уголь	3770	4,38	15,8	0,65
Щепа древесная	2700	3,132	11,3	0,6
Опилки	2500	2,9	10,5	0,6

Основываясь на выше сказанном можно сделать вывод, что использование пеллет в настоящее время актуально и перспективно. Их преимущества не вызывают сомнения, а для более широкого их использования необходимо совершенствование их производства и более активное внедрение пеллет в качестве топлива для различных отраслей и бытовых нужд. Пирамиду целеполагания можно рассмотреть на рисунке 3.

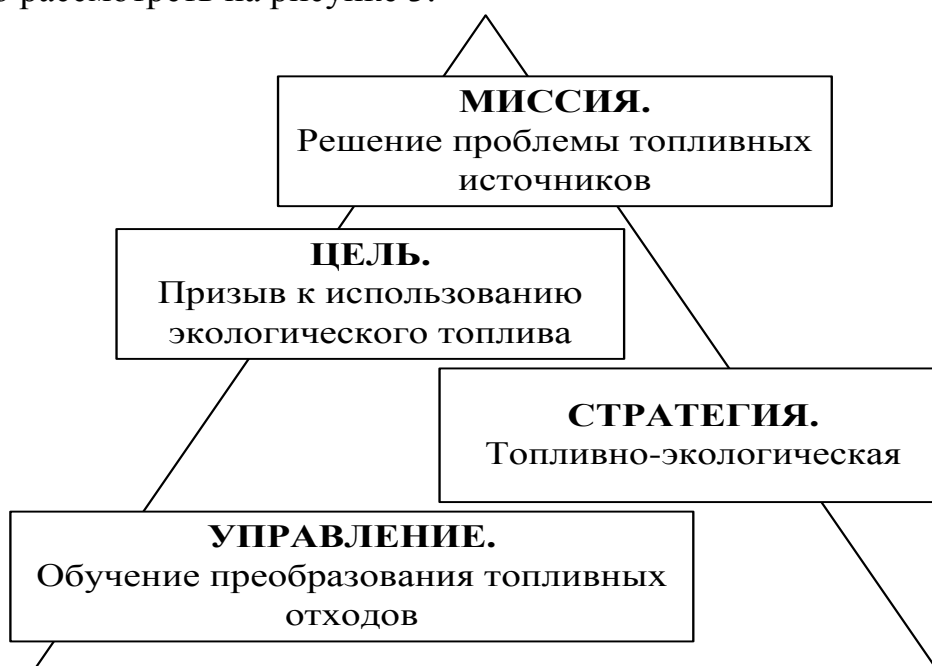


Рис. 3. Пирамида целеполагания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ПЕЛЛЕТЫ ВЫСШЕГО КАЧЕСТВА URL: <http://frp-pellets.ru/> (дата обращения: 20.04.17).
2. ООО «ЭКО-ТРЕЙД» URL: <http://ecotrade59.ru/> (дата обращения: 20.04.17).
3. Украинский биотопливный портал URL: <http://pelleta.com.ua/> (дата обращения: 20.04.17).

Научный руководитель: О.А. Степанова, к.т.н., доцент, Государственный университет имени Шакарима города Семей.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЖИГАНИЯ ПЕЛЛЕТОВ

Т.Н. Умыржан, М.М. Хабиев, М.В. Петряков.
Государственный университет имени Шакарима города Семей

В настоящее время одной из востребованных проблем земного шара остается проблема ограниченности и истощаемости ресурсов. Изготовление биотоплива, такого вида как пеллеты, невозможно сопоставить с размерами добычи нефти и газа, но интерес на древесные гранулы с каждым днем растет.

Пеллеты - это прессованный отход древесного изготовления в виде цилиндрической формы. Одним из достоинств пеллет является экологическая роль: утилизация отходов лесопильной промышленности. Продукт является энергетическим, безотходным и экологически чистым топливом. Теплотворная способность составляет от 4,3 до 4,5 кВт/кг, что в 1,5 раза больше, чем у древесины [1].

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика теплотворной способности пеллет по сравнению с другими видами топлива.

Табл. 1.

Вид топлива	Теплотворная способность, МДж/кг
Дерево (твердая масса, влажная)	12
Дерево (твердая масса, сухая)	14
Бурый уголь	16
Брикеты из древесных отходов	18
Черный уголь	20

При процессе сжигания 1 тонны древесного брикета распределяется энергии, сколько при сжигании 1,5 тонн древесины, 490 м³ газа, 400 литров дизельного топлива [2].

Уровни загрязняющих выбросов веществ в атмосферу при сжигании различных видов топлива приведены в рисунке 1.

