

УДК 662.61

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-29-34

Исследование степени выгорания пылеугольного топлива при обеспечении предварительного контакта с горячим воздухом

А.Б. Бирюков, В.А. Семергей

Механический недожог при сжигании пылеугольного топлива (ПУТ) в топках энергетических котлов связан с тем, что крупные частицы не успевают полностью сгореть за время пребывания в топочном пространстве. Обычно на угольных тепловых электростанциях пылепроводы высокой концентрации (ППВК) непосредственно подводят к основным горелкам и врезают в вертикальные воздухопроводы горячего воздуха. Данная схема подключения имеет ряд недостатков: пульсацию давления пылевоздушной смеси в пылепроводах, невозможность обеспечения раннего воспламенения из-за недостаточного прогрева пыли перед горелкой. Для решения этой проблемы (обеспечения более раннего контакта пыли с горячим первичным воздухом) в условиях Старобешевской ТЭС в 2010 г. была опробована схема подачи за счет врезки ППВК в канал первичного воздуха в районе бункера пыли. Это позволило полностью исключить подсветку пылеугольного факела газом при нагрузке 130 МВт и достичь снижения механического недожога на величину порядка 1%.

Исследованы трансформации ПУТ в процессе контакта с горячим воздухом до входа в горелочное устройство. Выполнен отбор проб топлива непосредственно под бункером пыли и перед горелками, находящимися на разном расстоянии от бункера. Установлено, что за время контакта с горячим воздухом от 0,5 до 0,9 с общее влагосодержание уменьшилось на 4...48%, а летучих на 6...25%. При помощи простейших расчетных оценок показано, что выделение такого количества летучих и их сгорание непосредственно после входа в топку дает тепловыделение, достаточное для прогрева топлива и первичного воздуха на несколько сотен градусов. Найденная закономерность объясняет физическую природу результатов по снижению механического недожога, достигнутых после переврезки пылепроводов и обеспечения более раннего контакта ПУТ с горячим воздухом.

Ключевые слова: механический недожог, пылеугольное топливо, пылепровод высокой концентрации, время задержки воспламенения, бункер пыли.

Для цитирования: Бирюков А.Б., Семергей В.А. Исследование степени выгорания пылеугольного топлива при обеспечении предварительного контакта с горячим воздухом // Вестник МЭИ. 2019. № 1. С. 29—34. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-29-34.

Studying the Pulverized Coal Fuel Burnout Degree in Ensuring Its Preliminary Contact with Hot Air

A.B. Biryukov, V.A. Semergey

A situation in which unburned carbon remains after combustion of pulverized coal in the furnaces of power-generating boilers is due to the fact that large particles do not have enough time to burn out completely during their dwelling in the furnace space. Typically, the high-density coal-air mixture conduits (HDCC) used at coal-fired thermal power plants are directly connected to the main burners and cut in the vertical hot air ducts. This connection arrangement has a number of drawbacks; in particular, pulsations of pulverized coal-air mixture pressure arise in the pulverized coal conduits, and it is impossible to secure early ignition of pulverized coal due to its being insufficiently heated upstream of the burner. For solving this problem (i.e., making sure that pulverized coal more promptly comes in contact with hot primary air) under the conditions of the Starobeshevo thermal power plant, a new pulverized coal feeding arrangement was tried out in 2010, according to which the HDCC is cut into the primary air channel near the pulverized coal bunker. With this arrangement put in use, it became possible to completely avoid the need to support the pulverized coal flame with gas at a load of 130 MW and to decrease the amount of unburned carbon by about 1%.

The pulverized coal fuel transformations in the course of its being in contact with hot air upstream of the burner inlet were investigated. To this end, fuel samples were taken directly under the pulverized coal bunker and upstream of the burners located at different distances from the bunker. It has been determined that in the course of fuel being in contact with hot air for a period from 0.5 to 0.9 s, the total moisture content in it decreased

by 4..48%, and the content of volatiles decreased by 6..25%. Simplest numerical assessments have shown that the release of such amounts of volatiles and their combustion immediately after entering the furnace yield a heat release sufficient for heating the fuel and primary air by several hundred degrees. The revealed regularity explains the physical nature of the results in terms of decreasing the amount of unburned carbon that have been achieved after re-cutting the pulverized coal conduits and taking measures for pulverized coal to more promptly come in contact with hot air.

