

Н. Н. МОНАРКИН
С. В. ЛУКИН
А. А. КОЧКИН

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА

INFLUENCE OF GEOMETRIC, THERMOPHYSICAL AND OPERATING PARAMETERS ON THERMAL EFFICIENCY OF REGENERATIVE HEAT EXCHANGER

Проведено исследование влияния геометрических (длина, диаметр и толщина стенки единичного эквивалентного канала насадки), теплофизических (плотность и теплоемкость материала насадки) и режимных параметров (расход воздуха через регенератор и время одного этапа аккумуляции/регенерации тепловой энергии) на тепловую эффективность стационарных переключающихся регенеративных теплоутилизаторов. Выявлено, что с помощью вариации длины и диаметра канала и расхода воздуха можно добиться повышения тепловой эффективности до 10 %. Установлено, что толщина стенки единичного канала, плотность и теплоемкость материала насадки, а также время одного этапа слабо влияют на тепловую эффективность регенеративного теплоутилизатора.

Ключевые слова: регенеративный теплоутилизатор, насадка, параметры, тепловая эффективность, коэффициент энергетической эффективности

Стационарные переключающиеся регенеративные теплоутилизаторы (СПРТ) довольно широко применяются в вентиляции различных помещений. Однако для таких устройств в существующих исследованиях не дано конкретной информации по оптимальным геометрическим и теплофизическим параметрам [1], либо исследования проводились для массивных регенераторов, применяемых в промышленности при высоких температурах теплоносителя [2, 3]. Поэтому данное направление актуально.

Теплообменным элементом СПРТ является регенеративная насадка. Насадка представляет собой твердотельный цилиндр, пронизанный множеством каналов малого диаметра для прохода воздуха. Работа СПРТ состоит из попеременного переключения этапов аккумуляции теплоты внутреннего воздуха насадкой (режим вытяжки воздуха) и регенерации теплоты путем теплопередачи от насадки наружному проходящему воздуху (режим притока). Подобные устройства устанавливаются в наружных стенах [4].

The influence of geometric (length, diameter and wall thickness of a unit equivalent channel of the nozzle), thermophysical (density and heat capacity of the nozzle material) and operating parameters (air flow through the regenerator and the time of one stage of accumulation / regeneration of thermal energy) on the thermal efficiency of stationary switching regenerative heat exchangers was studied. It was revealed that by varying the length and diameter of the channel and air flow, it is possible to increase thermal efficiency up to 10%. It was found that the wall thickness of a single channel, the density and heat capacity of the material of the nozzle, as well as the time of one stage, slightly affect the thermal efficiency of the regenerative heat exchanger.

Keywords: regenerative heat exchanger, nozzle, parameters, thermal efficiency, energy efficiency coefficient

Целью статьи является исследование влияния изменения геометрических параметров, а также расхода воздуха, времени одного этапа аккумуляции/регенерации тепловой энергии, теплоемкости и плотности материала на тепловую эффективность регенеративной насадки СПРТ. Исследование параметров теплоутилизатора (регенератора) проводится на основе численной реализации построенной математической модели, которая описывает процессы теплообмена в единичном канале насадки [4].

Критерием оценивания является безразмерный коэффициент энергетической эффективности, представляющий собой отношение фактической использованной регенератором энергии к максимально возможной энергии.

$$E_{\text{акк}} = \frac{\delta T_1}{\Delta T_{\text{max}}}, \quad E_{\text{рег}} = \frac{\delta T_2}{\Delta T_{\text{max}}}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{max}} = (T_{\text{in}} - T_{\text{out}})$ – максимально возможное охлаждение или нагрев воздуха в насадке от температуры внутренней среды T_{in} до наружной T_{out} , °С;

δT_1 – охлаждение внутреннего воздуха в насадке, среднее за этап аккумуляции, °С;

δT_2 – нагрев наружного воздуха в насадке, средний за этап регенерации, °С.

Коэффициенты $E_{\text{акк}}$ и $E_{\text{рег}}$ совпадают.

В ходе работы варьируются такие параметры насадки, как диаметр единичного канала (d), длина (l), толщина стенки (δ) единичного канала, объемный расход воздуха через насадку (L), плотность (ρ_H), удельная изобарная теплоемкость (c_H), а также время одного этапа аккумуляции/регенерации тепловой энергии (τ).

