



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПАРОВОГО КОТЛА ПРИ СЖИГАНИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА

Э.Р. Сайфуллин¹, В.М. Ларионов¹, Ю.В. Ваньков²

¹ Казанский Федеральный университет, г. Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0823-9051>, mr.emilsr@gmail.com

Резюме: Состав газообразного топлива может меняться в широких пределах, в зависимости от источника, времени и стадии разработки конкретного месторождения. Изменение состава приводит к изменению теплофизических характеристик топлива, что влияет на стабильность работы котельных агрегатов. В данной статье представлены результаты численного моделирования стабилизации теплопроизводительности и полноты сгорания попутного нефтяного газа (ПНГ) в случае длительного непрерывного изменения его состава. Моделирование проводилось по разработанному ранее алгоритму оптимизации процесса горения углеводородного топлива (УВТ) переменного состава. Результаты моделирования показали, что при медленном непрерывном изменении удельной теплоты сгорания (УТС) топлива с относительной скоростью изменения 1 % за время тепловой инерции, стабилизация работы котла по предложенному алгоритму позволяет поддерживать температуру теплоносителя на выходе из котла в пределах 10 % от требуемой.

Ключевые слова: теплоэнергетика; котлоагрегат; оптимизация горения; переменный состав топлива; попутный нефтяной газ

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

NUMERICAL MODELING OF STABILIZATION OF THE HEAT OUTPUT OF A STEAM BOILER IN THE COMBUSTION OF ASSOCIATED PETROLEUM GAS

E.R. Saifullin¹, V.M. Larionov¹, Yu.V. Vankov²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0823-9051>, mr.emilsr@gmail.com

Abstract: The composition of the gaseous fuel can vary widely, depending on the source, time and stage of development of a particular field. Changes in composition leads to a change in the thermophysical characteristics of the fuel, which affects the stability of the operation of the boiler units. This article presents the results of a numerical simulation of the stabilization of heating capacity and the completeness of combustion of associated petroleum gas (APG) in the event of a prolonged, continuous change in its composition. The simulation was carried out using the

previously developed algorithm for optimizing the combustion process of the hydrocarbon fuel (HCF) of variable composition. The simulation results showed that with a slow continuous change in the fuel low heating value with a relative rate of change of 1% during the time of thermal inertia, the stabilization of the operation of the boiler according to the proposed algorithm allows maintaining the steam temperature at the outlet within 10% of the required.

Keywords: heat power engineering, industrial boiler, combustion optimization, variable fuel composition, heat engineering, associated petroleum gas

Acknowledgments: The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University

For citation: Saifullin E.R., Larionov V.M., Vankov Yu.V. Numerical modeling of stabilization of the heat output of a steam boiler in the combustion of associated petroleum gas. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21(3-4):15-21. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-15-21.

Введение

Согласно Указу Президента Российской Федерации № 899 от 07.07.2011 г. приоритетным направлением развития науки, технологий и техники является «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а одной из критических технологий Российской Федерации развития является «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» [1]. Также в Энергетической стратегии России на период до 2030 года приоритетными направлениями развития энергетики являются снижение удельных затрат топлива при производстве и потреблении энергоресурсов за счет применения энергосберегающих технологий и оборудования [2]. Одним из направлений снижения потребления традиционных энергоресурсов является использование альтернативных видов топлива, таких как биогаз, синтез газ и газообразные промышленные отходы. В частности, для Российской Федерации актуально использование попутного нефтяного газа (ПНГ).

В 2009 году Правительством Российской Федерации принято постановление № 7 от 8 января «О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках», в котором заложено требование по доведению уровня рационального использования попутного газа до 95 % [4]. В США также отмечают важность рационального использования углеводородных отходов, поэтому Агентство по охране окружающей среды США, начиная с 2008 г., рассматривает любой газ, сгенерированный на нефтеперерабатывающем заводе, в качестве топлива [5]. В настоящее время используют следующие способы рационального использования ПНГ [10–14].

1. Переработка на газоперерабатывающем заводе.
2. Закачка в продуктивный пласт (сайклинг-процесс, «газлифт»).
3. Переработка ПНГ по технологии *GTL* (*gas to liquid*) или его сжижение *LPG* (*liquefied petroleum gas*).
4. Закачка во временные подземные хранилища.
5. Использование ПНГ в качестве альтернативного топлива для выработки электрической и тепловой энергии в энергетических установках.