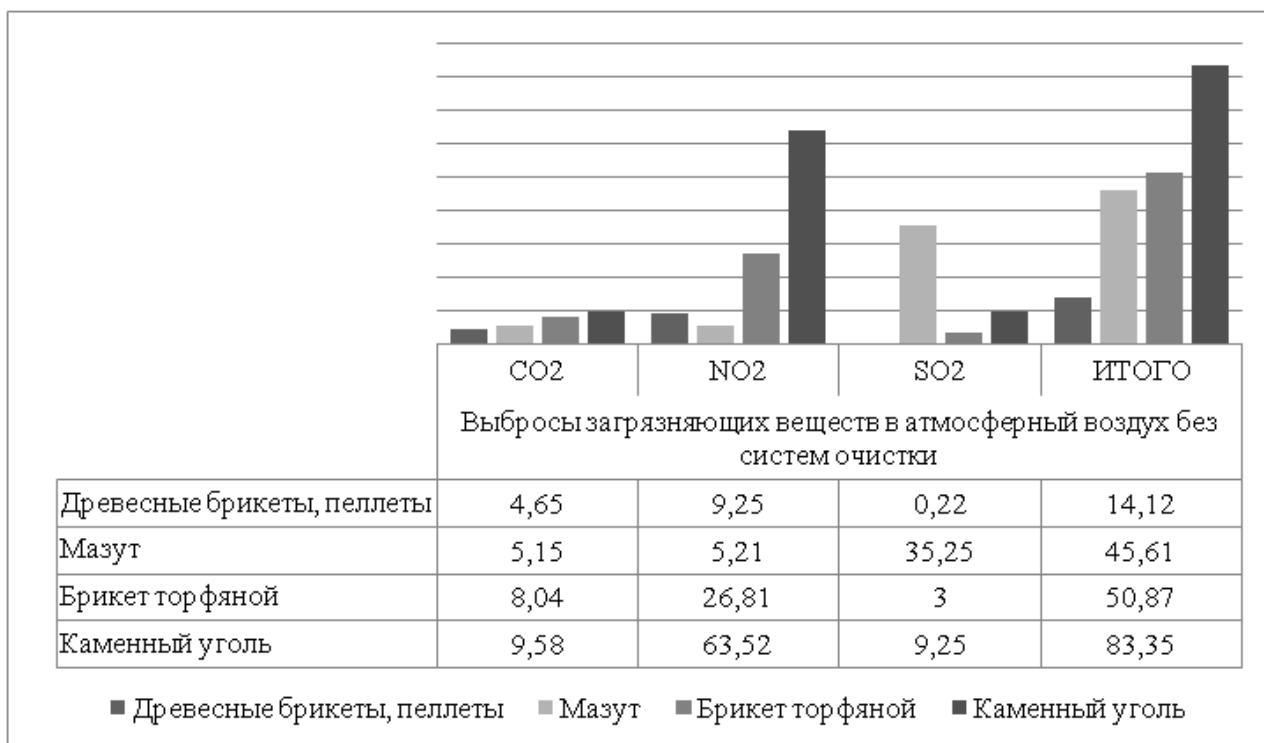


Рис. 1. Уровни загрязняющих выбросов веществ в атмосферу.

Из диаграммы следует, что древесное топливо (пеллеты и брикет) более предпочтительно, с точки зрения загрязнения атмосферы, в сравнении с мазутом, так как имеет практически «нулевой эффект» по выбросам парниковых газов, прежде всего углекислого. Объем выбросов загрязняющих веществ при сжигании древесного топлива зависит не только от его вида и состава, но и от его влажности и коэффициента полезного действия котла.

Экологическим требованиям в первую очередь соответствуют древесное топливо в виде пеллет, брикета угля. Древесные гранулы являются энергетически стабильным безотходным экологическим видом биотоплива. Определенные экологические выгоды от использования брикетов и пеллет имеют потребность в домашних условиях. Брикеты и пеллеты могут применяться в качестве топлива для каминов, печей и специальных котлов. При их сжигании резко снижается допустимость увеличения концентраций серы в воздухе внутри помещения [3].

Положительные и отрицательные экологические аспекты пеллет можно рассмотреть на рисунке 2.

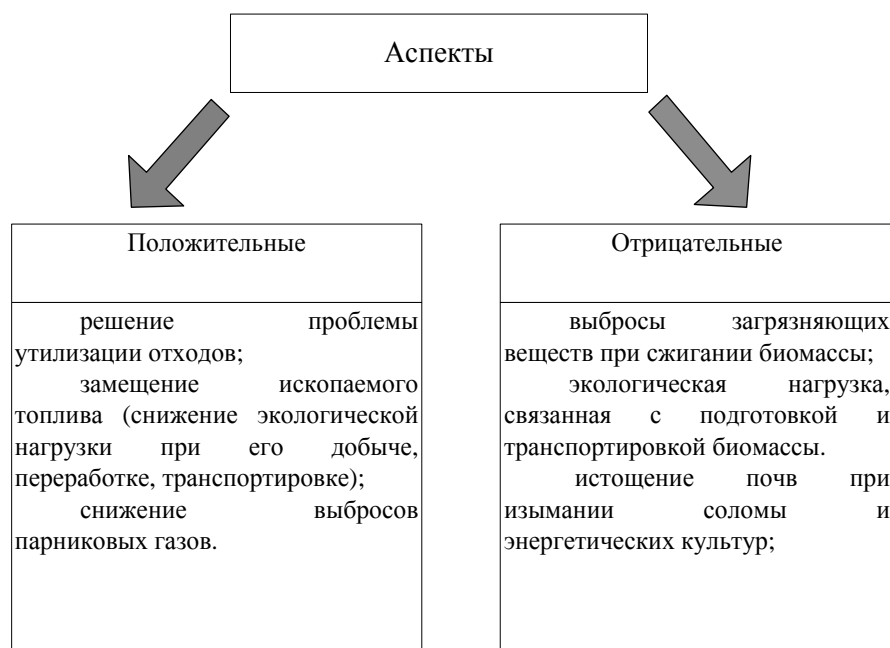


Рис. 2. Экологические аспекты пеллетов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Электронный портал URL: <http://postnauka.ru> / (дата обращения: 12.09.17).
2. ООО «ЭКОЭнергоПеллет» URL: <http://eco-pellets.net.ua/> (дата обращения: 12.09.17).
3. Электронный научный портал URL: <http://cyberleninka.ru/> (дата обращения: 12.09.17).

