

УДК 620.9

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРНОГО БЛОКА УСТАНОВКИ С ТВЕРДЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А.А. Селиванов¹, О.В. Афанасьева², *А.Н. Мракин¹, Г.К. Жанаев¹, А.Ю. Камаев¹

¹Саратовский государственный технический университет
им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3982-9735>, anton1987.87@mail.ru

Резюме: В статье рассматриваются вопросы оптимизации технологических параметров взаимного функционирования системы аппаратов установки полукоксования сланца с твердым (зольным) теплоносителем (УТТ).

Ключевые слова: горючий сланец, полукоксование, оптимизация, моделирование, реактор.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00295 «А».

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-47-54

THE OPTIMIZATION OF THE REACTOR BLOCK OPERATING PARAMETERS OF UNIT WITH A SOLID HEATING AGENT

A.A. Selivanov¹, O.V. Afanaseva², *A.N. Mrakin¹, G.K. Zhanaev¹, A.Yu. Kamaev¹

¹Gagarin Yu.A. Saratov State Technical University, Saratov, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3982-9735>, anton1987.87@mail.ru

Abstract: In the article the questions of optimization of technological parameters of mutual functioning of the system of apparatuses of the reactor block of semi-coking of slate with a solid heating agent (UTT) are considered.

Keywords: oil shale, semi-coking, optimization, modeling, reactor.

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project No. 17-08-00295 “A”.

Введение

Эффективность сланцеперерабатывающего комплекса (СПК) на базе УТТ [1–3] определяется величиной прибыли, полученной путем реализации товарной продукции. Выделение спектра конечной продукции обусловлено работой отделения конденсации парогазовой смеси (ПГС), которое включает в себя стандартные тепло-, массообменные устройства. При этом главным фактором, определяющим количественные и качественные параметры продукции, а следовательно, и величину прибыли является состав ПГС.

Особенности пребывания и взаимодействия горючего сланца и теплоносителя в реакторном блоке определяют соотношения продуктов полукоксования в составе ПГС. Поэтому эффективность работы установки будет, в основном, зависеть от условий взаимодействия аппаратов блока УТТ: основных – реактор полукоксования и аэрофонтанная топка, а также вспомогательного оборудования – зольный воздухоподогреватель, барабанная сушилка и котел-утилизатор. Их массогабаритные характеристики определяются величинами входящих и выходящих материальных и тепловых потоков.

На сегодняшний день в России используется методика оценки инвестиционных проектов *UNIDO* [4; 5]. Она включает в себя следующий ряд показателей: чистый дисконтированный доход (ЧДД); внутренняя норма доходности (ВНД); индекс доходности (ИД); срок окупаемости.

ЧДД характеризует превышение суммарных финансовых поступлений над суммарными затратами для рассматриваемого проекта с учетом неравноценности эффектов, относящихся к различным временным интервалам:

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - K, \quad (1)$$

где R_t – доход, достигаемый на t -м шаге, руб.; Z_t – затраты, полученные на t -м шаге, руб.; T – продолжительность расчетного периода (горизонт расчета), лет; t – номер шага расчета, определяемый с учетом срока проектирования, строительства, выход на номинальную производительность и период функционирования оборудования; E – норма дисконта, равная приемлемой для инвестора норме дохода на капитал, 1/год; K – сумма капитальных затрат с учетом дисконтирования, руб.; $\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t}$ – коэффициент дисконтирования.

Теоретические основы и результаты

В данной работе основная часть исследований базируется на созданном математическом описании внутренних процессов [6; 7] и программно реализованной модели [8] для расчета и оптимизации характеристик СПК.