В отличие от традиционного топлива, содержание компонентов в попутном нефтяном газе может меняться в больших пределах в зависимости от источника, времени и стадии разработки конкретного месторождения. В нефтяном пласте попутный нефтяной газ находится в растворенном виде или располагается над нефтью в «газовой шапке». Состав

газов, находящихся непосредственно над нефтью, может сильно отличаться от состава газов, растворенных в нефти. Состав газов сильно зависит от условий отбора пробы, от давления, под которым находится газ в скважине, соотношения в пробе свободного газа из залежи и газа, выделившегося из нефти при ее подъеме в скважине. В связи с этим содержание и состав тяжелых углеводородов в газах, отобранных на одной и той же площади, показывают значительные колебания.

Характерной особенностью состава попутных нефтяных газов является наличие в них, помимо метана (CH_4), этана (C_2H_6), пропана (C_3H_8), бутана (C_4H_{10}) и паров более тяжелых углеводородов. ПНГ имеет высокую теплотворную способность, которая меняется в пределах от 37673 до 62788 кДж/м³ из-за нестабильности его состава [3]. Данные изменения приводят к нарушению стабильности теплового эффекта процесса горения, что может привести к негативным последствиям [4, 5]. Возникает вероятность срыва пламени (уход пламени вглубь топочного пространства), обратной вспышки (распространение пламени внутрь горелки), неустойчивости горения (пульсации давления), самовоспламенения (возгорание газозвоздушной смеси в смесеобразовательном пространстве), локального перегрева поверхностей.

Имеющиеся способы оптимизации работы котла, основанные на контроле состава уходящих газов, расчете термического КПД, измерении температуры горения, не совершенны. Общими недостатками этих способов являются: высокая трудоемкость, конструктивная сложность исполнения и главное – отсутствие возможности оперативно реагировать на случайные изменения состава сжигаемого топлива. Такая ситуация является следствием недостаточной изученности термодинамических характеристик процесса горения углеводородного топлива в периоды изменения его состава, отсутствия научно обоснованных способов стабилизации теплового эффекта горения и теплового потока, передаваемого теплоносителю. Все вышеизложенное свидетельствует об актуальности данной темы.

Цель работы заключалась в численном моделировании стабилизации теплопроизводительности и полноты сгорания очищенного попутного нефтяного газа в случае длительного непрерывного изменения его состава по разработанному ранее алгоритму.

Методы

Авторами ранее была разработана квазистационарная модель стабилизации скорости тепловыделения при горении смеси УВТ метанового ряда и воздухом с обеспечением полного сгорания топлива в случае кратковременных и длительных изменений его УТС [6–9], а также был предложен алгоритм [10, 11], позволяющий стабилизировать скорость тепловыделения котлоагрегата при сжигании УВТ метанового ряда переменного состава с обеспечением его полного сгорания. Согласно алгоритму, при уменьшении температуры теплоносителя на выходе, вызванном снижением УТС топлива, необходимо начать постепенное увеличение подачи топлива, без изменения расхода воздуха, пока температура теплоносителя не станет прежней. В случае постоянства температуры проводят конкретизацию режима горения однократным уменьшением расхода топлива. Резкое снижение температуры указывает на оптимальный режим горения, и, согласно алгоритму, необходимо вернуться к предыдущему значению расхода топлива, восстанавливая оптимальный режим. Постоянство температуры после однократного уменьшения подачи топлива указывает на то, что началось увеличение удельной теплоты сгорания, которое компенсирует появившийся недожог топлива, так как расход воздуха не изменился. Поэтому необходимо продолжать дальнейшее снижение расхода топлива до того момента, пока температура не начнет снижаться. После этого необходимо вернуть предыдущее значение расхода топлива, соответствующее начальной постоянной температуре.

Численное моделирование проводилось согласно разработанному алгоритму с применением нормативного метода теплового расчета котлов [12].

Условия расчета

Для расчета выбран паровой котёл ДЕ 10-14. Параметры режима работы котла указаны в таблице.