Key words: unburned carbon, pulverized coal fuel, high-density coal-air mixture conduit, ignition delay time, pulverized coal bunker.

For citation: Biryukov A.B., Semergey V.A. Studying the Pulverized Coal Fuel Burnout Degree in Ensuring Its Preliminary Contact with Hot Air. MPEI Vestnik. 2019;1:29—34. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-1-29-34.

Механический недожог при сжигании пылеугольного топлива (ПУТ) в топках энергетических котлов связан с тем, что крупные частицы не успевают полностью сгореть за время пребывания в топочном пространстве [1—3]. Известно, что частицы воспламеняются не моментально после попадания в топку, а по истечении некоторого времени. Таким образом, усилия по снижению механического недожога распределяются на два направления [2, 4—6]:

- управление параметрами измельчения и снижение доли крупных частиц;
- сокращение времени задержки воспламенения за счет совершенствования параметров горелок, либо благодаря предварительной тепловой обработке пыли [7—9].

На угольных тепловых электростанциях (ТЭС) пылепроводы высокой концентрации (ППВК) непосредственно подведены к основным горелкам и врезаны в вертикальные воздухопроводы горячего воздуха. Подобная схема подключения имеет следующие недостатки: пульсацию давления пылевоздушной смеси в пылепроводах, недостаточный прогрев угольной пыли перед поступлением в топку по условиям более раннего воспламенения, неравномерное распределение пыли по сечению канала первичного воздуха на выходе из горелки. Все это приводит к увеличению содержания горючих веществ в уносе, а также необходимости подсветки пылеугольного факела газом или мазутом.

Для решения данной проблемы в условиях Старобешевской ТЭС в 2010 г. для обеспечения более раннего контакта пыли с горячим первичным воздухом, чем по традиционной схеме, была опробована схема ее подачи за счет врезки ППВК в канал первичного воздуха в районе бункера пыли. После переврезки ППВК в трубопроводы первичного воздуха к горелкам котла, за счет бо-

лее раннего смешения пыли в трубопроводе первичного воздуха, были достигнуты следующие результаты:

- значительно уменьшилась пульсация давления пылевоздушной смеси в пылепроводах;
- повысилась равномерность распределения угольной пыли между горелками перед поступлением в топку котла;
- более равномерным стало распределение угольной пыли по сечению канала первичного воздуха на выходе из каждой горелки.

Реализация рассматриваемого мероприятия в процессе эксплуатации энергоблока позволила полностью исключить подсветку пылеугольного факела газом при нагрузке 130 МВт и достичь снижения механического недожога на величину порядка 1%.

Однако до сих пор не было проведено детальное количественное исследование физико-химических трансформаций, претерпеваемых ПУТ в процессе предварительного контакта с горячим первичным воздухом. Результаты этого исследования должны дать понимание основных причин и процессов, позволивших существенно сократить механический недожог, и ответить на вопрос, полностью ли исчерпаны возможности анализируемого мероприятия.

Целью настоящей работы является исследование трансформаций ПУТ в процессе контакта с горячим воздухом до входа в горелочное устройство и объяснение физической сущности результатов по снижению механического недожога.

Исследование проведено на котлоагрегате ТП-100 энергоблока № 6 Старобешевской ТЭС. Исследуемая схема подачи пыли (схема переврезки) к горелкам с аэрационными пылепитателями (АПП) и базовая проектная схема пылеподачи показаны на рис. 1.

