

Теплотехника Heat engineering

Научная статья
УДК 662.9
DOI: 10.14529/power260110

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕННОЙ НАСАДКИ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК ПРИ ПОМОЩИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

А.Б. Бирюков, birukov.tff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8146-2017>
Н.С. Начкебия, nata@nachkebiya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3020-6064>
С.В. Деркачѐв, sergey_derkachev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5801-7081>
Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия

Аннотация. Разработка инженерной методики расчета регенеративных горелок является необходимым элементом развития научных основ повышения эффективности использования энергетических ресурсов. Известные методики не учитывают все особенности процессов, протекающих в теплообменных насадках таких горелок, что снижает точность определения их конструктивных и технологических параметров. В статье за основу взята одна из известных инженерных методик и при помощи специально созданного цифрового двойника проведено ее уточнение. В рамках известной методики для выполнения расчета необходимо математическое описание законов изменения во времени температур дыма и воздуха на выходе из насадки. Установлено, что ранее выдвинутая гипотеза об экспоненциальном законе изменения температуры дыма на выходе из насадки не всегда выполняется и для его описания следует использовать логарифмический закон. Для температуры воздуха доказана возможность использования предложенного в известной методике экспоненциального закона изменения температуры. Намечено направление дальнейших исследований, заключающееся в необходимости составления критериальных уравнений, устанавливающих зависимость безразмерных параметров законов изменения температуры дыма и воздуха на выходе из насадки в течение соответствующих фаз от критериев подобия, характеризующих процесс.

Ключевые слова: энергоэффективность, регенеративные горелки, теплообмен, тепловой баланс, совершенствование методов расчета, методы интенсивного энергосбережения, цифровой двойник

Для цитирования: Бирюков А.Б., Начкебия Н.С., Деркачѐв С.В. Совершенствование инженерной методики расчета теплообменной насадки регенеративных горелок при помощи цифрового двойника // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2026. Т. 26, № 1. С. 85–91. DOI: 10.14529/power260110

Original article
DOI: 10.14529/power260110

USING THE DIGITAL TWIN TO IMPROVE THE ENGINEERING METHODOLOGY FOR CALCULATING THE HEAT EXCHANGE NOZZLE OF REGENERATIVE BURNERS

A.B. Biryukov, birukov.tff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8146-2017>
N.S. Nachkebiya, nata@nachkebiya.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3020-6064>
S.V. Derkachev, sergey_derkachev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5801-7081>
Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia

Abstract. The development of an engineering methodology for calculating regenerative burners is an essential step in establishing the scientific foundations for improving the efficiency of energy resource utilization. Current techniques do not take into account all the features of the processes taking place in the heat exchange nozzles of such burners, leading to inaccuracies in determining their design and operational parameters. This article presents an improved version of a well-known engineering technique based on the use of a specially designed digital twin. The known methodology provides for a mathematical description of the laws of time variation in smoke and air temperatures at the nozzle outlet necessary for calculations. It was established that the previously assumption of an exponential law for the change

in smoke temperature at the nozzle outlet is not always accurate, and a logarithmic law should be used to describe it. The article demonstrated the usefulness of the exponential law of temperature change for air temperature proposed in the known methodology. Further research will focus on compiling criterion equations that establish the dependence of the dimensionless parameters in the laws of smoke and air temperature change at the nozzle outlet during the relevant phases on similarity criteria characterizing the process.

Keywords: energy efficiency, regenerative burner, heat exchange, heat balance, improved calculation methods, intensive energy saving methods, digital twin

For citation: Biryukov A.B., Nachkebiya N.S., Derkachev S.V. Using the digital twin to improve the engineering methodology for calculating the heat exchange nozzle of regenerative burners. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2026;26(1):85–91. (In Russ.) DOI: 10.14529/power260110

Введение

На сегодняшний день в сложившихся условиях санкционных запретов и курса на импортозамещение актуальным вопросом для промышленности является применение современных энергоэффективных технологий, разработанных в нашей стране. Одним из важных шагов в этом направлении является освоение методик расчёта и проектирования регенеративных и рекуперативных горелок, применение которых позволит перевести производство на новый уровень энергоэффективности, получить экономию топлива и экологический эффект.

