

Valerii V. Kuznetsov
Кузнецов
Валерий
Валериевич



Heorhii V. Kuznetsov
Кузнецов
Георгий
Валериевич

УДК 621.311.22

ESTIMATION OF THERMAL AND HYDRAULIC EFFICIENCY PROFILING OF FIBBED MARINE WASTE HEAT BOILER'S SURFACES

ОЦЕНКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФИЛИРОВАНИЯ ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СУДОВЫХ УТИЛИЗАЦИОННЫХ КОТЛОВ

DOI 10.15589/SMI. 2018.02.27

Valerii V. Kuznetsov

В. В. Кузнецов, канд. техн. наук, доцент
valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua
ORC ID: 0000-0002-3678-595X

Heorhii V. Kuznetsov

Г. В. Кузнецов, студент
kuznetsov_georgiy@ukr.net
ORC ID: 0000-0002-1028-4102

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Николаев

Abstract. Diesel plants with direct power transmission to the propeller occupy a leading position as the main ship power plants. This is due to the constantly increasing efficiency of low-speed diesel engines, which today is about 50 %. This led to decrease of the exhaust gas temperature to 230 ... 260 °C and decrease in losses from 35 ... 40 to about 25 %. However, such a percentage of losses remains is highest in the structure of the heat balance of the ship's power plant, so the leading global manufacturers of main diesel engines are constantly working to reduce it. The utilization of the main ship low-speed diesel engines exhaust gases heat is an effective way to increase the efficiency of the ship's power plant as a whole. Improving the thermal efficiency of main diesel engines and a corresponding decrease of the temperature of their exhaust gases necessitates substantiation of ways to intensify heat transfer processes in waste heat boilers in order to reduce their weight and size indexes. The article describes one of the ways of intensify heat transfer processes by applying a system of dimples on the fins. The method of mathematical modeling has been used to estimate the thermal and hydraulic efficiency of the proposed heat exchange surface. It was found that the application of dimples on the fins can improve the heat transfer efficiency up to 30 %.

Keywords: vessel; waste heat boiler; heat exchange surface; profiling; dimple.

Аннотация. Утилизация теплоты отработавших газов главных судовых малооборотных дизельных двигателей является действенным способом повышения эффективности судовой энергетической установки в целом. Повышение тепловой эффективности главных дизельных двигателей и соответствующее снижение температуры их отработавших газов вызывают необходимость обоснования способов интенсификации процессов теплоотдачи в утилизационных котлах для снижения их массогабаритных показателей. Рассмотрен один из способов интенсификации процессов теплоотдачи путем нанесения системы лунок на ребра. Методом математического моделирования произведена оценка теплогидравлической эффективности предложенной теплообменной поверхности. Получено, что нанесение лунок на ребра может улучшить эффективность теплоотдачи до 30 %.

Ключевые слова: судно; утилизационный котел; теплообменная поверхность; профилирование; лунка.

Анотація. Утилізація теплоти відпрацьованих газів головних суднових малооборотних дизельних двигунів є дієвим способом підвищення ефективності судової енергетичної установки в цілому. Підвищення теплової ефективності головних дизельних двигунів і відповідне зниження температури їх відпрацьованих газів викликають необхідність обґрунтування способів інтенсифікації процесів тепловіддачі в утилізаційних котлах для зниження їх масогабаритних показників. Розглянуто один зі способів інтенсифікації процесів тепловіддачі шляхом нанесення системи лунок на ребра.

Методом математичного моделювання проведена оцінка теплогідравлічної ефективності запропонованої теплообмінної поверхні. Отримано, що нанесення лунок на ребра може поліпшити ефективність тепловіддачі до 30%.

Ключові слова: судно, утилізаційний котел, теплообмінна поверхня, профілювання, лунка.

