

УДК 66.02

В. Н. Павлечко, В. С. Францкевич

Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА НА ПРОЦЕСС СЖИГАНИЯ
ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА**

Приведены результаты расчета процесса горения природного газа с различными количествами добавляемого технического кислорода взамен атмосферного воздуха. Для снижения трудоемкости расчетов использована специально разработанная программа. Расчет выполнен для сжигания 1 м^3 природного газа и для $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ применительно к условиям одной из стекловаренных печей ОАО «Полоцк-Стекловолокно». Добавление каждые 5% кислорода от его количества, необходимого для горения газа, повышает температуру в печи на $41\text{--}58^\circ\text{C}$, снижает расход воздуха на $0,55 \text{ м}^3/\text{м}^3$ газа, природного газа на $1,18\text{--}1,39\%$, выбросов оксидов азота на 6%. Экономия 1 м^3 газа достигается при использовании 7 м^3 кислорода.

Ключевые слова: сжигание природного газа, добавление технического кислорода.

V. N. Pavlechko, V. S. Frantskevich

Belarusian State Technological University

**INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION ON THE PROCESS
OF COMBUSTION GAS FUEL**

The results of calculating the combustion process of natural gas with various amounts of added oxygen in place of atmospheric air are given. To reduce the complexity of calculations, a specially developed program was used. The calculation was carried out for the combustion of 1 m^3 of natural gas and for $150 \text{ m}^3/\text{h}$ in relation to the conditions of one of the glass furnaces OJSC Polotsk-Steklovolokno. The addition of every 5% of oxygen from its amount necessary for burning gas raises the temperature in the furnace by $41\text{--}58^\circ\text{C}$, reduces air consumption by $0.55 \text{ m}^3/\text{m}^3$ of gas, natural gas by $1.18\text{--}1.39\%$, emissions of nitrogen oxides on 6%. Saving 1 m^3 of gas is achieved when 7 m^3 oxygen is used.

Key words: burning of natural gas, addition of technical oxygen.

Введение. Используемый в промышленности в качестве окислителя воздух содержит большое количество азота, который в процессах горения не используется, а является бесполезным балластом, так как для его нагрева необходимо расходовать некоторое количество тепловой энергии, а для его транспортировки по трубопроводам требуется расходовать заметное количество электрической энергии. Балласт, выводимый в атмосферу с дымовыми газами, содержит существенное количество тепла и вызывает тепловое загрязнение окружающей среды. При высокой температуре топки азот частично окисляется с образованием оксидов, которые также загрязняют воздух. Частичное или полное замещение азота необходимым и достаточным количеством кислорода позволяет соответствующим образом уменьшить его расход и отмеченное выше его негативное влияние на процесс горения топлива. Кроме того, при использовании кислорода достигается более высокая температура в топке, появляется возможность использования низкокалорийного топлива и снижения его расхода [1, 2]. В то же время внедрение кислородного дутья сдерживается его высокой стоимо-

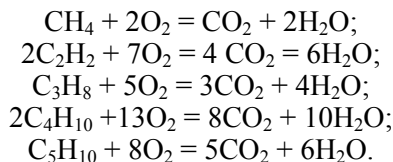
стью, необходимостью использования специальных горелок, перенастройки системы управления и автоматизации процесса горения, кроме того, отсутствием отечественного опыта.

Основная часть. По заданию крупнейшего в Республике Беларусь производителя продуктов разделения воздуха ОАО «Крион» проведена работа по определению возможности использования дополнительного количества кислорода в процессе горения газообразного топлива. Целью работы являлось определение влияния концентрации кислорода на процесс сжигания газообразного топлива. Расчет процесса горения необходимо было представить в виде специальной программы. Необходимость разработки программы была обусловлена большим объемом и трудоемкостью вычислительных операций. Программа разработана на основе электронных таблиц Excel. Апробация программы проводилась на примере расчета процесса горения природного газа в одной из стекловаренных печей ОАО «Полоцк-Стекловолокно».

В программе использована общепринятая методика расчета процесса горения топлива [3–5], на основании которой определены температура

и теплоемкость продуктов горения, их состав и количество.