Научный руководитель: О.А. Степанова, к.т.н., доцент, Государственный университет имени Шакарима города Семей.

СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

М.В. Петряков, А.О. Гейст, Т.Н. Умыржан
 Государственный университет имени Шакарима города Семей

При рассмотрении перспектив использования твердого топлива в энергетике одним из главных вопросов выступает эффективность процесса его сжигания, что означает полное сгорание и минимальное количество вредных выбросов в атмосферу. Поэтому вопросы разработки экологически чистых технологий постоянно находятся в центре внимания. К числу таких технологий относятся сжигание в кипящем слое. Изначально данная технология получила свое развитие в химической промышленности.

В кипящий слой вводят значительное количество инертных наполнителей: шлак, песок, доломит, известняк - они повышают теплоотдачу. Доломит и известняк, помимо этого, связывают в карбонаты до 90 % оксидов серы. Топли-

вом могут служить уголь (в том числе в виде остатков в золе от низкоэффективных котлов), горючий сланец, торф, древесные и иные отходы [1].

Кипящий слой может быть высокотемпературным и низкотемпературным (800÷900 °С), в настоящее время по ряду причин почти всегда используется второй. В частности, в нём весьма эффективно подавляется выделение оксидов азота и можно применить погружную поверхность, к которой исключительно высок коэффициент теплоотдачи (нагретые частицы топлива соприкасаются с ней непосредственно, и часть тепла передаётся не конвекцией, а теплопроводностью). Для регулировки температуры слоя во избежание шлакования можно вводить воду или пар.

Сжигание в кипящем слое - одна из технологий сжигания твёрдых топлив в энергетических котлах, при которой в топке создаётся кипящий слой из частиц топлива и негорючих материалов. Технология была привнесена в энергетику из химической промышленности примерно в 1970-е гг. [2].

При использовании данного способа сжигания угля в топочном устройстве создают кипящий слой из частиц топлива и негорючих материалов. При этом кипящий слой может быть высокотемпературным и низкотемпературным. Для увеличения эффективности теплоотдачи в кипящий слой вводят наполнители (инертные):

- шлак;
- песок;
- известняк;
- доломит

В результате проведенного сравнительного анализа сжигания топлива в кипящем слое и слоевым способом был сделан SWOT-анализ (таблица 1) [3].

Табл. 1.

Способ сжигания	Сильные стороны	Слабые стороны	Возможности	Угрозы
Кипящий слой	Эффективность сжигания низкокачественных или нетрадиционных видов топлива	Вынос некоторого количества углеродного топлива	Снижение выбросов	Эрозия стенок аппарата
	Подавление выбросов оксидов серы за счет внедрения карбонитов		Снижение капиталовложений	Зашлаковывание межсоплового пространства
	Высокая эффективность сжигания и теплообмена		Широкий спектр выбора топлива	

Слоевой способ	Предельная простота теплогенератора и минимальное количество движущихся частей	Плохая эффективность	Малые капиталовложения и короткий срок окупаемости	Увеличение выбросов
	Малое энергопотребление – менее 1 кВт электроэнергии на 1 МВт производимой тепловой энергии	Средний срок службы футеровки вследствие её прямоугольного сечения		

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1988.– 528 с.
2. «Кипящий слой» решает проблемы энергетики и экологии // Научные статьи Казахстана URL: <https://articlekz.com/article/13579> (дата обращения: 09.09.2017).
3. SWOT-анализ, что это? Методика проведения SWOT-анализа. // Бизнес Тюнинг URL: <http://www.businessstuning.ru/pm/80-swot-analiz-cto-eto-metodika-provedeniya-swot-analiza.html> (дата обращения: 09.09.2017).

Научный руководитель: М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. асс. профессора, кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Государственный университет имени Шакарима города Семей

РЕСУРСОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Н.М. Мартынова, А.Р. Надырова
Государственный университет имени Шакарима г. Семей

Сбережение энергии всех видов сегодня является одним из наиболее важных вопросов, все чаще поднимается проблема возможного в скором времени обострения энергетического кризиса.

Экономия энергии – это эффективное использование энергоресурсов за счет применения инновационных решений. В настоящее время можно услышать такой термин, как глобальная энергетическая проблема. Под глобальной энергетической проблемой подразумевается проблема обеспечения человечества топливом и энергией. Одной из главных причин ее проявления считается сравнительно быстрый и нецелесообразный рост потребления различных видов энергии [1].

Эффективность использования энергоресурсов остается очень низкой. К примеру, из каждой добытой тонны горючих ископаемых в полезную энергию превращается лишь 1/3 часть. Остальное топливо либо теряется при добыче, обогащении, транспортировке и преобразовании, либо бессмысленно тратится у конечного потребителя. Причем около 60% потерь энергоресурсов связано с их конечным потреблением.

Еще одной важной проблемой является результат от процесса преобразования энергии в электричество и тепло, а именно загрязнение атмосферы вредными металлами, загрязнение почвы при транспортировке энергоносителей и захоронении отходов, тепловое загрязнение водоемов и многое другое. На рисунке 1 представлены основные пути решения глобальной энергетической проблемы.