Применение регенеративных горелок для высокотемпературных производств, в которых температура отходящих газов составляет порядка 800–1500 °С, является крайне актуальной задачей, однако нет единой общепринятой отечественной методики для их расчета.

Основным элементом таких горелок является регенеративная насадка. В литературных источниках [1–7] приведены известные методики для расчета и определения параметров использования таких насадок.

Более полувека существует и успешно применяется метод расчета традиционных регенеративных теплообменников с насадкой в виде объемной решетки из огнеупорных кирпичей [1]. Данная аналитическая методика достаточно проста в расчетах и применяется для расчетов массивных регенеративных насадок воздухоподогревателей доменных печей долгое время. В статье [2] описана адаптация методики [1] для расчета шариковых микрогенеративных насадок. Существенный недостаток как классической методики расчета регенераторов [1], так и адаптированного варианта [2] – построение аналогии между двумя принципиально отличающимися процессами передачи теплоты: через разделительную стенку в рекуператоре и путем поочередного контакта удаляемых продуктов сгорания и нагреваемого воздуха с теплоаккумулирующей насадкой.

В работе [3] представлен вариант расчета оценки эффективности работы регенеративной горелки. Методика предназначена в большей мере для приблизительной оценки получаемого эффекта от применения регенеративных или рекуперативных горелок.

В зарубежной практике есть ряд публикаций, в которых исследуются количества NO_x и CO в дымовых газах при применении регенеративных горелок, а также влияние изменения количества подаваемого воздуха и доли низкокалорийного газа на беспламенное сжигание [4–6].

В работе [7] предложена методика определения основных конструктивных параметров теплообменных насадок регенеративных горелок, которая в наибольшей мере учитывает физические особенности протекающих процессов. Она базируется на уравнениях теплового баланса и теплопередачи при поочередном контакте охлаждаемой и нагреваемой сред с теплоаккумулирующей насадкой. При построении теплового баланса для одного цикла работы микрогенератора теплоты полагается, что количество теплоты, отданное дымовыми газами теплоаккумулирующему материалу насадки во время газовой фазы цикла, равно повышению теплосодержания насадки и оно же равно количеству теплоты, воспринятому нагреваемым воздухом во время воздушной фазы. При ее создании автором был сделан ряд допущений, требующих уточнения. В частности, в расчетных зависимостях используются законы изменения температур дыма и воздуха на выходе из насадки, которые отдельно не проверялись ни экспериментально, ни теоретически. Также недостатком данной методики является то, что тела, образующие насадку, считаются термически тонкими.

Целью данной работы является разработка цифрового двойника теплообменной насадки регенеративной горелки и установление с его помощью реальных законов изменения температуры дыма и воздуха на выходе из насадки.

Математическая модель теплообмена регенеративной насадки (цифровой двойник)

Для решения поставленной задачи была создана математическая модель (цифровой двойник) для определения теплотехнических параметров регенеративной насадки. Модель основывается на принципе элементарных тепловых балансов, а также учитывает термомассивность теплоаккумулирующих шариков за счет описания распределения температуры в них при помощи дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Детальнее методика описана в [8].

Насадка по высоте разбивается на m слоев с одинаковой толщиной Δh . Время дискретизируется с шагом $\Delta \tau$.

Количество тепла, передаваемое от горячего теплоносителя теплоаккумулирующим шарикам на произвольном слое i в момент времени k , рассчитывается по формуле

$$\Delta Q_{i,k+1} = \alpha_{v,i,k} \cdot \Delta h \cdot f \cdot \Delta \tau \left(U_{i,k}^A - t_{i,k} \right) - \frac{2\pi(t_{i,k} - t_{\text{окр}})}{\frac{1}{\alpha_{i,k} r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{окр}} r_2}}, \text{ Дж.}$$

Количество тепла, которое шарики передают холодному теплоносителю, рассчитывается по формуле

$$\Delta Q_{i,k+1} = \alpha_{v,i,k} \cdot \Delta h \cdot f \cdot \Delta \tau \left(t_{i,k} - U_{i,k}^B \right) - \frac{2\pi(t_{i,k} - t_{\text{окр}})}{\frac{1}{\alpha_{i,k} r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_{\text{окр}} r_2}}, \text{ Дж.}$$

