

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПЕРЕКИДКИ КЛАПАНОВ КОМПАКТНЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК

Бирюков А.Б., Начкебия Н.С.

ДонНТУ, г.Донецк

### Аннотация

В статье предложена уточнённая методика определения коэффициента использования топлива (КИТ) и оптимального времени перекидки клапанов печной системы на базе компактных регенеративных горелок. Для уточнения были использованы ранее верифицированные зависимости изменения температуры продуктов сгорания и методика определения коэффициентов, описывающих изменение температуры дымовых газов в «дымовой» фазе. Уточнение закона изменения температуры дымовых газов приводит к заметным изменениям в результаты расчёта КИТ и оптимального времени переключения клапанов. Применение предложенной методики способствует более обоснованному выбору режима работы регенеративных горелок, что важно для повышения энергоэффективности, экономии топлива и продления ресурса клапанных механизмов на промышленных печах.

**Ключевые слова:** регенеративные горелки, коэффициент использования топлива (КИТ), время перекидки клапанов, энергоэффективность.

## DETERMINING THE OPTIMAL TIME FOR SWITCHING THE VALVES OF COMPACT REGENERATIVE BURNERS

Aleksey Biryukov, Nataliya Nachkebiya

Donetsk National Technical University, Donetsk

### Abstract

The article proposes a refined method for determining the fuel utilization coefficient (FUF) and the optimal valve switching time for a furnace system based on compact regenerative burners. Previously verified dependences on the change in combustion product temperature and a method for determining the coefficients that describe its change in the "smoke" phase were used for refinement. The refinement of the flue gas temperature change law leads to significant changes in the results of calculating the FUC and the optimal valve switching time. The proposed methodology allows for a more informed selection of the operating mode for regenerative burners, which is important for improving energy efficiency, saving fuel, and extending the service life of valve mechanisms in industrial furnaces.

**Keywords:** regenerative burners, fuel utilization coefficient (FUF), valve switching time, energy efficiency.

### Введение

В условиях современного промышленного производства, где энергоэффективность и снижение выбросов являются приоритетными задачами, широкое распространение получают печные системы с регенеративными горелками. Данные системы позволяют существенно повысить КПД за счет утилизации тепла отходящих газов, что приводит к значительной экономии топлива. Однако, для достижения максимальной эффективности, ключевым фактором является



оптимизация режима работы регенеративных горелок, в частности, точное определение оптимального и рационального времени перекидки клапанов.

Таким образом, задача определения оптимального времени перекидки клапанов является крайне актуальной и имеет прямое влияние на экономическую эффективность и долговечность печной системы. Необходимость точного определения оптимального времени перекидки клапанов, учитывающего специфику технологического процесса и параметры печи, диктуется потребностью в разработке и применении эффективных методов и моделей, позволяющих достичь максимальной энергоэффективности и минимизировать негативные воздействия на окружающую среду. Примеры исследования этих параметров можно найти в ряде исследований [1-5].

На практике коэффициент использования топлива (КИТ) часто используют в качестве критерия оценки затрат на расходуемое топливо, что помогает определить экономическую целесообразность применения данной технологии в конкретной технологической цепочке производства. Анализ изменения КИТ в зависимости от времени перекидки клапанов позволяет определить оптимальное, с теплотехнической точки зрения, время длительности «дымовой» («воздушной») фазы. Определение КИТ для регенеративных горелок по стандартным формулам невозможно, так как температура подогрева воздуха меняется по мере охлаждения теплоаккумулирующей насадки. В работе [6] описана методика оценки КИТ для регенеративных горелок, основываясь на гипотезах о законах изменения температуры из статьи [7].

Целью работы является определение оптимального времени перекидки клапанов компактных регенеративных горелок с использованием уточненной методики определения КИТ печной системы.

