

С. Н. МОВЧАН, Д. Н. СОЛОМОНЮК

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В РЕГЕНЕРАТОРАХ ГТУ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ
ТЕПЛООТДАЧИ ВЫСТУПАМИ И ВПАДИНАМИ**

АННОТАЦИЯ Определено влияние размещения на наружной и внутренней поверхностях трубок впадин и выступов различной формы на теплоотдачу, гидравлическое сопротивление и массу трубчатого регенератора ГТУ. Установлено, что перспективным является применение тонкостенных (толщина стенки 1 мм) трубок с лунками на наружной поверхности, которые увеличивают теплоотдачу в 1,16–1,97 раза при незначительном увеличении сопротивления, что приведет к снижению массы поверхности теплообмена до 33 %.

Ключевые слова: газотурбинная установка, регенерация теплоты, трубный пучок, интенсификация теплоотдачи, масса

S. MOVCHAN, D. SOLOMONUK

**PROSPECTS OF THE USE OF HEAT-EXCHANGE SURFACES FOR THE
GAS TURBINE PLANT REGENERATORS INTENSIFYING THE HEAT RELEASE
BY THE RIDGES AND CAVITIES**

ABSTRACT The heat regeneration results in an increase in the efficiency factor of gas turbine plant (GTP) on average by 6 to 8% (absolute); however the plant size and mass are increased significantly. In this connection, when designing the regeneration GTP an important task is to reduce the regenerator mass and increase its compactness; one of the ways to the solution of this problem is to make use of intensified heat-exchange surfaces. Joint experimental and computational research done by the Institute for Engineering Heat Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the state-owned Scientific and Production Company SE Gas Turbine Scientific Production Complex "Zorya"- "Mashproekt" allowed us to determine the influence produced by the ridges and cavities of a different shape arranged on external and internal pipe surfaces on the heat release, hydraulic resistance and the tubular regenerator mass. It has been established that the arrangement of holes on the external surface would increase the heat release by a factor of 1.16 to 1.97 with an insignificant increase in the resistance (on average 1.01 times), which will result in the reduction of the mass of heat exchange surface by 33 %. Spiral grooves made on the external surface of the pipes would increase the heat release 1.5–1.9 times with the 21 to 32 % mass reduction. The formation of cylindrical projections on the internal surface of pipes would increase the heat release 1.03–1.5 times and the resistance 1.18–2.85 times which may result both in the mass decrease (by 18 %) and the mass increase (by 27 %). The use of spiral ribs results in 1.75–2.25 times increase in the heat release and 4.05–6.8 times increase in the resistance and the mass is increased by 37 %.

Key words: gas turbine plant, heat regeneration, tubular beam, heat release intensification, and the mass.

Введение

Газотурбинные установки (ГТУ) нашли широкое применение в стационарной энергетике и газотранспортной отрасли. По сравнению с другими тепловыми двигателями, ГТУ обладает такими преимуществами, как высокая агрегатная мощность, малые массогабаритные показатели, простота конструкции, ремонта и обслуживания, малые сроки введения в эксплуатацию, высокая маневренность [1]. Существенным недостатком ГТУ есть относительно низкий коэффициент полезного действия (КПД), который на сегодня составляет 34–38 %.

Регенерация теплоты повышает КПД ГТУ в среднем на 6–8 % (абс.) на номинальном режиме и обеспечивает его высокое значение на частичных режимах. Введение в состав установки регенератора приводит к существенному увеличению ее массы и габаритов, поскольку масса теплообменника может превышать массу газотурбинного двигателя (ГТД) в 5–6 раз. Потому важной задачей при проектировании регенеративных ГТУ есть

снижение массы регенератора и повышение его компактности [2].

С целью уменьшения массогабаритных показателей трубчатых регенераторов проектировщиками и производителями ГТД и теплообменных аппаратов внедряются новые поверхности теплообмена с интенсификацией теплообменных процессов [3–6]: трубы овального или каплевидного сечения, крученые, спиральные или с интенсификаторами в виде канавок, лунок, шнековых завихрителей.

Цель работы

Определить влияние размещения на наружной и внутренней поверхностях трубок впадин и выступов различной формы на теплоотдачу, гидравлическое сопротивление и массу трубчатого регенератора.

Изложение основного материала

Научно-исследовательские работы по созданию регенеративного ГТД ведутся в ЦНИОКР «Машпроект» с 1990 года. Основную сложность представляет создание высокоэффективного и надежного регенератора, который имел бы приемлемые массогабаритные и стоимостные показатели.