Рис. 1. Основные пути решения глобальной энергетической проблемы

Решение энергетической проблемы должно идти интенсивным путем. Одним из основных направлений рационального использования ресурсов является энергосбережение. Вопросы проведения энергосберегающих мероприятий в современном мире имеют важное народно-хозяйственное значение. Во многих странах мира разработки в сфере энергосбережения являются приоритетной задачей на уровне государственной политики. Основная задача энергосбережения – снижение бесполезных потерь энергии.

Внедрение энергосберегающих технологий – это наиболее приоритетный способ решения вышеназванных энергетических и экологических проблем, в результате которого увеличивается эффективность использования энергии.

Энергосберегающая технология – современный усовершенствованный технологический процесс, характеризующийся более высоким коэффициентом полезного использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). На рисунке 2 даны основные виды современных энергосберегающих технологий [2].



Рис. 2. Виды современных энергосберегающих технологий

Энергосбережение на предприятии зачастую является одной из актуальных проблем, связано это с постоянным ростом цен на энергию. Внедрение энергосберегающих технологий на предприятии позволяет существенно снизить стоимость оплаты за энергетическую составляющую, а также оказывать положительное влияние на технико-экономические показатели работы предприятия или производства.

Основные способы экономии энергии на предприятии:

- модернизация оборудования;
- применение энергосберегающих технологий;
- уменьшение потерь электроэнергии в электроприемниках и системах электроснабжения;
- регулирование режимов работы оборудования;
- улучшение качества электроэнергии.

Проблема эффективного производства энергии также находит решение в использовании энергосберегающих технологий, старое промышленное оборудование заменяется новым, более эффективным, появляются современные котельные, когенерационные и тригенерационные установки. Когенерация - это процесс одновременного производства тепла и электроэнергии. Этот процесс осуществляется при помощи одного устройства, которое представляет собой электрогенераторную установку, оснащенную системой утилизации выделяемого тепла. Вырабатываемую когенерационными установками тепловую энергию используют для производства горячей воды и пара, а также в технологических процессах сушки горячим воздухом. Тригенерация - это частный случай

когенерации при котором полученное тепло трансформируют в абсорбционной холодильной машине в холод с температурой до $+5\div+7$ °С. Установка системы тригенерации или когенерации позволяет снизить эксплуатационные расходы за счет более высокого КПД процесса производства энергии. Кроме того, делает этот процесс максимально простым и не требующим высокой квалификации работников за счет правильно отлаженной автоматизации и круглосуточного мониторинга. Когенерационные установки уже эксплуатируются практически на всей территории стран СНГ и дают существенную экономию [5].

Предлагается большое количество нетрадиционных способов энергосбережения, которые или применяются в качестве эксперимента, или совсем не применяются. Все же главным проблемой внедрения новых технологий являются высокие капитальные затраты на их реализацию. Внедрение инноваций требует детально проработанной системы их стимулирования и финансирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Энергосберегающие технологии и способы энергосбережения. // URL: <https://ria.ru/eco/20081205/156573930.html> (дата обращения: 11.09.2017);
2. Энергосберегающие технологии и способы энергосбережения. // URL: <http://www.energoinform.org/news/2008/energy/081205e.aspx> (дата обращения: 12.09.2017);
3. Технологии альтернативной энергетики // URL: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=219 (дата обращения: 14.09.2017);
4. Новые технологии использования тепловой энергии недр // URL: <http://nauka21vek.ru/archives/3473> (дата обращения: 13.09.2017).
5. Когенерация и тригенерация – современные технологии энергоэффективности и ресурсосбережения // URL: http://knu.edu.ua/Files/27_2011/s06.pdf (дата обращения: 15.09.17).

Научный руководитель: М.В. Ермоленко, к.т.н., и.о. асс. профессора кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика» ГУ имени Шакарима города Семей.

SWOT-АНАЛИЗ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

А. Дамиркызы, Е.М. Бейлханов

Государственный университет имени Шакарима города Семей

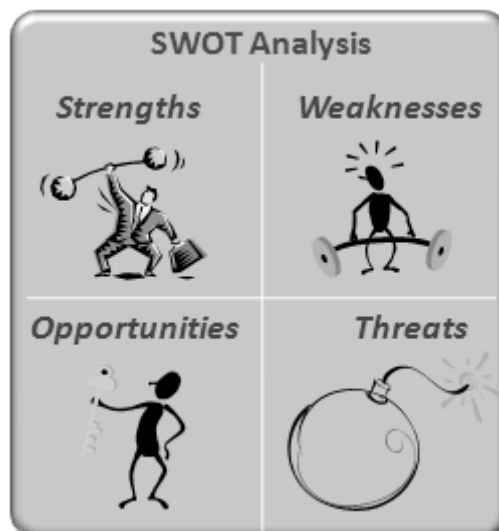
В последнее время большое распространение при оценке деятельности предприятия получит SWOT-анализ. Цель SWOT-анализа – сформулировать основные направления развития через систематизацию имеющейся информа-

ции о сильных и слабых сторонах, а также о потенциальных возможностях и угрозах. Задачи SWOT-анализа представлены на рисунке 1.



Рис. 1. Задачи SWOT-анализа.

SWOT-анализ называется так по первым буквам английских слов, которые характеризуют содержание и направление этого метода («сильные и слабые стороны, возможности и угрозы»). SWOT - это аббревиатура из четырех слов (рисунок 2).