References

- [1] Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI / MAN Diesel & Turbo. [https://turbomachinery.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/waste-heat-recovery-system-\(whrs\).pdf?sfvrsn=8](https://turbomachinery.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/waste-heat-recovery-system-(whrs).pdf?sfvrsn=8).
- [2] Bazhan, P. I. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Quick reference guide of heat exchangers] / P. I. Bazhan, G. E. Kanevets, V. M. Seliverstov. M.: Mashinostroyenie, 1989. 367 p.
- [3] **Khalatov, A. A.** Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglubleniy (lunok) [Heat transfer and fluid mechanics over surface indentations (dimples)] / A. A. Khalatov. K.: In-t tehnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainyi., 2005. 140 p.
- [4] **Khalatov, A. A.** Obobshcheniye opytnykh dannykh po faktoru analogii Reynoldsa dlya intensivifikatorov teploobmena razlichnykh tipov [Generalization of experimental data on the Reynolds analogy factor for various types of heat exchange intensifiers] / A. A. Khalatov, A. V. Okishev, V. N. Onishchenko. Prom. teplotekhnika, 2010, t. 32, № 5. s. 5–13.
- [5] Kuntyshev V. B., Dudarev V. V., Kuntyshev V. E., Sukhotsky A. B. Teploobmennaya truba. Patent na poleznuyu model [Heat exchange pipe. Patent for utility model] BY No. 7593. Stated 2011.03.17. Publ. 2011.10.30.
- [6] Kelvion. Product Line: Air Fin Cooler. Taking the heat out of major industries/http://www.edelflex.com/archivos/descargas/379/Kelvion_AFC_Product_Line_Brochure_EN.PDF.
- [7] Teploobmennaya poverkhnya [Heat exchange surface]. Kuznetsov V. V., Kuznetsova S. A., Yakimovich A. V., Kuznetsov V. G. Patent Ukraini na korisnu model № 69705. Zayavleno 25.10.2011. Opubl. 10.05.2012 byul. № 9 Patentovlasnik NUK im. admiral Makarova.
- [8] **Shlihting G.** Teoriya pogrannichnogo sloya [Theory of the boundary layer] M.: Nauka 1974. 712 s.
- [9] *Marine Engine IMO Tier II and Tier III Programme 2nd edition 2017* / <http://marine.man.eu>.
- [10] **Byistrov, Yu. A.** Chislennoe modelirovaniye vikhrevoy intensivifikatsii v paketah trub [Numerical simulation of vortex intensification in tube banks] / Yu. A. Byistrov, S. A. Isaev, N. A. Kudryavtsev, A. I. Leontev. SPb.: Sudostroeniye, 2005. 392 s.

Постановка проблемы. За последние 20 лет дизельные установки с прямой передачей мощности на винт заняли лидирующее положение в качестве главных судовых энергетических установок. Обусловлено это постоянно повышающейся эффективностью малооборотных дизельных двигателей, которая на сегодняшний день составляет около 50 %. Это привело к снижению температуры отработавших газов до 230...260°C и снижению потерь с 35...40 до уровня около 25 %. Тем не менее, такой процент потерь остается самым высоким в структуре теплового баланса судовой энергетической установки, поэтому ведущими мировыми производителями главных дизельных двигателей постоянно ведутся работы по его снижению.

На рис. 1 представлена структура теплового баланса двигателя 12S90ME-C9.2 компании MAN B&W [1]. Показано, что использование системы WHRS — Waste Heat Recovery System позволяет снизить процент потерь с отработавшими газами на 2,6%, получив при этом дополнительную выработку электроэнергии на уровне 5,1...5,7 %.

Показано, что применение подобных систем WHRS на контейнеровозах вместимостью 14000 TEU и мощностью главного двигателя 12S90ME-C9.2

57,8 МВт приводит к экономии топлива только для главного двигателя на уровне около 285 тыс. \$ США в год со сроком окупаемости капитальных вложений от 3,5 до 5,8 лет. Кроме того немаловажным фактором является снижение эмиссии двигателя на: CO_2 — 11260 тонн, NO_x — 319 тонн, SO_x — 214 тонн [1].

Принципиальная схема реализации системы WHRS представлена на рис. 2. Схема включает котел двух давлений главного двигателя, осуществляющий выработку перегретого пара на паровую турбину, работающей совместно с силовой турбиной на перепускаемых мимо турбокомпрессора главного двигателя отработавших газах на электрогенератор. Компенсация снижения температуры отработавших газов главного двигателя осуществляется за счет подогрева питательной воды в экономайзерных котлах дизель-генераторов (*GenSet Economizer*).