где $\alpha_{v,i,k}$ – объемный коэффициент конвективной теплоотдачи в слое шариков, определяется по эмпирической формуле Китаева – Фурнаса, Вт/(м³·К) [2];

f – поперечное сечение шариковой насадки, м²;

$U_{i,k}$ – температура теплоносителя на i -м шаге по координате и k -м шаге по времени, °С;

$t_{i,k}$ – температура поверхности теплоаккумулятора (шариков засыпки насадки) на i -м шаге по координате и k -м шаге по времени, °С;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

$\alpha_{i,k}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·К);

$\alpha_{\text{окр}}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности корпуса насадки к окружающей среде, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала на корпусе насадки, Вт/(м·К);

r_1, r_2 – внутренний и внешний радиусы слоя теплоизоляции на корпусе насадки, м.

Количество теплоты, передаваемой с теплоносителем в следующий элементарный слой теплоаккумулятора:

$$Q_{i+1,k} = Q_{i,k} - \Delta Q_{i,k}, \text{ Дж.}$$

Расчет температуры дыма на выходе из i -го слоя производится по формуле

$$U_{i,k}^A = U_{i,k-1}^A - \frac{\Delta Q_{i,k}}{V_0 \cdot c_{\text{дым}} \Delta \tau}, \text{ °С,}$$

где $U_{i,k}^A$ – температура дыма, °С;

$c_{\text{д}}$ – теплоемкость дыма, Дж/(м³·К).

Расчет температуры воздуха на выходе из i -го слоя производится по формуле

$$U_{i,k}^B = U_{i,k-1}^B + \frac{\Delta Q_{i,k}}{V_0 \cdot c_{\text{в}} \Delta \tau}, \text{ °С,}$$

где $U_{i,k}^B$ – температура воздуха, °С;

$c_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха, Дж/(м³·К).

Исследование термической массивности шариков производится путем решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в одномерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_{\text{эф}}} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right),$$

где r – радиус теплоаккумулирующего шарика.

В математической модели реализовано решение численным методом с использованием явной схемы аппроксимации. Для точки в центре шарика принимаются граничные условия второго рода $\frac{\partial t}{\partial r} = 0$. Для точки на поверхности шарика задаются граничные условия третьего рода.

Для расчета шарик условно разделили на слои, n контрольных точек находятся на расстоянии

$\Delta r = \frac{r}{n-1}$, м, друг от друга. Расчет по толщине шарика производится по следующим формулам:

– для поверхности шарика:

$$t_{i,k}^1 = \frac{U_{i-1,k}^{cp} \cdot \alpha + \frac{\lambda \cdot t_{i,k-1}^1}{\Delta r}}{\alpha + \frac{\lambda}{\Delta r}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

– для точек от 2 до $n-1$:

$$t_{i,k}^j = t_{i,k-1}^j + \frac{\lambda \Delta \tau}{\rho c} \left(\frac{t_{i,k-1}^{j+1} - 2t_{i,k-1}^j + t_{i,k-1}^{j-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{t_{i,k-1}^{j+1} - t_{i,k-1}^j}{\Delta r} \right), \text{ } ^\circ\text{C};$$

– температуру центра считаем равной температуре предыдущей точки $n-1$:

$$t_{i,k}^n = t_{i,k}^{n-1}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

После расчета температур шарика в контрольных точках производится расчет среднemasсовой температуры шарика. Принимается, что все шарики i -го слоя имеют одинаковую температуру.