Strengths – сильная сторона, Weakness – слабая сторона, Opportunity – возможность, Threats – угроза

Рис. 2. Аббревиатура SWOT-анализа.

Структура матрицы представлена на таблице 1.

Табл. 1.

	Сильные стороны	Слабые стороны
Внутренние факторы	<ol style="list-style-type: none"> 1. Большой опыт. 2. Высокое качество продукции. 3. Высокая известность компаний. 4. Высокие продажи. 5. Лидерство в отрасли сегменте. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Мало оборотных средств. 2. Слабый имидж продукции. 3. Слабость поставщиков. 4. Отсутствие стратегии. 5. Внутриполитические проблемы.
Внешние факторы	Возможности	Угрозы
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Новые виды продукции. 2. Новые технологий. 3. Новые потребности, мода, в том числе потребности неосознанные. 4. Захват смежных сегментов – изучение ситуаций переключений потребителей. 5. Определение целевой аудиторий. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Продукты – заменители. 2. Новые игроки на рынке. 3. Слабость поставщиков. 4. Жизненный цикл товара на спаде. 5. Сезонный спад.

Особенностью SWOT-анализа является его универсальность и возможность использования при внедрении новых и усовершенствованных технологий.

Развитие производства в большой степени зависит от уровня и состояния энергетической отрасли. Теплоэнергетика является отраслью энергетики. Теплоэнергетика рассматривает процессы преобразования тепла в другие виды энергии. Именно ей, на сегодняшний день, принадлежит доминирующее положение в обеспечении потребностей в электрической и тепловой энергии. А тепловые электростанции, работающие на газе и угле, находятся в центре внимания в вопросах повышения их эффективности и повышения экологичности.

В настоящее время совершенствуются технологии, происходит замена различных видов топлива и т.д. Поэтому для более четкого установления, как изменится ситуация с введением той или иной технологии, модернизации производства целесообразно составлять SWOT-анализ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Блог Молодого аналитика [Электронный ресурс]: содержание, цель и задачи SWOT-анализа, 2012. URL: <http://humeur.ru/page/soderzhanie-cel-i-zadachi-swot-analiza> (дата обращения 14.09.2017).

Научный руководитель: О.А. Степанова, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика» государственного университета имени Шакарима города Семей.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ БИОГАЗОВЫХ СТАНЦИЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Т.А. Тюрин

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Сегодня биогазовые технологии получившие широкое распространение в зарубежных странах, начинают привлекать внимание российской общественности и инвесторов. Внимание данные технологии привлекли в начале 21 века, несколько стран - Германия, Финляндия, Австрия, Дания и Швейцария перевели от 10 до 12% генерации всей электрической энергии, на биогазовые станции [1]. Энергетики Швейцарии заявили, что к 2020 году переведут всю выработку на нетрадиционные источники энергии [2]. Эти тенденции напрямую связаны с топливным кризисом в период с 2007 по 2009 года. Также, стоит отметить, что генерация электроэнергии и тепла на биогазовых станциях (БГС) существенно улучшает экологическую обстановку, так как ни один из "нетрадиционных" источников энергии не приносит вред окружающей среде, как традиционные технологии генерации. На рис. 1 представлена доля возобновляемых источников энергии в объеме её производства в разных странах на 2015 год. Если говорить про биогаз в России, то такие способы генерации по сравнению с Европой не развиты, если взять процент нетрадиционной энергетики, мы едва дотягиваем до 1% в структуре всей генерации [1]. Тем не менее, министерство энергетики России заявило, что до 10% энергии в стране к 2030 году будет вырабатываться за счет нетрадиционных источников. [1].

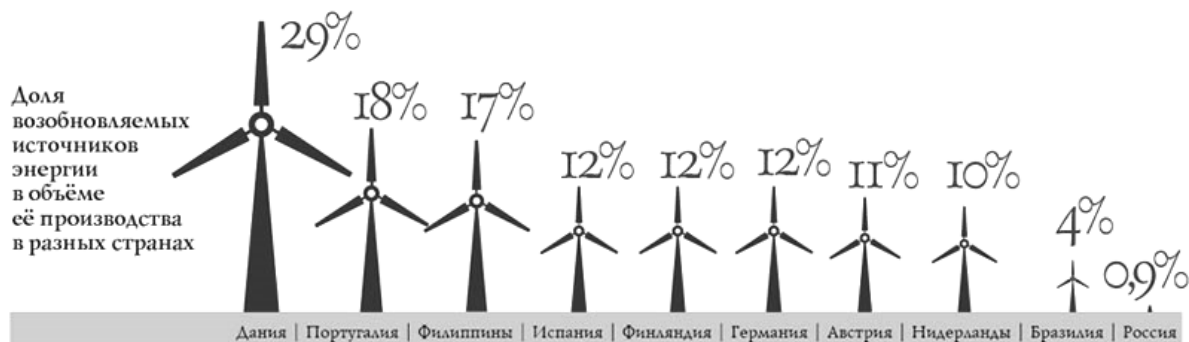


Рис. 1. Доля возобновляемых источников энергии в объеме её производства в разных странах.