Таблица

Параметры режима работы котла

№	Параметр	Значение
1.	Паропроизводительность котла D , кг/ч	6097
2.	Температура насыщенного пара $t_{п}$, °С	172,1
3.	Энтальпия насыщенного пара $H_{п}$, кДж/кг	2770
4.	Температура воды на входе $t_{в}$, °С	100
5.	Энтальпия воды на входе $H_{в}$, кДж/кг	508
6.	Температура продуктов сгорания ϑ , °С	125
7.	Температура воздуха на входе в котел $t_{вхв}$, °С	27
8.	Время тепловой инерции $\tau_{тп}$, мин	1

В качестве примера углеводородного топлива переменного состава был взят очищенный попутный нефтяной газ (т.е. учитывался только углеводородный состав газа). Было рассмотрено два случая: длительное уменьшение и увеличение УТС топлива (рис. 1).

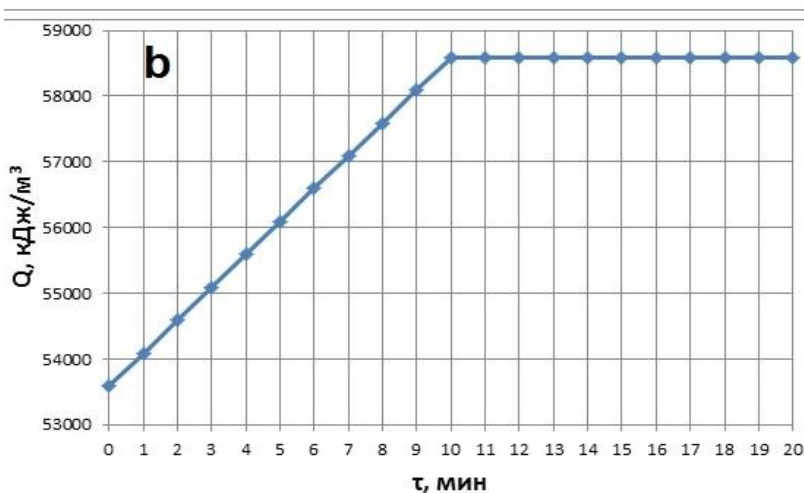
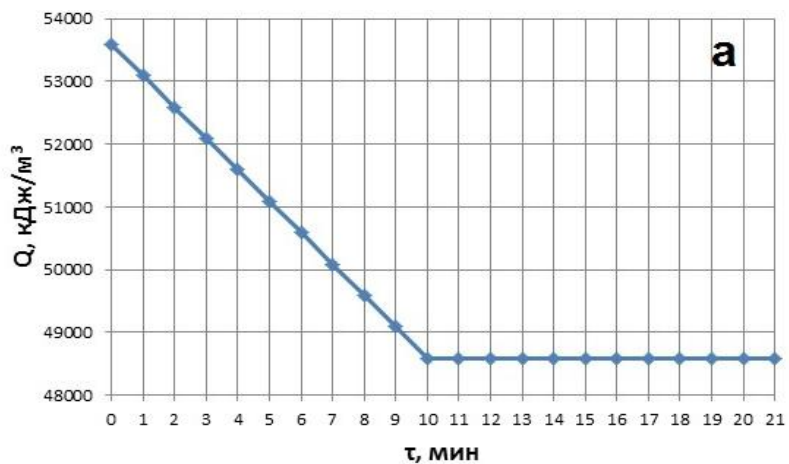


Рис. 1. Длительное увеличение (a) и уменьшение (b) УТС топлива по времени

Скорость изменения УТС $\lambda_q = 500$ кДж/мин·м³, начальный расход топлива $G_f = 276,5$ м³/ч, КПД брутто $\eta = 0,931$. Анализ производился в квазистационарном приближении; это значит, что в интервале времени, равном времени тепловой инерции котла, энтальпия пара остается постоянной. В конце интервала энтальпия скачком принимает значение, соответствующее удельной теплоте сгорания топлива, которая была в начале интервала, то есть $H_n(\tau)$ считается функцией от $Q_n^p(\tau - \tau_{ин})$.

Результаты

Численное моделирование показало, что регулирование работы котла по предложенному алгоритму позволяет поддерживать температуру теплоносителя в пределах 10 % от заданной (рис. 2, а, рис. 3, а) в результате соответствующего регулирования расхода топлива (рис. 2, б, рис. 3, б) с обеспечением полного сгорания топлива. Минимальный шаг изменения расхода топлива составлял 0,125 %.

