

Rogalev Andrei Nikolayevich,  
National Research University «Moscow State Power Engineering University»,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Innovative Technologies of  
Science-Intensive Industries,  
e-mail: r-andrey2007@yandex.ru

*Григорьев Евгений Юрьевич,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин,  
e-mail: rvs@tren.ispu.ru  
Grigoryev Evgeny Yuryevich,  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Steam and Gas Turbines,  
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

*Киндра Владимир Олегович,*  
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»  
аспирант, инженер Управления инновационной деятельности,  
e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru  
Kindra Vladimir Olegovich,  
National Research University «Moscow State Power Engineering Institute»,  
Post-Graduate Student, Engineer of the Division of Innovative Activity,  
e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru

*Осипов Сергей Константинович,*  
ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»,  
аспирант, инженер Управления инновационной деятельности,  
e-mail: osipovsk@mail.ru  
Osipov Sergei Konstantinovich,  
National Research University «Moscow State Power Engineering Institute»,  
Post-Graduate Student, Engineer of the Division of Innovative Activity,  
e-mail: osipovsk@mail.ru

*Павлычев Сергей Александрович,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
студент,  
e-mail: rvs@tren.ispu.ru  
Pavlychev Sergei Aleksandrovich,  
Ivanovo State Power Engineering University,  
student,  
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

УДК 662.61

## **Исследование увеличения КПД котла, сжигающего пылеугольное топливо, при повышении степени газоплотности топки**

А.Б. Бирюков, В.А. Семергей, И.И. Шевелева  
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина  
E-mail: innashevelewa@yandex.ru

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса:** В энергетике продолжает использоваться значительное количество энергетических котлов, сжигающих пылеугольное топливо, и задача повышения их КПД сохраняет актуальность. Научно обосновано, что использование газоплотных топок позволяет повысить КПД котлов на 1–2 % за счет сокращения потерь теплоты с уходящими газами. В настоящее время нет однозначного ответа на вопрос о влиянии степени газоплотности топки на механический недожог. В связи с этим актуальным является исследование возможности повышения КПД котлов за счет снижения механического недожога при повышении степени газоплотности топок.

**Материалы и методы:** Характерные температуры процесса горения определены при помощи нормативного метода расчета парогенераторов. Механический недожог определен при помощи математической модели, в которой реальный полифракционный состав топлива представлен шестью выделенными для рассмотрения фракциями. Достоверность результатов, полученных при помощи модели, доказана путем сопоставительного анализа ее результатов с практическими данными.

**Результаты:** Проведены численные эксперименты, в которых доля присосов воздуха менялась от 0 до 0,15. Установлены новые научные данные о закономерностях изменения теплотехнических характеристик процесса горения в зависимости от степени газоплотности топки: снижение присосов воздуха в топку от 0,15 до 0,05 в пределе приводит к увеличению средней температура факела на 11 °С и константы скорости реакции горения на 7 %, при этом механический недожог снижается с 3 до 2,8 %, а ожидаемое повышение КПД котла составляет 0,2 %.

**Выводы:** Полученные результаты по снижению механического недожога и повышению КПД котла на 0,2 % являются ощутимыми и дополняют основной положительный эффект от данного мероприятия. Результаты важны для построения более сложных моделей сжигания пылеугольного топлива. Их целесообразно использовать для дополнения нормативных методов расчета тепловой работы парогенераторов и оценки технико-экономической целесообразности использования газоплотных топков.

**Ключевые слова:** энергетический котел, газоплотная топка, пылеугольное топливо, полифракционный факел, присосы воздуха, механический недожог.

## A study of the efficiency of pulverized coal-fired boilers at a furnace gas-tightness increase

A.B. Biryukov, V.A. Semergey, I.I. Shevelyova  
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine  
E-mail: innashevelewa@yandex.ru

### Abstract

**Background:** Utility companies are still using a considerable number of pulverized coal-fired boilers. That is why the problem of their efficiency increase remains relevant. It has been scientifically grounded that gas-tight furnaces increase the efficiency of such boilers by 1–2 % by reducing heat loss with exhaust gases. Currently, there is no unambiguous answer to the question of how the degree of furnace gas-tightness affects unburned carbon amount. This work aims to investigate methods of boiler efficiency increase by reducing the unburned carbon amount at furnace gas-tightness growth.