В Белгородской области в 2013 году был реализован пилотный проект "Альт Энерго" и запущена в эксплуатацию одна из самых крупных биогазовых станций в России мощностью 2.4 МВт. Этой энергии хватает чтобы обеспечить весь Прохоровский район Белгородской области с численностью населения более пятидесяти тысяч человек. Выгоду таких проектов сотрудник Белгородской БГС демонстрируют на электромобиле заправленным электроэнергией сгенерированной при помощи био технологий, 100 километров пути обходится в 34 рубля, по сравнению с бензином это в 10 раз дешевле. Факты на лицо, но есть ряд проблем с которыми без помощи государства не обойтись. Продается такая энергия по обычным расценкам, а появление новых производителей альтернативной энергии такая система не стимулирует. На данный момент законопроект о нетрадиционной энергетике только разрабатывается, и в скором будущем стоит ожидать появления так называемых зеленых тарифов. Также, реализация электроэнергии, газа, тепла населению и предприятиям затруднена и без специальных разрешений, документов и сертификатов в этот рынок войти невозможно. Это один из барьеров для биоэнергетики в России. К примеру, в Европе любой владелец альтернативного источника в праве реализовывать излишки своей энергии в общую сеть тем самым не только экономить собственные средства, но и поддерживать соседей. Тем-не менее если частное лицо либо компания установит у себя на производстве или в доме подобную электростанцию и начнет вырабатывать энергию для собственных нужд при этом соблюдая нормы и правила технической эксплуатации то экономия не заставит себя ждать. Данный факт привел нас к агропромышленным комплексам так-как там имеется достаточное количество сырья и потребность в энергии электрической и тепловой. На примере компании "Саянский Бройлер", был произведен экономический расчет и получены следующие результаты выведенные в таблице

Табл. 1. Таблица сроков окупаемости

БГС	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	6 год	7 год	8 год
Инвестиционный поток (руб.)	58 000 000							
Операционный поток (руб.)	11 262 749	12 267 675	13 342 946	14 493 485	15 724 563	17 041 816	18 451 276	19 959 399
Ставка дисконта	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Чистый денежный поток (NCF)	9 793 695	19 069 820	27 843 024	36 129 722	43 947 609	52 420 403	61 593 949	71 517 297
Чистый дисконтированный доход (NPV) (руб.)	-48 206 304	-38 930 179	-30 156 975	-21 870 277	-14 052 390	-5 579 596	3 593 949	13 517 297
Внутренняя норма доходности (IRR)	-81%	-43%	-19%	-5%	5%	11%	15%	18%
Индекс рентабельности (PI)	0,17	0,33	0,48	0,62	0,76	0,90	1,06	1,23
Окупаемость	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ЛОЖЬ	ИСТИНА	ИСТИНА

При инвестиции в проект 58 млн рублей срок окупаемости проекта по внедрению биогазовой станции семь лет это соответствует нормам для энергетических объектов [4], процент доходности (IRR) проекта продолжает расти, денежный поток соответственно. Исходя из расчетов приведенных в таблице 1 можно сделать вывод что проект по внедрению БГС рентабелен. Интересным

фактом является то что для привлечения средств было принято решение реализовывать органические удобрения среди областных фермерских организаций. Технология производства позволяет вырабатывать до 18 тон удобрения в месяц, а также до 1000 м³ метана, который полезно используется на в газопоршневых двигателях вырабатывая тепловую и электрическую энергию. Весь экономический расчет представленный в таблице был произведен в соответствии с требованиями к проектам такого рода.

Помимо экономических выгод необходимо отметить факт, что на всех предприятиях подобного рода присутствует проблема отходов, а конкретно их утилизация, "Саянский бройлер"[3] перерабатывает в компост порядка 200 тонн помета в сутки и реализует его на собственных полях зерновых культур, но держать уровень кислотности и общее состояние почвы при таком обильном сдабривании крайне сложно поэтому возможен риск нанести экологический вред окружающей среде.

Используя биогазовые технологии отработанное сырье "биогаз" является биологическим удобрением, эффективно ускоряет рост культур повышает урожайность в 1,5-2 раза. Абсолютно не вредит окружающей среде, практически не обладает запахом и стабилизирует кислотность почвы.

Необходимость внедрения данных технологий очевидна, но сроки окупаемости едва входят в общепринятые стандарты, единственное что подтверждает пользу и выгоду - это опыт зарубежных ученых и стратегические инициативы в Белгороде. Правильный подход инвесторов к данному вопросу позволит динамично войти в рынок и приумножить инвестиции, агропромышленным комплексам экономить средства на собственные нужды, а земли сделать более плодородными.

Выводы

При внедрении биогазовых станций в России можно получить следующие эффекты:

1. Снижение энергонагрузки на существующие генерирующие объекты, что приведет к более сбалансированной работе энергосистемы.
2. Снижение операционных затрат на утилизацию отходов.
3. Собственная генерация энергии на агропромышленных предприятиях, что в итоге положительно отразится на себестоимости продукции.
4. Возможность получения дополнительных доходов за счет реализации ряда продуктов в процессе переработки отходов.
5. Улучшения экологической обстановки местности, где устанавливается БГС, за счет утилизации отходов и возможного сокращения выработки электроэнергии традиционной генерацией.
6. Гарантированное дешёвое резервное топливо готовое к применению.

