

DOI 10.15589/jnn20180303  
УДК 621.311.22  
К89

**REDUCING THE THERMAL STEALTHINESS FOR SHIPS  
OF THE CORVETTE CLASS BY THE INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER  
IN THE ELEMENTS OF THE GAS EMISSION SYSTEM**

**СНИЖЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАМЕТНОСТИ КОРАБЛЕЙ КЛАССА КОРВЕТ  
ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ  
В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ ГАЗОВЫПУСКА**

**Valerii V. Kuznetsov**

valeriy.kuznetsov@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-3678-595X

**Svitlana A. Kuznetsova**

svitlana.kuznetsova@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0003-0823-0583

**В. В. Кузнецов,**

канд. техн. наук, доц.

**С. А. Кузнецова,**

канд. техн. наук, доц.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** The basis for the revived Ukraine Marine Forces should be ships of the “Corvette” class. The effectiveness of the implementation of the tasks assigned to the corvettes largely depends on the possibility of securing their stealthiness. The general concept of ensuring the ship stealthiness is to reduce its physical fields. In the composition of these fields, a significant place is occupied by the temperature and acoustic fields. Therefore, reducing the levels of these fields of the power plant in the composition of the analogous fields of the entire ship is an actual scientific and technical problem. To increase the stealthiness of ships of the corvette class, a method for reducing the temperature and acoustic fields of a ship power plant has been considered. The method provides the using of silencers for noise from marine diesel generators, which are combined with the hot water heating surface, meet the requirements of the ship. It is shown that due to the intensification of heat transfer by using the dimple systems on the finned surface of the heating, it is possible to reduce the temperature of the exhaust gases at the section of the ship chimney by 5...30 °C (depending on the size of the dimples and the arrangement of the wells), the sound pressure by 6,8...13,3 dB, an increase of stealthiness by the thermal wake by 3,2...17,9 %

**Keywords:** corvette; physical field; diesel-generator; silencer; intensification.

**Анотація.** Для підвищення скритності кораблів класу корвет розглянутий спосіб зниження температурного та акустичного полів корабельної енергетичної установки. Спосіб передбачає застосування глушників шуму корабельних дизель-генераторів, які суміщені з поверхнею нагріву гарячої води для потреб корабля. Показано, що за рахунок інтенсифікації тепловіддачі шляхом використання лункових систем на оребреній поверхні нагріву можливі зниження температури відпрацьованих газів на зрізі димової труби корабля на 5...30 °C (залежно від розмірів глушника і розташування лунок), звукового тиску на 6,8...13,3 дБ, а також підвищення скритності за тепловим слідом на 3,2...17,9 %.

**Ключові слова:** корвет; фізичне поле; дизель-генератор; глушник; інтенсифікація.

**Аннотация.** Для повышения скрытности кораблей класса корвет рассмотрен способ снижения температурного и акустического полей корабельной энергетической установки. Способ предусматривает применение глушителей шума корабельных дизель-генераторов, которые совмещены с поверхностью нагрева горячей воды для нужд корабля. Показано, что за счет интенсификации теплоотдачи путем использования луночных систем на оребренной поверхности нагрева возможны снижение температуры отработавших газов на срезе дымовой трубы корабля на 5...30 °C (в зависимости от размеров глушителя и расположения лунок), звукового давления на 6,8...13,3 дБ, а также повышение скрытности по тепловому следу на 3,2...17,9 %.