**Materials and methods:** Characteristic combustion temperatures were obtained by the normative method of steam-generator calculation. The unburned carbon amount was determined by a mathematical model in which the real polyfractional fuel composition was represented by six fractions. The reliability of the results obtained by using this model was proved by comparing its results with the experimental data.

**Results:** Numerical experiments have been conducted in which the air suction fraction varied from 0 to 0,15. New scientific data have been obtained on heat engineering regularities of combustion depending on furnace gas-tightness: an air suction decrease from 0,15 to 0,05 results in the average 11 °С increase in the flame temperature and 7 % growth in the combustion reaction rate constant, with the unburned carbon amount decrease from 3 to 2,8 %, and expected boiler efficiency boost of 0,2 %.

**Conclusions:** The obtained results of reducing unburned carbon amount and increasing boiler efficiency by 0,2 % are tangible and complement the main positive effect of this measure. The results are important for developing more complex models of pulverized coal burning. It is reasonable to use them as a supplement for the normative methods of steam-generator calculation and for technical and economic feasibility analysis of gas-tight furnace use.

**Key words:** power plant boiler, gas-tight furnace, pulverized coal fuel, polyfractional flame, air suction, unburned carbon.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2018.3.014-019

**Введение.** В современной энергетике производство электроэнергии на тепловых электростанциях продолжает играть важнейшую роль. Перспективным направлением развития современной теплоэнергетики является использование парогазовых станций [1]. Для производства водяного пара в качестве источника энергии в этом случае применяется газобразное топливо. В виду высокой стоимости природного газа, в ряде случаев прибегают к производству генераторного газа путем газификации твердых топлив [2]. Однако доля электроэнергии, производимой на тепловых электростанциях, реализующих факельное сжигание пылеугольного топлива, остается существенной. Несмотря на то, что такая технология успешно используется много десятилетий, продолжается поиск научно-технических решений, позволяющих повысить коэффициент полезного

действия (КПД) котлов и, соответственно, сократить расход топлива [3]. Одним из направлений решения задач такого рода является применение газоплотных топков. На практике установлено, что в этом случае удается добиться повышения КПД котла на 1–2 % в первую очередь за счет уменьшения потерь теплоты с продуктами сгорания [4]. Также имеется мнение, что использование газоплотных топков позволит уменьшить величину механического недожога. Поскольку переход на газоплотные топки является достаточно затратным мероприятием, необходимо детальное исследование всех аспектов их использования.

Целью данной работы является определение механического недожога при факельном сжигании пылеугольного топлива в топках энергетических котлов в зависимости от степени газоплотности топки.

**Методы исследования.** На стадии предварительного качественного анализа данного вопроса логично ожидать, что при исключении (уменьшении) присосов холодного воздуха в топку будет иметь место повышение калориметрической и действительных температур в топочном пространстве, что благоприятно для улучшения выгорания топлива, поскольку возрастают значения констант скорости реакций горения. Но с другой стороны, можно предположить понижение концентрации кислорода в газовой смеси на стадии догорания частиц топлива перед выходом из топки, что ухудшает условия, при которых происходит выгорание.

Однако в настоящее время в подавляющем большинстве случаев управление работой дутьевых вентиляторов (ДВ) ведется не по принципу вычисления необходимого расхода воздуха в зависимости от массового расхода топлива для обеспечения заданного значения  $\alpha_T$ , а по принципу обеспечения заданной концентрации остаточного кислорода в продуктах сгорания за котлом. Таким образом, некоторая часть воздуха поступает в топку путем присоса и через систему пылеприготовления, а основная часть воздуха подается ДВ. То есть количество воздуха, поступившего в топку, остается одним и тем же, но меняется соотношение горячего вентиляторного воздуха и холодного присосанного воздуха. В пределе при использовании идеально газоплотной топки весь воздух на горение поступает только от ДВ и системы пылеприготовления.

Заданные значения концентрации остаточного кислорода в продуктах сгорания за топкой, как правило, устанавливаются на уровне 3,5–6 % в зависимости от тепловой нагрузки котла, при этом большим значениям тепловой нагрузки соответствуют меньшие значения концентрации кислорода.

Коэффициент расхода воздуха, обеспечивающий заданную концентрацию кислорода в продуктах сгорания, можно рассматривать как полный коэффициент расхода воздуха, который складывается из коэффициента расхода воздуха, формируемого вентилятором  $\alpha_B$ , притока воздуха через систему пылеприготовления  $\Delta\alpha_{пп}$  и присоса воздуха в топку  $\Delta\alpha_T$ .