На эффективность теплообмена в регенераторе в первую очередь влияет площадь контакта (площадь теплообмена) между воздухом и насадкой. Соответственно параметры насадки регенератора, влияющие на изменение площади теплообмена, влияют и на эффективность регенератора. Чем меньше площадь теплообмена, тем ниже эффективность, и наоборот.

Площадь теплообмена уменьшается при снижении длины насадки и уменьшении общего числа каналов насадки, что возникает при увеличении поперечных размеров и толщины стенки единичного канала насадки.

В случае увеличения поперечных размеров единичного канала насадки из-за ограниченности общего поперечного размера (диаметра) насадки суммарная площадь теплообмена уменьшается, что связано со снижением общего числа каналов в насадке (рис. 1). Ограниченность

общего диаметра насадки вытекает из ограничения возможности выполнения сквозных отверстий в наружных стенах. В данном случае диаметр насадки ограничен 0,2 м (площадь 0,03 м²).

Из рис. 1 следует, например, что при увеличении эквивалентного диаметра канала от 0,0016 до 0,0058 м (т. е. в 3,6 раза) площадь теплообмена одного канала возрастает от 0,006 до 0,019 м² (в 3,2 раза); при этом суммарная площадь теплообмена уменьшается от 22,3 до 10,8 м (в 2,06 раза).

Зависимость коэффициента энергетической эффективности от эквивалентного диаметра единичного канала приведена на рис. 2. Видно, что при увеличении диаметра с 1,6 до 5,8 мм (в 3,63 раза) эффективность падает: для расхода 15 м³/ч – на 3 %, для расхода 20 м³/ч – на 4 %, для расхода 31 м³/ч – на 7 %, для расхода 50 м³/ч – на 10 %. То есть увеличение диаметра канала при постоянном расходе воздуха через насадку снижает ее эффективность, и наиболее резкое снижение наблюдается при максимальном расходе воздуха.

Необходимо отметить, что с повышением расхода воздуха при постоянном диаметре снижается коэффициент эффективности.

В случае увеличения толщины стенки единичного канала общее число каналов насадки уменьшается из-за большего заполнения сечения насадки твердым материалом. Таким образом, чем меньше толщина стенки канала, тем эффективнее регенератор. Ограничение на сни-

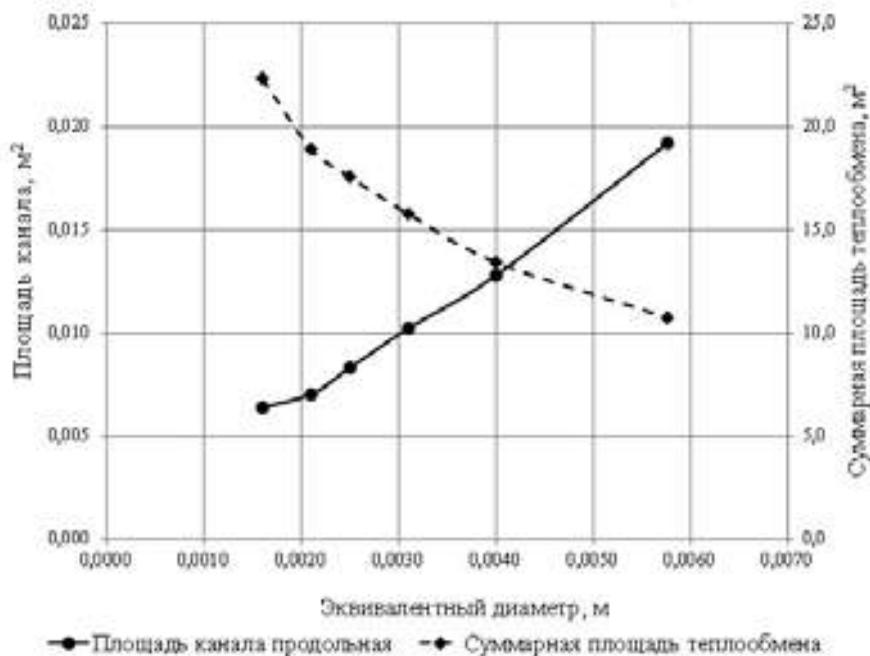
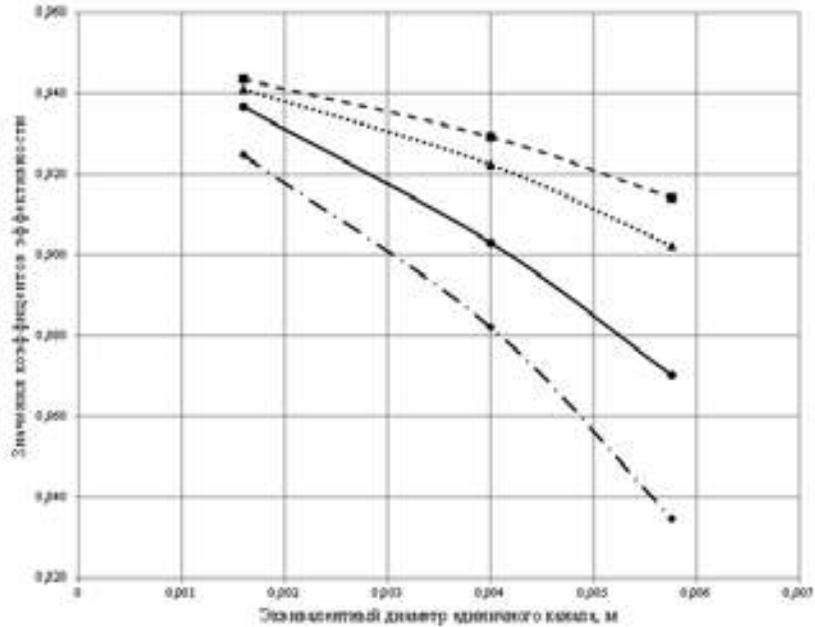