ЛИТЕРАТУРА:

1. БИОКОМПЛЕКС - электронный ресурс. [Точка доступа]: biogaz-russia.ru/biogaz-v-rossii/ (дата обращения 08.05.2017)

2. Wikipedia - электронный ресурс. [Точка доступа]: wikipedia.org/wiki/Ископаемый_уголь
3. Обращение к специалистам предприятий: Шевцов Е.Ю. Главный инженер ООО "Саянский бройлер"(дата обращения 08.01.2017)
4. РОСЭНЕРГО - электронный ресурс. [Точка доступа]: lib.rosenergосervis.ru/ekonomika-elektroenergetiki.html?start=35

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Косторева А.А., Косторева Ж.А., Сыродой С.В. Исследование процессов тепло- и массопереноса в условиях микроволнового нагрева влажной древесины	3
Михайленко С.А. Конвективно-радиационный теплообмен во вращающейся полости с локальным тепловыделяющим элементом	8
Батищева К.А., Феоктистов Д.В. Влияние параметров лазерного луча на текстуру металлической поверхности	12
Золотухин А.В., Терехов В.И., Шаров К.А. Исследование структуры течения при обтекании сотовых поверхностей	16
Ни А.Э. Кондукция, конвекция и излучение в замкнутой системе с источником радиационной энергии	19
Иванова Н.А. Экспериментальное исследование влияния теплофизических свойств хвойной биомассы на процесс сушки	21
Войтков И.С. Экспериментальное исследование температурных следов жидкостного аэрозоля при движении через высокотемпературные газы	25
Габидуллина Д.Х., Калугин Г.А., Снопко И.Р. Исследование характеристик оптических печей	29
Бычкова А.А. Энергетическое моделирование термодинамических систем для решения проблем повышения ресурсо- и энергоэффективности сооружений в суровых условиях	33
Абрамова А.В. Экспериментальное исследование испарения капель водных эмульсий в разогретом воздухе	37
Савкина Н.В., Скибина Н.П., Маслов Е.А., Фарапонов В.В. Влияние локального вдува газа на теплообмен в пограничном слое	41
Эсенбеков С.Р., Н. Жангарач уулу, Разва А.С. Методы оценок классификационных эффектов в аэродинамических сепараторах	43
Мацкевич В.В., Фарапонов В.В., Маслов Е.А. Анализ процесса теплообмена в пограничном слое проточной части модельного ГПВРД при обтекании свехрзвуковым потоком	49
Назаров К.К., Кадырова Л.Ф. Исследование специализированного метода обеспечения температурно-скоростного режима охлаждения радиоэлектронной аппаратуры	52
Надырова А.Р. Моделирование процессов теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева котла КВТ-116,3-150	54
Айткалиев Ж.К., Сахариева А.М., Миниязов А.Ж. Исследование структуры и свойств вольфрама марки ВЧ-99	58

Ниязбеков А.Е. Кинетика изменения температуры ограждающих конструкций в зависимости от условий эксплуатации теплоизоляционных материалов	61
Хабиев М.М., Ашимов Б.Е., Серікбеков Д.Қ. К вопросу об использовании теплоизоляционных материалов	64
Сатыбалдинова А.Е., Тоимбаев А.Б. Влияние холодильного агента на экологию и эффективность работы теплового насоса.....	66
Исайнов Б.К., Сарпеков А.Т. Исследование древесноугольных брикетов.....	69
Мартынова Н.М., Ашимов Б.Е. Современные теплофизические методы исследования в энергетике	72
Елистратов С.Л., Кулиш А.Ю. Разработка блочно-модульной энергетической установки, мощностью 4 МВт на водоаммиачном рабочем теле.....	74
Шабардин Д.П. Сравнение скоростей горения органоводоугольных топлив на основе углей разных марок и отходов их переработки	77
Секция 2. Автоматизированные системы управления технологическими процессами	
Шлегель Н.Е. Измерение теплофизических параметров лесных горючих материалов с помощью системы DLA–1200 TA.....	82
Афанасьева В.В. Автоматическая система регулирования температуры в климатической камере на базе ПЛК.....	86
Рябова Т.В. Математические модели и алгоритмы в системе отопления умного дома	89
Курганкина М.А., Косинцев А.Г. Экологические последствия сжигания суспензионных топлив на основе углей, отходов и продуктов их переработки	94
Чебочакова Д.А. АСР процесса горения в топке котла при реализации безмазутной растопки	98
Няшина Г.С., Шлегель Н.Е. Оценка экологических индикаторов сжигание суспензионных угольных топлив с примесью перспективных древесных компонентов.....	102
Ляховская О.Е. Перспективы безмазутной растопки паровых котлов. Особенности автоматизации технологического процесса.....	106
Бойкова Т.С. Автоматическая система регулирования температуры перегретого пара барабанного котлоагрегата	110
Тимошенко Е.Л. АСР влажности в климатической камере на базе контроллера Siemens семейства Simatic.....	114