Особый интерес для анализа представляют значения суммы холодных притоков  $\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пп}$  от 0,05 до 0,15. В случае идеально газоплотной топки ( $\Delta\alpha_T = 0$ ) эта сумма равна приходу воздуха через систему пылеприготовления ( $\Delta\alpha_{пп} = 0,05$ ), а при использовании обычно не газоплотной топки ( $\Delta\alpha_T = 0,1$ ) получаем значение 0,15. Для более широкого анализа нижний диапазон  $\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пп}$  примем на уровне нуля.

Исследование проведено для следующего набора исходных данных: котлоагрегат, для условий которого производятся расчеты и моделирование, – ТП-100; состав угля, %, –

$C^r = 90$ ;  $H^r = 4$ ;  $N^r = 0,94$ ;  $O^r = 4$ ;  $S^r = 1,06$ ;  $A^c = 19$ ;  $W^p = 0,7$ .

Фракционный состав топлива приведен в таблице.

При помощи стандартных зависимостей, используемых в теории горения топлива, установлено, что для обеспечения 3,5 % остаточного кислорода в уходящих продуктах сгорания с учетом ожидаемого недожога около 3 % для выбранного состава топлива необходимо значение коэффициента расхода воздуха  $\alpha_T$  составляет 1,19.

#### Фракционный состав топлива для моделирования процесса выгорания топлива в топке энергетического котла

№ п/п	Класс крупности, мм	Массовая доля, %
1	0,16–0,125	2,1
2	0,125–0,104	4
3	0,104–0,083	4
4	0,083–0,063	3,9
5	0,063–0,040	10,4
6	0,040–0	75,6
Итого		100,0

Время выгорания коксового остатка по опыту работы [5] установлено на уровне 3 с.

Исследование проведено по следующей схеме:

1. Величина  $\alpha_T$  зафиксирована на уровне 1,19. Для проведения численных экспериментов сумма дополнительных поступлений воздуха  $\Delta\alpha_{пп} + \Delta\alpha_T$  меняется от 0 до 0,15 с шагом 0,01. При этом коэффициент расхода воздуха, формируемый при помощи ДВ, определяется как  $\alpha_T - (\Delta\alpha_{пп} + \Delta\alpha_T)$ .

2. Для каждого случая определяется адиабатическая температура горения  $T_a$  при помощи стандартных выражений в зависимости от полезного тепловыделения [6].

3. Для каждого случая определяется температура продуктов сгорания на выходе из топки  $\theta_T''$  при помощи набора зависимостей, предложенных в Нормативном методе расчета парогенераторов для расчета теплообмена в топках [6]:

$$\theta_T'' = \frac{T_a}{M \left( \frac{5,67 \cdot \psi_{cp} F_{ст} a_T T_a^3}{10^{11} \varphi B_p V c_p} \right) + 1},$$

где  $M$  – коэффициент, учитывающий характер распределения температуры в топочном пространстве;  $\psi_{cp}$  – среднее значение коэффициента тепловой эффективности лучевоспринимающих поверхностей;  $F_{ст}$  – полная площадь стен топки,  $m^2$ ;  $a_T$  – степень черноты топки;  $\varphi$  – коэффициент сохранения тепловой энергии;  $B_p$  – расход топлива,  $kg/c$ ;  $V$  – выход продуктов сгорания с единицы топлива,  $m^3/kg$ ;  $c_p$  – объемная теплоемкость продуктов сгорания,  $Dж/(m^3 \cdot K)$ .

4. Далее при помощи последовательности действий, предложенной в [7] и основывающейся на использовании специальных номограмм, определяется средняя температура факела в зависимости от безразмерной температуры уходящих газов.

5. Определяются значения константы скорости реакции окисления углерода до углекислоты [7]:

$$k = 4,5 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-\frac{140,3 \cdot 10^3}{8,31 \cdot T_\phi}\right).$$

6. При помощи математической модели расчета выгорания полифракционного факела определяется механический недожог [5, 8]. Модель базируется на рассмотрении системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих изменение размера частиц каждой из выделенных для рассмотрения фракций. Используется следующий шаблон записи этого уравнения:

$$\frac{d\delta_i}{d\tau} = -\frac{P}{RT} \frac{2M_c}{\rho_k} \frac{V_k^0}{V_r} \frac{k_r}{1 + \left(\frac{1}{Nu_D}\right) \frac{k_r \delta_i}{D}} \left[ (\alpha - 1) \frac{V^0}{V_k^0} + G \right],$$