Комплексный подход при решении таких задач позволяет исследовать влияние данных показателей на всю взаимодействующую систему аппаратов реакторного блока. Наиболее целесообразным критерием оптимальности в данном случае является величина прироста интегрального эффекта за рассматриваемый период функционирования оборудования УТТ:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{инт}} = \mathcal{E}_{\text{инт1}} - \mathcal{E}_{\text{инт2}} = \sum_{t=0}^T ((R_{t1} - Z_{t1}) - (R_{t2} - Z_{t2})) \alpha_t - \sum_{t=0}^T (K_{t1} - K_{t2}), \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_{\text{инт1}}$, $\mathcal{E}_{\text{инт2}}$ – эффекты, достигаемые при реализации проекта для двух сопоставляемых вариантов, руб.; T – горизонт расчета, для СПК составляет 15 лет; K_{t1} , K_{t2} – капитальные затраты для рассматриваемых вариантов (без дисконтирования), руб.

Основным критерием при использовании данного показателя является постоянство выработки конечной продукции. В данном случае в качестве сопоставляющего фактора принят одинаковый, для рассматриваемых конфигураций схем и параметров, выход ПГС после барабанного реактора. Применение данного критерия сопоставления объясняется, исходя из следующих соображений:

- состав ПГС, полученный в исследуемом температурном диапазоне ($t_{\text{пк}} = 492 \div 502$ °C и $t_3 = 618 \div 750$ °C) [4], различается незначительно;

- равенство количества и состава ПГС позволяет не рассматривать капитальные и эксплуатационные затраты на отделение конденсации и выделение конечных продуктов;

- изменение технологических параметров внутри реакторного блока может быть легко компенсировано увеличением расхода исходного горючего сланца.

Поэтому выражение (2) будет иметь вид

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{инт}} = \Delta \mathcal{Z}_{\Sigma} - \Delta \mathcal{K}, \quad (3)$$

где $\Delta \mathcal{Z}_{\Sigma}$ – изменение эксплуатационных (текущих) затрат на выделение парогазовой смеси из горючего сланца, руб.; $\Delta \mathcal{K}$ – изменение капитальных вложений в УТТ, руб.

Комплексная многопараметрическая оптимизация массогабаритных характеристик и особенностей взаимодействия аппаратов блока полукоксования УТТ подразумевает влияние оптимизируемых технологических параметров на минимальное значение дисконтированных затрат согласно (3). Для определения количества оптимизируемых параметров необходим подробный анализ функционирования реакторного отделения, принципиальная схема внутренних материальных потоков которого показана на рис. 1.

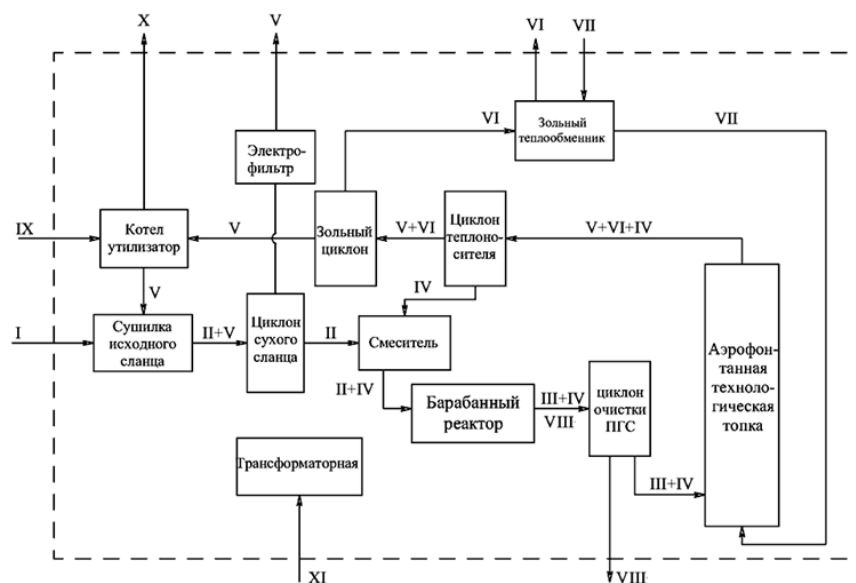


Рис.1. Принципиальная технологическая схема УТТ: I – исходный сланец; II – сухой сланец; III – сланцевый полукокк; IV – зольный теплоноситель; V – дымовые газы; VI – зольный остаток; VII – подогретый воздух; VIII – ПГС от полукоксования; IX – питательная вода в котле-утилизаторе (КУ); X – водяной пар из КУ; XI – электроэнергия из стороннего источника
 - - - - - условная граница реакторного блока