Как известно, взаимодействие кислорода и компонентов природного газа при полном сгорании топлива осуществляется в соответствии с формулами:



Стехиометрический расход кислорода для окисления 1 кг метана

$$G_{\text{O}_2} = G_{\text{CH}_4} \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{CH}_4}} = 1 \frac{64}{16} = 4 \text{ кг/кг}, \quad (1)$$

где M_{O_2} , M_{CH_4} – молекулярная масса кислорода и метана соответственно, кг/кмоль.

Объемный расход кислорода для окисления 1 нм^3 метана

$$L_{\text{O}_2} = G_{\text{O}_2} \frac{\rho_{\text{CH}_4}}{\rho_{\text{O}_2}} = 4 \frac{0,7143}{1,4286} = 2 \text{ нм}^3/\text{нм}^3, \quad (2)$$

где ρ_{CH_4} , ρ_{O_2} – плотность соответственно метана и кислорода при нормальных условиях, кг/м³.

Объемный расход воздуха для окисления 1 нм^3 метана

$$L_{\text{возд}} = \frac{L_{\text{O}_2}}{x'_{\text{O}_2}} = \frac{2}{21} 100 = 9,524 \text{ нм}^3/\text{нм}^3, \quad (3)$$

где x'_{O_2} – объемное содержание кислорода в воздухе, % (об.).

С учетом горения других компонентов природного газа помимо метана стехиометрические удельные расходы кислорода и воздуха

будут несколько меньше (1,9677 $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ кислорода и 9,37 $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ воздуха).

В расчете принята средняя температура воздуха, подаваемого на горение, $t_{\text{в}} = 600^\circ\text{C}$ и кислорода $t_{\text{O}_2} = 600^\circ\text{C}$ с учетом того, что газовая смесь, состоящая из воздуха и добавляемого кислорода, проходит через рекуператор, в котором частично утилизируется тепло отходящих дымовых газов.

Первоначально расчет выполнен для 1 м^3 природного газа, состав и характеристика которого приведены в табл. 1, параметры воздуха, используемого для горения, – в табл. 2. Параметры кислорода, используемого для горения, приняты в соответствии с ГОСТ 6331–78 (табл. 3). Необходимые для расчета технологические параметры одной из стекловаренных печи ОАО «Полоцк-Стекловолокно» приведены в табл. 4.

Выход дымовых газов (диоксида углерода, водяного пара, азота и остаточного кислорода) принят пропорциональным расходу топлива. При высокой температуре печи азот атмосферного воздуха частично окисляется с образованием оксидов. Образование диоксидов зависит от множества факторов, которые при выполнении работы не учитывались, но логически следует, что с уменьшением азота, вводимого в топку, выход его оксидов должен снижаться.

Приход тепла в печь определен по формуле

$$Q_{\text{пр}} = V_{\text{г}} (Q_{\text{н}}^{\text{п}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{O}_2}), \quad (4)$$

где $V_{\text{г}}$ – расход природного газа, $\text{нм}^3/\text{с}$; $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания природного газа, кДж/кг; $Q_{\text{в}}$ – физическое тепло, вносимое в топку воздухом, кДж/кг; $Q_{\text{г}}$ – физическое тепло, вносимое в топку природным газом, кДж/кг; Q_{O_2} – физическое тепло, вносимое в топку добавляемым техническим кислородом, кДж/кг.

Таблица 1

Состав и характеристика природного газа

Наименование показателя	Размерность	Величина
Метан (CH ₄)	% (об.)	95,6
Этан (C ₂ H ₆)	% (об.)	0,7
Пропан (C ₃ H ₈)	% (об.)	0,4
Бутан (C ₄ H ₁₀)	% (об.)	0,2
Пентан (C ₅ H ₁₂)	% (об.)	0,2
Диоксид углерода (CO ₂)	% (об.)	0,1
Азот (N ₂)	% (об.)	2,8
Плотность природного газа, $\rho_{\text{г}}$	кг/нм ³	0,7312
Температура природного газа, $t_{\text{г}}$	°C	0
Удельная теплоемкость природного газа, $c_{\text{г}}$	кДж/(нм ³ ·град)	1,55
Теплота сгорания природного газа, $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$	кДж/нм ³	33 948