**Ключевые слова:** корвет; физическое поле; дизель-генератор; глушитель; интенсификация.

## REFERENCES

- [1] Apalkov, Yu. V. Boevyye korabli mira na rubezhe XX–XXI vekov. Chast IV–II (A–Ya). Korvety i katera. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya: Spravochnik [Combat ships of the world at the turn of the XX–XXI centuries. Part IV–II (A–Z). Corvettes and boats. Current state and development prospects: Handbook.]. SPb, Galeya Print Publ., 2004. 248 p.
- [2] Burkinskiy B. V., Kotlubai O. M., Stepanov V. M. Formuvannya morskoi doktryny Ukrainy [Formation of the Maritime Doctrine of Ukraine]. Visnyk NAN Ukrainy [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine], 2008, no. 9, pp. 6–11.
- [3] Ivanov N. I. Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika borby s shumom. [Engineering acoustics. Theory and practice of noise control]/ Moscow, Universitetskaya kniga, Logos Publ., 2008. 424 p.
- [4] Izak G. D., Gomzikov E. A. Shum na sudakh i metody ego umensheniya [Noise on ships and methods for reducing it]. Moscow, Transport Publ., 1987. 303 p.
- [5] Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheyndlin A. E. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical thermodynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 416 p.
- [6] Project 58250 Corvettes. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki>
- [7] Kuznetsov V. V., Yakimovich A. V. Issledovaniye sopryazhennogo teploobmena v elementakh turbinnykh ustanovok [Study of the coupled heat transfer in the elements of turbine plants]. Nasosy. Turbiny. Sistemy [Pumps. Turbines. Systems], 2013, no. 3 (8), pp. 71–79.
- [8] Dymo B. V., Voloshin A. Yu., Epifanov A. A., Kuznetsov V. V. Povysheniye effektivnosti gazovozdushnogo okhladitelya korabelnoy energeticheskoy ustanovki [Increasing the efficiency of the gas-air cooler of the ship power plant]. Problemy regionalnoy energetiki. Moldova, ANRM, Institut Energetiki Publ., 2017, no. 2(34), pp. 112–123. Available at: [http://journal.ie.asm.md/assets/files/13\\_02\\_34\\_2017.pdf](http://journal.ie.asm.md/assets/files/13_02_34_2017.pdf)
- [9] Khomenko A. I., Romanov V. V., Chernov S. K. et al. Rozrobka i vprovadzhennia sudnovykh GTD DP NVKG «Zoria»-«Mashproekt» [Development and implementation of marine GTE SE RPCGTC “Zorya”-“Mashproekt”]. Mykolaiv: Torubara O.S. Publ., 2010. 288 p.
- [10] Khalatov A. A., Romanov V. V., Borisov I. I., Dashevskiy Yu. Ya., Severin S. D. Teploobmen i gidrodinamika pri tsiklonnom okhlazhdenii lopatok gazovykh turbin [Heat transfer and hydrodynamics during cyclonic cooling of gas turbine blades]. Kiev, Institut tekhnicheskoy teplofiziki NAN Ukrainy, 2010. 317 p.
- [11] Storozhevoy korabl 2-go ranga blizhney morskoy zony (SKR) / korvet pr. 20380 «Korvet-1» STEREGUSHCHIY [Second-rank patrol ship of the near sea zone (RPS) / corvette of the project 20380 “Corvette-1” STEREGUSHCHIY]. Available at: <http://militaryrussia.ru>.
- [12] Khalatov A. A. Teploobmen i gidrodinamika okolo poverkhnostnykh uglubleniy (lunok) [Heat transfer and hydrodynamics near surface indentations (dimples)]. Kiev, NAN Ukrainy, ITTF Publ., 2005. 76 p.
- [13] Heat recovery silencers for reciprocating engines. Available at: <http://www.maximsilencers.com>.
- [14] MTU\_Marine\_Navy. Available at: <http://www.mtu-online.com>.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современная политико-экономическая ситуация в Украине такова, что для обеспечения государственных интересов на Черном и Азовском морях необходимо срочное развитие собственных Военно-морских сил [2]. Это также подтверждается Военной доктриной Украины (утверждена Указом Президента Украины от 24 сентября 2015 г. № 555/2015), которая предусматривает как один из путей формирования национальных оборонных возможностей возрождение военно-морского потенциала государства, развитие Военно-Морских Сил Вооруженных Сил Украины, которые должны быть способными защищать берего-

вую линию Черного и Азовского морей в исключительной (морской) экономической зоне, а также привлекаться к международным операциям НАТО и ЕС. Морской доктриной Украины на период до 2035 года (утверждена постановлением Кабинета Министров Украины от 7 октября 2009 г. № 1307) среди основных задач государственной морской политики Украины предусмотрено решение задач, возложенных на ВМС Украины и Морские части Государственной пограничной службы, на уровне, достаточном для участия в обеспечении территориальной целостности, политической и экономической независимости Украины, нерушимости ее государственной границы

на море и защиты других национальных интересов в сфере морской и военно-морской деятельности государства.

Основой возрождаемых Военно-Морских сил должны стать корабли класса «корвет» [2].

Корвет — класс многоцелевых военных кораблей ближней морской зоны, предназначенных для дозорной и конвойной службы, противовоздушной и противолодочной обороны военно-морских баз и пунктов базирования [1].

Эффективность реализации поставленных перед корветами задач во многом зависит от возможности обеспечения их скрытности. Общей концепцией обеспечения скрытности действий корабля является снижение его физических полей. В составе этих полей значительное место занимают температурное и акустическое поля. Поэтому снижение уровней этих полей энергетической установки в составе аналогичных полей всего корабля является актуальной научно-технической проблемой.

Уровень указанных полей зависит от мощностей главной и вспомогательной энергетических установок корабля и распределения их работы во времени. Главная энергетическая установка имеет широкую спектрограмму нагрузок в отличие от корабельной электроэнергетической установки, приводные двигатели которой работают с более постоянной нагрузкой. Поэтому дальнейшее исследование будет направлено на рассмотрение способа снижения уровней теплового и акустического полей вспомогательных дизель-генераторов.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Источниками теплового и акустического полей являются отработавшие газы приводных двигателей, которые имеют температуру 350...400 °С и скорость 30...50 м/с [11, 14]. Однако, в отличие от судовых газораздающих систем, задачей их корабельных аналогов является не только их отвод в окружающую среду, но и снижение температуры, акустического давления и интенсивности излучения.

Анализ архитектурного исполнения кораблей класса корвет [1, 6] показал, что для этого типа кораблей преимущественно используется отвод отработавших газов в дымовую трубу (рис. 1).

Одним из наиболее распространенных способов охлаждения газов в дымовой трубе в отечественной корабельной энергетике является использование газоздушных охладителей эжекторного типа [8] (рис. 2).

Для работы охладителя такого типа используется энергия отработавших газов. В объеме охладителя происходит активное перемешивание потока отработавших газов от главных и вспомогательных двигателей (эжектируемый поток) с внешним атмосферным потоком воздуха (эжектируемый поток), в результате которого происходит значительное снижение температуры отработавших газов.