Подтверждение достоверности цифрового двойника

Для подтверждения достоверности данной модели на кафедре «Техническая теплофизика» ДонНТУ была создана лабораторная установка, имитирующая «дымовую» фазу работы регенеративной горелки (рис. 1). Параметры установки: диаметр корпуса 200 мм, на сетку засыпаны стеклянные шарики, высота засыпки шариков 137 мм, диаметр шариков 21 мм. Для подогрева воздуха были использованы 2 спирали общей мощностью 3,5 кВт. Экспериментально установлено, что вентилятор обеспечивает скорость потока 3 м/с, отнесенную к внутреннему сечению корпуса теплообменной насадки. Через слой стеклянных шариков пропускали нагретый воздух и в непрерывном режиме отслеживали изменение температуры воздуха при помощи термопар.



a)



b)

Рис. 1. Лабораторная установка шариковой регенеративной насадки (а) и наполнитель, имитирующий теплоаккумулятор (b)

Fig. 1. Laboratory setup of a ball regenerative nozzle (a) and filler simulating a heat accumulator (b)

Теплофизические свойства шариков, выполнявших роль теплоаккумуляторов в лабораторной установке:

| | |
|------------------|--------------------------|
| теплопроводность | 1 Вт/(м·К); |
| теплоемкость | 840 Дж/(кг·К); |
| плотность | 2350 кг/м ³ . |

Проводились замеры температуры воздуха на входе в насадку, непосредственно перед шариковой теплообменной насадкой и температуры воздуха сразу после насадки. Результаты измерений показаны на рис. 2а.

Проверка адекватности математической модели проведена следующим образом. Закон изменения температуры воздуха на входе в насадку, имевший место в эксперименте, был аппроксимирован при помощи полиномиального уравнения второго порядка с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9926$.

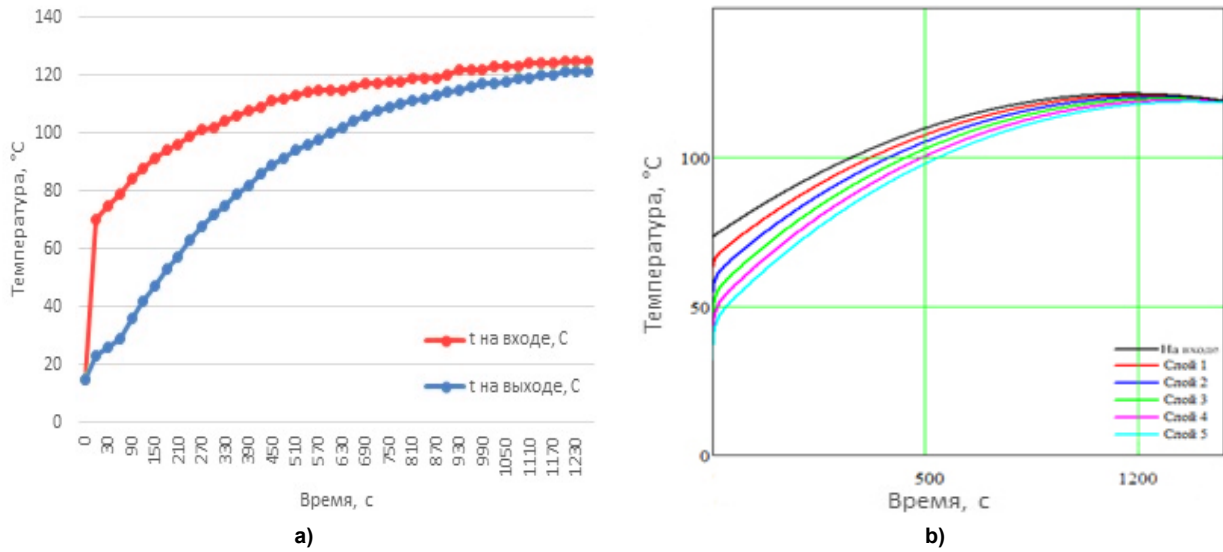


Рис. 2. Результат натурального эксперимента (а) и результат расчета цифрового двойника в условиях проводимого эксперимента (б)
Fig. 2. The result of a full-scale experiment (a) and the result of calculating a digital twin in the experimental conditions (b)

Это уравнение было задано в математическую модель наряду с прочими условиями однозначности, соответствующими параметрам экспериментальной установки. В результате моделирования получены изменения во времени температур воздуха на выходе из каждого слоя насадки (рис. 3). Как видно из сопоставления соответствующих кривых на рис. 2 и 3, экспериментальные и расчетные изменения температуры воздуха на выходе из насадки хорошо согласуются между собой.