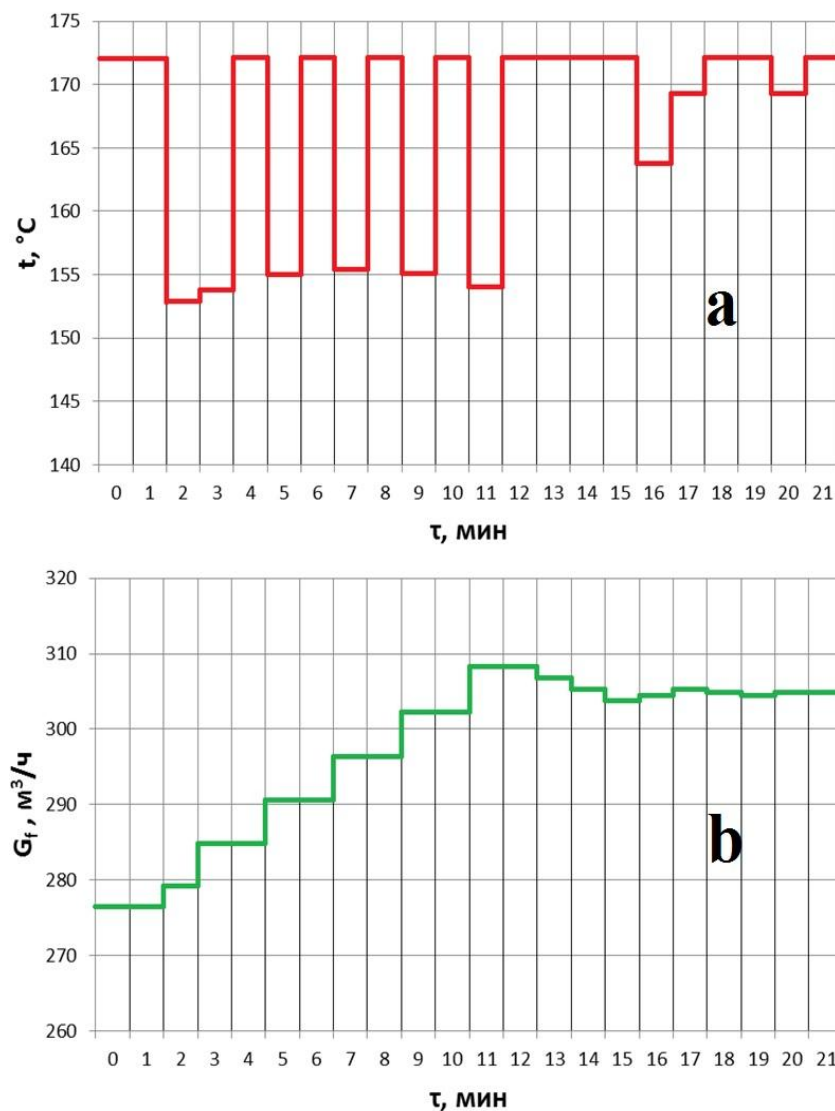


Рис. 2. Изменение температуры пара на выходе из котла t (а) и оптимального расхода топлива G_f (б) от времени при длительном уменьшении УТС