Таблица 2

Параметры воздуха для горения

Наименование показателя	Размерность	Величина
Плотность воздуха, ρ_v	кг/м ³	1,293
Удельная теплоемкость воздуха, c_v	кДж/(м ³ ·град)	1,350
Температура воздуха, t_v	°С	600
Влажосодержание воздуха, x	кг/кг	0,01
Коэффициент избытка воздуха, α	–	1,1455
Содержание кислорода в воздухе, x_{O_2}	% (об.)	21
Содержание азота в воздухе, x_{N_2}	% (об.)	79

Таблица 3

Параметры кислорода, используемого для горения

Наименование показателя	Размерность	Величина
Содержание кислорода, x'_{O_2}	% (об.)	99,7
Содержание диоксида углерода, x'_{CO_2}	% (об.)	0,2
Плотность чистого кислорода, ρ_{O_2}	кг/м ³	1,4286
Удельная теплоемкость кислорода, c_{O_2}	кДж/(м ³ ·град)	1,300
Температура кислорода, t_{O_2}	°С	600

Таблица 4

Некоторые технологические параметры стекловаренной печи

Наименование параметра	Размерность	Величина
Низшая теплота сгорания топлива, Q_n^p	кДж/м ³	33 948
Расход природного газа, V_r	м ³ /ч	150
Расход воздуха, L'_α	м ³ /ч	1650
Температура воздуха, t_v	°С	500–700
Температура газового пространства, t_n	°С	1550

При расчете реальной температуры топки значение пирометрического коэффициента принято равным 0,8. Удельные теплоемкости компонентов дымовых газов приняты из справочников при рабочей температуре топки.

В результате расчета установлено, что при добавлении кислорода снижается расход воздуха и, соответственно, расход азота. Суммарный приход кислорода не изменяется, так как добавочный кислород полностью компенсирует снижение прихода кислорода вследствие уменьшения количества воздуха, подаваемого на горение. Следовательно, при добавлении кислорода снижаются затраты тепла на нагрев балластного азота от температуры 600°С после рекуператора до температуры газового пространства печи (1550°С), уменьшается количество тепла, вносимого воздухом в печь, но повышается тепло, вносимое добавляемым кислородом, нагретым до температуры 600°С в рекуператоре. Расчет некоторых параметров печи

выполнен исходя из одинакового количества тепла, которое должно быть внесено в печь с учетом потерь тепла.

Результаты расчета разработанной программой процесса горения 1 м³ природного газа приведены в табл. 5, в одной из стекловаренных печей – в табл. 6.

Анализ результатов показал, что каждые 5% добавляемого кислорода (0,0989 м³/м³), используемого взамен воздуха для горения природного газа, позволяют повысить рабочую температуру процесса горения на 41–58°С (меньшие цифры соответствуют меньшим добавкам кислорода), а также снижают расход воздуха на 0,55 м³/м³ газа. Количество тепла, вносимого в топку, определено без учета снижения потерь тепла на нагрев азота до температуры топки. Замещение воздуха на 20% кислородом приводит к снижению объемов дымовых газов на 18% и в первом приближении к пропорциональному уменьшению выбросов оксидов азота.