В качестве регенераторов в ГТУ используются рекуперативные теплообменники с трубной и пластинчатой поверхностями теплообмена [7]. Регенераторы с трубными поверхностями имеют большие массу и габариты, чем пластинчатые, однако они менее чувствительные к термическим нагрузкам, которые возникают в процессах пуска, остановки и переходных режимов работы ГТД, и способны обеспечить надежную работу при высоких температурах и давлениях рабочих сред, поэтому считаются более долговечными и надежными в эксплуатации.

Конструкции пластинчатых и трубчатых регенераторов разработки Государственного предприятия «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект» для судовых и стационарных ГТУ, а также их основные параметры приведены в [8]. Там же выполнен анализ целесообразности применения разных типов и компоновок поверхностей теплообмена регенераторов.

С 2008 года ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» начал работы над созданием регенеративного ГТД мощностью 16 МВт для привода нагнетателя природного газа [9, 10]. Основные расчетные параметры ГТУ при стандартных атмосферных условиях в условиях компрессорной станции приведены в таблице 1, общий вид установки на рис. 1.

Таблица 1 – Основные расчетные параметры ГТУ мощностью 16 МВт для привода нагнетателя природного газа

Величина	Значение
Мощность на выходном валу, МВт	16
КПД ГТД, %	40,3
Степень повышения давления	5,75
Температура газа на входе в турбину, °С	980
Расход воздуха на входе в ГТД, кг/с	74,9
Степень регенерации теплоты	0,85
Температура воздуха на входе в регенератор, °С	223
Температура газов на входе в регенератор, °С	590
Относительные потери давления (суммарные), %	4
Масса теплообменника, т	92,6

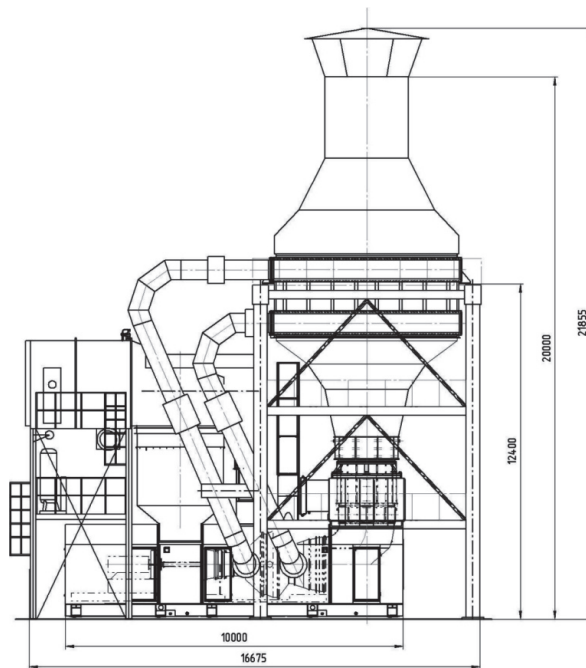


Рис. 1 – Компоновка ГТУ с регенерацией теплоты

Регенератор (рис. 2) состоит из двух секций, которые устанавливаются при монтаже параллельно. Схема движения теплоносителей в регенераторе – многократный перекрестный ток с общим противотоком. Поверхность теплообмена набрана из плоских трубных пучков, выполненных в форме змеевиков, размещенных в прямоугольном корпусе, который является частью газохода ГТД. Змеевики набраны из тонкостенных трубок размещенных в шахматном порядке.

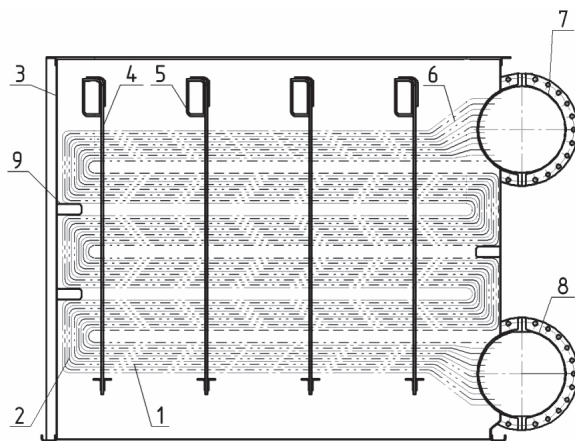


Рис. 2 – Секция регенератора:
 1 – теплообменный пакет из плоских змеевиков;
 2 – калачи; 3 – корпус; 4 – проставки; 5 – балки;
 6 – отводы; 7 – раздаточный воздушный коллектор;
 8 – собирающий воздушный коллектор;
 9 – вытеснитель

Выхлопные газы обтекают трубки снаружи, воздух осуществляет несколько ходов в середине трубок и подводится (отводится) по круглым коллекторам. Между ходами по периметру газохода установленные вытеснители. Трубки соединяются с коллекторами с помощью гнутых отводов. Переход воздуха из одного хода в другого осуществляется по калачам. Особенности конструкции регенератора задекларированны в патенте на полезную модель UA 78601 U.