Основным технологическим потоком блока УТТ является исходный карьерный сланец I. Выходящими материальными потоками являются: ПГС от полукоксования сланца VIII, передаваемая в отделение конденсации и выделения конечных продуктов; зольный остаток IV, также являющийся конечным сырьем для нужд дорожного строительства и водяной пар VI, получаемый в котле-утилизаторе. Все остальные материальные потоки являются внутренними и обеспечивают получение ПГС с наилучшими показателями в результате полукоксования сланца.

Основным аппаратом схемы является непосредственно барабанный реактор полукоксования [9]. Его размеры определяются расходными и качественными показателями сланца и зольного теплоносителя. При принятой нагрузке по горючему сланцу необходимо определиться с расчетным содержанием УОМ, в первом приближении и с остаточным углеродом в полукоксе, степенью заполнения барабана смесью сланца и зольного теплоносителя, определяемой кратностью циркуляции, с температурой зольного теплоносителя. Все эти показатели влияют на габаритные характеристики барабанного реактора и зависят от результатов расчета динамики тепло- и массообмена и выделения

ПГС на основе кинетических констант скоростей реакций и температурного уровня процесса.

Остаточный углерод в сланцевом полукоксе на выходе из реактора является, по существу, наиболее важным показателем условий работы технологической топки (АФТ). Чем больше остаточного углерода в конечном полукоксе, тем выше температурный уровень продуктов после АФТ, что, в свою очередь, влияет на количество зольного теплоносителя в самом реакторе. На температуру выгорания углерода полукокса в АФТ также оказывает влияние температура воздуха, подогретого в зольном теплообменнике, которая, в свою очередь, зависит от температуры мелкодисперсной золы после зольных циклонов и от принятого расхода окислителя по отношению к теоретическому расходу для процесса полного догорания углерода. При этом максимальная температура догорания полукокса в топке имеет ограничение, связанное с температурой размягчения золы. Такой анализ влияющих факторов указывает на необходимость оптимизации температуры продуктов на выходе из АФТ и связанных с этим показателем остаточного углерода полукокса, количества окислителя в АФТ и температуры подогрева воздуха в зольном теплообменнике. На основе решения многопараметрических зависимостей определяются оптимальные массогабаритные характеристики аппаратов схемы УТТ и оптимальный выход ПГС.

Таким образом, оптимизируемыми параметрами, определяющими совместную работу всех узлов реакторного блока УТТ, являются: 1) остаточный углерод в полукоксе φ_c ; температура воздуха на входе в АФТ, t_b , и коэффициент расхода воздуха α . Задача поиска оптимальных характеристик работы оборудования и параметров блока УТТ может быть записана на основе подхода, изложенного в работе [10], в следующем виде:

$$\begin{cases} Z = f(\varphi_c; t_b; \alpha) \rightarrow \min \\ 4\% \leq \varphi_c \leq 10\% \\ 400 \text{ }^\circ\text{C} \leq t_b \leq 600 \text{ }^\circ\text{C} \\ 1,4 \leq \alpha \leq 2 \end{cases} \quad (4)$$

Величина доверительных интервалов для остаточного углерода полукокса φ_c и температуры воздуха t_b обусловлена действующими показателями работы оборудования на установках УТТ. Повышение количества остаточного углерода в сланцевом полукоксе выше 10% приведет к достижению температур размягчения золы при его дожигании в АФТ. Повышенные значения α приводит к снижению температуры в основном объеме АФТ, за счет увеличения затрат теплоты на нагрев воздуха, и увеличению кратности циркуляции зольного теплоносителя при условии поддержания оптимального температурного уровня процесса полукоксования. Все это приводит к увеличению расчетных габаритных характеристик оборудования, а следовательно, капитальных и текущих затрат.