Таблица 5

Результаты расчета процесса сгорания 1 м³ природного газа

Наименование показателя	Размерность	Величина								
Расход технического кислорода, V_{O_2}	нм ³ /нм ³	0,0000	0,0989	0,1978	0,2966	0,3955	0,4944	0,5933	0,6922	1,9776
Удельный расход чистого кислорода от расхода воздуха, $\gamma = V_{O_2}' / L_{O_2}'_{теор}$	об. доли	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	1,00
Расход чистого кислорода, V_{O_2}	нм ³ /нм ³	0,0000	0,0984	0,1968	0,2952	0,3935	0,4919	0,5903	0,6887	1,9677
Снижение расхода влажного воздуха, $\Delta L_{возд}$	нм ³ /нм ³	0,0000	0,2436	0,4872	0,7309	0,9745	1,2181	1,4617	1,7053	4,8724
Теоретический расход сухого воздуха, L_0	нм ³ /нм ³	9,4510	8,9784	8,5059	8,0333	7,5608	7,0882	6,6157	6,1431	0,0000
Теоретический расход влажного воздуха, L_α	нм ³ /нм ³	9,6022	9,1221	8,6420	8,1619	7,6818	7,2016	6,7215	6,2414	0,0000
Действительный расход сухого воздуха, L_0'	нм ³ /нм ³	10,8261	10,2848	9,7435	9,2022	8,6609	8,1196	7,5783	7,0370	0,0000
Действительный расход влажного воздуха, L_α'	нм ³ /нм ³	10,9993	10,4493	9,8994	9,3494	8,7995	8,2495	7,6995	7,1496	0,0000
Расход избыточного количества сухого воздуха, $(\alpha - 1) L_0'$	нм ³ /нм ³	1,5752	1,4964	1,4177	1,3389	1,2602	1,1814	1,1026	1,0239	0,0000
Расход избыточного количества влажного воздуха, $(\alpha - 1) L_\alpha'$	нм ³ /нм ³	1,6004	1,5204	1,4404	1,3603	1,2803	1,2003	1,1203	1,0403	0,0000
Выход диоксида углерода, V_{CO_2}	нм ³ /нм ³	1,0010	1,0012	1,0014	1,0016	1,0018	1,0020	1,0022	1,0024	1,0049
Выход водяного пара, V_{H_2O}	нм ³ /нм ³	1,9727	1,9726	1,9726	1,9725	1,9724	1,9723	1,9722	1,9721	1,9710
Выход азота, V_{N_2}	нм ³ /нм ³	8,5806	8,1530	7,7254	7,2977	6,8701	6,4425	6,0148	5,5872	0,0280
Выход кислорода, V_{O_2}	нм ³ /нм ³	0,2888	0,2743	0,2599	0,2455	0,2310	0,2166	0,2021	0,1877	0,0000
Суммарный выход дымовых газов, $V_{дг}$	нм ³ /нм ³	11,8431	11,4012	10,9592	10,5172	10,0753	9,6333	9,1914	8,7494	3,0039
Влагосодержание дымовых газов, $x_{дг}$	кг/кг сух. газа	0,1208	0,1262	0,1320	0,1384	0,1454	0,1532	0,1619	0,1716	0,7838
Задаваемая удельная теплоемкость дымовых газов, $c_{дг}$	кДж/(нм ³ ·°C)	1,6123	1,6231	1,6348	1,6476	1,6614	1,6765	1,6931	1,7113	2,4283
Пирометрический коэффициент, η	–	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Приход тепла, Q_T	кДж/нм ³	34323	34032	33740	33449	33158	32866	32575	32283	28496
Рабочая температура печи, t_p	°C	1798	1839	1883	1930	1981	2035	2093	2156	3906
Удельная теплоемкость дымовых газов при t_p , $c_{дг}$	кДж/(нм ³ ·°C)	1,6123	1,6231	1,6348	1,6476	1,6614	1,6765	1,6931	1,7113	2,4283