## Материалы и методы

Проводимые авторами исследования, опубликованные в статьях [8, 9] позволили усовершенствовать методику расчета насадок регенеративных горелок. В частности, был установлен и верифицирован закон изменения температуры дыма на выходе из теплообменной насадки регенеративной горелки (1) и предложен метод определения коэффициентов, характеризующих изменение температуры дымовых газов в течение «дымовой» фазы (2).

$$t_{\circ}(\tau) = t_{\circ}^{\min} + (t_{\circ}^{\text{печь}} - t_{\circ}^{\min})^{k_{\circ}} \cdot \ln(\tau); \quad (1)$$

где  $t_{\circ}(\tau)$  – температура продуктов сгорания, выходящих из насадки, в произвольный момент в течение «дымовой» фазы, °С;  $t_{\circ}^{\min}$  – минимальная температура продуктов сгорания на выходе из насадки в начале «дымовой» фазы, °С;  $t_{\circ}^{\text{печь}}$  – температура продуктов сгорания, покидающих печную камеру, °С;  $k_{\circ}$  – параметр, характеризующий изменение температуры продуктов сгорания;  $\tau$  – время, с;

$$k_{\circ} = 9,15 \cdot Re^{(-0,33)} \cdot W^{0,25} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^{0,26} \quad (2)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $W$  – критерий, равный отношению водяного числа продуктов сгорания к кажущемуся водяному числу насадки (отношение полной теплоёмкости насадки к продолжительности «дымовой» фазы);  $H/D$  – критерий, отражающий влияние параметров насадки/



Внесенные изменения в методику значительно повлияли на получаемые результаты расчетов. Поэтому разработанная методика для определения КИТ печной системы с регенеративными горелками [6] требует уточнения в связи с использованием новой зависимости изменения температуры дыма (1).

КИТ печной системы рассчитывается по формуле:

$$\eta = \left[ V_T Q_H^p \tau - V_T V_{\delta}^{y\delta} \int_0^{\tau} c_{\delta} (t_{\delta}(\tau)) t_{\delta}(\tau) d\tau - V_{св.о}^p \frac{273 c_{\delta} (10 + t_{603}^{\min} \chi / 2)}{273 + 0,5 (t_{603}^{\min} + t_{\delta})} \cdot V_{сбр} c_{\delta} (t_{\delta}^{нечь}) t_{\delta}^{нечь} \right] / V_T Q_H^p \tau \tag{3}$$

где  $V_T$  – расход топлива м<sup>3</sup>/с;  $Q_H^p$  – теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – период смены фаз(перекидки клапанов), с;  $t_{\delta}^{нечь}$  – температура продуктов сгорания, удаляемых из печной камеры, °С;  $V_{\delta}^{y\delta}$  – удельный выход продуктов сгорания при сжигании 1 м<sup>3</sup> топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{\delta}, c_{\delta}$  – средние теплоемкости продуктов сгорания и воздуха при соответствующих температурах, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{603}^{\min}$  – минимальная температура нагреваемого воздуха перед перекидкой клапанов, °С;  $t_{\delta}$  – температура вентиляторного воздуха, подаваемого на горелку, °С;  $V_{св.о}^p$  – свободный объем насадки регенератора, М<sup>3</sup>;  $\chi$  – коэффициент, учитывающий понижение температуры воздуха, удаляемого из насадки в боров при перекидке клапанов;  $V_{сбр}$  – объем продуктов сгорания при нормальных условиях, сбрасываемых из печи при каждой перекидке клапанов, м<sup>3</sup>.

Для проведения расчетов по уточненной методике и сравнения результатов с полученными по ранее принятой методике были использованы следующие исходные данные. Условный состав топлива – 100 % СН<sub>4</sub>; коэффициент расхода воздуха – 1,1;  $t_{603}^{\max} = 1100^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\delta}^{\min} = 300^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\delta}^{нечь} = 1300^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{\delta} = 0,47$ ;  $V_T = 0,028$  м<sup>3</sup>/с;  $t_{603} = 30^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент  $\chi$ , учитывающий понижение температуры воздуха, принят 0,7. На основании расчета процесса горения топлива установлен удельный выход продуктов сгорания 11,71 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Остальные исходные данные перечислены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