В последнее время при разработке новых компактных теплообменников все большее внимание уделяется трубным теплообменным поверхностям с выступами или впадинами на наружной или внутренней сторонах (рис. 3).

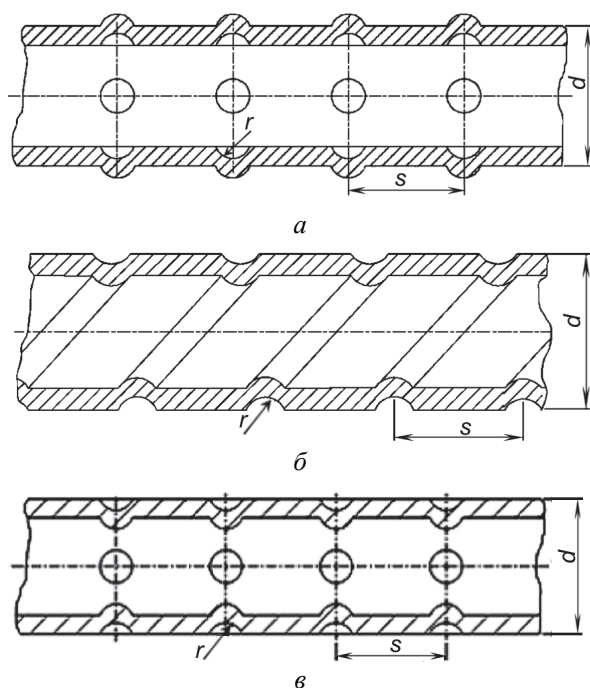


Рис. 3 – Варианты интенсификации теплоотдачи впадинами и выступами различной формы: а – труба с внутренними лунками; б – труба с винтовыми канавками, в – труба с наружными лунками

Ранее Институтом технической теплофизики НАН Украины (ИТТФ) проводилось исследование теплообмена и гидравлического сопротивления при поперечном обтекании одиночных цилиндров и однорядных пучков труб, на внешней поверхности которых располагались цилиндрические углубления разной формы [11–13]. По сравнению с гладкими цилиндрами максимальная степень интенсификации в таких поверхностях составляла 1,39. При этом размещение на поверхности цилиндров лунок оказалось более эффективным, чем выступов.

По договору с ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» ИТТФ провел экспериментальное

исследование теплообмена и гидродинамики при поперечном обтекании пучков тонкостенных труб с лунками и спиральными канавками на наружной стороне трубок и соответствующими им выступами (одиночными и спиральными) на внутренней стороне трубок.

ИТТФ были изготовлены и испытаны однадцать моделей трубных пучков с различными диаметрами труб ($d = 20, 22, 24$ мм), относительными поперечными шагами $s_1/d = 1,36-2$, относительными продольными шагами $s_2/d = 1,0-2$. Лунки на поверхности трубок размещались в шахматном (шаг 4,9 мм) и коридорном (шаг 9,8 мм) порядке. Соотношение глубины лунки к ее диаметру $h/d = 0,3$ и $h/d = 1,4$. Канавки на поверхности трубок выполнялись с относительной глубиной $h/d = 0,5$ и двумя относительными шагами $s/d = 0,9$ и $s/d = 1,8$.

Сравнение параметров исследуемых труб с гладкими трубами проводилось по величинам относительного изменения теплоотдачи

$$Nu_{инн}/Nu_{гл},$$

относительного изменения сопротивления

$$\xi_{инн}/\xi_{гл}$$

и эффективности интенсификации теплоты

$$(Nu_{инн}/Nu_{гл})/(\xi_{инн}/\xi_{гл}),$$

где $Nu = \alpha l/\lambda$ – критерий Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); l – характерный размер поверхности теплообмена, м; λ – теплопроводность теплоносителя, Вт/(м·К); w – характерная скорость потока, м/с; $\xi = \Delta P/(\rho w^2/2)$ – коэффициент сопротивления; ΔP – потери давления теплоносителя при течении через теплообменную поверхность, Па; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³. Индексы «инн» и «гл» относятся к интенсифицированной и гладкой поверхностям соответственно.