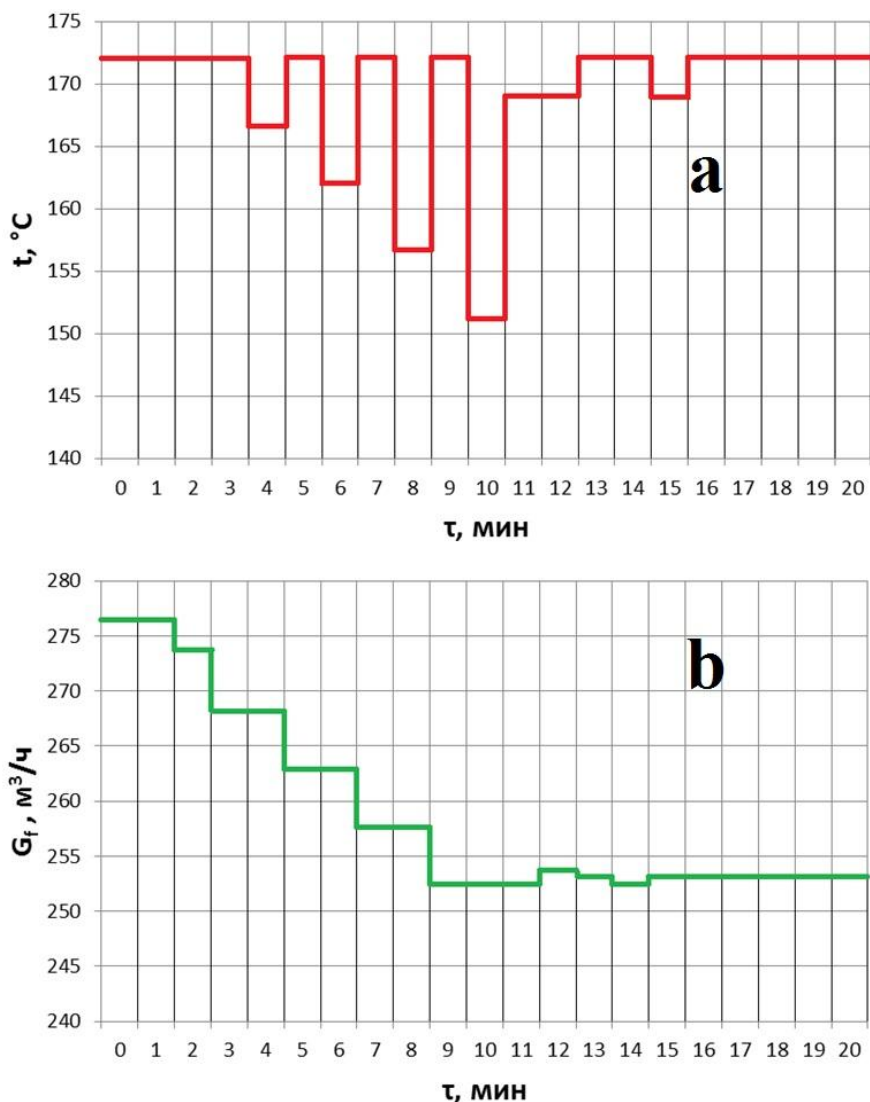


Рис. 3. Изменение температуры пара на выходе из котла t (a) и оптимального расхода топлива G_f (b) от времени при длительном увеличении УТС

Выводы

Численное моделирование показало, что при непрерывном случайном уменьшении (или увеличении) УТС ПНГ, вызванном колебанием его состава, стабилизация теплопроизводительности парового котла ДЕ 10-14 с обеспечением полного сгорания топлива осуществляется дискретными увеличениями (или уменьшениями) расхода топлива на величину, позволяющую поддерживать температуру пара в заданном контрольном диапазоне 10 %.

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации" от 7 июля 2011 г № 899 // Собрание законодательства Российской Федерации.
2. Акт правительства Российской Федерации "Энергетическая стратегия России на период до 2030 года" от 13 ноября 2009 г. № 1715-п // Собрание законодательства Российской Федерации.

3. A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov, R.E. Kirichenko, D.G. Ievlev Analysis of the Gas Turbine Engine Combustion Chamber Conversion to Associated Petroleum Gas and Oil // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2015. №58. С. 205–209.

4. О мерах по стимулированию сокращения загрязнения атмосферного воздуха продуктами сжигания попутного нефтяного газа на факельных установках: Постановление Правительства РФ №7 от 8 января 2009 года.

5. U.S. Environmental Protection Agency, Standards of Performance for Petroleum Refineries, 40 CFR 60, Subpart J, Section 60.101(d), U.S. Government Printing Office, Washington, DC, Electronic Code of Federal Regulations, current as of June 12, 2008.

6. Kayadelen H.K. Effect of natural gas components on its flame temperature, equilibrium combustion products and thermodynamic properties, Journal of Natural Gas Science and Engineering 45 (2017) 456-473.

7. Sayad P. Operational stability of lean premixed combustion in gas turbines. An experimental study on gaseous alternative fuels, Doctoral Dissertation (2016), Lund University.

8. Saifullin E.R. Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Yu.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 86. 2015. № 012006.

9. Saifullin E.R. Thermal effect of hydrocarbon fuels combustion after a sudden change in the specific calorific value / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012043.

10. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012037.

11. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. V. 789. 2017. № 012045.

12. Ларионов В.М., Сайфуллин Э.Р., Назарычев С.А., Малахов А.О., Ваньков Ю.В. Алгоритм оптимизации процесса сжигания попутного нефтяного газа в тепловых энергетических установках с учетом непостоянства его состава // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №19. С. 3–9.