Использование котла двух давлений выдвигает повышенные требования к его массогабаритным показателям. Их снижение возможно за счет интенсификации процессов теплоотдачи на поверхностях нагрева. На рис. 3 представлены варианты выполнения интенсифицированных поверхностей теплообмена путем оребрения.

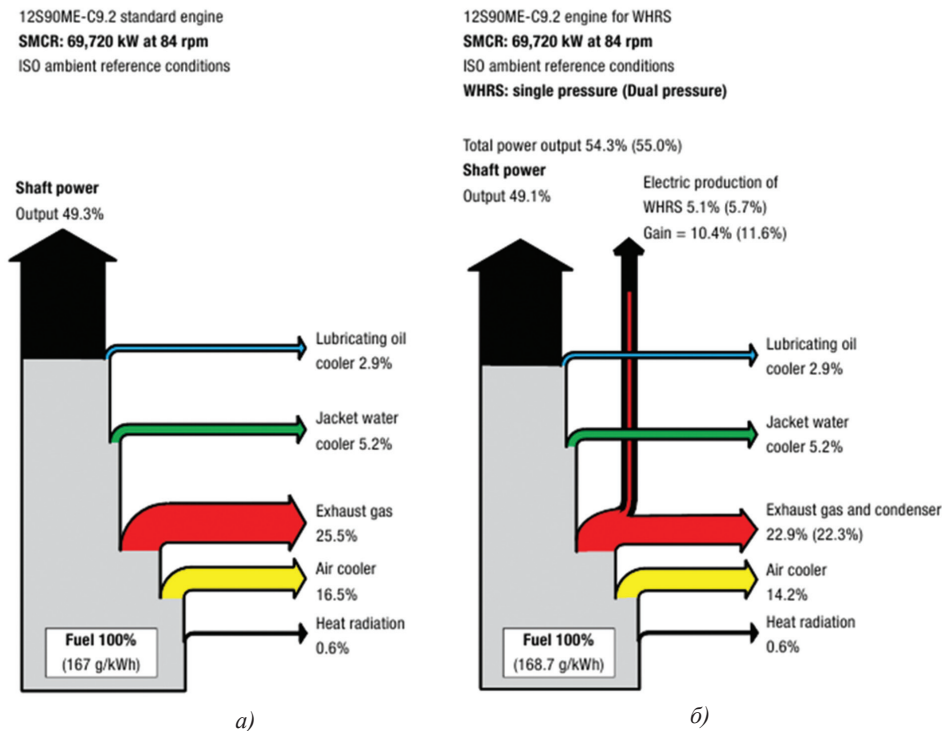


Рис. 1. Структура теплового баланса двигателя 12S90ME-C9.2 без системы утилизации (а) и с ситемой утилизации тепло-ты WHRS (б).

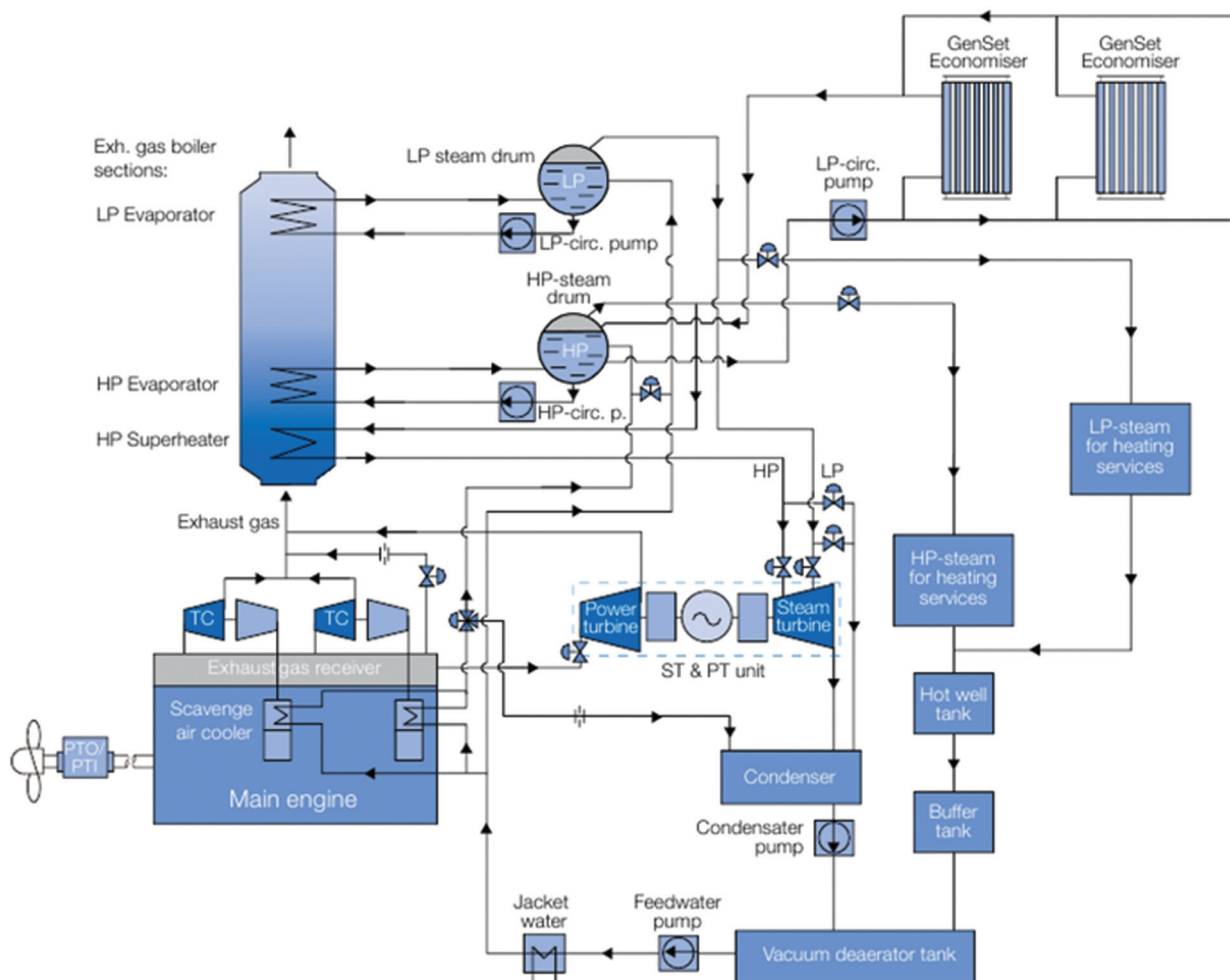


Рис. 2. Принципиальная схема реализации системы WHRS

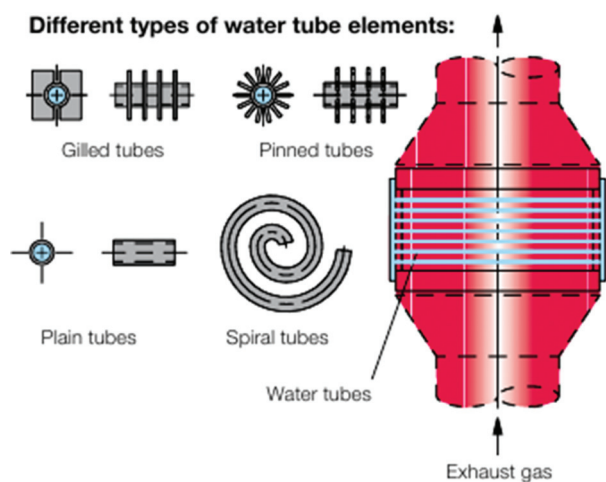


Рис. 3. Варианты выполнения поверхности нагрева

Однако использование таких теплообменных поверхностей представляет определенные эксплуатационные трудности. Применение в судовых энергетических установках высоковязких топлив с высоким содержанием в них серы может вызвать повышенные отложения сажи на ребрах, что, в свою очередь, приведет к возможности пожара в газоходе. Снизить подобную вероятность можно за счет увеличения скорости газов, однако это увеличит сопротивление поверхности нагрева. Таким образом, разработка интенсифицированных поверхностей нагрева судовых утилизационных котлов с пониженным аэродинамическим сопротивлением является *актуальной научной проблемой*.

Анализ последних исследований и публикаций и выделение нерешенных частей проблемы. Для оценки эффективности процессов интенсификации теплоотдачи предложено достаточно большое количество показателей [2].

В работах [3, 4] для оценки эффективности процессов теплоотдачи предлагается использовать показатель фактора аналогии Рейнольдса

$$FAR = \frac{Nu/Nu_0}{f/f_0}, \quad (1)$$

где Nu — критерий Нуссельта со стороны оцениваемой теплоотдачи, f — коэффициент сопротивления на достижение этой теплоотдачи; индекс «0» определяет базовый канал, обычно гладкий, с которым проводится сравнение.

Согласно этому показателю повышение эффективности теплоотдачи возможно за счет снижения аэродинамического сопротивления f .

Эффективным способом в направлении методов интенсификации теплообмена, в которых рост теплоотдачи опережает рост гидродинамического сопротивления, является использование луночных систем [3]. Физической основой этого процесса является формирование в лунках микровихрей типа «торнадо», создающих разрежение в своем центре. Генерируемые микровихри будут диффундировать в погра-

ничный слой, препятствуя таким образом осаждению загрязнений на поверхности ребер и обеспечивая реализацию эффекта самоочистки.

В работе [5] для повышения интенсивности теплоотдачи при продольном омывании оребренной поверхности теплообмена предложено на всей боковой поверхности каждого ребра располагать сферические выемки такой глубины, при которой на противоположной поверхности этого ребра под выемкой возникают сферические выступы высотой, не меньшей толщины пограничного слоя движущегося в межреберных каналах теплоносителя, при этом на каждой паре смежных ребер сферические выемки одного ребра зеркально обращены к сферическим выступам другого ребра. Авторами приведены сведения, что применительно к параметрам ребер регенератора ГТУ энергетическая эффективность аппарата увеличивается в 1,4...1,8 раз в зависимости от режима течения и скорости потока, однако не указаны условия достижения такого увеличения и не приводится сравнение эффективности предложенного способа с другими способами интенсификации теплоотдачи.

Согласно зависимости (1) повышение эффективности теплоотдачи возможно за счет снижения гидродинамического сопротивления f . Представим укрупненно сопротивление оребренной поверхности как

$$f = f_{\text{осн}} + f_{\text{ребр}},$$

где $f_{\text{осн}}$ — сопротивление трубы-основы; $f_{\text{ребр}}$ — сопротивление ребер.

Тогда снижение общего сопротивления возможно не только за счет ребер, например путем нанесения на них лунок, но и использования в качестве трубы-основы труб с меньшим сопротивлением при обтекании, например с эллиптическим поперечным сечением.

Подобная труба используется в теплообменных аппаратах компании «Kelvion» (рис. 4) [6].

В работе [7] была произведена оценка эффективности нанесения лунок на одиночную оребренную эллиптическую трубу. Получено, что нанесение на миделевом сечении по малой оси трубы с обеих сторон трубы-основы на ребре по одной лунке позволяет достичь снижения гидродинамического сопротивления на 15...18% и повышения интенсивности теплоотдачи на 17...19%. Однако не была произведена оценка эффективности использования предложенного способа интенсификации и влияния количества лунок, нанесенных на ребрах, на эффективность теплоотдачи.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы — оценить эффективность по показателю FAR нанесения лунок на ребра оребренных эллиптических пучков труб для интенсификации теплоотдачи.

Объект исследования — процессы гидродинамики и теплоотдачи при течении теплоносителя в оребренных профилированных эллиптических пучках труб.

Предмет исследования — показатели гидродинамики, теплоотдачи и теплогидравлической эффек-

тивности при обтекании оребренных профилированных эллиптических трубных пучков.

Задачи исследования.

- определение схемы расположения лунок на ребрах;
- разработка математической модели течения теплоносителя в пучках труб;
- моделирование и анализ теплогидравлической эффективности процессов теплоотдачи.

Результаты исследования. Определим места расположения лунок на ребре. Для этого представим ребро в качестве обыкновенной пластины и рассмотрим формирование пограничного слоя и изменение коэффициента теплоотдачи по его длине.

В соответствии с [8], изменение толщины пограничного слоя по пластине можно определить как

$$\delta(x) = \frac{4,64 \cdot x}{\sqrt{\text{Re}(x)} \cdot \sqrt[3]{\text{Pr}}} \quad (2)$$

где x — текущая координата пластины, а коэффициент теплоотдачи

$$\alpha(x) = \frac{3}{2} \frac{\lambda}{\delta(x)}. \quad (3)$$

Исходными данными для расчета приняты:

- теплоноситель — отработавшие газы;
- температура теплоносителя — 300 °С;
- скорость движения теплоносителя — 25 м/с;
- длина пластины — 50 мм.

Приведенные данные приняты из следующих условий: температура и скорость отработавших газов — как средние значения для современных четырехтактных дизельных двигателей [9], а длина пластины равна длине ребра оребренной эллиптической поверхности компании «Kelvion» [6].

Распределения толщины пограничного слоя и коэффициента теплоотдачи по длине пластины, которые рассчитаны по зависимостям (2) и (3), представлены на рис. 5.

Основной идеей нанесения лунок на поверхность является локальный срыв пограничного слоя с целью интенсификации теплоотдачи. В рассматриваемом случае на начальном участке наблюдается стремительное падение коэффициента теплоотдачи, происходящее примерно до середины пластины. Дальнейшее увеличение толщины пограничного слоя и падение коэффициента теплоотдачи (рис. 5) не превышает 4 %. Таким образом, в качестве первого варианта был принят вариант, аналогичный [7] с расположением лунок по малой оси эллипса (рис. 6, б), варианту в (рис. 6, в) определено расположение лунок на начальном и конечном участках ребра, по варианту г (рис. 6, г) рассмотрено оценку эффективности гипотезы расположения лунок в носовой и кормовой части ребра по большой оси эллипса.

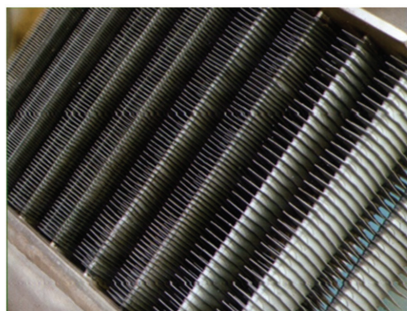
При разработке математической модели течения теплоносителя в пучках труб использовались современные достижения в области вычислительной гидромеханики [10]. Процесс течения моделировался следующими уравнениями:



а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Теплообменный аппарат с интенсификацией теплопередачи компании „Kelvion”:

а — эллиптическая труба с оребрением; б, в — элементы теплообменной поверхности; г — теплообменный аппарат в сборе

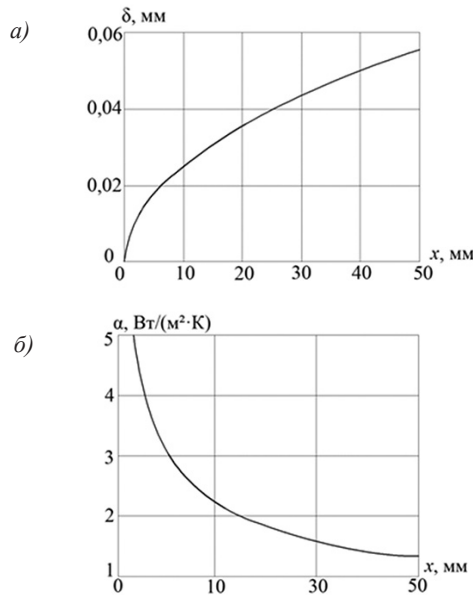


Рис. 5. Распределение толщины пограничного слоя (а) и коэффициента теплоотдачи (б) по длине пластины

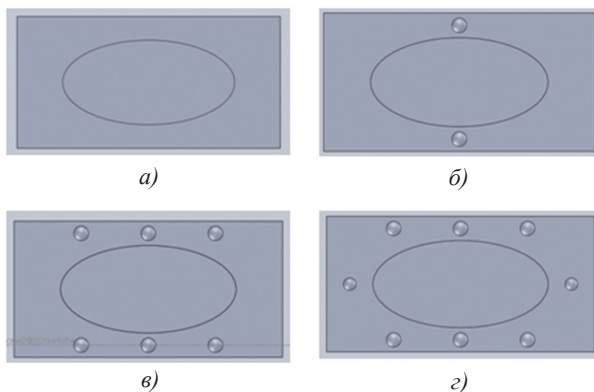


Рис. 6. Варианты расположения лунок на ребре

– неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0; \quad (4)$$

– количества движения

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \vec{S}_M; \quad (5)$$

где тензор напряжений определяется как

$$\tau = \mu \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{V} \right], \quad (6)$$

а δ — дельта-функция Кронекера;

– энергии

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_{tot}) = \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau}) + \vec{V} \cdot \vec{S}_M + S_E \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$h_{tot} = h_{stat} + \frac{\vec{V}^2}{2}, \quad (8)$$

$$h_{stat} = h_{stat}(T, p); \quad (9)$$

– состояния

$$\rho = \rho(T, p), \quad (10)$$

где T — температура; V — скорость; t — время; p — давление; ρ — плотность; λ — коэффициент теплопроводности; μ — коэффициент динамической вязкости; h_{tot} — полная энтальпия; h_{stat} — статическая энтальпия; S_M — источниковый член для импульса; S_E — источниковый член для энергии.

Приведенные выше уравнения составляют систему уравнений *Навье–Стокса*, которые позволяют математически описать практически любой случай течения жидкости или газа. Замыкание этой системы осуществлялось с помощью *RSM*-модели турбулентности. В этой модели принята гипотеза анизотропности турбулентной вязкости, что повлекло за собой введение в систему индивидуальных уравнений переноса напряжений Рейнольдса и коэффициент диссипации. В результате для трехмерной задачи система предполагает наличие семи дополнительных транспортных уравнений.

Использование этой модели обусловлено рекомендациями к ее применению для моделирования сложных течений в каналах с искривленной геометрией, большим количеством обратных течений, инверсией потока, наличием значительных градиентов скоростей и температур. Следовательно, ее применение для исследования течений в рабочих каналах, сформированных из поперечно обтекаемых пучков профилированных оребренных эллиптических труб, наиболее целесообразно.

Решение системы (4)–(10) производилось методом конечных объемов [10]. В качестве рационального варианта принимался вариант, при котором наблюдался бы наибольший рост интенсивности теплоотдачи по сравнению с ростом аэродинамического сопротивления. Сравнение эффективности теплоотдачи производилось по показателю фактора аналогии Рейнольдса (1). Индекс «0» определяет базовый канал, в нашем случае принимался вариант *a* (см. рис. 6, а). Компоновка расчетной области представлена на рис. 7.

Обсуждение полученных результатов. Результаты моделирования поданы в табл. 1 и на рис. 8.

Анализ результатов показывает следующее. Как и ожидалось, нанесение лунок на ребро значительно интенсифицирует теплоотдачу за счет снижения аэродинамического сопротивления при обтекании. Показатель эффективности *FAR* сдвигается от нижней граничной линии к верхней. Однако эффективность теплообменной поверхности сильно зависит от расположения лунок. Наиболее рациональным является

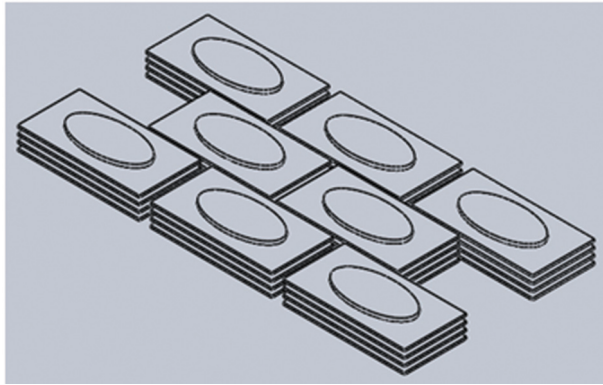


Рис. 7. Компоновка расчетной области

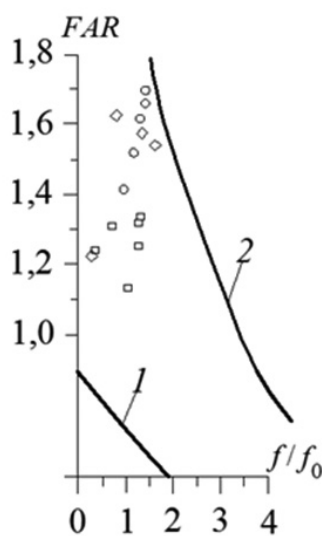


Рис. 8. Сравнение полученных результатов по показателю FAR:

1 — оребренная поверхность при больших числах Рейнольдса, 2 — поверхность со сферическими углублениями, □ — вариант б, ○ — вариант с, ◇ — вариант д

Таблица 1. Результаты оценки эффективности теплообмена

	Вариант б		Вариант с		Вариант д	
Re	f/f_0	FAR	f/f_0	FAR	f/f_0	FAR
2200	0,42	1,24	0,46	1,31	0,48	1,21
4350	0,78	1,31	0,97	1,41	0,98	1,63
6500	1,15	1,17	1,26	1,51	1,44	1,56
8700	1,19	1,25	1,30	1,60	1,52	1,58
11000	1,22	1,31	1,35	1,65	1,59	1,59
13000	1,26	1,35	1,38	1,69	1,65	1,58

вариант в — последовательного расположения лунок на ребре, поскольку в нем наблюдается наибольший рост эффективности теплоотдачи по сравнению с ростом сопротивления. Вариант г — с носовым и кормовым расположением лунок не дал ожидаемого эффекта, поскольку дополнительное сопротивление развивающемуся носовому вихрю создала носовая часть трубы, а кормовая лунка находится в гидродинамическом следе лунок на ребрах.

ВЫВОДЫ. 1. Впервые выполнено моделирование наружного обтекания теплообменной поверхности, элементом которой является эллиптическая труба-основа с прямоугольными ребрами, на которые нанесены три варианта расположения лунок: в диаметральной плоскости по малой оси трубы, последовательно на ребрах, в носовой и кормовой частях и последовательно на ребрах.

2. Получено, что наилучшим вариантом является вариант с последовательным расположением лунок на ребрах, при которых максимальный рост по показателю эффективности FAR достигает до 30 %.

3. Полученные результаты будут использованы для получения критериальных зависимостей теплоотдачи профилированных оребренных поверхностей теплообмена.

Список литературы

- [1] *Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emissions and EEDI* [Электронный документ] / MAN Diesel & Turbo. Режим доступа [https://turbomachinery.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/waste-heat-recovery-system-\(whrs\).pdf?sfvrsn=8](https://turbomachinery.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider4/Turbomachinery_doc/waste-heat-recovery-system-(whrs).pdf?sfvrsn=8).
- [2] **Бажан, П. И.** Справочник по теплообменным аппаратам [Текст] / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. М.: Машиностроение, 1989. 367 с.
- [3] **Халатов, А. А.** Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) [Текст] / А. А. Халатов. К.: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 2005. 140 с.
- [4] **Халатов, А. А.** Обобщение опытных данных по фактору аналогии Рейнольдса для интенсификаторов теплообмена различных типов [Текст] / А. А. Халатов, А. В. Окишев, В. Н. Онищенко. Пром. Теплотехника, 2010, т. 32, № 5. С. 5–13.
- [5] Кунтыш В. Б., Дударев В. В., Кунтыш В. Э., Сухоцкий А. Б. Теплообменная труба. Патент на полезную модель. ВУ № 7593. Заявлено 2011.03.17. Опубл. 2011.10.30.
- [6] Kelvion. Product Line: Air Fin Cooler. Taking the heat out of major industries [Электронный документ] / Режим доступа http://www.edelflex.com/archivos/descargas/379/Kelvion_AFC_Product_Line_Brochure_EN.PDF.
- [7] Теплообменная поверхность. Кузнецов В. В., Кузнецова С. А., Якимович А. В., Кузнецов В. Г. Патент України на корисну модель № 69705. Заявлено 25.10.2011. Опубл. 10.05.2012 бюл. № 9 Патентовласник НУК ім. адмірала Макарова.
- [8] **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя [Текст] М.: Наука 1974. 712 с.
- [9] *Marine Engine IMO Tier II and Tier III Programme 2nd edition 2017* [Электронный документ] / Режим доступа <http://marine.man.eu>.
- [10] **Быстров, Ю. А.** Численное моделирование вихревой интенсификации в пакетах труб [Текст] / Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев. СПб.: Судостроение, 2005. 392 с.