Одним из путей совершенствования газоздушных охладителей такого типа является комплексное снижение температуры и скорости отработавших газов вспомогательных двигателей при утилизации их теплоты с дополнительным получением горячей



Рис. 1. Корвет проекта 58250

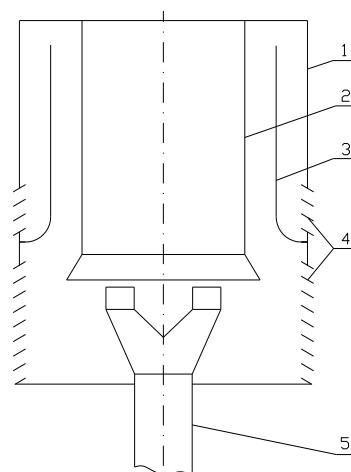


Рис. 2. Газовоздушный охладитель эжекторного типа:  
1 — кожух; 2 — смеситель; 3 — экран смесителя; 4 — воздухоприемные жалюзи; 5 — газоход

воды для корабельных нужд. Для этого, учитывая повышенные требования к массогабаритным показателям энергетического оборудования в корабельных энергетических установках, целесообразно использовать глушители шума двигателей, совмещенные с теплообменной поверхностью.

Идея совмещения глушителя с теплообменной поверхностью не нова. На рис. 3 приведена принципиальная схема глушителя типа *mft* компании *Maxim Silencers Inc.*, США [13].

Конструкция представляет собой глушитель расширительного типа, в котором отходящие газы через подводящий патрубок 1 поступают в расширительную камеру 2, совершают поворот на 180° и поступают в теплообменную поверхность 3 типа «труба-в-трубе», нагревая находящуюся во внутренней трубе воду. Далее, через выпускную камеру 4 и отводящий патрубок 5 газы поступают в систему газоотвода.

Согласно информации компании-производителя [13], степень глушения шума в таком глушителе достигает 24 дБ. Параметры горячей воды не сообщаются. Для повышения эффективности теплопередачи внутренние трубы теплообменной поверхности выполнены оребренными. Таким образом, представленная конструкция обеспечивает глушение шума в расширительной камере и теплообменной поверхности за счет снижения скорости и температуры отработавших газов.

Дальнейшее совершенствование оребренных теплообменных поверхностей возможно за счет профилирования ребер луночными системами. Это позволит обеспечить опережающий рост интенсивности теплоотдачи над гидродинамическим сопротивлением на её достижение [10, 12].

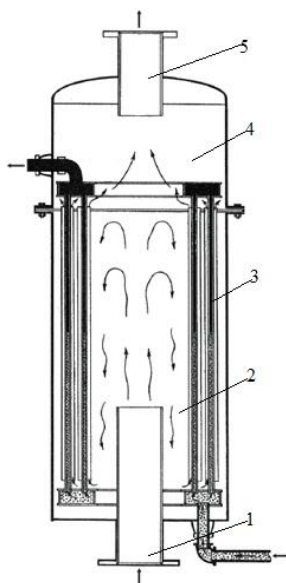


Рис. 3. Принципиальная схема глушителя типа *mft* компании *Maxim Silencers Inc.*

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** — повышение скрытности кораблей класса корвет путём снижения теплового и акустического полей за счёт интенсификации теплоотдачи в профилированных теплообменных поверхностях глушителей вспомогательных двигателей.

Для достижения указанной цели необходимо:

- обосновать расположение луночных систем на оребренных поверхностях;
- исследовать теплогидравлическую эффективность профилированных оребренных поверхностей с луночными системами;
- оценить уровень снижения температуры и акустического давления отработавших газов после глушителя и на срезе дымовой трубы;
- оценить изменение скрытности корабля за счет интенсификации теплообмена в профилированных оребренных трубчатых пучках.

**Объектом исследования** являются процессы течения, теплопередачи и шума при расширении и охлаждении отработавших газов в профилированных оребренных трубчатых пучках. **Предмет исследования** — условия и показатели интенсификации процессов теплоотдачи при обтекании профилированных оребренных трубчатых пучков.

**Метод исследования** — математическое моделирование процессов гидродинамики и теплообмена на основе фундаментальных уравнений движения и теплоотдачи жидкости.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Физический механизм течения потока по луночным системам сходный с эффектом природных вихрей типа «торнадо». При прохождении через лунки поток формирует зону пониженного давления, обеспечивая при этом отрыв пограничного слоя и интенсифицируя теплоотдачу. Таким образом, расположение лунок на ребре определялось из геометрических размеров ребер и условия «неналожения» соседних вихрей: линейное, коридорное и шахматное (рис. 4).

Геометрические размеры области течения принимались в соответствии с [13].