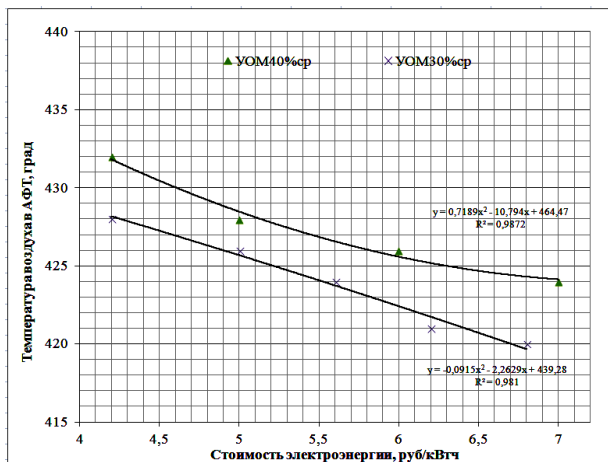
Обсуждение

Ниже приведены результаты многопараметрической оптимизации. Расчеты выполнены для сланца с различным содержанием исходного условного органического вещества (УОМ) в пределах 30–40%, что позволило оценить влияние качественных характеристик сырья на технологические параметры работы УТТ [11].

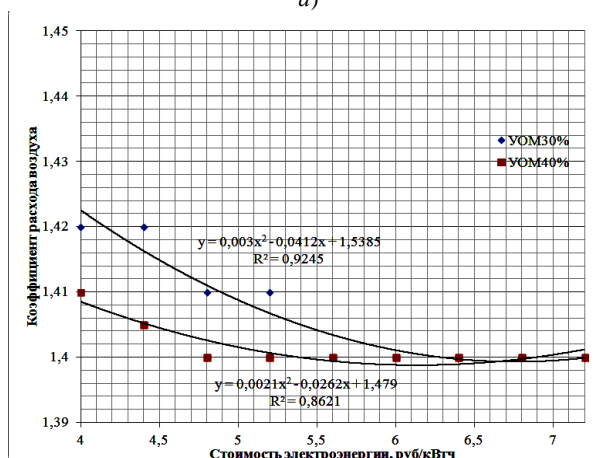
Расход карьерного сланца в сутки составил 500 тонн сланца/сутки; уровень налоговых отчислений – 30%. Уровень цен на энергоносители принят согласно действующим тарифам (ОАО «Саратовэнерго», ЗАО «НЭСК» и др.).

Увеличение стоимости электроэнергии приводит к необходимости компенсации текущих затрат за счет снижения количества подаваемого на горение воздуха, а это, в свою

очередь, сказывается на особенностях ведения процесса выгорания углерода с поверхности полукокса. На рис. 2 показано влияние цены электроэнергии на технологические показатели работы АФТ.



а)



б)

Рис. 2. Влияние стоимости электроэнергии на оптимальную температуры окислителя в АФТ (а) и коэффициента расхода воздуха в АФТ (б)

Таким образом, уменьшение количества воздуха приводит к росту отношения CO/CO_2 в продуктах дожигания углерода полукокса, а следовательно, к снижению количества теплоты за счет увеличения выхода CO с более низким экзотермическим эффектом реакции (23350 кДж/кг против 34000 кДж/кг). Это обстоятельство сказывается и на функционировании барабанного реактора (за счет увеличения количества зольного теплоносителя на основе теплового баланса) и вспомогательного оборудования (барабанной сушилки, котла-утилизатора и зольного теплообменника). Отметим, что при разработке математического описания не учитывались потери теплоты в окружающую среду, а также различные диффузионные осложнения, связанные с особенностями доступа кислорода в зону реакции горения частиц полукокса. Поэтому результаты расчетов (рис. 2, а) несколько занижены исходя из меньших значений величины коэффициента расхода воздуха. Данные

рис. 2 наглядно иллюстрируют влияние качества исходного карьерного сланца на технологические характеристики работы АФТ. Уменьшение содержания УОМ в исходном сланце повышает количество отработавшего зольного теплоносителя и полукокса в топке, что способствует снижению температуры на выходе из топки, а это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению теплопередающей поверхности зольного воздухоподогревателя.