На основании этого сделан вывод о возможности использования разработанной математиче-

ской модели для описания процессов теплообмена между газообразными средами и шариковой теплообменной насадкой.

Установление законов изменения температуры газообразных сред при прохождении насадки

Для решения основной задачи данной работы по уточнению законов изменения температуры дыма и воздуха на выходе из насадки в течение соответствующих фаз был проведен ряд численных экспериментов при помощи математической модели.

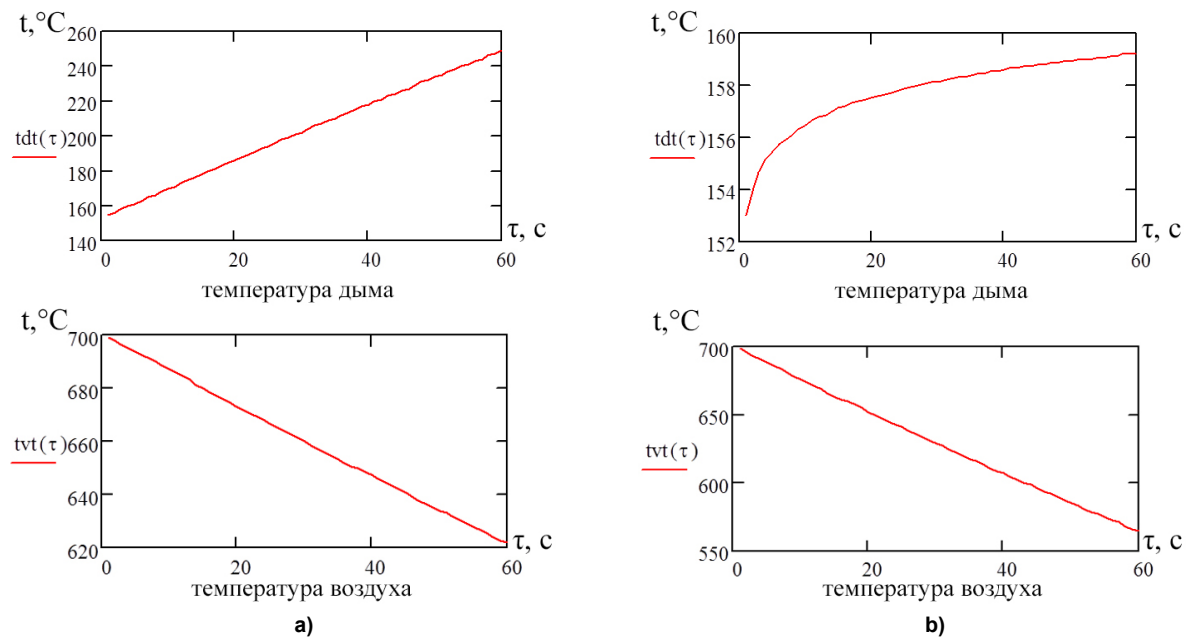


Рис. 3. Изменение температуры: а – рассчитанное по методике; б – рассчитанное при помощи математической модели
Fig. 3. Temperature change: а – calculated using the methodology; б – calculated using the mathematical model

В качестве исходных данных для расчета использовались данные об ожидаемых условиях эксплуатации регенеративных горелок на промышленной печи. Начальная температура дыма $t_d^H = 1000$ °С; расход дыма при н.ф.у. $V_d = 6$ м³/с; начальная температура воздуха $t_B^H = 20$ °С; расход воздуха при н.ф.у. $V_B = 5$ м³/с; высота насадки $H = 0,223$ м; диаметр насадки $D = 0,6$ м; диаметр шариков $d = 0,02$ м; материал шариков – корунд; теплоемкость шариков 2000 Дж/(кг·К); плотность шариков 4000 кг/м³; теплопроводность материала шариков 1,4 Вт/(м·К).

Результаты определения изменения во времени температуры воздуха и дыма на выходе из насадки в течение соответствующих фаз представлены на рис. 3. При этом результаты моделирования сопоставлены с законами изменения температуры, принятыми в работе [7].