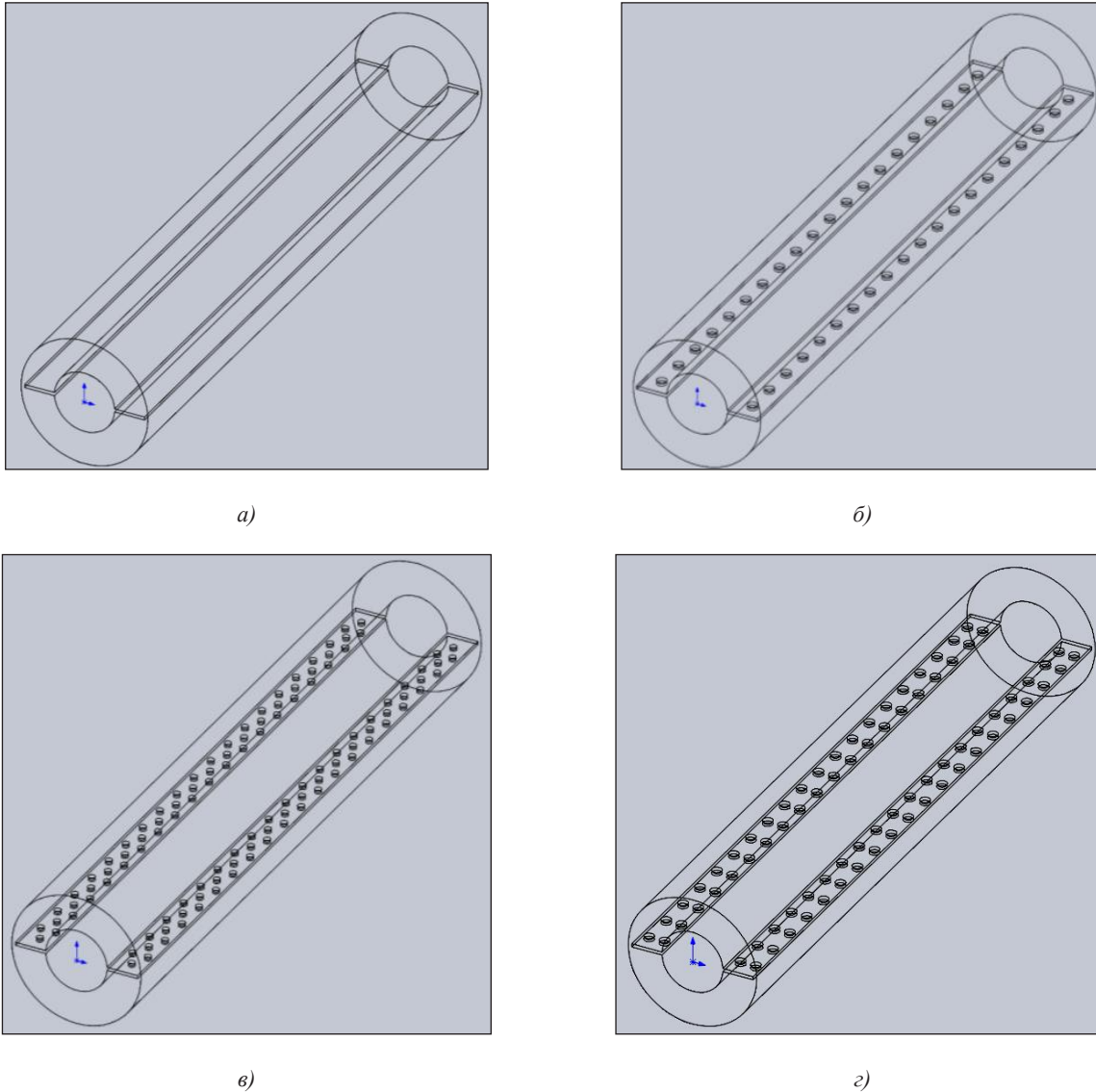
Параметры лунок принимались в соответствии с рекомендациями [12] и размерами ребра и составляли: для линейного и коридорного расположений  $d/h = 0,33$  ( $d$  — диаметр лунки;  $h$  — высота лунки), шахматного  $d/h = 0,5$ .

Параметры потока газов принимались в соответствии с рекомендациями [14]: скорость газов 20...50 м/с, температура газов 300 °С, температура стенки 200 °С.

Оценка эффективности интенсификации теплоотдачи выполнялась с использованием показателя фактора аналогии Рейнольдса [9].

Для моделирования течения в представленных моделях применялась хорошо зарекомендовавшая себя в рассматриваемых условиях *RSM*-модель турбулентности [7].





**Рис. 4.** Варианты профилирования оребренной поверхности луночными системами:  
 а — базовая поверхность; б — линейное расположение; в — шахматное расположение; з — коридорное расположение

Анализ состава корабельных энергетических установок показал, что для современных корветов мощность главной энергетической установки составляет около 14700 кВт (20000 л. с.), количество дизель-генераторов от 2 до 4 мощностью 450...600 кВт.

В газозоудном охладителе происходит смешение потоков отработавших газов и эжектируемого воздуха. Фактически процесс смешения осуществляется в постоянном объеме охладителя. Принципиальная схема процесса представлена на рис. 5.

Принимая во внимание, что отработавшие газы имеют свойства идеального газа, температуру потока после смешения можно определить как [5]:

$$t_{\text{тр}} = \frac{t_{\text{ог}}^{\text{ГД}} \cdot G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + t_{\text{ог}}^{\text{ВД}} \cdot \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}} + t_{\text{эв}} \cdot G_{\text{эв}}}{G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}} + G_{\text{эв}}}, ^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{ог}}^{\text{ГД}}$ ,  $t_{\text{ог}}^{\text{ВД}}$ ,  $t_{\text{эв}}$  — соответственно температуры отработавших газов главного двигателя, вспомогательных двигателей и эжектируемого воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $G_{\text{ог}}^{\text{ГД}}$ ,  $\Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}$ ,  $G_{\text{эв}}$  — соответственно расходы отработавших газов главного двигателя, вспомогательных двигателей и эжектируемого воздуха, кг/с.