На рис. 3 показано влияние изменения стоимости исходного карьерного сланца на остаточное содержание углерода в сланцевом полукоксе на выходе из реактора.

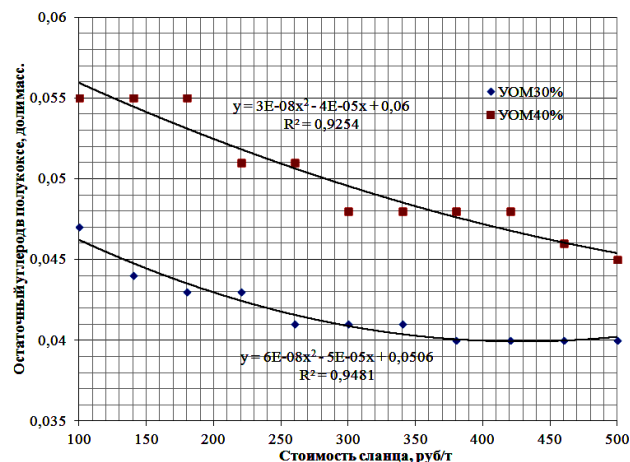


Рис. 3. Зависимость оптимального остаточного углерода в полукоксе от стоимости сланца

Увеличение стоимости карьерного сланца приводит к необходимости снижения его расхода в реактор, путем увеличения времени нахождения сланцезольной смеси в аппарате, и более полному разложению органического вещества с увеличением выхода ПГС. Этим объясняется снижение доли остаточного углерода полукокса. Этот факт приводит к увеличению температуры выходящего воздуха в зольном теплообменнике и увеличению его теплопередающей поверхности.

Заключение

1. На основе предположения о постоянстве выхода ПГС из барабанного реактора для сопоставляемых вариантов обоснован критерий технико-экономической оптимизации. Анализ системы аппаратов реакторного блока позволил определить состав независимых влияющих параметров и диапазоны их изменения, определяемые технологическими особенностями аппаратов и качественными показателями сырья.

2. На основе проведения численных экспериментов на математической модели выявлено влияние стоимости карьерного сланца, электроэнергии а также качества исходного сланца на оптимизируемые параметры.

3. Показано, что увеличение стоимости электроэнергии в пределах 4÷7 руб./кВт·ч приводит к понижению температуры и количества окислителя в АФТ.

Литература

1. Õpik I. Current status of oil shale processing in solid heat carrier UTT (Galoter) retorts in Estonia / I. Õpik, N. Golubev, A. Kaidalov, J. Kann, A. Elenurm // Oil Shale. 2001. Vol. 18. No. 2. P. 99–108.
2. Potapov O.P. Experience and prospects of oil shale utilization for power production in Russia // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. No. 9. P. 643–647.

3. Volkov E., Stelmakh G. The stages of research on creating commercial units for processing oil shale fines. Development of the “Galoter” process in 1944–1999 // Oil Shale. 1999. Vol. 16. No. 2. P. 161–185.
4. Александров Ю.Л., Кониковская Н.О., Кузнецова Е.Н., Фомина В.Н. Экономика и управление в энергетике. М.: Издательство Юрайт, 2017. 485 с.
5. Панфилова О.В. Инвестиционное проектирование: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. эконом. ун-т, 2017. 116 с.
6. Selivanov A.A. Mathematical modeling of the carbon burn-out process from the shale semi-coke surface of aerofountain technological furnace in the solid heat-carrier oil shale semi-coking scheme / Selivanov A.A., Batrakov P.A., Mraikin A.N., Morev A.A. // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. p. 134–139.
7. Симонов В.Ф. Разработка алгоритма расчета барабанного реактора полукоксования горючего сланца зольным теплоносителем / В.Ф. Симонов, А.А. Селиванов, А.Н. Мракин, А.А. Морев, О.В. Афанасьева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 10. С. 16–19.
8. Программа оптимизации схемы комплексной переработки сернистого горючего сланца с головным процессом полукоксования в реакторе с твердым (зольным) теплоносителем / А.А. Селиванов, В.Ф. Симонов, А.Н. Мракин // Программа для ЭВМ №2015612304.
9. Väizene V. High selective oil shale mining / V. Väizene, I. Valgma, R. Iskül, M. Kolats, M. Nurme, V. Karu // Oil Shale. 2013. Vol. 30. № 2S. p. 305–325.
10. Симонов В.Ф., Морев А.А. Оптимизация энерготехнологической установки для переработки сернистого горючего сланца в псевдооживленном слое // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 1–2. С. 81–87.
11. Волков Э.П. Энерготехнологическое использование сланца. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 480 с.