где  $P$  – давление в топочной камере, Па;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – текущее значение температуры поверхности частицы, К;  $\rho_k$  – расчетная плотность частиц топлива, кг/м<sup>3</sup>;  $M_c$  – молярная масса углерода, кг/кмоль;  $V^0$  – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг угля, м<sup>3</sup>/кг;  $V_r$  – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 кг угля, м<sup>3</sup>/кг;  $V_k^0$  – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м<sup>3</sup>/кг);  $k_r$  – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности частицы топлива, м/с;  $Nu_D$  – диффузионное число Нуссельта;  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м<sup>2</sup>/с;  $G$  – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка, кг.

**Результаты исследования.** Зависимость адиабатной температуры горения и температуры продуктов сгорания на выходе из топки от коэффициента присоса воздуха в топку представлены на рис. 1.

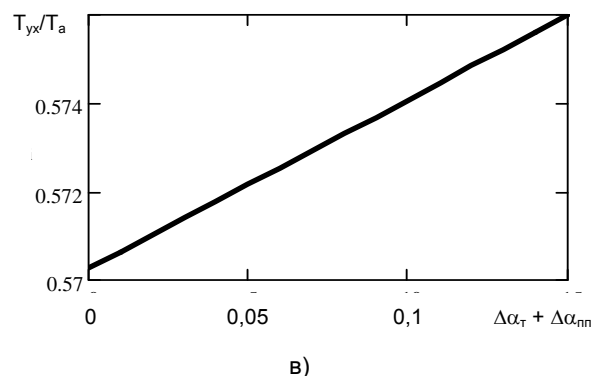
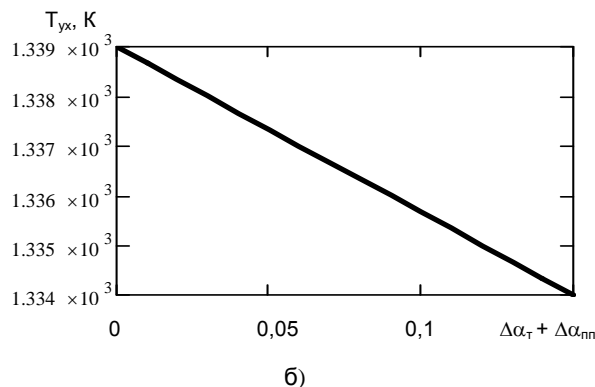
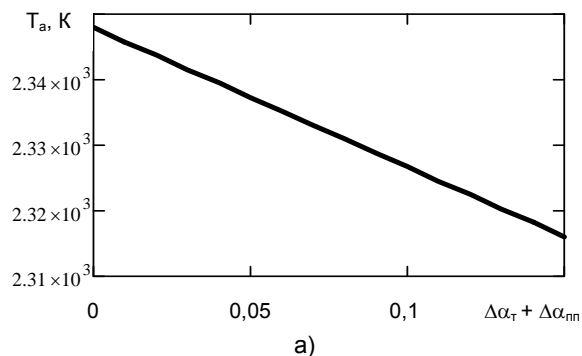


Рис. 1. Зависимость характерных температур, характеризующих процесс горения ПУТ в топке, от уровня присоса воздуха в топку: а – адиабатическая температура горения; б – температура продуктов сгорания на выходе из топки; в – безразмерная температура уходящих газов

Зависимость средней температуры факела от коэффициента присоса воздуха в топку представлены на рис. 2.

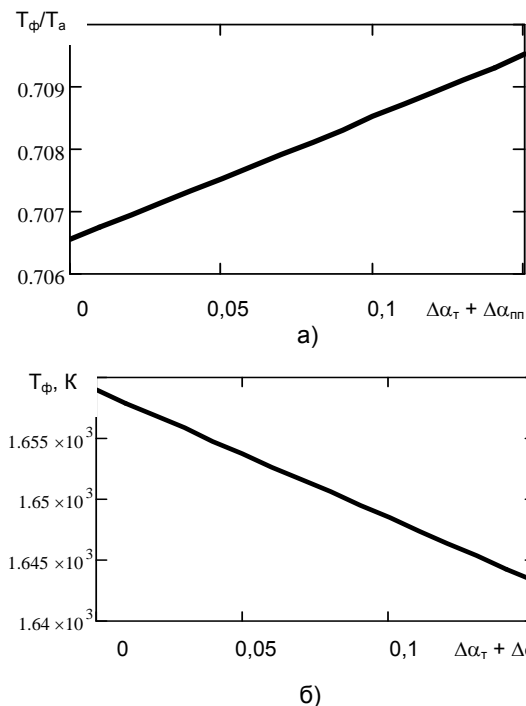


Рис. 2. Зависимость средней (действующей) температуры факела от уровня присоса воздуха в топку: а – безразмерная средняя температура факела; б – абсолютное значение действующей температуры факела

Зависимость константы скорости реакции выгорания углерода от коэффициента присоса воздуха в топку (поскольку последний определяет среднюю температуру факела) представлена на рис. 3.