Рис. 1. Зависимость площади единичного канала и суммарной площади теплообмена от эквивалентного диаметра единичного канала (длина канала $l=0,64$ м, толщина стенки канала $\delta=0,5$ мм, время $\tau=40$ с, расход воздуха $L=31\text{ м}^3/\text{ч}$)

жение толщины стенки здесь может накладываться только условие прочности конструкции.

В целом (рис. 3) наблюдается снижение эффективности при увеличении диаметра и толщины стенки канала, при этом внутри

зависимости для одного диаметра снижение эффективности слабое. При диаметре 1,6 мм значение коэффициента эффективности уменьшается на 4 %, при диаметре 4,0 мм – на 5 %, при диаметре 5,8 мм – на 3 %.



■ Расход 15 м³/ч ····· Расход 20 м³/ч ——— Расход 31 м³/ч ——— Расход 50 м³/ч

Рис. 2. Зависимость значений коэффициентов энергетической эффективности от эквивалентного диаметра единичного канала (длина канала $l=0,64$ м, толщина стенки канала $\delta=0,5$ мм, время $\tau=40$ с)

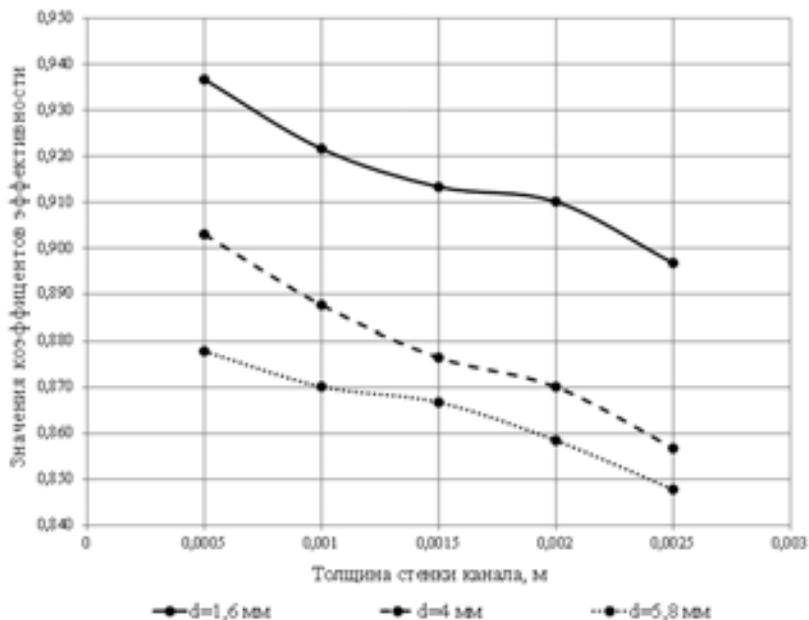


Рис. 3. Зависимость коэффициентов эффективности от толщины стенки единичного канала для трех диаметров канала (длина канала $l=0,64$ м, время $\tau=40$ с, расход воздуха $L=31$ м³/ч)