Согласно методике [7] изменение температур дыма и воздуха при выходе из насадки в течение соответствующих фаз описывается экспоненциальными зависимостями:

$$t_d(\tau) = t_d^{\min} + (t_d^{\text{печь}} - t_d^{\min}) \cdot (1 - \exp(-k_d \cdot \tau));$$

$$t_B(\tau) = t_B^{\max} \cdot \exp(-k_B \cdot \tau),$$

где t_d^{\min} и t_B^{\max} – минимальная температура дыма и максимальная температура воздуха на выходе из насадки в начале периода, °С;

k_d , k_B – константы, характеризующие изменение температур дыма и воздуха соответственно;

$t_d^{\text{печь}}$ – температура дымовых газов, покидающих печную камеру, °С;

τ – время, с;

$t_d(\tau)$ – температура дыма, выходящего из насадки, в произвольный момент в течение газовой фазы, °С;

$t_B(\tau)$ – температура воздуха, покидающего насадку, в произвольный момент в течение воздушной фазы, °С.

На основании сопоставления результатов расчетов согласно методике [7] и данных, полученных при помощи верифицированной математической модели (рис. 3б), можно сделать вывод, что не все гипотезы, высказанные в методике, соответствуют действительности.

Предложенная в [7] экспоненциальная зависимость для определения температуры греющей

среды (дыма) не отражает действительное распределение температур во времени. В то же время зависимость для определения температуры воздуха, предложенная в методике, подтверждается результатами моделирования. Следует обратить внимание, что кривые, соответствующие экспоненциальным зависимостям из методики [7], в рассматриваемых узких временных диапазонах визуально кажутся близкими к прямым линиям.

Для получения зависимости изменения температуры дыма во времени использовались данные расчетов цифрового двойника. В результате «примерки» нескольких типов зависимостей была выбрана логарифмическая зависимость. Для такого вида зависимости получено уравнение, которое с высокой точностью описывает данные, полученные при помощи цифрового двойника:

– шаблон зависимости:

$$t_d(\tau) = t_d^{\min} + (t_d^{\text{печь}} - t_d^{\min})^{k_d} \cdot \ln(\tau);$$

– конкретная зависимость для условий проведенного численного эксперимента (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9961$):

$$t_d(\tau) = t_d^{\min} + (t_d^{\text{печь}} - t_d^{\min})^{0,062} \cdot \ln(\tau).$$

Заключение

В результате проведенных исследований установлены виды зависимостей изменения во времени температур газообразных сред на выходе из шариковой регенеративной насадки. Установленные зависимости необходимы для корректного использования инженерной методики расчета теплообмена в регенеративных насадках. Таким образом, зависимости являются важным инструментом для освоения методов интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах и процессах.

Для температуры дыма необходимо использовать логарифмическую зависимость, а для температуры воздуха – экспоненциальную зависимость. Установленная зависимость изменения температуры дыма отличается от принятой в известной методике и позволяет уточнить расчетное значение среднеинтегральной температуры дыма, покидающего насадку, на 5–7 %. Планируется продолжение исследований в данном направлении, ожидаемым результатом будет установление критериальных уравнений, описывающих зависимости величин k_d и k_B от критериев подобия процесса.

Список литературы

1. Расчеты нагревательных печей / С.И. Аверин, Э.М. Гольдфарб, А.Ф. Кравцов и др.; под ред. Н.Ю. Тайца. Киев: Техніка, 1969. 539 с.
2. Методика теплового расчета шариковой регенеративной насадки / Ю.Л. Курбатов, А.Б. Бирюков, Н.С. Начкебия и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 6 (1422). С. 82–91.
3. Wuenning J.G. Regenerative Burners for Heat Treating Furnaces // 8th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 25–28 March 2008, Vilamoura, Portugal. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/13129026/regenerative-burners-for-heat-treating-furnaces-flocom> (дата обращения: 30.05.2025).