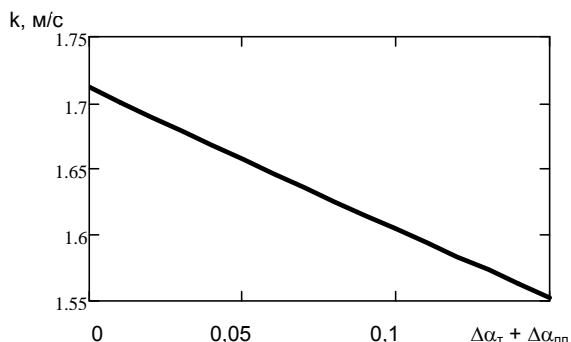


Рис. 3. Зависимость константы скорости реакции окисления углерода от уровня присоса воздуха в топку

Определенная при помощи расчетной программы зависимость механического недожога от коэффициента присоса воздуха в топку представлена на рис. 4.

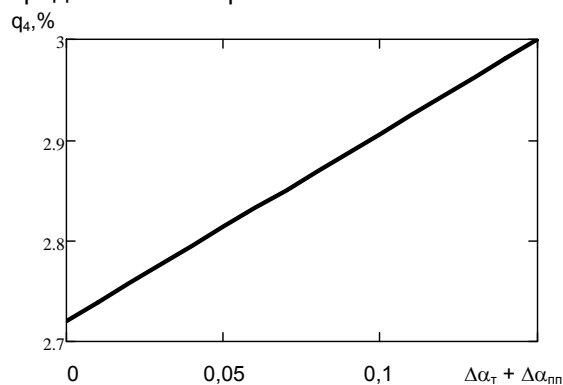


Рис. 4. Зависимость величины механического недожога от уровня присоса воздуха в топку

Анализ результатов расчета (рис. 1–4) показывает, что между характерными значениями  $\Delta\alpha_t + \Delta\alpha_{пп}$ , составляющими 0,05 и 0,15, адиабатная температура горения линейно меняется от 2337 до 2317 К, а температура уходящих газов незначительно меняется в диапазоне 1337–1334 К. При таком отличии темпов спада характерных температур в топке логичным является результат, согласно которому относительная температура уходящих газов при понижении степени газоплотности увеличивается с 0,572 до 0,576, что соответствует крайне незначительному увеличению безразмерной температуры факела в пределах 0,707–0,709; зато абсолютное значение средней температуры факела понижается от 1654 до 1643 К, что приводит к снижению значения константы скорости реакции с 1,66 до 1,55 м/с. Механический недожог при таком понижении газоплотности увеличивается с 2,8 до 3,0 %.

Таким образом, переход от обычной топки к газоплотному исполнению позволяет со-

кратить механический недожог топлива и, соответственно, повысить КПД котла на 0,2 %. Этот результат объясняется увеличением средней температуры факела при сохранении концентрации кислорода в топке.

**Выводы.** В результате проведенных исследований установлены важные закономерности о влиянии степени газоплотности топки на КПД котла, сжигающего пылеугольное топливо. При управлении работой ДВ по принципу обеспечения заданной концентрации кислорода на выходе из топки снижение присосов приведет к увеличению доли горячего вентиляторного воздуха, что в пределе приводит к увеличению адиабатной температуры горения на величину около 20 °С и незначительному повышению температуры уходящих газов около 3 °С. При этом средняя температура факела увеличивается на 11 °С. Таким образом, это позволяет увеличить значение константы скорости реакции на 7% и получить снижение механического недожога с 2,8 до 3,0 %, что приводит к повышению КПД котла на 0,2 %. Этот результат является вполне ощутимым и дополняет основной положительный эффект, получаемый от перехода на газоплотные топки, связанный со снижением потерь теплоты с уходящими газами.