Увеличение времени этапа аккумуляции/регенерации тепловой энергии в регенераторе приводит к снижению его энергоэффективности (рис. 4). Из рисунка видно, что при изменении времени этапа с 5 до 300 с (в 60 раз) для длины 0,64 м снижается эффективность на 3 %, для длины 0,4 м – на 6 %, для длины 0,2 м – на

9 %. То есть в наихудших условиях находится вариант при минимальной длине и максимальном времени этапа. Стоит отметить, что со снижением длины канала при постоянном диаметре снижается эффективность регенератора.

На рис. 5 приведена зависимость коэффициентов эффективности от плотности мате-

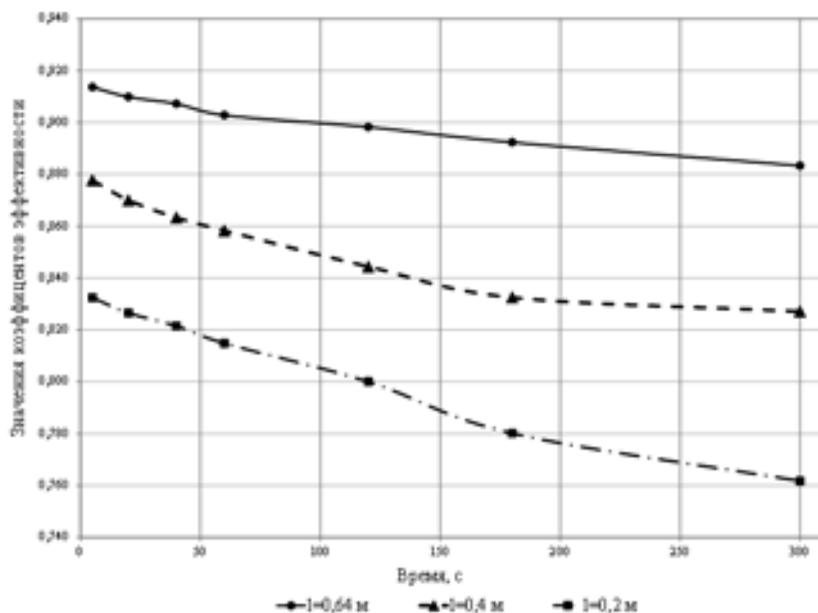


Рис. 4. Зависимость коэффициентов эффективности от времени одного этапа аккумуляции/регенерации при различной длине канала (диаметр канала $d=4,0$ мм, толщина стенки канала $\delta=0,5$ мм, расход воздуха $L=31\text{ м}^3/\text{ч}$)