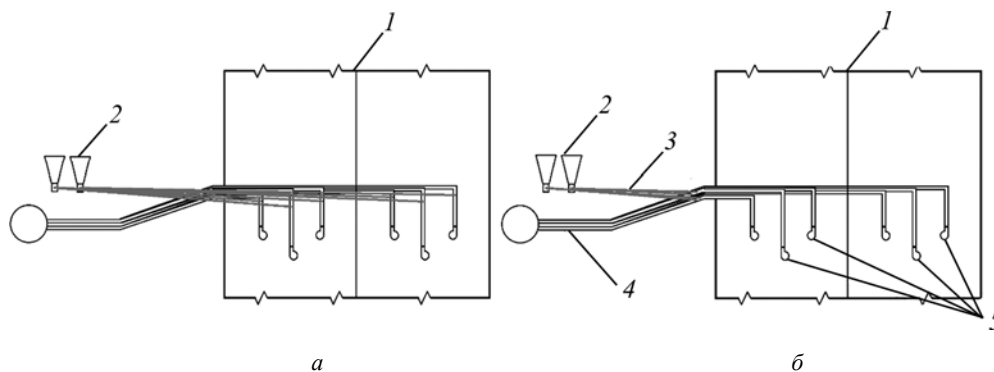


Рис. 1. Схемы трассировки аэрационного пылепитателя к воздухопроводам первичного воздуха до (а) и после (б) реконструкции:

1 — котел ТП-100; 2 — пылевой бункер; 3 — аэрационные пылепитатели; 4 — первичный воздуховод; 5 — горелки

Для детального анализа улучшения процесса горения в топке после изменения схемы переврезки ППВК проведены контрольные отборы проб угольной пыли в различных местах. Основной отбор пробы брался из-под бункера готовой пыли, где горячий воздух не взаимодействует с угольной пылью и не оказывает своего влияния. Четыре отбора угольной пыли взяты непосредственно перед горелками из воздухопровода первичного воздуха, в котором первоначально угольная пыль смешалась с горячим воздухом, подающимся на первичную улитку основной горелки котла. Для отборов пыли выбраны горелки, лежащие на различных расстояниях от места врезки: минимально и максимально удаленные горелки № 5 и 9 и горелки № 1 и 7, находящиеся на примерно одинаковом среднем расстоянии от места врезки.

Для отобранных проб определяли количество общей влаги и содержание летучих примесей.

Изучение общего содержания влаги в отобранных пробах проводили по стандартной схеме [10], предполагающей использование сушильного электрического шкафа с терморегулятором, обеспечивающим устойчивую температуру нагрева $(160 \pm 5)^\circ\text{C}$, с естественной вентиляцией воздуха. После окончания сушки в сушильном шкафу противень с пробой вынимали для свободной сушки при комнатной температуре, взвешивали каждый час до тех пор, пока результаты двух последних взвешиваний не становились отличными не более чем на 0,01% исходной массы пробы.

Массовую долю общей влаги вычисляли по формуле:

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100\%,$$

где m_1 — потеря массы при сушке навески топлива, г; m — масса навески пробы топлива, г; точность результатов — 0,01%.

Выход летучих веществ определяли по стандартной методике [11], как потерю массы навески твердого топлива за вычетом влаги при нагревании без доступа воздуха в стандартных условиях. Навеску пробы массой $(1 \pm 0,01)$ г нагревали без доступа воздуха при температуре 900°C в течение 7 мин. Выход летучих

веществ в процентах рассчитывали по потере массы навески за вычетом потери массы, обусловленной влажностью пробы:

$$V^{\text{л}} = \frac{100(m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W,$$

где m_1 — m_3 — массы пустого тигля с крышкой, тигля с крышкой и пробой до испытания и тигля с крышкой и нелетучим остатком после испытания, г; точность результатов — 0,01%.

В качестве топлива использовали антрацит с тепловой сгорания 23500 кДж/кг, зольностью 21%, влажностью после мельницы 0,9%, содержанием летучих (в бункере) 8,9%. При проведении эксперимента котел ТП-100 работал с номинальной тепловой нагрузкой и расход первичного воздуха на каждую горелку — 7878 м³/ч (н.ф.у.). Исходя из этого, скорость воздуха в соответствующих трубопроводах к горелкам (при их внутреннем диаметре 350 мм) — 22,75 м/с. Температура горячего первичного воздуха — 400°C , температура пыли в бункере — 80°C , температура аэропылевзвеси на входе в каждую выбранную для изучения горелку находилась в пределах $230 \dots 240^\circ\text{C}$. Согласно предварительным оценкам прогрев пыли и выход на конечную температуру завершается задолго до достижения первой по ходу 5-й горелки (0,528 с). Условно для горелок, время транспорта аэропылевзвеси до которых превышает 0,528 с, можно принять температуру процесса равной 240°C .