Считается, что интенсификация теплоты приносит положительный эффект при

$$(Nu_{инн}/Nu_{гл})/(\xi_{инн}/\xi_{гл}) > 1.$$

В результате экспериментального исследования установлено, что теплоотдача в пучках труб с лунками на наружной поверхности при числах Рейнольдса менее 1000 незначительно отличается от теплоотдачи пучков гладких труб. С увеличением числа Рейнольдса теплоотдача в пучках с лунками возрастает, и на конце исследованного диапазона она превышала теплоотдачу гладких трубок в 1,16–1,97 раза (см. табл. 2). Гидравлическое сопротивление таких пучков незначительно превышало сопротивление пучков гладких труб, и только в одном варианте возросло на 33%. По

сравнению с аналогичными гладкотрубными пучками средняя степень интенсификации теплоотдачи составила 1,4 среднее увеличение сопротивления – 1,01. Эффективность интенсификации теплоты менялась от 0,7 до 1,75.

При интенсификации теплоотдачи наружной поверхности труб спиральными однозаходными канавками теплоотдача увеличивалась в диапазоне 1,5–1,9 раза, т.е. в среднем больше, чем при интенсификации лунками, при практически равном увеличении сопротивления (табл. 2).

Таблица 2 – Изменение теплоотдачи и сопротивления труб при различных способах интенсификации

Способ интенсификации	$Nu_{инн}/Nu_{гл}$	$\xi_{инн}/\xi_{гл}$
Наружная поверхность труб		
цилиндрические лунки	1,0–1,97	1,03–1,33
винтовые канавки	1,5–1,9	1,0–1,35
Внутренняя поверхность труб		
цилиндрические выступы	1,03–1,5	1,18–2,85
спиральные ребра	1,75–2,25	4,05–6,8

При нанесении на наружную поверхность тонкостенных (толщина стенки 1 мм и меньше) труб цилиндрических лунок или винтовых канавок, на внутренней поверхности образуются аналогичные цилиндрические выступы или однозаходные спиральные ребра, которые интенсифицируют теплоотдачу внутри трубок.

При течении теплоносителя внутри трубок с цилиндрическими выступами наблюдалось увеличение теплообмена до 1,5 раз (по сравнению с гладкой поверхностью), которое сопровождалось существенным (до 2,85 раз) увеличением сопротивления. Среднее увеличение теплоотдачи было принято 1,33, сопротивления – 1,65 (табл. 2).

Образовавшиеся на внутренней поверхности труб спиральные ребра увеличили теплоотдачу

в 1,75–2,25 раза (при шаге ребра равном диаметру трубы), при увеличении сопротивления в 4,05–6,8 раза (табл. 2).

Интенсивность теплоотдачи для цилиндрических выступов находилась в диапазоне 0,8–0,95, для винтовых выступов 0,1–0,2. Исходя из чего, был сделан вывод о нецелесообразности применения такого вида интенсификации теплоотдачи.

Используя полученные ИТТФ теплогидравлические характеристики интенсифицированных поверхностей ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» было оценено изменение массы теплообменной поверхности регенератора при использовании пучков труб с лунками и спиральными канавками на наружной поверхности труб и с выступами на внутренней. Расчеты проводились на параметры теплоносителей и значения степени регенерации и суммарных потерь давления, приведенных в табл. 1.

Установлено, что в зависимости от увеличения теплоотдачи и сопротивления использование в регенераторе труб, на наружной поверхности которых размещены цилиндрические лунки, может привести к снижению массы (δM) до 33 % (рис. 4). Нанесение на наружную поверхность винтовых канавок с шагом равным диаметру трубок приведет к снижению массы на 21–32 %.

Появление на внутренней стороне трубок выступов, соответствующим впадинам на наружной стороне, сопровождается существенным увеличением сопротивления и потому в большинстве случаев приводит к возрастанию массы (рис. 5).

Так, при образовании на внутренней поверхности труб цилиндрических выступов масса регенератора изменялась в диапазоне от минус 18 % (уменьшение) до 27 % (увеличение). Еще худшие результаты получены при наличии на внутренней поверхности трубок винтовых ребер. Здесь масса изменялась в диапазоне от минус 4 % (уменьшение) до 37 % (увеличение).