#### Список литературы

1. Усмонов Н.О., Умарджанова Ф.Ш. Особенности использования парогазовых установок на ТЭС // Молодой ученый. – 2016. – № 11. – С. 518–522.
2. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Анализ технологий газификации твердого топлива // Вестник Чувашского университета. – 2010. – № 3. – С. 194–205.
3. Козлов А.Н., Свищев Д.А., Донской И.Г. Исследование реакционной способности твердых топлив в зависимости от состава и их свойств // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: сб. материалов IX Всерос. конф. с международным участием, 16–18 ноября, 2015. – Новосибирск, 2015.
4. Development of energy efficient technologies for burning coal in modern thermal power plants and efficiency assessment tools / V. Dubrovskiy, M. Zubova, N. Sedelnikov, A. Dihnova // EPJ Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies. – 2015. – P. 1–3.
5. Бирюков А.Б., Семергей В.А. Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла // Вестник ДонНТУ. – 2017. – №1 (7). – С. 32–37.
6. Частухин В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов. – Киев: Вища школа, 1980. – 182 с.
7. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
8. Numerical research of reburning-process of burning of coal-dust torch / A. Trinchenko, A. Paramonov, M. Kadyrov, A. Koryabkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences. – 2017. – Vol. 90. – P. 1–9.

## References

1. Usmonov, N.O., Umardzhanova, F.Sh. Oso-bennosti ispol'zovaniya parogazovykh ustanovok na TES [The use of combined cycle gas turbines at thermal power plants]. *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 11, pp. 518–522.
2. Afanasyev, V.V., Kovalev, V.G., Tarasov, V.A. Analiz tekhnologiy gazifikatsii tverdogo topliva [Analysis of solid fuel gasification technologies]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2010, no. 3, pp. 194–205.
3. Kozlov, A.N., Svishchev, D.A., Donskoi, I.G. Issledovanie reaktsionnoy sposobnosti tverdykh topliv v zavisimosti ot sostava i ikh svoystv [Study of reaction capacity of solid fuels depending on their composition and properties]. *Sbornik materialov IX Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: «Gorenie topliva: teoriya, eksperiment, prilozheniya»* [Proceedings of the IX All-Russian Conference with International Participation: «Fuel Burning: Theory, Experiment, Applications»]. Novosibirsk, 2015.
4. Dubrovsky, V., Zubova, M., Sedelnikov, N., Dihnova, A. Development of energy efficient technologies for burning coal in modern thermal power plants and efficiency assessment tools. *EPJ Web of Conferences. Thermophysical Basis of Energy Technologies*, 2015, pp. 1–3.
5. Biryukov, A.B., Semergey, V.A. Matematicheskaya model' vygoraniya pyleugol'nogo topliva v topke energeticheskogo kotla [Mathematical Model of Pulverized Fuel Burning in Power Plant Boiler Furnaces]. *Vestnik DonNTU*, 2017, no. 1(7), pp. 32–37.
6. Chastukhin, V.I. *Teplovoyy raschet promyshlennyykh parogeneratorov* [Heat Calculation of Industrial Steam Generators]. Kiev: Vishcha shkola, 1980. 182 p.
7. Vilensky, T.V., Khzmalyan, D.M. *Dinamika goreniya pylevidnogo topliva* [Dynamics of Pulverized Fuel Burning]. Moscow: Energiya, 1978. 248 p.
8. Trinchenko, A., Paramonov, A., Kadyrov, M., Koryabkin, A. Numerical research of reburning-process of burning of coal-dust torch. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences*, 2017, vol. 90, pp. 1–9.

*Бирюков Алексей Борисович,*

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технической теплофизики,  
адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а,  
e-mail: birukov.tff@gmail.com

*Biryukov Aleksei Borisovich,*

Donetsk National Technical University,  
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor,  
Head of the Engineering Thermophysics Department,  
address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a,  
e-mail: birukov.tff@gmail.com

*Семергей Владимир Александрович,*

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
соискатель

e-mail: semergey79@mail.ru

*Semerger Vladimir Aleksandrovich,*

Donetsk National Technical University,  
External Postgrade Student,  
e-mail: semergey79@mail.ru

*Шевелева Инна Игоревна,*

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
магистрант физико-металлургического факультета,  
e-mail: innashevelewa@yandex.ru

*Shevelyova Inna Igorevna*

Donetsk National Technical University,  
Master Degree Student of the Physics and Metallurgy Faculty,  
e-mail: innashevelewa@yandex.ru