Антонов Д.В., Стрижак П.А. Теоретические и экспериментальные исследования высокотемпературного испарения неоднородных капель воды.....	116
Латников Д.И. Автоматическая система контроля и управления петротермальной станции.....	119
Щенникова О.С., Полех В.С. Разработка SCADA системы управления вентилятором приточной вентиляции.....	122
Нигай А.Г. Разработка системы автоматизированного контроля и управления реактором по осаждению нерастворимых аэрозолей на базе программируемого логического контроллера SIEMENS S7-1500.....	125
Бычкова А.А. Разработка и изготовление тепловой модели объекта для решения проблем повышения ресурсо- и энергоэффективности сооружений в суровых условиях.....	130
Лукашев А.А. Разработка и исследование адаптивного шагового алгоритма экстремального регулирования.....	134
Айкина Н.С. Модернизация автоматизированной системы управления теплотреблением административного здания.....	137
Андрианова Е.А. Реконструкция системы топливоподачи парового котла типа ТГМ-84 при переводе на автоматический розжиг.....	141
Ткаченко П.П. Светоиндуцированная газификация продуктов угольной промышленности.....	145
Болотникова О.А. Схема автоматики электропитания установки для синтеза карбида кремния.....	149
Балахнина Ю.Е. Комплексная система автоматического управления работой ЦТП.....	152
Ткаченко П.П. Автоматизация розжига горелок котла ТГМ-84.....	155
Круглова Т.Н., Власов А.С. Нейросетевое планирование траектории и обхода препятствий мобильным роботом.....	159
Власов А.С., Круглова Т.Н. Моделирование траектории передвижения мобильного робота с дифференциальным приводом колес и искусственной нейронной сети для объезда препятствий.....	162
Шмелев И.А., Рыженков С.И., Филатов Р.С. Классификация систем технического зрения для автоматизации технологического процесса.....	165
Олиферович Н.М., Кашкан М.А., Сухорукова И.Г., Гринюк Д.А. Адаптивное сглаживание трендов измерительных преобразователей.....	169
Кузьмицкий Д.В., Косолапов А.В., Гвоздев М.М. Анализ интегральных ошибок алгоритмов математического моделирования в MATLAB.....	173
Литвиненко М.А., В. Ю. Козловский, Шкудун Д.П. Динамика изменения температуры дисковой пилы.....	175

Токенова Г., Окасова К. Исследование эффективности автоматизированной системы отопления.....	179
Стаблецкий В.А., Морозова М.П., Шкудун Д.П. Определения передаточных функций динамики температуры металлического стержня.....	183
Иванов В.В., Захаров О.В. Анализ погрешности измерения цилиндричности деталей	186
Яковишин А.С., Захаров О.В. Адаптивный алгоритм измерения труднодоступных участков деталей на координатно-измерительных машинах	190
Шабардин Д.П. Разработка автоматизированной системы управления процессом подготовки композиционного жидкого топлива к сжиганию в топке котла.....	194
Аманжолова Н.А. Существующие методы расчета кинетики неизо-термической вулканизации	198
Секция 3. Ресурсоэффективные технологии для топливосжигающих энергетических установок	
Церешко Н.А. Исследование влияния магния на активность алюмо-медномагнийхромовых катализаторов в реакции окисления метана.....	200
Мракин А.Н., Сотников Д.Г., Табакаев Р.Б. Термодинамическое обоснование параметров дутья энергохимических установок с газификацией топлива	203
Орлова М.П., Горбенко Т.И. Термодинамическое исследование тер-митных композиций	208
Вислогузов Р.А., Астафьев А.В. Разработка экспериментальных стендов для определения теплофизических характеристик углеродной матрицы криптола	211
Цибизов Е.Р., Черкасова М.А. Особенности низкотемпературного вихревого сжигания бурого угля на примере котла П-49.....	216
Кокшарев О.М., Гиль А.В. Подходы к расчету и моделированию котлов с ЦКС	217
Юйпэй У Состояние угольной деятельности в России и в Китае и возможность сотрудничества в сфере торговли топливом.....	221
Зайцев А.С., Ткаченко П.П., Белоногов М.В. Газификация водоугольных топливных смесей, приготовленных из промышленных отходов, под действием лазерного излучения	224
Курганов А.А. Сравнение технологических методов подавления вредных выбросов.....	228
Астафьев А.В. Автотермический режим пиролиза биомассы за счет собственных тепловых эффектов разложения	231

Глебов Р.А., Елистратов С.Л. Газогидраты горючих газов, как перспективный энергоресурс	235
Кузьменко Н.С. Децентрализованное энергоснабжение республики Саха (Якутия): состояние вопроса и перспективные решения.	238
Захарушкин Н.А., Абашев И.Ю. Модель для определения динамических характеристик горизонтального блочного жаротрубного котла	242
Сурасманов И.Г., Данилов С.С. Термозкономический анализ жаротрубного котла	245
Шадрин Е.Ю., Ануфриев И.С. Диагностика структуры турбулентного потока при распылении жидких углеводородов струей перегретого водяного пара.....	247
Арсентьев С.С., Копьев Е.П. Горение дизельного топлива в условиях паровой газификации	251
Avdeyev B.A., Vyngra A.V. Increase of operating efficiency of ship electrical generating plant with shaft generator	255
Пятыгина М.В. Оценка тепловой эффективности процесса разложения твердого топлива	259
Хабиев М.М., Умыржан Т.Н., Серікбеков Д.Қ. Рациональное использование топлива путём сжигания древесных гранул «пеллеты».....	263
Умыржан Т.Н., Хабиев М.М., Петряков М.В. Экологические аспекты сжигания пеллетов.....	266
Петряков М.В., Гейст А.О., Умыржан Т.Н. Сжигание топлива в кипящем слое	268
Мартынова Н.М., Надырова А.Р. Ресурсоэффективные технологии в энергетике	270
Дамиркызы А., Бейлханов Е.М. SWOT-анализ в теплоэнергетике	273
Тюрин Т.А. Оценка эффективности внедрения биогазовых станций в агропромышленные комплексы восточной Сибири.....	276