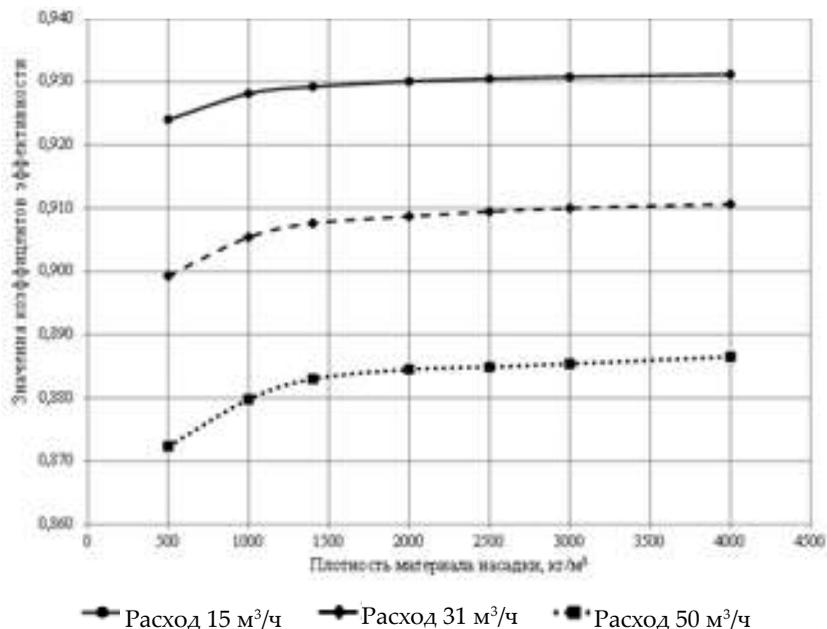


Рис. 5. Зависимость коэффициентов эффективности от плотности материала насадки (диаметр канала $d=4,0$ мм, длина канала $l=0,64$ м, толщина стенки канала $\delta=0,5$ мм, время $\tau=40$ с)

риала насадки для трех различных расходов воздуха при постоянной теплоемкости (длина канала $l=0,64$ м, диаметр $d=4,0$ мм, толщина стенки $\delta=0,5$ мм). Из рисунка видно, что характер изменения коэффициентов эффективности для всех трех расходов одинаков: наблюдается заметный рост вначале (от 500 до 2000 кг/м³), затем процесс практически стабилизируется. При росте плотности насадки

с 500 до 4000 кг/м³ коэффициент эффективности увеличивается для всех указанных расходов на 1–2 %.

Варьирование теплоемкости при постоянной плотности материала насадки в 1400 кг/м³ дает аналогичные результаты. При росте теплоемкости насадки с 1000 до 8000 Дж/кг·К коэффициент эффективности увеличивается для всех указанных расходов на 1–2 % (рис. 6).

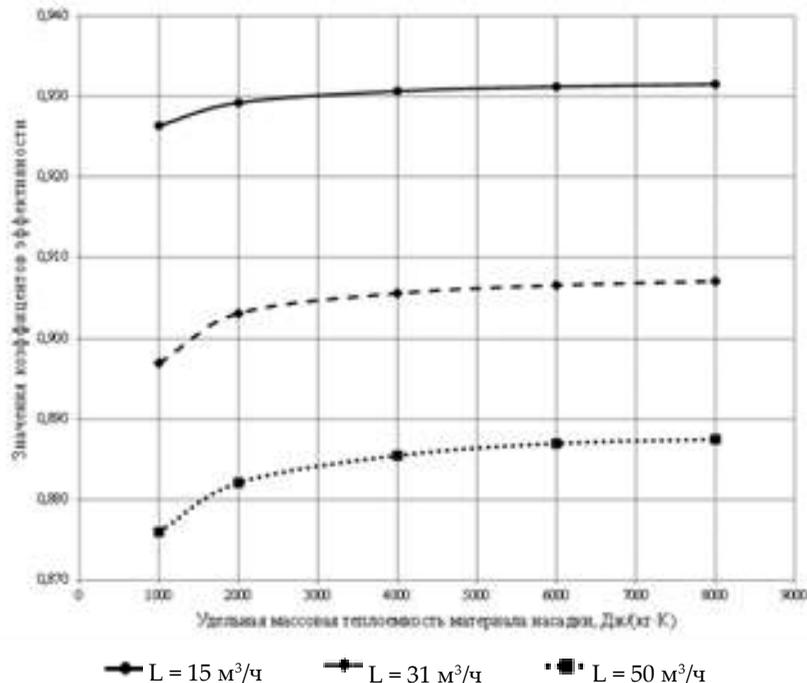


Рис. 6. Зависимость коэффициентов эффективности от плотности материала насадки (диаметр канала $d=4,0$ мм, длина канала $l=0,64$ м, толщина стенки канала $\delta=0,5$ мм, время $\tau=40$ с)

Выводы. В результате работы выявлено, что на тепловую и аэродинамическую эффективность регенератора определяющее влияние оказывают диаметр и длина единичного эквивалентного канала насадки, а также расход воздуха через насадку. Например, при расходе воздуха в количестве 50 м³/ч уменьшение диаметра канала с 5,8 до 1,6 мм (в 3,63 раза) позволяет увеличивать тепловую эффективность до 10 %.