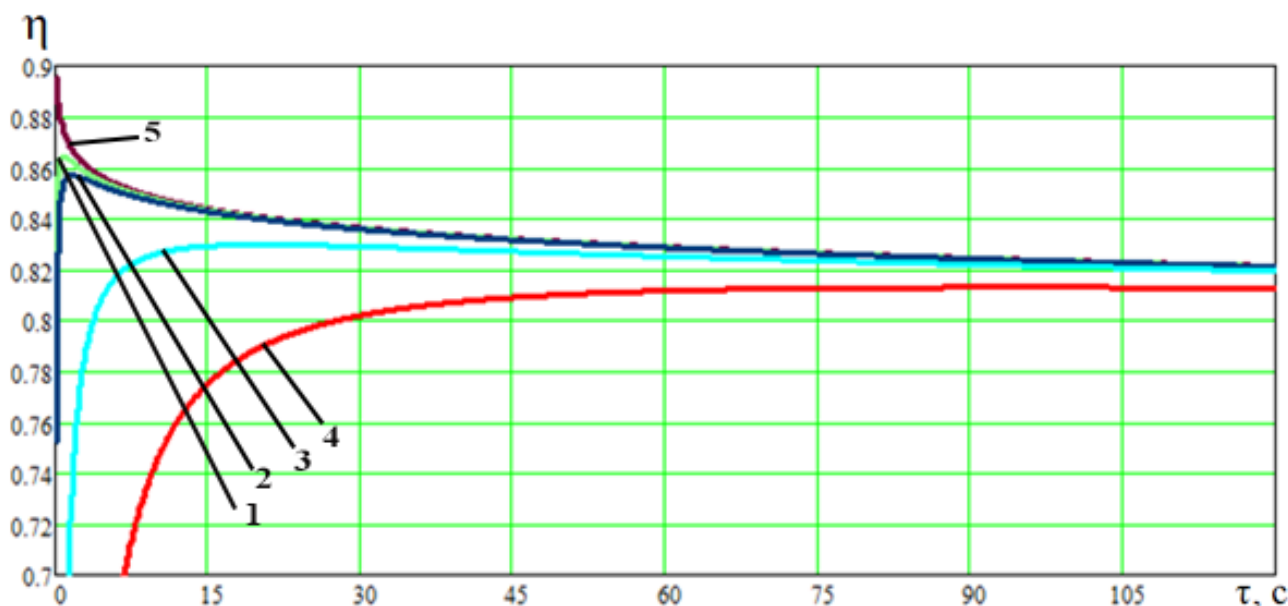
Вариант	I	II	III	IV
Свободный объем насадки регенератора, $V_{сбр}$ , м <sup>3</sup>	0,05	0,1	0,1	0,1
Объем продуктов сгорания при нормальных условиях сбрасываемых из печи при каждой смене фаз, $V_{св.о}^p$ , м <sup>3</sup>	0	0	0,1	0,5

### Результаты (Results)

Одним из основных параметров работы регенеративных горелок является время смены фаз (перекидки клапанов). По результатам рассматриваемой методики можно построить график зависимости КИТ от времени перекидки клапанов. Полученные результаты в виде зависимости КИТ от периода перекидки клапанов для рассматриваемых четырех вариантов представлены на рис. 1.



Судя из графиков, можно сделать вывод, что зависимость КИТ от времени перекидки клапанов носит экстремальный характер.



**Рис. 1. Зависимость КИТ печной системы на базе регенеративных горелок от периода перекидки клапанов:**

1-4 – для расчетных вариантов I-IV соответственно; 5 – при неучете  $V_{сбр}$  и  $V_{св.о}^p$

Для каждого из 4 вариантов функция КИТ была продифференцирована по периоду перекидки клапанов. Значения  $\tau_{opt}$  при котором производные равны 0, соответствуют оптимальным значениям периода перекидки клапанов для каждого из расчетных вариантов. Полученные значения  $\tau_{opt}$  и  $КИТ_{opt}$  представлены в табл. 2.

Полученные значения оптимального времени перекидки клапанов для рассмотренных наборов исходных данных, а главное, разработка методики, которая позволяет получать эти величины для произвольных данных позволяют для произвольных условий определять и устанавливать оптимальные значения времени перекидки клапанов. Следует обратить внимание, что в случае получения малых значений оптимального времени перекидки клапанов, по мнению авторов, следует устанавливать рациональное значение (превышающее оптимальное значение) на уровне не менее 10-15 с. Это предложение связано с тем, что помимо высокой теплотехнической эффективности устройств необходимо обеспечить достаточный срок службы высокотемпературных клапанов горелки.

Таблица 2

**Результаты исследования базовых вариантов**

Вариант	I	II	III	IV
<b>Вариант расчета до внесения изменений</b>				
Оптимальное время смены фаз, $\tau$ , с	2,4	3,35	12,1	26,7
Коэффициент использования топлива $КИТ_{opt}$	0,855	0,852	0,825	0,783
<b>Вариант расчета после модернизации методики</b>				
Оптимальное время смены фаз, $\tau$ , с	0,85	2	20,28	95
Коэффициент использования топлива $КИТ_{opt}$	0,867	0,857	0,83	0,813



## Выводы (Conclusion)

Приведено изменение методики определения КИТ печей, отапливаемых регенеративными горелками, учитывающее результаты предварительно проведенных исследований. Основное уточнение связано с использованием логарифмического закона изменения температуры продуктов сгорания на выходе из насадки.

Проведен сравнительный анализ показателей, полученных по методике до усовершенствования и после. Значения оптимального времени перекидки клапанов в 1,5 – 2,1 раза превышают значения, полученные по ранее принятой методике.

Применение данной методики будет способствовать развитию энергоэффективных технологий за счет повышения эффективности использования регенеративных горелок.

## Библиографический список

1. Попов С.К. Исследование тепловой работы регенератора с шариковой насадкой // Промышленная энергетика. – 2019. – № 5. – С. 26–33. EDN: [XCGUUL](#)
2. Монаркин Н.Н., Синицын А.А., Наимов А.Н. Построение и исследование простейшей математической модели регенеративного теплообменника // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 3 (72). – С. 11-15. EDN: [WAIWLB](#)
3. Кабаков З.К., Сенатова И.А. Математическое описание тепловых процессов в насадке регенеративной горелки // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии. Череповец: ЧГУ, 2013. – С. 119-123. EDN: [RQRZBL](#)
4. Сысоева Т.Е., Абраменков Ю.Я. Конечно-разностное решение задачи нагрева (охлаждения) неподвижного пористого слоя материала на основе уточненной физической модели движения газа // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. – Днепропетровск: НМетАУ, 2008. – С. 272-286.
5. Соболев Е.В. Математическая модель регенеративного теплоутилизатора // Холодильная техника и кондиционирование. – 2010. – № 2. – С. 44-54. EDN: [NCCORL](#)
6. Бирюков А.Б., Лебедев А.Н., Гнитиев П.А. Анализ теплотехнической эффективности печей, отапливаемых регенеративными горелками // Сталь. – 2018. – № 3. – С. 64-67. EDN: [YUDXPQ](#)
7. Бирюков А.Б. Методика определения основных параметров теплообменной насадки регенеративных горелок // Сталь. – 2018. – № 11. – С. 72-75. EDN: [YPFBNF](#)
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. EDN: [CCQUTX](#). DOI: [10.5281/zenodo.14717871](https://doi.org/10.5281/zenodo.14717871)
9. Бирюков А.Б., Начкебия Н.С. Определение закона изменения температуры продуктов сгорания на выходе из регенеративной насадки // Промышленная энергетика. – 2025. – № 10. – С. 35-43. EDN: [FBJVVW](#). DOI: [10.71759/3yzp-8t41](https://doi.org/10.71759/3yzp-8t41)