Время контакта пыли с горячим воздухом определено как отношение расстояния от врезки ППВК в воздухопровод до горелок.

Значения параметров, характеризующих каждую горелку, и результаты экспериментов по определению содержания летучих и влажности проб, представлены в табл. 1.

Из анализа результатов экспериментов можно заключить, что и удаление влаги, и выделение летучих имеют общую закономерность, а именно, чем больше время контакта исходного ПУТ из бункера пыли с горячим воздухом, тем в большем количестве выделяются как влаги, так и летучие.

Таблица 1

Параметры точек отбора проб и результаты определения характеристик отобранного пылеугольного топлива

Параметры точек отбора и характеристики ПУТ	Номера горелок			
	1	5	7	9
Расстояние от врезки ПВК до горелки, м	14,80	12,00	17,10	20,50
Время контакта пыли с горячим воздухом, с	0,651	0,528	0,752	0,901
Содержание летучих в пробе перед горелкой, %	7,300	8,400	7,200	6,700
Относительное количество выделившихся летучих, %	18,00	5,600	19,10	24,70
Содержание влаги в пробе перед горелкой, %	0,230	0,240	0,150	0,130
Относительное количество выделившейся влаги, %	8,000	4,000	40,00	48,00

В наиболее простом виде выход летучих веществ по однокомпонентной схеме расчета описывается следующим выражением [1]:

$$C = 1 - \exp(-k\tau), \quad (1)$$

где C — относительное количество выделившихся летучих веществ к моменту времени τ ; k — константа скорости процесса выделения летучих, с^{-1} , величина которой зависит от температуры процесса по следующему экспоненциальному выражению:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где k_0 — базовая константа скорости процесса выделения летучих веществ, с^{-1} ; E — энергия активации процесса выделения летучих веществ, Дж/моль; R — газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, при которой протекает процесс, К.

Для антрацитов и тощих углей в [1] для расчетов выхода летучих по однокомпонентной схеме рекомендованы следующие значения: $E = 60,7$ МДж/кмоль, $k_0 = 212 \text{ с}^{-1}$.

В случае меняющейся температуры возможно использование ее среднеинтегрального значения. Для четырех выбранных для изучения горелок из (1) определены константа скорости процесса выделения летучих и получены значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Значения констант скорости выделения летучих, установленные в результате обработки экспериментальных данных

Значение	Номера горелок			
	1	5	7	9
k	0,305	0,110	0,282	0,315

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что прогрев пыли протекает достаточно быстро и завершается до 0,528 с, поскольку только константа скорости процесса для 5-й горелки существенно отличается от остальных, что объясняется тем, что в этом случае среднеинтегральная температура процесса получается значительно ниже, чем для остальных.

При помощи метода наименьших квадратов для трех экспериментальных точек (горелок № 1, 7 и 9) вычислены значения константы скорости процесса возгонки летучих веществ для аппроксимирующего выражения типа (1). Полученное значение k составляет 0,302. На рис. 2 дано сопоставление аппроксимирующей кривой $C = 1 - \exp(-0,302\tau)$ и точек экспериментальных данных.

Коэффициент детерминации для предложенного выражения, полученного для горелок № 1, 7 и 9, составляет более 0,95.

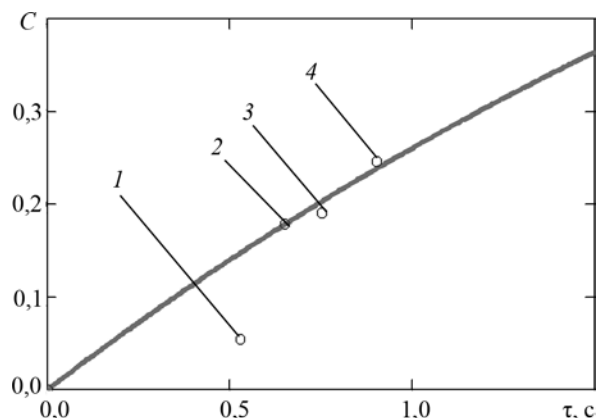


Рис. 2. Экспериментальные данные и аппроксимирующая кривая, описывающие изменение относительного выхода летучих из угля во времени при предварительном контакте с горячим воздухом для горелок № 5 (1), 1 (2), 7 (3) и 9 (4)