Для получения существенных изменений эффективности при варьировании времени одного этапа аккумуляции/регенерации тепловой энергии требуется слишком сильное его увеличение или уменьшение, что в данном случае является неприемлемым. Поэтому можно считать, что время этапа влияет на эффективность регенератора незначительно. Также слабое влияние на эффективность оказывают толщина стенки единичного канала и плотность материала насадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев В.А., Гаврилов А.И., Каменецкий К.К., Соболев Е.В. Параметрическое исследование регенеративного теплообменника // Вестник международной академии холода. 2010. С. 32–35.
2. Шашкин В.Ю., Торопов Е.В. Оценка эффективности насадок регенеративных теплообменных аппаратов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2007. С. 5–6.
3. Рыбкина Г.В., Ометова М.Ю., Елин Н.Н. Оптимизация геометрических характеристик насадки регенеративного теплообменника // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. С. 47–48.
4. Монаркин Н.Н., Лукин С.В., Кочкин А.А. Математическая модель теплообмена в тонкостенном регенераторе // Приволжский научный журнал. 2018. № 3 (47). С. 57–62.

REFERENCES

1. Vasil'ev V.A., Gavrilov A.I., Kamenetskiy K.K., Sobol' E.V. Parametric study of regenerative heat exchanger. *Vestnik mezhdunarodnoy akademii kholoda* [Bulletin of the International Academy of Cold], 2010, no. 1, pp. 32–35. (in Russian)
2. Shashkin V.Yu., Toropov E.V. Evaluation of efficiency of regenerative heat exchangers nozzles. *Vestnik yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of South Ural State University], 2007, no. 12 (84), pp. 5–6. (in Russian)
3. Rybkina G.V., Ometova M.Yu., Elin N.N. Optimization of the geometric characteristics of the regenerative heat exchanger nozzle. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and Water Treatment], 2010, no. 4 (66), pp. 47–48. (in Russian)
4. Monarkin N.N., Lukin S.V., Kochkin A.A. Mathematical model of heat transfer in a thin-walled regenerator. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [The Privolzhsky Scientific Journal], 2018, no. 3 (47), pp. 57–62. (in Russian)

Об авторах:

МОНАРКИН Николай Николаевич

старший преподаватель кафедры
теплогаснабжения и вентиляции
Вологодский государственный университет
Инженерно-строительный институт
160000, Россия, Вологодская область, г. Вологда,
ул. Ленина, 15
E-mail: nikolay-monarkin@yandex.ru

ЛУКИН Сергей Владимирович

доктор технических наук, профессор,
и.о. заведующего кафедрой теплогаснабжения
и вентиляции
Вологодский государственный университет
Инженерно-строительный институт
160000, Россия, Вологодская область, г. Вологда,
ул. Ленина, 15
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

КОЧКИН Александр Александрович

доктор технических наук, доцент, и.о. директора
инженерно-строительного института, доцент
кафедры промышленного и гражданского
строительства
Вологодский государственный университет
Инженерно-строительный институт
160000, Россия, Вологодская область, г. Вологда,
ул. Ленина, 15
E-mail: aakochkin@mail.ru

MONARKIN Nikolay N.

Senior Lecturer of the Heat and Gas Supply and
Ventilation Chair
Vologda State University
Institute of Civil Engineering
160000, Russia, Vologda, Lenina str., 15
E-mail: nikolay-monarkin@yandex.ru

LUKIN Sergey V.

Doctor of Engineering Science, Professor, Acting Head
of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair
Vologda State University
Institute of Civil Engineering
160000, Russia, Vologda, Lenina str., 15
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

KOCHKIN Aleksandr A.

Doctor of Engineering Science, Acting Director of the
Institute of Civil Engineering, Associate Professor of the
Industrial and Civil Engineering Chair
Vologda State University
Institute of Civil Engineering
160000, Russia, Vologda, Lenina str., 15
E-mail: aakochkin@mail.ru

Для цитирования: *Монаркин Н.Н., Лукин С.В., Кочкин А.А.* Влияние геометрических, теплофизических и режимных параметров на тепловую эффективность регенеративного теплоутилизатора // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9, № 4. С. 33–38. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.6.

For citation: *Monarkin N.N., Lukin S.V., Kochkin A.A.* Influence of Geometric, Thermophysical and Operating Parameters on Thermal Efficiency of Regenerative Heat Exchanger. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019. Vol. 9, no. 4. Pp. 33–38. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.6.