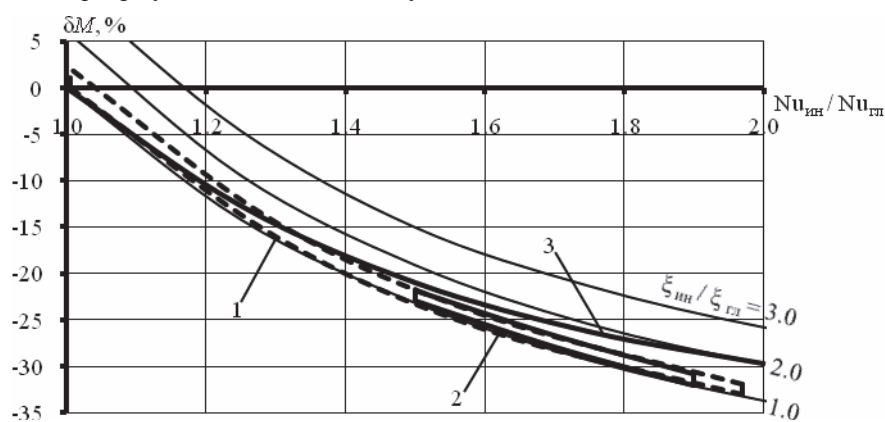


Рис. 4 – Изменение массы поверхности теплообмена регенератора при интенсификации теплоотдачи с наружной стороны трубок: 1 – лунками; 2 – винтовыми канавками; 3 – линия $(Nu_{инн}/Nu_{гл})/(\xi_{инн}/\xi_{гл}) = 1$

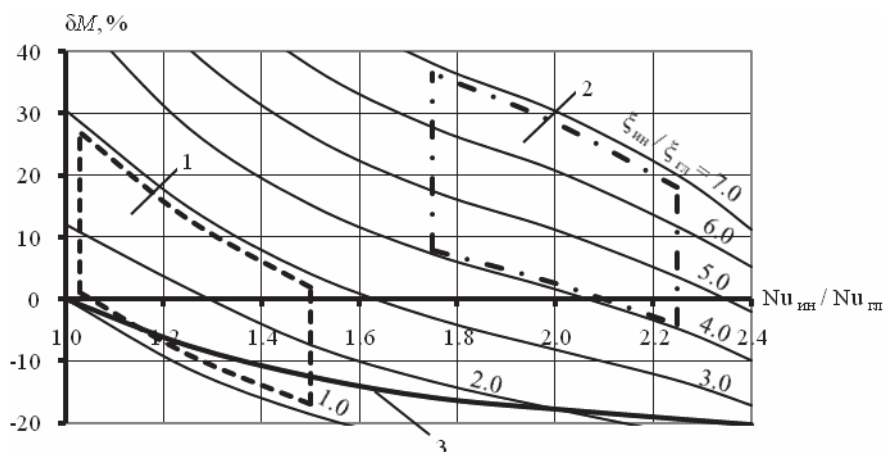


Рис. 5 – Изменение массы поверхности теплообмена регенератора при интенсификации теплоотдачи с внутренней стороны трубок: 1 – выступами; 2 – спиральными ребрами; 3 – линия $(Nu_{\text{вн}}/Nu_{\text{вл}})/(\xi_{\text{вн}}/\xi_{\text{вл}}) = 1$

Обсуждение результатов

Результаты расчетов показали, что при размещении на наружной поверхности трубок цилиндрических лунок и винтовых канавок возможно добиться уменьшения массы теплообменной поверхности регенератора до 33 % в зависимости от увеличения теплоотдачи и сопротивления.

Образование на внутренней поверхности тонкостенных труб выступов различной формы в большинстве случаев приводит к увеличению массы. Особенно это заметно для случая выдавливания на наружной поверхности труб винтовых канавок с образованием на внутренней поверхности спиральных ребер. В этом случае увеличение массы, вызванное ростом сопротивления внутри труб, превышает снижение массы, вызванное повышением теплоотдачи от наружной поверхности.

Таким образом, применение в регенераторах ГТУ тонкостенных (толщина стенки 1 мм) трубок с лунками на наружной поверхности является более перспективными, чем тонкостенных труб с винтовыми канавками.

Интенсификация теплоты внешней поверхности трубок является более эффективной, чем внутренней, так как при одинаковом увеличении теплоотдачи и сопротивления, она уменьшает массу на 3–20% больше (рис. 4, 5).

Из анализа графиков, приведенных на рис. 4, 5, также установлено, что снижение массы регенератора можно ожидать и в тех случаях, когда увеличение теплоотдачи меньше увеличения сопротивления, т.е. при $(Nu_{\text{вн}}/Nu_{\text{вл}})/(\xi_{\text{вн}}/\xi_{\text{вл}}) < 1$. Так, при наличии выступов на внутренней поверхности трубок при $Nu_{\text{вн}}/Nu_{\text{вл}} = 2,0$ и $\xi_{\text{вн}}/\xi_{\text{вл}} = 2,85$ эффективность интенсификации теплоты $(Nu_{\text{вн}}/Nu_{\text{вл}})/(\xi_{\text{вн}}/\xi_{\text{вл}}) = 0,8$, а масса регенератора при этом снижается на 7 %.

Это объясняется тем, что потери давления зависят от квадрата скорости теплоносителя, не-

значительным уменьшением которой можно компенсировать рост коэффициента сопротивления. Вызванное уменьшением скорости снижение теплоотдачи (пропорциональное величине скорости в степени 0,6–0,8) будет незначительным по сравнению с эффектом, вызванным введением интенсификации, что в результате приведет к уменьшению массы.

Выводы

В результате экспериментального исследования, выполненного ИТТФ НАН Украины, и расчетного исследования, проведенного ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», установлено, что:

- интенсификация теплоотдачи трубных пучков путем размещения на их наружной поверхности лунок приводит к возрастанию теплоотдачи в 1,16–1,97 раза (среднее значение 1,4) при незначительном увеличении сопротивления (в среднем 1,01 раза), что приведет к снижению массы поверхности теплообмена до 33 %;

- выполнение на наружной поверхности трубок винтовых канавок увеличивает теплоотдачу в 1,5–1,9 раза, со снижением массы на 21–32 %;

- образование на внутренней поверхности трубок цилиндрических выступов увеличивает теплоотдачу в 1,03–1,5 раза, сопротивление в 1,18–2,85 раза и, в зависимости от сочетания этих величин, может привести как к снижению массы (до 18 %), так и к ее увеличению (до 27 %). Еще менее эффективно использование винтовых ребер, которые увеличивают теплоотдачу в 1,75–2,25 раза, сопротивление в 4,05–6,8 раза, что приводит к увеличению массы до 37 %;

- более перспективными для применения в регенераторах ГТУ являются тонкостенные (толщина стенки 1 мм) трубки с лунками на наружной поверхности;

– интенсификация теплоты внешней поверхности трубок является более эффективной, чем внутренней, так как при одинаковом увеличении теплоотдачи и сопротивления уменьшает массу на 3–20 % больше;

– снижение массы регенератора можно ожидать и в тех случаях, когда эффективности интенсификации теплоты меньше единицы.

Список литературы

- 1 Патон, Б. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики» / Б. Патон, А. Халатов, Д. Костенко, Б. Білека, О. Письменний, А. Боцула, В. Парафійник, В. Коняхін // Вісник НАН України. – 2008. – № 4. – С. 3–9. – ISSN 1027-3239
- 2 Халатов, А. А. Какие газотурбинные двигатели необходимы газотранспортной системе Украины? / А. А. Халатов, Д. А. Костенко // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 7. – С. 22–24. – ISSN 2311-2646.
- 3 Бажан, П. И. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. – Москва : Машиностроение, 1989. – 365 с.
- 4 Зарянкин, А. Е. Применение новых теплопередающих поверхностей для модернизации воздушных регенеративных подогревателей / А. Е. Зарянкин, В. А. Зарянкин, Н. А. Зройчиков, Б. В. Ломакин, Н. И. Серебрянников, Б. П. Симонов // Теплоэнергетика. – 1999. – № 12. – С. 40–43. – ISSN 0040-3636.
- 5 Астановский, Д. Л. Использование теплообменных аппаратов новой конструкции в теплоэнергетике / Д. Л. Астановский // Теплоэнергетика. – 2007. – № 7. – С. 46–51. – ISSN 0040-3636.
- 6 Письменный, Е. Н. Теплоаэродинамическая эффективность трубчатых поверхностей нагрева регенераторов ГТУ / Е. Н. Письменный, А. М. Терех, А. В. Семеняко, А. В. Баранюк // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 4. – С. 63–73. – ISSN 0204-3602.
- 7 Грязнов, Н. Д. Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок / Н. Д. Грязнов, В. М. Елифанов, В. Л. Иванов, Э. А. Манушин. – Москва : Машиностроение, 1985. – 360 с.
- 8 Мовчан, С. Н. Регенераторы проекта ЦНИОКР «Машпроект» для стационарных и судовых газотурбинных установок / С. Н. Мовчан, Ю. В. Бочкарёв, Д. Н. Соломонюк // Наукові праці МДГУ. Серія «Техногенна безпека». – 2009. – Т. 111. – Випуск 98. – С. 205–210. – ISSN 1609-7742.
- 9 Спицын, В. Е. Высокоэффективная газотурбинная установка для ГПА / В. Е. Спицын, А. Л. Боцула, В. Н. Чобенко, Д. Н. Соломонюк // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Технології в машиностроєнні. – 2008. – № 34. – С. 3–6. – ISSN 2078-774X.
- 10 Спицын, В. Е. Регенеративная газотурбинная установка для ГПА мощностью 16 МВт / В. Е. Спицын, А. Л. Боцула, С. Н. Мовчан, В. Н. Чобенко, Д. Н. Соломонюк // Турбины и дизели – 2010. – № 5. – С. 28–31.

- 11 Коваленко, Г. В. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление трубчатых поверхностей с цилиндрическими лунками при поперечном обтекании в однорядных пучках / Г. В. Коваленко // Промышленная теплотехника. – 1998. – Т. 20, № 3. – С. 65–70. – ISSN 0204-3602.
- 12 Khalatov, A. A. Fluid flow and Heat Transfer Features at a Cross-Flow of Dimpled Tubes in a Confined Space / A. A. Khalatov, G. V. Kovalenko // Proceeding of ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. – 2003. – Vol. 5: Turbo Expo 2003, Parts A and B. –P. 945–954. – doi:10.1115/GT2003-38155. – Atlanta, Georgia, USA, 2003. – GT2002–38155. – Режим доступа: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleID=1577949>. – 15.01.2017.
- 13 Халатов, А. А. Теплогидравлическая эффективность круговых цилиндров с выступами и углублениями при поперечном обтекании / А. А. Халатов, Г. В. Коваленко // Промышленная теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 1. – С. 10–15. – ISSN 0204-3602.

Bibliography (transliterated)

- 1 Paton, B., Khalatov, A., Kostenko, D., Bileka, B., Pysmennyi, O., Botsula, A., Parafiinyk, V. and Koniahin, V. (2008), "Konseptsiia (proekt) derzhavnoi naukovo-tekhnichnoi prohramy "Stvorennia promyslovykh hazoturbinykh dvyhuniv novoho pokolinnia dlia hazovoi promyslovosti ta enerhetyky [Concept (project) of the state research and development program "Development of industrial gas turbine engines of new generation for gas industry and power engineering"]", *Visn. NAN Ukrainy [Herald of the NAS of Ukraine]*, No. 4, pp. 3–9.
- 2 Khalatov, A. A. and Kostenko, D. A. (2008), "Kakye hazoturbynnye dvyhately neobkhodimy hazotransportnoi systeme Ukrainy? [What gas turbine engines do need to the gas-transport system of Ukraine?]", *Hazoturbynnye tekhnolohyy [Gas turbo technology]*, No. 7, pp. 22–24.
- 3 Bazhan, P. Y., Kanevets, H. E. and Selyverstov, V. M. (1989), *Spravochnyk po teploobmennyim apparatam [Reference book on heat-exchangers]*, Mashynostroeny, Moscow, USSR.
- 4 Zarjankin, A. E., Zarjankin, V. A., Zrojchikov, N. A., Lomakin, B. V., Serebrjannikov, N. I. and Simonov, B. P. (1999), "Primenenie novyh teploperedajushhijh poverhnostej dlja modernizacii vozdušnyh regenerativnyh podogrevatelej [Application of new heat exchange surfaces for modernization of air regenerative heaters]", *Teplojenergetika [Thermal Engineering]*, No. 12, pp. 40–43.
- 5 Astanovskij, D. L. (2007), "Ispolzovanie teploobmennykh apparatov novoj konstrukcii v teplojenergetike [The use of heat-exchangers of new construction in thermal engineering]", *Teplojenergetika [Thermal Engineering]*, No. 7, pp. 46–51.
- 6 Pysmennyi E. N., Terekh, A. M., Semeniako, A. V. and Baraniuk, A. V. (2010), "Teploaerodynamicheskaia efektyvnost trubchatekh poverkhnostei nahreva reheneratorov GTU [Heat-aerodynamic efficiency of tubular heat transfer surfaces of gas-turbine plants regenerator]", *Promyshlennatai teploetehnyka [Industrial heat engineering]*, Vol. 32 No. 4, pp. 63–73.