Авторы публикации

Селиванов Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Афанасьева Ольга Валерьевна – канд. техн. наук, начальник УНИР Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Мракин Антон Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Жанаев Гайнидин Кайрадинович – магистрант кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Камаев Андрей Юрьевич – магистрант кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

References

1. Õpik I. Current status of oil shale processing in solid heat carrier UTT (Galoter) retorts in Estonia / I. Õpik, N. Golubev, A. Kaidalov, J. Kann, A. Elenurm // Oil Shale. 2001. Vol. 18. №2. p. 99-108.
2. Potapov O.P. Experience and prospects of oil shale utilization for power production in Russia / Potapov O.P. // Thermal Engineering. 2016. Vol. 63. №9. p. 643-647.
3. Volkov E. The stages of research on creating commercial units for processing oil shale fines. Development of the «Galoter» process in 1944-1999 / E. Volkov, G. Stelmakh// Oil Shale. 1999. Vol. 16. №2. p. 161-185.

4. Alexandrov Yu.L. Economics and management in power engineering / Yu.L. Alexandrov, N.O. Konikovskaya, E.N. Kuznetsova, V.N. Fomina. – Moscow: Yurayt Publishing House, 2017. – 485 p.
5. Panfilova O.V. Investment design: Textbook. allowance. – St. Petersburg: St. Petersburg state. economy. univ., 2017. – 116 p.
6. Selivanov A.A. Mathematical modeling of the carbon burn-out process from the shale semi-coke surface of aerofountain technological furnace in the solid heat-carrier oil shale semi-coking scheme / Selivanov A.A., Batrakov P.A., Mrakin A.N., Morev A.A. // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. p. 134-139.
7. Simonov V.F. Development of an algorithm for calculating a drum reactor for the semi-coking of oil shale with an ash coolant / V.F. Simonov, A.A. Selivanov, A.N. Mrakin, AA Morev, O.V. Afanasyeva // Chemical and Oil and Gas Engineering. 2016. №10. p. 16-19.
8. Program to optimize the scheme for the complex processing of sulfur fuels shale with a head semi-coking process in a reactor with a solid (ash) coolant / A.A. Selivanov, V.F. Simonov, A.N. Mrakin // The program for the computer №2015612304.
9. Väizene V. High selective oil shale mining / V. Väizene, I. Valgma, R. Iskül, M. Kolats, M. Nurme, V. Karu // Oil Shale. 2013. Vol. 30. №2S. p. 305-325.
10. Simonov V.F. Optimization of an energy technological plant for the processing of sulfuric oil shale in a fluidized bed / V.F. Simonov, A.A. Morev // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problems of energy. 2014. №1-2. p. 81-87.
11. Volkov E.P. Energy technology use of oil shale. – Moscow: Publishing house MPEI, 2015. – 480 p.

Authors of the publication

Alexey A. Selivanov – cand. sci. (techn.), associate professor of Industrial Heating Engineering, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Olga V. Afanaseva – cand. sci. (techn.), Head of scientific research, innovation and development department, Kazan State Power Engineering University.

Anton N. Mrakin – cand. sci. (techn.), associate professor of Industrial Heating Engineering, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Gainidin K. Zhanaev – graduate student of Industrial Heat Engineering, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Andrey Y. Kamaev – graduate student of Industrial Heat Engineering, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

Поступила в редакцию

16 апреля 2018 г.