13. Пат. 2647940 Рос. Федерация: МПК F23C 1/02, F23C 1/08. Способ автоматической оптимизации процесса сжигания топлива переменного состава / В.М. Ларионов, Ю.В. Ваньков, Э.Р. Сайфуллин, С.А. Назарычев, А.О. Малахов; Заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО КФУ, RU. – № 2017116036/06; заявл. 04.05.2017; опубл. 21.03.2018; бюл. №9. 6 с.

14. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Изд-е 3-е, перераб. и доп. СПб: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

Авторы публикации

Сайфуллин Эмиль Ринатович – аспирант Казанского федерального университета (КФУ).

Ларионов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор Казанского федерального университета (КФУ).

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Decree of the President of the Russian Federation "On the approval of priority directions for the development of science, technology and technology in the Russian Federation and the list of critical

technologies of the Russian Federation" of July 7, 2011 No. 899 // Collected Legislation of the Russian Federation.

2. Act of the Government of the Russian Federation "The Energy Strategy of Russia for the period until 2030" of November 13, 2009 No. 1715-p // Meeting of the Legislation of the Russian Federation.

3. A.I. Gur'yanov, O.A. Evdokimov, Sh.A. Piralishvili, S.V. Veretennikov, R.E. Kirichenko, D.G. Ievlev Analysis of the Gas Turbine Engine Combustion Chamber Conversion to Associated Petroleum Gas and Oil // Russian Aeronautics (Iz.VUZ). 2015. №58. C. 205–209.

4. O merakh po stimulirovaniyu sokrashcheniya zagryazneniya atmosfernogo vozdukha produktami szhiganiya poputnogo neftyanogo gaza na fabel'nykh ustanovkakh: Postanovleniye Pravitel'stva RF №7 ot 8 yanvarya 2009 goda.

5. U.S. Environmental Protection Agency, Standards of Performance for Petroleum Refineries, 40 CFR 60, Subpart J, Section 60.101(d), U.S. Government Printing Office, Washington, DC, Electronic Code of Federal Regulations, current as of June 12, 2008.

4. Kayadelen H.K. Effect of natural gas components on its flame temperature, equilibrium combustion products and thermodynamic properties // Journal of Natural Gas Science and Engineering 45 (2017) 456–473.

5. Sayad P. Operational stability of lean premixed combustion in gas turbines. An experimental study on gaseous alternative fuels, Doctoral Dissertation (2016), Lund University.

6. Saifullin E.R. Optimization of burning process of hydrocarbon fuels with varying specific heat of combustion / E.R. Saifullin, Yu.V. Vankov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. V. 86. 2015. № 012006.

7. Saifullin, E.R. Thermal effect of hydrocarbon fuels combustion after a sudden change in the specific calorific value / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012043.

8. Saifullin E.R. Optimization of hydrocarbon fuels combustion variable composition in thermal power plants / E.R. Saifullin, V.M. Larionov, A.V. Busarov, V.V. Busarov // Journal of Physics: Conference Series. V. 669. 2016. № 012037.

9. Saifullin E.R. The heat effect of combustion process depending on fuel composition fluctuations / E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malahov, V.M. Larionov, O.V. Iovleva // Journal of Physics: Conference Series. V. 789. 2017. № 012045.

10. Larionov V.M., Saifullin E.R., Nazarychev S.A., Malakhov A.O., Vankov Yu.V. Algorithm for optimizing the process of burning associated petroleum gas in thermal power plants, taking into account the variability of its composition // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problems of energy. 2017. № 19. P. 3–9.

11. Pat. 2647940 Ros. Federation: IPC F23C 1/02, F23C 1/08. The method of automatic optimization of the process of burning fuel of variable composition / V.M. Larionov, Yu.V. Vankov, E.R. Saifullin, S.A. Nazarychev, A.O. Malakhov; Applicant and patent holder: FGAOU VO KFU, RU. - No. 2017116036/06; claimed. 04/05/2017; publ. 03/21/2018; bul. №9. 6 p.

12. Thermal calculation of boiler units (normative method). Izd-e 3rd, revised. and additional. St. Petersburg: NGO CKTI, 1998. 256 p.

Authors of the publication

Emil R. Saifullin – Kazan Federal University, Kazan, Russia

Viktor M. Larionov – Kazan Federal University, Kazan, Russia

Yuriy V. Vankov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Поступила в редакцию

16 января 2019 г.