- 7 **Hriaznov, N. D., Epyfanov, V. M., Yvanov, V. L. and Manushyn, E. A.** (1985), *Teplotobmennye ustroystva hazoturbinykh y kombynyrovannykh ustanovok [Heat-exchangers of gas-turbine and combined plants]*, Mashynostroeniye, Moscow, USSR.
- 8 **Movchan, S. N., Bochkarev, Yu. V. and Solomonuk, D. N.** (2009), "Reheneratory proekta TsNYOKR "Mashproekt" dlia statsyonarnykh y sudovykh hazoturbinykh ustanovok [Regenerators of project CSRД «Mashproekt» for the stationary and ship gas-turbine plants]", *Naukovi pratsi MDGU. Seriya «Tekhnohenna bezpeka» [Bulletin of MSHU. Series "Technogenic safety"]*, Vol. 111 No. 98, pp. 205–210.
- 9 **Spytsyn, V. E., Botsula, A. L., Chobenko, V. N. and Solomonuk, D. N.**, (2008) "Vysokoeffektyvnaia hazoturbynnaia ustanovka dlia HPA [High-efficiency gas-turbine plant for gas pumping unit]", *Vestnyk NTU "KhPI" [Bulletin of NTU "KhPI". Technologies in machinebuilding]*, No. 34, pp. 3–6.
- 10 **Spytsyn, V. E., Botsula, A. L., Movchan S. N., Chobenko, V. N. and Solomonuk, D. N.** (2010) "Regenerativnaja gazoturbinnaja ustanovka dlja GPA moshhnost'ju 16 MVt [Regenerative gas turbine plant for gas pumping unit rated at 16 MWt]", *Turbiny i dizeli [Turbines & Diesels]*, No. 5, pp. 28–31.
- 11 **Kovalenko, G. V.**, (1998), "Teplotdacha i gidravlichesкое soprotivlenie trubchatykh poverhnostej s cilindricheskimi lunkami pri poperechnom obtekanii v odnorjadnih puchkah [Heat emission and hydraulic resistance of tubular surfaces with cylindrical small holes at the transversal flowing around in one row bunches]", *Promyshlennaja teplotehnika [Industrial heat engineering]*, Vol. 20 No. 3, pp. 65–70.
- 12 **Khalatov, A. A. and Kovalenko, G. V.** (2003) "Fluid Flow and Heat Transfer Features at a Cross-Flow of Dimpled Tubes in a Confined Space", *Proceeding of ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Vol. 5: Turbo Expo 2003, Parts A and B, pp. 945–954, doi: 10.1115/GT2003-38155, available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleID=1577949> (accessed 15 January 2017).
- 13 **Khalatov, A. A. and Kovalenko G. V.** (2008) "Teplotdacha i gidravlichesкое soprotivlenie trubchatykh poverhnostej s vustupami i uglubljenijami pri poperechnom obtekanii [Heat and hydraulic efficiency of circular cylinders with ledges and deepenings at the transversal flowing]", *Promyshlennaja teplotehnika [Industrial heat engineering]*, Vol. 30 No. 1, pp. 10–15.

Сведения об авторах (About authors)

Мовчан Сергей Николаевич – начальник отдела, Государственное предприятие «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект»; г. Николаев, Украина; e-mail: mov_sn@rambler.ru, ORCID 0000-0002-2893-7597.

Movchan Sergej – Chief of department, Gas Turbine Scientific Production Complex "Zorya"- "Mashproekt", Mykolaiv, Ukraine.

Соломонюк Денис Николаевич – ведущий инженер-конструктор, Государственное предприятие «Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Зоря»-«Машпроект»; г. Николаев, Украина; e-mail: dns_wrk@ukr.net, ORCID 0000-0002-3479-9397.

Solomonuk Denis – leading engineer-designer, Gas Turbine Scientific Production Complex "Zorya"- "Mashproekt"; Mykolaiv, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Мовчан, С. Н. Перспективы применения в регенераторах ГТУ поверхностей теплообмена с интенсификацией теплоотдачи выступами и впадинами / **С. Н. Мовчан, Д. Н. Соломонюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 45–51. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.07.

Please cite this article as:

Movchan, S. and Solomonuk, D. (2017), "Prospects of the Use of Heat-Exchange Surfaces for the Gas Turbine Plant Regenerators Intensifying the Heat Release by the Ridges and Cavities", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 45–51, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.07.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Мовчан, С. М. Перспективи використання у регенераторах ГТУ поверхонь теплообміну з інтенсифікацією теплообміну виступами та западинами / **С. М. Мовчан, Д. М. Соломонюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 45–51. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.07.

АНОТАЦІЯ Визначено вплив розміщення на зовнішній та внутрішній поверхнях трубок западин і виступів різної форми на тепловіддачу, гідравлічний спротив і масу трубчастого регенератора ГТУ. Встановлено, що перспективним є використання тонкостінних (товщина стінки 1 мм) трубок з лунками на зовнішній поверхні, які збільшують тепловіддачу у 1,16–1,97 рази при незначному збільшенні опору, що приведе до зниження маси поверхні теплообміну до 33 %.

Ключові слова: газотурбіна установка, регенерація теплоти, регенератор, трубний пучок, інтенсифікація тепловіддачі, маса.

Поступила (received) 14.02.2017