Но, учитывая отсутствие значений  $G_{\text{эв}}$ , можно оценить только дополнительное снижение температуры на срезе дымовой трубы следующим образом:

— температура на срезе трубы без использования интенсификации теплопередачи в глушителях вспомогательных двигателей

$$t_{\text{тр}} = \frac{t_{\text{ог}}^{\text{ГД}} \cdot G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + t_{\text{ог}}^{\text{ВД}} \cdot \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}}{G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}}, ^\circ\text{C};$$

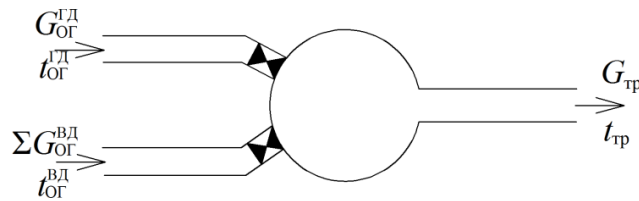


Рис. 5. Принципиальная схема смешения потоков

– температура на срезе трубы с использованием интенсификации теплопередачи в глушителях вспомогательных двигателей

$$t'_{\text{тр}} = \frac{t_{\text{ог}}^{\text{ГД}} \cdot G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + (t_{\text{ог}}^{\text{ВД}} - \Delta t) \cdot \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}}{G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}}, \text{ } ^\circ\text{C};$$

где  $\Delta t$  — дополнительное снижение температуры отработавших газов за счет интенсификации теплопередачи в глушителях вспомогательных двигателей;

– дополнительное снижение температуры

$$\Delta t_{\text{тр}} = t_{\text{тр}} - t'_{\text{тр}} = \Delta t \cdot \frac{\Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}}{G_{\text{ог}}^{\text{ГД}} + \Sigma G_{\text{ог}}^{\text{ВД}}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Снижение акустического давления при охлаждении отработавших газов рассчитывалось по рекомендациям [3, 4].

Результаты расчета обтекания поверхностей без использования лунок и с шахматным их расположением представлены на рис. 6 и 7. Анализ результатов показывает участок тепловой стабилизации, который на поверхности без интенсификации составляет около  $10D_T$  ( $D_T$  — гидравлический диаметр канала), для шахматного расположения лунок снижается до  $2,25D_T$ . Это приводит к снижению температуры на участке без интенсификации  $0,42^\circ\text{C}$ , на участке с шахматным расположением —  $0,72^\circ\text{C}$ .

На рис. 8 приведены зависимости эффективности теплоотдачи от скорости потока для четырех рассмотренных вариантов, которые представлены на рис. 4.

По сравнению с базовым вариантом (оребренная непрофилированная поверхность, рис. 4, а) рост те-

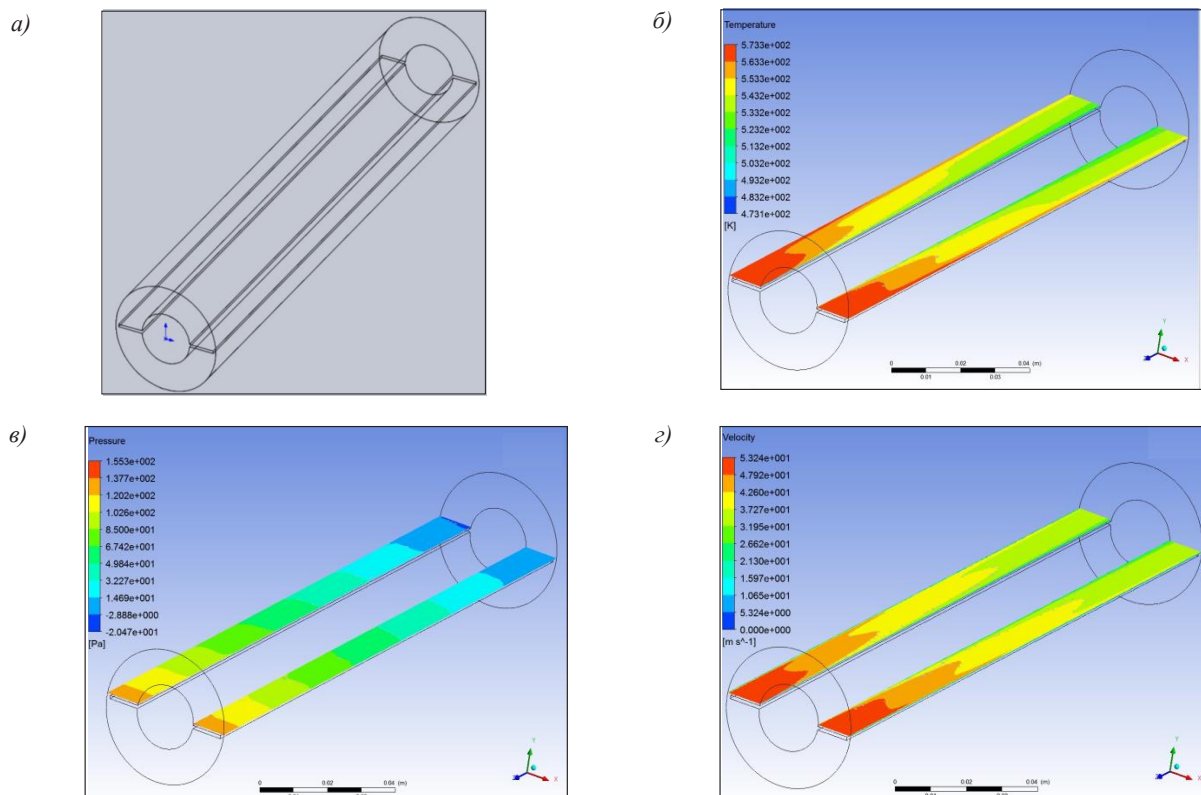


Рис. 6. Результаты обтекания поверхности: а — вариант поверхности; б — распределение температуры; в — распределение давления; г — распределение скорости