При построении аппроксимирующей кривой выполнено экстраполирование за рассмотренное в экспериментах предельное значение времени (0,9 с). Такой подход возможен, поскольку вид экстраполирующего участка кривой вполне согласуется с представлениями о выходе летучих веществ из твердого топлива [1]. Из анализа поведения кривой в промежутке времени 0,9...1,5 с можно сделать вывод, что дополнительным резервом дальнейшего снижения механического недожога является удлинение времени теплового контакта ПУТ с горячим воздухом, например, за счет удлинения ПВК, идущих на наиболее близкие к АПП горелки.

Для объяснения влияния более раннего контакта пыли с горячим первичным воздухом на снижение величины механического недожога предложена следующая схема. Известно, что летучие, выделившиеся при низких температурах, относятся в основном к метановой группе [1]. Они хорошо перемешиваются с первичным воздухом еще до поступления в топочное пространство. При догреве смеси от температуры поступления в топку на 200...300 °С происходит ее воспламенение и выделение теплоты. Для оценки влияния данного процесса на ход воспламенения частиц выполнена простая расчетная оценка: если считать что выделившиеся летучие представлены одним метаном, то выделения энергии от сжигания метана в количестве 1,75% от массы топлива (как для горелок № 1 и 7) достаточно для подъема температуры частицы и соответствующей ей массы первичного воздуха на 400...450 °С. Естественно, вычленение процесса сгорания летучих, выделившихся при транспорте пыли к горелке, и ее использование для догрева частиц из общей совокупности процессов носит достаточно условный характер. Так, при нагреве сред, поступающих в котел, продолжается выделение летучих. Однако выполненная расчетная оценка однозначно показала, что выделение 20...30% летучих в трубопроводе подачи горячего воздуха существенно ускоряет воспламенение частиц

угольной пыли и тем самым снижает потери с механическим недожогом.

При помощи математической модели процесса выгорания ПУТ, представленной в [2], показано, что для условий эксплуатации котла ТП-100 в номинальном режиме для снижения мехнедожога на 1% время выгорания частиц должно увеличиться примерно на 0,5 с. Этот результат достаточно логичен, поскольку, с одной стороны, полученное уменьшение времени задержки воспламенения $\Delta\tau_3$ должно быть сопоставимо со средним временем контакта ПУТ и горячего воздуха τ_k , а, с другой стороны, ввиду достаточно низкой температуры в ПВК, $\Delta\tau_3$ получается меньше, чем τ_k .

Таким образом, на практике доказано существенное снижение механического недожога при сжигании ПУТ в топках энергетических котлов при обеспечении предварительного теплового контакта горячего первичного воздуха и пыли из АПП.

Литература

1. **Померанцев В.В. и др.** Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Бирюков А.Б., Семергей В.А.** Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла // Вестник ДонНТУ. 2017. № 1. С. 32—37.
3. **Бирюков А.Б., Дробышевская И.П., Рубан Ю.Е.** Сжигание и термическая переработка органических топлив // Твердое топливо. Донецк: Изд-во Ноулидж, 2014.
4. **Trinchenko A., Paramonov A., Kadyrov M., Koryabkin A.** Numerical Research of Reburning-process of Burning of Coal-dust Torch // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2017. Vol. 90. Pp. 1—9.
5. **Dubrovskiy 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 Conf. Thermophys. Basis of Energy Techn. 2016. V. 110. Pp. 1—3.
6. **Ranade, V.V., Gupta D.F.** Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers. Boca Raton: CRC Press, 2014.
7. **Enkhjargal Kh., Salomatov V.V.** Mathematical Modeling of the Heat Treatment and Combustion of a Coal Particle. Volatile Escape Stage // J. Eng. Phys. and Thermophys. 2011. Vol. 84. Iss. 3. Pp. 638—647.
8. **Chernetskiy M.Yu. e. a.** Using Ignition of Coal Dust Produced by Different Types of Mechanical Treatment Under Conditions of Rapid Heating // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2016. V. 52. No. 3. Pp. 79—81.
9. **Burdukov A. e. a.** The Use of Mechanically Activated Micronized Coal in Thermal Power Engineering // Thermal Sci. 2016. V. 20. Suppl. 1. Pp. 23—33.
10. **ГОСТ Р 52917—2008.** Методы определения содержания влаги в аналитической пробе.
11. **ГОСТ Р 55660—2013.** Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ.

В результате определения общего содержания влаги и летучих в пробах установлено, что за время контакта с горячим воздухом от 0,5 до 0,9 с общее влагосодержание уменьшилось на 4...48%, а летучих на 6...25%.

Обосновано, что основной причиной снижения механического недожога является выделение летучих веществ из топлива до попадания ПУТ в топочное пространство котла, выделение энергии от сжигания которых в топке котла ускоряет выделение оставшейся части летучих веществ, прогрев частицы и ее воспламенение, т. е. приводит к уменьшению времени задержки воспламенения.

Дополнительным резервом дальнейшего снижения механического недожога является удлинение времени теплового контакта ПУТ с горячим воздухом, например, за счет удлинения ПВК, идущих на наиболее близкие к АПП горелки.

References

1. **Pomerantsev V.V. i dr.** Osnovy Prakticheskoy Teorii Goreniya. L.: Energoatomizdat, 1986. (in Russian).
2. **Biryukov A.B., Semergey V.A.** Matematicheskaya Model' Vygoraniya Pyleugol'nogo Topлива v Topke Energeticheskogo Kotla. Vestnik DonNTU. 2017;1: 32—37. (in Russian).
3. **Biryukov A.B., Drobyshevskaya I.P., Ruban Yu.E.** Szhiganiye i Termicheskaya Pererabotka Organicheskikh Topliv. Tverdoe Topливо. Donetsk: Izd-vo Noulidzh, 2014. (in Russian).
4. **Trinchenko A., Paramonov A., Kadyrov M., Koryabkin A.** Numerical Research of Reburning-process of Burning of Coal-dust Torch. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci. 2017;90:1—9.
5. **Dubrovskiy 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 Conf. Thermophys. Basis of Energy Techn. 2016;110:1—3.
6. **Ranade, V.V., Gupta D.F.** Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers. Boca Raton: CRC Press, 2014.
7. **Enkhjargal Kh., Salomatov V.V.** Mathematical Modeling of the Heat Treatment and Combustion of a Coal Particle. Volatile Escape Stage. J. Eng. Phys. and Thermophys. 2011;84;3:638—647.
8. **Chernetskiy M.Yu. e. a.** Using Ignition of Coal Dust Produced by Different Types of Mechanical Treatment Under Conditions of Rapid Heating. Combustion, Explosion and Shock Waves. 2016;52;3:79—81.
9. **Burdukov A. e. a.** The Use of Mechanically Activated Micronized Coal in Thermal Power Engineering. Thermal Sci. 2016;20;1:23—33.
10. **GOST R 52917—2008.** Metody Opredeleniya Soderzhaniya Vlazi V Analiticheskoy Probe. (in Russian).
11. **GOST R 55660—2013.** Topливо Tverdoe Mineral'noe. Opredelenie Vykhoda Letuchikh Veshchestv. (in Russian).

Сведения об авторах:

Бирюков Алексей Борисович — доктор технических наук, заведующий кафедрой технической теплофизики Донецкого национального технического университета, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Семергей Владимир Александрович — соискатель Донецкого национального технического университета, e-mail: semergey79@mail.ru

Information about authors:

Biryukov Aleksey B. — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Head of Engineering Thermophysics Dept., Donetsk National Technical University, e-mail: birukov.ttf@gmail.com

Semerгей Vladimir A. — Applicant of Donetsk National Technical University, e-mail: semergey79@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 18.01.2018

The article received to the editor: 18.01.2018