Таблица 6

Результаты расчета некоторых параметров стекловаренной печи

Наименование показателя	Размерность	Величина								
Расход газа, V_T	нм ³ /ч	150,00	147,92	145,89	143,92	142,00	140,13	138,31	136,54	117,0
Расход добавляемого кислорода, V_{O_2}	об. доли	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	1,00
Расход добавляемого кислорода, V_{O_2}	нм ³ /ч	0,000	14,626	28,851	42,691	56,163	69,280	82,056	94,507	231,4
Расход воздуха, V_B	нм ³ /ч	1650	1546	1444	1346	1250	1156	1065	976	0
Температура газового пространства, $t_{гп}$	°C	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550	1550
Выход дымовых газов, $V_{дг}$	нм ³ /ч	1776	1686	1599	1514	1431	1350	1271	1195	352
Удельная теплоемкость дымовых газов при $t_{гп}$, $c_{дг}$	кДж/(нм ³ ·°C)	1,5827	1,5883	1,5944	1,6010	1,6082	1,6160	1,6246	1,6341	2,010
Приход тепла, $Q_{пр}$	кВт	1430,1	1398,3	1367,3	1337,2	1307,9	1279,3	1251,5	1224,4	926,3
Расход тепла на нагрев азота воздуха до температуры печи, Q_{N_2}	кВт	505,1	473,2	442,3	412,1	382,8	354,3	326,5	299,4	1,3
Экономия тепла на нагрев азота, ΔQ_{N_2}	кВт	0,0	31,8	62,8	92,9	122,3	150,8	178,6	205,7	503,8
Расход тепла на нагрев и плавление шихты, $Q_{ш}$	кВт	286	286	286	286	286	286	286	286	286
Расход тепла с дымовыми газами, $Q_{дг}$	кВт	1144	1112	1081	1051	1022	993	965	938	640
Снижение расхода газа, ΔV_T	нм ³ /ч	0,00	2,08	4,11	6,08	8,00	9,87	11,69	13,46	32,97
Снижение расхода газа, ΔV_T	%	0,00	1,39	2,74	4,05	5,33	6,58	7,79	8,97	21,98

Графическая иллюстрация зависимости температуры процесса горения от количества добавляемого кислорода приведена на рис. 1.

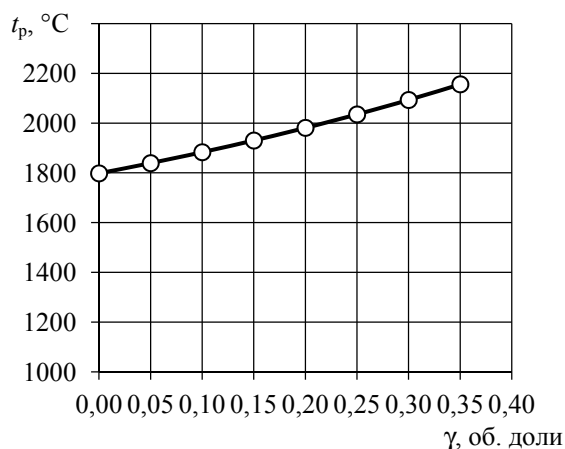


Рис. 1. Зависимость температуры процесса горения газа от расхода добавочного кислорода

Апробация программы при расчете процесса горения в одной из стекловаренных печей ОАО «Полоцк-Стекловолокно» (табл. 6) показала, что каждые 5% добавляемого кислорода ($12,45\text{--}14,62 \text{ нм}^3/\text{ч}$) снижают расход природного газа на $1,77\text{--}2,08 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (рис. 2) и расход воздуха на $88,7\text{--}104,3 \text{ нм}^3/\text{ч}$ (рис. 3) (большие величины соответствуют меньшим добавкам кислорода). Экономия тепла на нагреве азота составляет $63 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ на каждые 10% введенного кислорода. Выход дымовых газов снижается на $80\text{--}90 \text{ нм}^3/\text{ч}$ при добавлении каждых 5% кислорода.

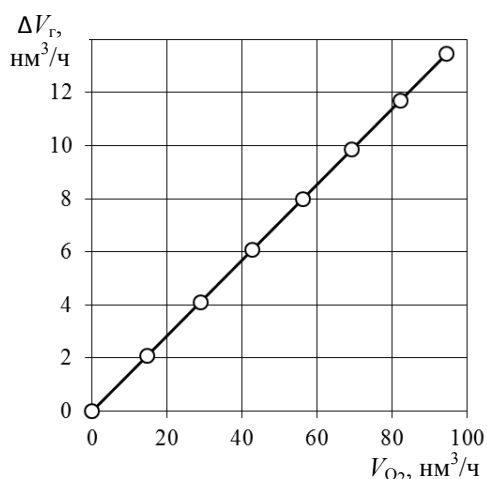


Рис. 2. Зависимость снижения расхода газа от расхода добавочного кислорода

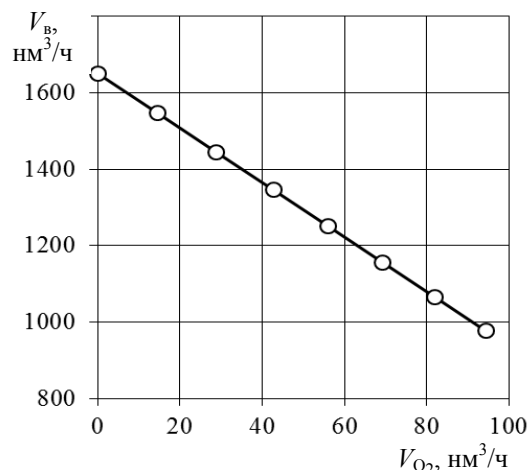


Рис. 3. Зависимость расхода воздуха от расхода добавочного кислорода

Разработанная программа проста в использовании и позволяет значительно снизить трудоемкость и продолжительность вычислений.

Заключение. Таким образом, разработанная программа при своей простоте использования позволяет определять основные параметры продуктов горения природного газа при различных долях введения технического кислорода и сравнивать полученные значения с горением только при использовании атмосферного воздуха.

Результаты апробации программы показали, что добавление каждых 5% кислорода ($0,0989 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$) в топку для горения природного газа позволяет снизить расход воздуха на $0,55 \text{ нм}^3/\text{нм}^3$ газа и повысить рабочую температуру процесса горения на $41\text{--}58^\circ\text{C}$.

Добавление каждых 5% кислорода в одну из стекловаренных печей ОАО «Полоцк-Стекловолокно» позволяет снизить расход воздуха в среднем на $100 \text{ нм}^3/\text{ч}$ и природного газа на $2 \text{ нм}^3/\text{ч}$. Причем добавление 7 нм^3 кислорода приводит к экономии всего 1 нм^3 природного газа, что на первый взгляд представляется экономически нецелесообразным.

Но с учетом снижения выбросов оксидов азота и взвешенных твердых частиц в атмосферу, а также уменьшения затрат на транспортировку дымовых газов и рекуперацию тепла данное техническое решение может оказаться оправданным.

Литература

1. Лешина В. А., Пулина И. А. Эффективные способы сжигания топлива в производстве стекла // Труды Владимирского государственного университета. 2014. Вып. 10. С. 97–99.
2. Передовые технологии сжигания топлива. URL: <http://www.techgaz.ru/page/232.html> (дата обращения: 01.01.2018).
3. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. М.: Альянс, 2007. 366 с.

4. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / под общ. ред. Г. М. Островского. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. Ч. II. 916 с.
5. Исламов М. Ш. Печи химической промышленности. Л.: Химия, 1975. 432 с.

References

1. Leshina V. A., Pulina I. A. Effective methods of burning fuel in the production of glass. *Trudy Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Vladimir State University], 2014, issue 10, pp. 97–99 (In Russian).
2. *Peredovyye tekhnologii szhiganiya topliva* [Advanced combustion technologies]. Available at: <http://www.techgaz.ru/page/232.html> (accessed 01.01.2018).
3. Levchenko P. V. *Raschety pechey i sushil silikatnoy promyshlennosti* [Calculations of furnaces and dried silicate industry]. Moscow, Al'yanS Publ., 2007. 366 p.
4. Ostrovskiy G. M. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy* [A new directory of chemist and technologist. Processes and apparatus of chemical technologies. Part II]. St. Petersburg, NPO "Professional" Publ., 2006. 916 p.
5. Islamov M. Sh. *Pechi khimicheskoy promyshlennosti* [The furnaces of the chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1975. 432 p.

Информация об авторах

Павлечко Владимир Никифорович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: pavlechko@tut.by

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

Information about the authors

Pavlechko Uladimir Nikiforovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavlechko@tut.by

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

Поступила 18.04.2018