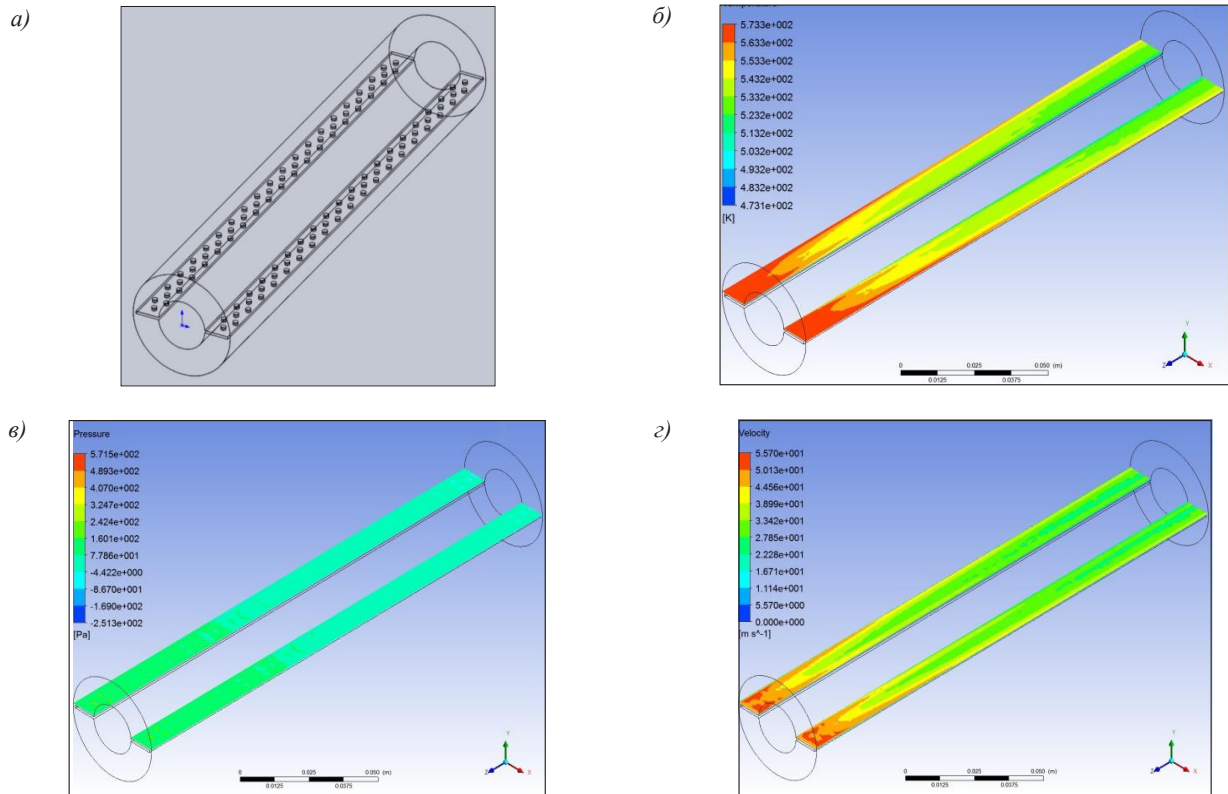


Рис. 7. Результаты обтекания поверхности: а — вариант поверхности; б — распределение температуры; в — распределение давления; г — распределение скорости

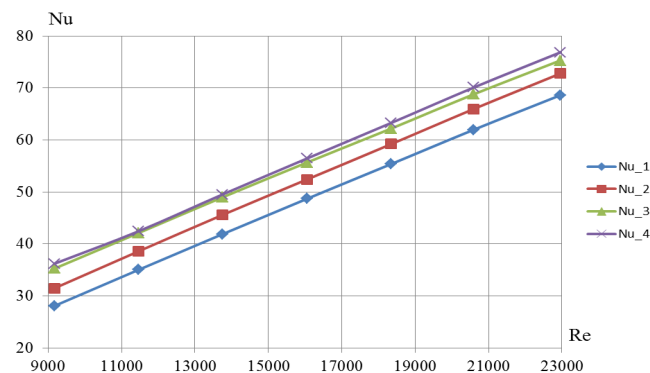


Рис. 8. Зависимость эффективности теплоотдачи от скорости движения потока: Nu\_1 — рис. 4, а; Nu\_2 — рис. 4, б; Nu\_3 — рис. 4, в; Nu\_4 — рис. 4, г.

плоотдачи носит практически линейный характер, снижается по мере повышения скорости потока и составляет, в зависимости от скорости, 12,2...6,1 % — рис. 4, б; 25,5...9,7 % — рис. 4, в; 28,8...12,1 % — рис. 4, г.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обработка полученных данных по показателю эффективности FAR представлена в табл. 1. В качестве базового варианта для сравнения принимался вариант продольного обтекания оребренной непро-

филированной поверхности (см. рис. 4, а). Номер указанных вариантов соответствует рис. 4.