4. Tenova Flexy Tech regenerative flameless burners / M. Ageno, A. Della Rocca, M. Fantuzzi, M. Senarega // *Millennium Steel*. 2011. P. 115–122.
5. Yepes H.A., Obando J.E., Amell A.A. The effect of syngas addition on flameless natural gas combustion in a regenerative furnace // *Energy*. 2022. T. 252. P. 124008. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124008
6. Verissimo A., Maura A. Rocha A., Vieira Cortez E., Costa F. Parametric Study of a Regenerative Burner Working in a Flameless Combustion // Conference: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. January 2015. DOI: 10.20906/CPS/CON-2016-1163. URL: https://www.researchgate.net/publication/316726408_Parametric_Study_of_a_Regenerative_Burner_Working_in_a_Flameless_Combustion (дата обращения: 30.05.2025).
7. Бирюков А.Б. Методика определения основных параметров теплообменной насадки регенеративных горелок // *Сталь*. 2018. № 11. С. 72–75.
8. Начкебия Н.С., Бирюков А.Б., Асламова Я.Ю. Моделирование температурного поля насадок регенеративных горелок // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 4. С. 234–241. DOI: 10.5281/zenodo.14717871

References

1. Averin S.I., Goldfarb E.M., Kravtsov A.F. et al.; Tayts N.Yu. (Ed.). *Raschety nagrevatel'nykh pechey* [Calculations of Heating Furnaces]. Kiev: Technika Publ., 1969. 539 p. (In Russ.)
2. Kurbatov Yu.L., Biryukov A.B., Nachkebiya N.S., Novikova E.V., Pilipeev E.A. [Method of Thermal Calculation of a Ball Regenerative Nozzle]. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018;6(1422):82–91. (In Russ.)
3. Wuening J.G. Regenerative Burners for Heat Treating Furnaces. In: *8th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, 25–28 March 2008, Vilamoura, Portugal*. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/13129026/regenerative-burners-for-heat-treating-furnaces-flocom> (accessed 30.05.2025).
4. Ageno M, Della Rocca A., Fantuzzi M., Senarega M. Tenova FlexyTech Regenerative Flameless Burners. *Millennium Steel*. 2011. P. 115–122.
5. Yepes H.A., Obando J.E., Amell A.A. The effect of syngas addition on flameless natural gas combustion in a regenerative furnace. *Energy*. 2022;252:124008. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124008
6. Verissimo A., Maura A. Rocha A., Vieira Cortez E., Costa F. Parametric Study of a Regenerative Burner Working in a Flameless Combustion. In: *Conference: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*. January 2015. DOI: 10.20906/CPS/CON-2016-1163. Available at: https://www.researchgate.net/publication/316726408_Parametric_Study_of_a_Regenerative_Burner_Working_in_a_Flameless_Combustion (accessed 30.05.2025).
7. Biryukov A.B. [Methodology for determining the main parameters of the heat exchange nozzle of regenerative burners]. *Steel*. 2018;(11):72–75. (In Russ.)
8. Nachkebiya N.S., Biryukov A.B., Aslamova Ya.Iu. Modeling the temperature field of nozzles of regenerative burners. *Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2024;(4):234–241. (In Russ.) DOI: 10.5281/zenodo.14717871

Информация об авторах

Бирюков Алексей Борисович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технической теплофизики, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия; biryukov.ttf@gmail.com.

Начкебия Наталья Сергеевна, аспирант, младший научный сотрудник молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение», Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия; nata@nachkebiya.ru.

Деркачев Сергей Владимирович, канд. техн. наук, руководитель молодежной научной лаборатории «Приборостроение и станкостроение», доц. кафедры электрических станций, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия; sergey_derkachev@mail.ru.

Information about the authors

Aleksey B. Biryukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Technical Thermophysics, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia; biryukov.ttf@gmail.com.

Nataliya S. Nachkebiya, Postgraduate Student, Junior Researcher at the Youth Scientific Laboratory Instrument and Machine Tool Engineering, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia; nata@nachkebiya.ru.

Sergey V. Derkachev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Youth Scientific Laboratory Instrument and Machine Tool Engineering, Ass. Prof. of the Department of Electrical Stations, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia; sergey_derkachev@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 27.05.2025.

The article was submitted 24.04.2025; approved after review 27.05.2025; accepted for publication 27.05.2025.