## References

1. Popov, S. K. (2019). Issledovanie teplovoy raboty regeneratora s sharikovoy nasadkoy [Study of thermal performance of a regenerator with ball packing]. *Promyshlennaya energetika*, 5, 26-33. [In Russian]
2. Monarkin, N. N., Sinitsyn, A. A., & Naimov, A. N. (2016). Postroenie i issledovanie prosteyshy matematicheskoy modeli regenerativnogo teplotobmennika [Construction and study of the simplest mathematical model of a regenerative heat exchanger]. *Cherepovets state university bulletin*, 3 (72), 11-15. [In Russian]
3. Kabakov, Z. K., & Senatova, I. A. (2013). Matematicheskoe opisanie teplovykh protsessov v nasadke regenerativnoy gorelki [Mathematical description of thermal processes in the nozzle of a regenerative burner]. In *Proc. Nauchno-tekhnicheskiiy progress v chernoy metallurgii* (pp. 119-123). ChGU. [In Russian]



4. Sysoeva, T. E., & Abramnikov, Yu. Ya. (2008). Konechno-raznostnoe reshenie zadachi nagreva (okhlazhdeniya) nepodvizhnogo poristogo sloya materiala na osnove utochnennoy fizicheskoy modeli dvizheniya gaza [Finite-difference solution of the problem of heating (cooling) a stationary porous layer of material based on a refined physical model of gas motion]. In *Proc. Metallurgicheskaya teplotekhnika* (pp. 272-286). NMetAU. [In Russian]
5. Sobol, E. V. (2010). Mathematical model of a regenerative heat exchanger. Matematicheskaya model regenerativnogo teploutilizatora. *Kholodilnaya tekhnika i konditsionirovanie*, 2, 34-44. [In Russian]
6. Biryukov, A. B., Lebedev, A. N., & Gnitiev, P. A. (2018). Analiz teplotekhnicheskoy effektivnosti pechey, otarlivayemykh regenerativnymi gorelkami [Analysis of thermal efficiency of furnaces heated by regenerative burners]. *Stal*, 3, 64-67. [In Russian]
7. Biryukov, A. B. (2018). Metodika opredeleniya osnovnykh parametrov teploobmennoy nasadki regenerativnykh gorelok [Methodology for determining the main parameters of heat exchange packing of regenerative burners]. *Stal*, 11, 72-75. [In Russian]
8. Nachkebiya, N. S., Biryukov, A. B., & Aslamova, Ya. Yu. (2024). Modelirovanie temperaturnogo polya nasadok regenerativnykh gorelok. *Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*, 4, 234-241. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14717871> [In Russian]
9. Biryukov, A. B., & Nachkebiya, N. S. (2025). Determination of the law of changing the temperature of combustion products at the output of a regenerative nozzle. *Promyshlennaya energetika*, 10, 35-43. <https://doi.org/10.71759/3yyp-8t41> [In Russian]

#### Сведения об авторах

**Бирюков Алексей Борисович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая теплофизика», Донецкий национальный технический университет, SPIN-код [3186-0680](https://orcid.org/0000-0002-8146-2017), ORCID [0000-0002-8146-2017](https://orcid.org/0000-0002-8146-2017).

**Начкебия Наталья Сергеевна**, аспирант кафедры «Техническая теплофизика», Донецкий национальный технический университет, , e-mail: [nata@nachkebiya.ru](mailto:nata@nachkebiya.ru), SPIN-код [1910-3032](https://orcid.org/0009-0001-3020-6064), ORCID [0009-0001-3020-6064](https://orcid.org/0009-0001-3020-6064).

#### Authors about

**Aleksey B. Biryukov**, Dr. of Tech. Sciences, Donetsk National Technical University, ORCID [0000-0002-8146-2017](https://orcid.org/0000-0002-8146-2017).

**Nataliya S. Nachkebiya**, Postgraduate student of the Department of Technical Thermal Physics, Donetsk National Technical University, e-mail^ [nata@nachkebiya.ru](mailto:nata@nachkebiya.ru), ORCID [0009-0001-3020-6064](https://orcid.org/0009-0001-3020-6064).

#### Ссылки для цитирования

Бирюков А.Б., Начкебия Н.С. Определение оптимального времени перекидки клапанов компактных регенеративных горелок // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 46-51.

Biryukov, A.B. & Nachkebiya N. (2025). Determining the optimal time for switching the valves of compact regenerative burners. *Energy Systems*, 4, 46-51. <https://doi.org/10.34031/es.2025.4.04>