Полученные результаты соотносятся с экспериментальными данными [7, 10].

Представленные данные показывают, что с повышением скорости потока  $v_{\text{пот}}$ , обтекающего поверхность, эффективность теплоотдачи несколько снижается. При максимальной скорости потока, при которой производилось моделирование, эффективность теплоотдачи выше у варианта 4 в.

Результаты оценки изменения температурного и акустического полей корабельной энергетической установки поданы в табл. 2. Высота глушителя и высота теплообменной поверхности принимались по данным [13] и являлись постоянными величинами при расчете.

Приведенные результаты показывают, что наиболее эффективно использование шахматного расположения лунок, позволяющее обеспечить дополнитель-

ное суммарное снижение температуры на срезе дымовой трубы  $\Delta t_{\text{тр}} = 24,3 \dots 29,8$  °С и дополнительное снижение звукового давления 10,7...13,3 дБ.

Если же в качестве условия интенсификации принимать снижение габаритных показателей глушителя, то совместный анализ результатов таблиц 1 и 2 показывает, что возможно снижение высоты теплообменной поверхности с 1689,1...2053,3 мм до 1530,0...1853,2 мм.

**Таблица 1.** Эффективность теплоотдачи при обтекании профилированных оребренных поверхностей

| $v_{\text{пот}}, \text{ м/с}$ | Вариант 4б |       | Вариант 4в |       | Вариант 4г |       |
|-------------------------------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|                               | $f/f_0^*$  | $FAR$ | $f/f_0$    | $FAR$ | $f/f_0$    | $FAR$ |
| 20                            | 1,068      | 1,100 | 1,09       | 1,123 | 1,15       | 1,181 |
| 25                            | 1,071      | 1,094 | 1,09       | 1,111 | 1,15       | 1,180 |
| 30                            | 1,071      | 1,092 | 1,08       | 1,099 | 1,15       | 1,177 |
| 35                            | 1,071      | 1,090 | 1,08       | 1,097 | 1,15       | 1,175 |
| 40                            | 1,072      | 1,085 | 1,08       | 1,095 | 1,16       | 1,173 |
| 45                            | 1,076      | 1,082 | 1,09       | 1,092 | 1,16       | 1,171 |
| 50                            | 1,080      | 1,079 | 1,09       | 1,091 | 1,17       | 1,169 |

\* $f/f_0$  — изменение гидродинамического сопротивления при обтекании поверхности.

**Таблица 2.** Результаты оценки суммарного изменения температурного и акустического полей корабельной энергетической установки

| Высота глушителя, мм | Высота теплообменной поверхности, мм | Линейное расположение                       |                                        |                 | Коридорное расположение                     |                                        |                 | Шахматное расположение                      |                                        |                 |
|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------|
|                      |                                      | $t_{\text{ог}}^{\text{ВД}}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t_{\text{тр}}, ^\circ\text{C}$ | $L, \text{ дБ}$ | $t_{\text{ог}}^{\text{ВД}}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t_{\text{тр}}, ^\circ\text{C}$ | $L, \text{ дБ}$ | $t_{\text{ог}}^{\text{ВД}}, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t_{\text{тр}}, ^\circ\text{C}$ | $L, \text{ дБ}$ |
| 2413,0               | 1689,1                               | 13,7                                        | 4,1                                    | 5,3             | 37,2                                        | 15,1                                   | 8,8             | 62,0                                        | 24,3                                   | 10,7            |
| 2483,2               | 1724,7                               | 14,0                                        | 5,2                                    | 5,4             | 38,1                                        | 16,2                                   | 9,0             | 63,4                                        | 25,5                                   | 11,0            |
| 2590,8               | 1780,5                               | 14,6                                        | 6,4                                    | 5,7             | 39,5                                        | 17,5                                   | 9,3             | 65,6                                        | 26,6                                   | 11,4            |
| 2768,6               | 1851,7                               | 15,3                                        | 7,3                                    | 5,9             | 41,2                                        | 18,6                                   | 9,7             | 68,5                                        | 27,5                                   | 11,9            |
| 2870,2               | 1978,7                               | 16,6                                        | 8,1                                    | 6,5             | 44,4                                        | 20,8                                   | 10,5            | 73,5                                        | 28,7                                   | 12,7            |
| 2971,8               | 2053,3                               | 17,3                                        | 9,4                                    | 6,8             | 46,3                                        | 22,4                                   | 11,0            | 76,5                                        | 29,8                                   | 13,3            |

Общее физическое поле корабля формируется за счет теплового, акустического, электромагнитного, гидродинамического полей. Вероятность обнаружения теплового следа корабля, формируемого струей выпускных газов, можно оценить как

$$P = A \left( \frac{T}{100} \right)^4,$$

где  $T$  — температура газов, К. Изменение вероятности при снижении температуры газов

$$\delta P_{\text{т}} = \left( \frac{T_{\text{тр}}^{\text{УТ}}}{T_{\text{тр}}^{\text{Без УУ}}} \right)^4,$$

где  $T_{\text{тр}}^{\text{УТ}}, T_{\text{тр}}^{\text{Без УУ}}$ , — соответственно температуры отработавших газов на срезе дымовой трубы с приме-

нением утилизации и без утилизации теплоты, а изменение скрытности корабля по тепловому следу можно представить как

$$P_{\text{к}} = B \cdot (1 - \delta P_{\text{т}}),$$

где  $A$  и  $B$  — комплексные переменные, которые учитывают влияние требований тактико-технического задания на энергетическую установку.

Таким образом, учитывая последнюю зависимость, несложно получить, что снижение температуры отработавших газов на срезе дымовой трубы на 5...30 °С приведет к повышению его скрытности по тепловому следу на 3,2...17,9 %.

В качестве дополнительного эффекта предлагаемого решения можно отметить, что его реализация в судовых энергетических установках позволит сни-



зять тепловое загрязнение окружающей среды за счет снижения температуры отработавших газов, а также улучшить условия работы экипажа за счет снижения звукового давления.

**ВЫВОДЫ.** 1. Впервые для конструктивных схем «труба в трубе» глушителей шума с оребренной внутренней трубой с высотой ребра, которая соответствует радиальному зазору, определены распределения температур на начальном и стабилизированном термическом участках для линейного, коридорного и шахматного расположений лунок на двух ребрах, расположенных в диаметральной плоскости.

2. Впервые для соотношений размеров канала «труба-в-трубе» (внешнего диаметра внутренней трубы  $d$ , внутреннего диаметра внешней трубы  $D$  и длины  $l$ )  $d \times D \times l = 20 \times 40 \times 200$  мм получено, что за счет интенсификации процессов теплообмена на ребрах с лунками участок тепловой стабилизации по срав-

нению с гладкими ребрами, для которых длина этого участка составляет  $x = 10D_r$  ( $D_r$  — гидравлический диаметр канала), для линейного расположения составляет  $x = 5,2D_r$ , коридорного —  $x = 3,25D_r$ , шахматного —  $x = 2,25D_r$ .

3. Впервые для конструктивных схем «труба-в-трубе» глушителей шума с внутренней трубой с двумя ребрами, расположенными в диаметральной плоскости, получено, что снижение температуры на участке тепловой стабилизации для линейного расположения лунок составляет  $0,42^\circ\text{C}$ , коридорного —  $0,65^\circ\text{C}$ , шахматного —  $0,72^\circ\text{C}$ .

4. Рассчитано, что снижение температуры отработавших газов на срезе дымовой трубы, за счет интенсификации теплоотдачи, на  $5 \dots 30^\circ\text{C}$  позволит снизить звуковое давление дополнительно на  $6,8 \dots 13,3$  дБ и приведет к повышению его скрытности по тепловому следу на  $3,2 \dots 17,9\%$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Апальков, Ю. В. Боевые корабли мира на рубеже XX–XXI веков [Текст]. – Часть IV–II (А–Я). Корветы и катера. Современное состояние и перспективы развития : справочник / Ю. В. Апальков. – С.Пб. : Галей Принт, 2004. – 248 с.
- [2] Буркинський, Б. В. Формування морської доктрини України [Текст] / Б. В. Буркинський, О. М. Котлубай, В. М. Степанов // Вісн. НАН України. – 2008. – № 9. – С. 6–11.
- [3] Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом [Текст] / Н. И. Иванов. – М. : Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
- [4] Изак, Г. Д. Шум на судах и методы его уменьшения [Текст] / Г. Д. Изак, Э. А. Гомзиков. – М. : Транспорт, 1987. – 303 с.
- [5] Кириллин, В. А. Техническая термодинамика [Текст] / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 4-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
- [6] Корветы проекта 58250 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
- [7] Кузнецов, В. В. Исследование сопряженного теплообмена в элементах турбинных установок [Текст] / В. В. Кузнецов, А. В. Якимович // Насосы. Турбины. Системы. – 2013. – № 3 (8). – С. 71–79.
- [8] Повышение эффективности газоздушного охладителя корабельной энергетической установки [Электронный ресурс] / Б. В. Дымо, А. Ю. Волошин, А. А. Елифанов, В. В. Кузнецов // Проблемы региональной энергетики. – Молдова : АНРЕМ, Институт Энергетики, 2017. – № 2 (34). – С. 112–123. – Режим доступа : <http://journal.ie.asm.md>.
- [9] Розробка й впровадження суднових ГТД ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект» [Текст] / А. І. Хоменко, В. В. Романов, С. К. Чернов [та ін.]. – Миколаїв : Видавництво Торубари О. С., 2010. – 288 с.
- [10] Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин [Текст] / А. А. Халатов, В. В. Романов, И. И. Борисов, Ю. Я. Дашевский, С. Д. Северин. – К. : Институт технической теплофизики НАН Украины, 2010. – 317 с.
- [11] Сторожевой корабль 2-го ранга ближней морской зоны (СКР) / корвет пр. 20380 «Корвет-1» СТЕРЕГУЩИЙ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://militaryrussia.ru>.
- [12] Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика околоповерхностных углублений (лунок) [Текст] / А. А. Халатов. – К. : НАН Украины, ИТТФ, 2005. – 76 с.
- [13] Heat recovery silencers for reciprocating engines [Electronic resource]. – Available at : <http://www.maximsilencers.com>.
- [14] MTU\_Marine\_Navy [Electronic resource]. – Available at : <http://www.mtu-online.com>.

© В. В. Кузнецов, С. А. Кузнецова

Надійшла до редколегії 19.11.2018

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко