

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-126-134

УДК 621.565.93/95

EDN: ICNKSE

А.М. Белов<sup>1</sup>, С.С. Гоняева<sup>2</sup>, В.В. Кожемякин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗАБОРТНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования является забортный теплообменный аппарат – один из главных элементов системы аварийного расхолаживания судовых ядерных энергетических установок. Цель – определение мощности, отводимой от теплоносителя забортной водой, а также температур теплоносителя, забортной воды и стенок труб забортного теплообменного аппарата (ЗТО).

**Материалы и методы.** Решение задачи осуществлялось путем моделирования методом конечных элементов моделью турбулентности  $k-\omega$  SST в программном комплексе ANSYS®. Для построения мозаичной сетки использован метод Poly-Hexcore. Рассмотрен обратный алгоритм Катхилла – Макки, используемый для построения т.н. дерева уровней, инициируемого из исходной ячейки в области расчетной сетки.

**Основные результаты.** Определены температуры сред на выходе из ЗТО, а также установлено количество тепла, отводимого от каждой секции труб. Построены поля температур внешней и внутренней поверхностей стенок и трубной доски.

**Заключение.** Рассмотрен забортный теплообменный аппарат системы аварийного расхолаживания. Проведены прямой тепловой и поверочный расчеты теплообменных процессов в ЗТО методом конечных элементов. Определена мощность, отводимая от теплоносителя по секциям, а также поля температур теплоносителя, забортной воды и стенок труб ЗТО. Установлено, что охлаждение теплоносителя забортной водой происходит неравномерно в связи с различным типом движения сред: так, забортная вода имеет ламинарный режим течения, а теплоноситель – турбулентный режим, что говорит о незначительном наличии вихрей и перемешивания потоков забортной воды.

**Ключевые слова:** забортный теплообменный аппарат, теплоноситель, забортная вода, теплообменные процессы, мозаичная сетка.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-126-134

UDC 621.565.93/95

EDN: ICNKSE

A.M. Belov<sup>1</sup>, S.S. Gonyaeva<sup>2</sup>, V.V. Kozhemyakin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

## OUTBOARD HEAT EXCHANGER OPERATION: FE STUDY

**Object and purpose of research.** This paper discusses outboard heat exchangers, i.e. one of the most important elements in emergency cooldown systems of marine nuclear reactors. The purpose of the study was to determine the amount of heat taken by sea water from the coolant, as well as to determine the temperatures of coolant, sea water and tube walls of outboard heat exchanger.

**Materials and methods.** The study was performed through FE simulation in ANSYS® software package with  $k-\omega$  turbulence model. Mosaic meshing was performed as per Poly Hexcore method. The study also discusses reverse Cuthill – McKee (RCM) algorithm used to build up the tree of levels initiated from the initial cell in the calculation domain.

*Для цитирования:* Белов А.М., Гоняева С.С., Кожемякин В.В. Исследование методом конечных элементов теплообменных процессов забортного теплообменного аппарата. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 3(405): 126–134.

*For citations:* Belov A.M., Gonyaeva S.S., Kozhemyakin V.V. Outboard heat exchanger operation: FE study. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 3(405): 126–134 (in Russian).

**Main results.** The study yielded the temperatures of media at the exit of outboard heat exchanger, as well as heats removed from each tube section. It was also possible to obtain thermal fields for both inner and outer tube surfaces, as well as for the tube plate.

**Conclusion.** The paper discusses outboard heat exchanger for emergency cooldown system. It presents FE calculations (both direct and verification) of heat exchanger thermodynamics. The study yielded the heats removed from each tube section, as well as thermal fields for coolant, sea water and heat exchanger tube walls. It was found that sea water does not remove the heat from the coolant in a uniform manner because of the difference in flow patterns: sea water flow is laminar, whereas coolant flow is turbulent, which brings about insignificant eddies that mix sea water flows.

**Keywords:** outboard heat exchanger, coolant, sea water, heat exchange, mosaic meshing.

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Одним из направлений повышения безопасности ядерных реакторов морских объектов является использование систем аварийного расхолаживания (САР) с неограниченным временем действия.

На кафедре судовой ядерной и водородной энергетики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ) созданы инжекторные САР, позволяющие отводить остаточное тепловыделение к забортной воде. В таких системах особые требования предъявляются к забортному теплообменному аппарату. В частности, ЗТО должен обладать невысоким гидравлическим сопротивлением по забортной воде для обеспечения естественной циркуляции. Этим требованиям в значительной степени отвечает ЗТО, конструкция которого предложена в патенте [5].

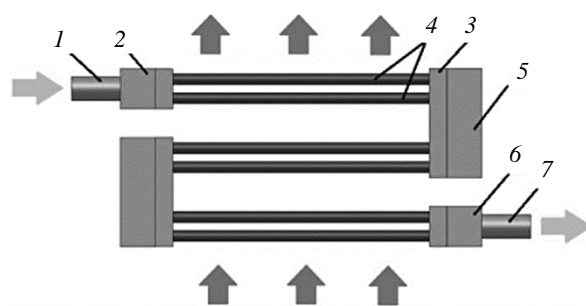
Схема такого ЗТО представлена на рис. 1.

Рассмотренный теплообменный аппарат состоит из идентичных горизонтальных секций, в каждой из которых имеется один или несколько слоев труб. Трубы расположены в шахматном порядке. Находящиеся по бокам коллекторы собирают теплоноситель из труб одной секции и раздают по трубам другой секции.

В данном ЗТО забортная вода (ЗВ) движется снизу вверх в межтрубном пространстве. Поперечное обтекание труб, с одной стороны, гарантирует более эффективную теплоотдачу, с другой, межтрубное пространство позволяет обеспечить небольшое гидравлическое сопротивление по сравнению с установкой перегородок для поперечного обтекания, что приводит к естественной циркуляции по ЗВ даже при ее небольшом подогреве [6–9].

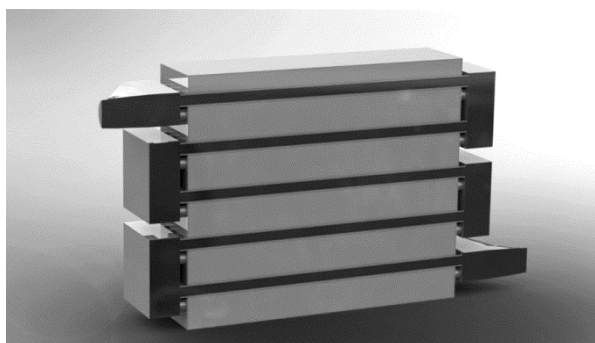
Уже начальные исследования [5] показали, что патрубок, подводящий теплоноситель (ТН) к первому коллектору, создает струю, которая попадает в центральные трубки и вызывает обратный ток теплоносителя в периферийных трубках. Для перехода

к более равномерному распределению было предложено установить на входе в первый коллектор короткий диффузор, который существенно снижает неравномерность раздачи охлаждаемой воды по трубкам в первой секции. ЗТО с таким диффузором представлен на рис. 2.



**Рис. 1.** Теплообменный аппарат с двумя параллельными и шестью общими слоями труб со схемой движения потоков охлаждаемой и охлаждающей сред: 1 – входной патрубок; 2 – входной коллектор; 3 – трубные доски; 4 – слои труб; 5 – промежуточный коллектор; 6 – выходной коллектор; 7 – выходной патрубок

**Fig. 1.** Flow paths of the cooling medium and the coolant in a heat exchanger with six layers of two tubes each: 1 – inlet branch; 2 – inlet header; 3 – tube plates; 4 – tube layers; 5 – intermediate header; 6 – outlet header; 7 – outlet branch



**Рис. 2.** Забортный теплообменный аппарат

**Fig. 2.** Outboard heat exchanger

## Прямой расчет забортного теплообменного аппарата

Direct calculation of heat exchanger

Тепловой и конструктивный расчет ЗТО был проведен в соответствии с методиками, изложенными в справочниках М.А. Михеева [12], Б.С. Петухова [13] и Х. Хаузена [10]. В ходе расчетов были выбраны исходные конструктивные соотношения для компоновки ЗТО и определены рабочие площади теплопередающей поверхности.

В расчете ЗТО применялись справочные материалы по расчету теплофизических свойств, которые позволяют определить все основные теплофизические параметры (вязкость, энтальпию, теплопроводность, теплоемкость, плотность и число Прандтля) в зависимости от температуры и давления. Параметры жидкости были позаимство-

ваны из справочников Н.Б. Варгафтика [11] и С.Н. Богданова [14]. Исходные данные были взяты согласно предыдущим расчетам ЗТО [5] (табл. 1). Результаты расчета приведены соответственно в табл. 2.

Первым шагом в прямом расчете ЗТО являлось определение коэффициентов теплоотдачи со стороны ТН через стенку труб к ЗВ. Были заданы граничные условия для температур входа и выхода ТН и ЗА, а также расходы ЗВ и ТН. Исходя из выбранной геометрии обоих трактов ЗТО по результатам прошлых работ [5] было определено проходное сечение ТН и скорость в трубках без учета неравномерности раздачи, а также в первом приближении была задана полная длина труб секций ЗТО.

При помощи итеративных вычислений была получена окончательная длина труб, коэффициенты теплоотдачи и коэффициент теплопередачи, представленные в табл. 2.

**Таблица 1.** Исходные данные

**Table 1.** Input data

Наименование параметра	Значение
Расход теплоносителя (ТН), кг/ч (кг/с)	2084,4 (0,5794)
Расход забортной воды (ЗВ), кг/ч (кг/с)	3126,6 (0,8685)
Температура на входе ТН, °С	110
Температура на выходе ТН, °С	85
Температура на входе ЗВ, °С	5
Температура на выходе ЗВ, °С	24
Тепловая мощность, кВт	61

**Таблица 2.** Результаты расчета

**Table 2.** Calculation results

Наименование параметра	Значение
Площадь поверхности теплообмена, м <sup>2</sup>	0,8
Коэффициент теплоотдачи со стороны ТН, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	10439
Коэффициент теплоотдачи со стороны ЗВ, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	1527
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	934,82
Расчетная длина трубок, м	1,566
Количество трубок в одной секции, шт.	16
Тип трубок	6×1

## Твердотельная модель заборного теплообменного аппарата

3D model of heat exchanger

На основании результатов конструктивного и теплового расчетов было принято решение разбить длину труб на пять равных участков для уменьшения ширины и удобства компоновки САР. После этого была создана твердотельная модель ЗТО, состоящая из трех частей:

- проточной части теплоносителя, включающей входной диффузор, шесть коллекторов, пять параллельных секций труб и выходной диффузор (рис. 3);
- проточной части забортовой воды, включающей только один элемент – полость с вырезами под трубные секции. Модель была искусственно увеличена на 30 мм для создания начального входного и выходного участков, чтобы после прохождения секций труб было осуществлено смешение потоков, омывающих трубы, и отсутствие обратных токов на выходе, т.к. это негативно сказывается на сходимости задачи при моделировании (рис. 4);
- секций труб и трубных досок, которые обеспечивают передачу тепла от теплоносителя к забортовой воде (рис. 5).

Для исследования процессов теплообмена были созданы т.н. мнимые стенки, т.е. на самом деле через данную плоскость осуществляется перенос среды (рис. 6, см. вклейку). Такие плоскости появились в каждом из шести коллекторов для определения температуры после прохождения одной секции труб. Кроме того, эти плоскости находятся посередине каждой трубки в пяти секциях труб, что необходимо для определения массовых расходов через каждую трубку [5], а также температуры в середине участка и передаваемой мощности на участке.

На рис. 6 показано различие двух видов стенок, между фиолетовой и оранжевой областью находится мнимая стенка и полностью отсутствует приграничный слой, что позволяет среде беспрепятственно проходить из одной области в другую. Между оранжевой и бирюзовой областью находится непроницаемая стенка, т.е. это различные области, на сеточной модели это явно показано при помощи пограничных пристеночных слоев с одной и другой стороны.

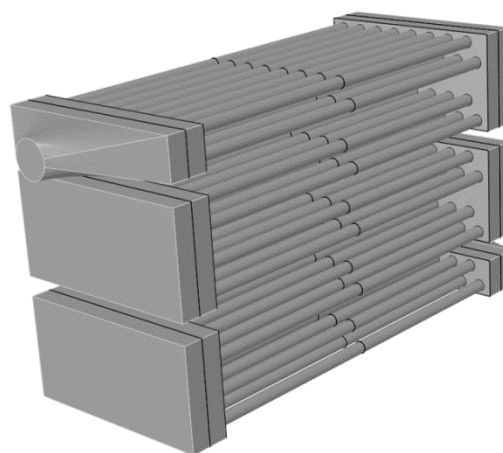


Рис. 3. Проточная часть теплоносителя  
Fig. 3. Flow part of the coolant

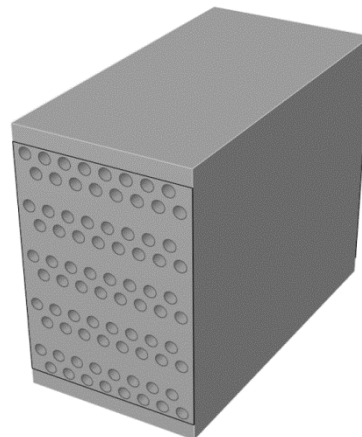


Рис. 4. Проточная часть забортовой воды  
Fig. 4. Flow part of sea water

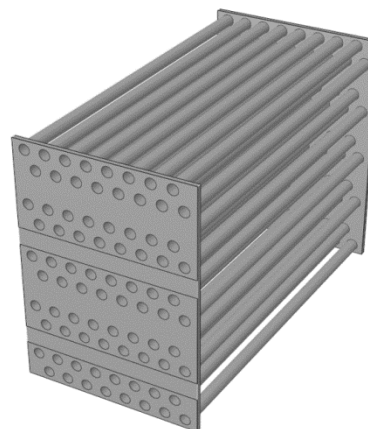


Рис. 5. Трубные доски и секции труб  
Fig. 5. Tube plates and tube sections

## Построение расчетной сетки

### Meshing

Для расчета была построена мозаичная сетка. Мозаичная технология позволяет создавать полиэдрические соединения между различными типами сеток. Недавно введенный метод Poly-Hexcore первым вобрал в себя эту методику для соединения вытянутых многогранных призм на границе со структурированными выровненными гексаэдрами в основном объеме [5].

Используя высококачественные полиэдрические и гексаэдрические элементы в основном объеме, эта сетка автоматически и конформно делает переход к призматическому пристеночному слою. Гексаэдрические элементы желательны из-за их высокой точности и эффективности. Сетка из гексаэдрических элементов при том же разрешении позволяет уменьшить количество граней (рис. 7, см. вклейку). Чем ниже количество граней, тем выше скорость расчета и тем меньше требований к оперативной памяти и дисковому пространству.

Перед выполнением инициализации и запуска расчета было проведено изменение порядка областей и зон расчетной сетки модели. Переупорядочивание домена может улучшить вычислительную производительность решателя за счет перестановки узлов, граней и ячеек в памяти. Полоса пропускания (bandwidth) дает представление о распределении ячеек в зонах и в памяти.

Полоса пропускания – это максимальная разница между индексами соседних ячеек в сетке,

т.е. если последовательно пронумерована каждая ячейка в списке зон и сопоставлены эти индексы. Полоса пропускания до переупорядочивания показана на рис. 8.

Обратный алгоритм Катхилла – Макки используется [1] в процессе переупорядочивания для построения дерева уровней, инициируемого из исходной ячейки в области расчетной сетки. Сначала выбирается т.н. исходная ячейка с использованием алгоритма Гиббса, Пула и Стокмейера [2]. Затем каждой ячейке присваивается уровень в зависимости от ее расстояния от исходной. Эти назначения уровней образуют дерево уровней.

В общем, грани и ячейки переупорядочиваются так, чтобы соседние ячейки находились рядом друг с другом в зоне и в памяти. Поскольку большинство вычислительных циклов выполняются поверх плоскостей, необходимо, чтобы две ячейки в кэше памяти одновременно уменьшали кэш и/или подкачку диска. Иными словами, требуется, чтобы соседние ячейки уменьшали время доступа к необходимому разделу памяти. Данная схема переупорядочивает грани и ячейки в зоне, а также узлы, грани и ячейки в памяти. Полоса пропускания после переупорядочивания показана на рис. 9.

После ввода граничных условий модели и первичной инициализации была проведена FMG (Full-Approximation Storage (FAS) Multigrid) инициализация. Начиная с равномерного решения (после выполнения стандартной инициализации), инициа-

```
Building...
  mesh
  auto partitioning mesh by Metis (fast),
  distributing mesh
    parts....,
    faces....,|
    nodes....,
    cells....,
    bandwidth reduction using Reverse Cuthill-McKee: 701627/4908 = 142.956
```

**Рис. 8.** Полоса пропускания до переупорядочивания

**Fig. 8.** Band width before rearrangement

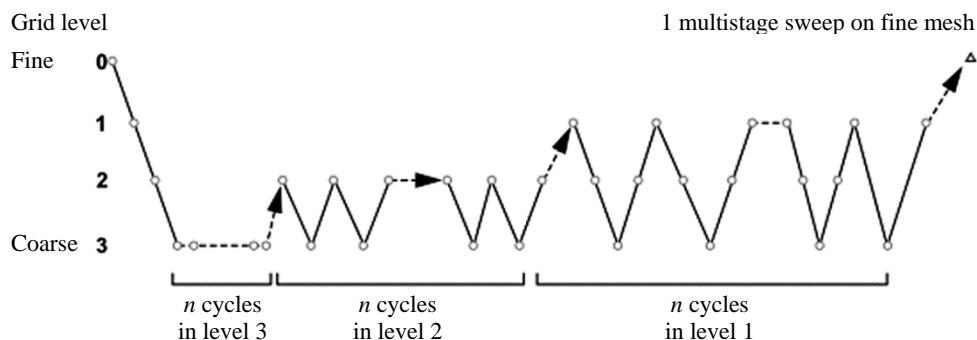
```
>> Reordering domain using Reverse Cuthill-McKee method:
  zones, cells, faces, done.
  Bandwidth reduction = 4908/5013 = 0.98
  Done.
```

**Рис. 9.** Полоса пропускания после переупорядочивания

**Fig. 9.** Band width after rearrangement

**Рис. 10.** Итерация инициализации FMG

**Fig. 10.** Iteration of FMG initialization



лизация FMG строит желаемое количество уровней геометрической сетки, используя процедуру, описанную в [3–4].

Чтобы запустить процесс, начальное решение ограничивается до самого грубого уровня. Затем применяется многосеточный цикл FAS до тех пор, пока не будет получен заданный порядок остаточного сокращения или достигнуто максимальное количество циклов. Затем решение интерполируется на один уровень сетки вверх, и многосеточный цикл FAS снова применяется между текущим уровнем вплоть до самого грубого уровня. Этот процесс будет повторяться, пока не будет достигнут самый лучший уровень. Итерация инициализации FMG показана на рис. 10.

Поскольку инициализация FMG выполняет большую часть работы на грубых уровнях, эта процедура инициализации не требует больших вычислительных затрат, и для больших задач хорошее начальное решение может быть получено за долю времени, затрачиваемого на сходимость к окончательному решению.

## Поверочный расчет забортного теплообменного аппарата

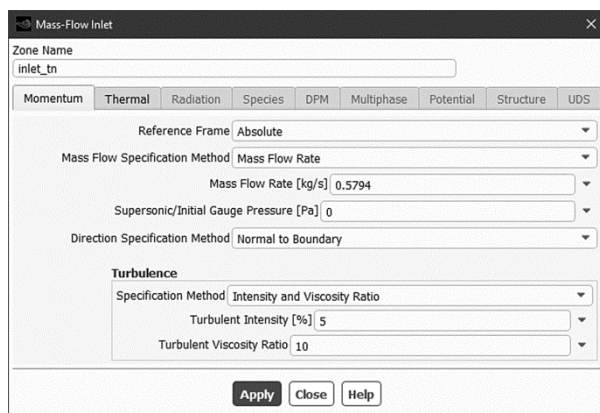
Verification calculation of outboard heat exchanger

Для проверки верности выбранных методик при прямом расчете ЗТО, а также определения мощности, отводимой от теплоносителя забортной водой, температур теплоносителя, забортной воды и стенок труб был проведен поверочный расчет в программном комплексе ANSYS® с использованием модели турбулентности  $k-\omega$  SST.

В качестве исходных данных были приняты следующие значения для входов ТН (рис. 11) и ЗВ (рис. 12).

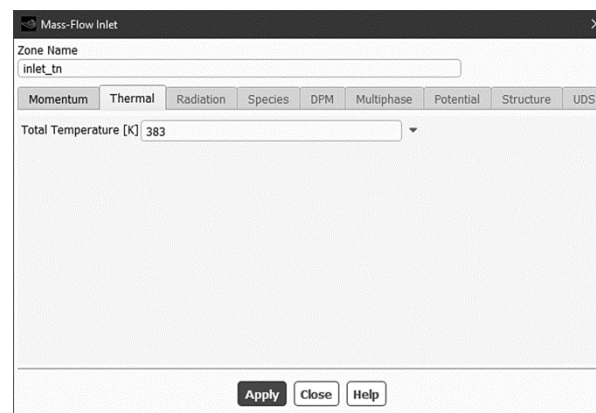
Для граничных условий выхода ТН и ЗВ были приняты следующие параметры, представленные на рис. 13.

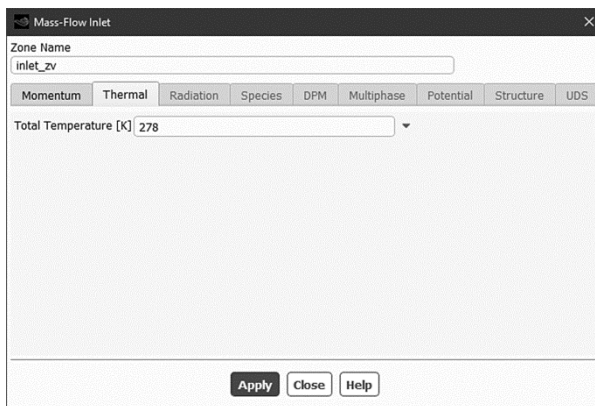
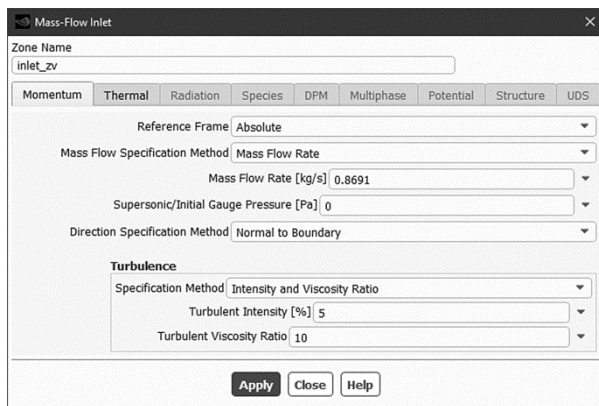
Критерием сходимости задачи являлись два параметра: температура выходов теплоносителя и забортной воды (рис. 14а, см. вклейку) и разность расходов входов и выходов ТН и ЗВ (рис. 14б,



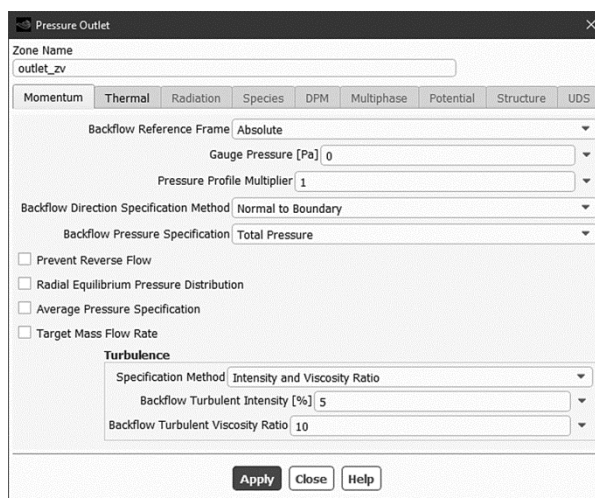
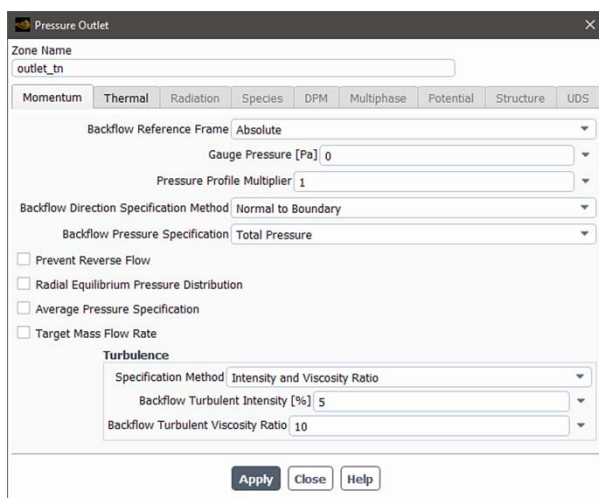
**Рис. 11.** Граничные условия входа теплоносителя

**Fig. 11.** Boundary conditions at coolant inlet





**Рис. 12.** Граничные условия входа забортной воды  
**Fig. 12.** Boundary conditions at sea water inlet



**Рис. 13.** Граничные условия выхода теплоносителя и забортной воды  
**Fig. 13.** Boundary conditions at coolant and sea water outlet

см. вклейку). При достижении «полки» по обоим критериям решение было остановлено.

## Результаты моделирования теплообменных процессов

Heat exchange simulation results

После окончания расчетов были получены следующие данные:

- температура ТН на выходе 84,74 °С;
- температура ЗВ на выходе 23,86 °С.

Таким образом, расхождение поверочного расчета с прямым составило 0,3 %.

На рис. 15 (см. вклейку) изображено изменение температуры на протяжении всего тракта ТН и ЗВ.

Для рис. 15 были выбраны следующие расчетные плоскости, на которых определялась средняя температура по срезу:

- для контура ТН (рис. 3):
  - номер 1 и 13 – вход и выход ТН;
  - номера 2, 4, 6, 8, 10 – коллекторы с 1 по 5;
  - номера 3, 5, 7, 9, 11 – середина секций труб с 1 по 5.
- для контура ЗВ (рис. 4):
  - номер 1 и 13 – вход и выход ЗВ.

На рис. 16 (см. вклейку) показано поле температур ЗТО. В коллекторах на срезах температура ТН почти не меняется ввиду смешения потоков, наличия сильных завихрений и отсутствия теплообмена с ЗВ на пяти гранях коллектора из шести. Для ЗВ видны локальные прогревы. Это происходит из-за вихрей

при поперечном обтекании секций труб, которые обеспечивают интенсификацию теплообмена, но, ввиду большого проходного сечения и малой скорости (низких чисел Рейнольдса), смешение потоков почти не происходит. Это также представлено на рис. 17 (см. вклейку), где показано поле температур внешней поверхности стенки и трубной доски и внутренней поверхности стенки и трубной доски.

На основании данных моделирования была построена зависимость количества отводимого тепла секциями труб.

Из рис. 18 видно, что наибольшее количество теплоты, а именно 12,7 кВт (на 5 % больше, чем вторая секция, и составляющее 21 % от общей мощности) отводится первой секцией труб, что объясняется повышенной скоростью в центральных трубках после первого коллектора из-за неравномерной раздачи [5] и большим температурным напором по сравнению со следующими секциями труб.

## Заключение

### Conclusion

В данной работе рассмотрен забортный теплообменный аппарат системы аварийного расхолаживания. Проведены прямой тепловой и поверочный расчеты теплообменных процессов в забортном теплообменном аппарате. Поверочный расчет осуществлен путем моделирования методом конечных элементов моделью турбулентности  $k-\omega$  SST в программном комплексе ANSYS.

Рассмотрен обратный алгоритм Катхилла – Макки, который был использован для построения дерева уровней, иницируемого из исходной ячейки в области расчетной сетки методом конечных элементов.

В ходе исследования установлена мощность, отводимая от теплоносителя по секциям. Также определены поля температур теплоносителя, забортной воды и стенок труб забортного теплообменного аппарата. Установлено, что охлаждение труб забортной водой происходит неравномерно, это связано с завихрением ЗВ при проходе через межтрубное пространство.

## Список использованной литературы

1. *Cuthill E.H., McKee J.* Reducing the Bandwidth of Sparse Symmetric Matrices // ACM'69: Proceedings of the 1969 24<sup>th</sup> National Conference. New York : Association for Computing Machinery, 1969. P. 157–172. DOI: 10.1145/800195.805928.
2. *Gibbs N.E., Poole W.G.Jr., Stockmeyer P.K.* An algorithm for reducing the bandwidth and profile of a sparse

Отводимое количество тепла, кВт

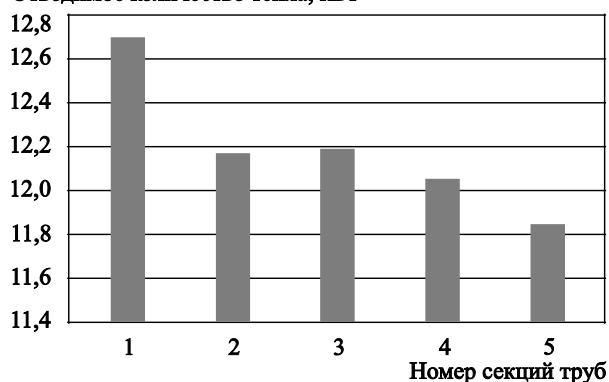


Рис. 18. Количество отводимого тепла секциями труб  
Fig. 18. Heat removals for different pipe sections

- matrix // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1976. Vol. 13, No. 2. P. 236–250. DOI: 10.1137/0713023.
3. *Brandt A.* Multi-level Adaptive Computations in Fluid Dynamics // A collection of technical papers : 4<sup>th</sup> AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. New York : American Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1979. P.79-1455 (9 p.). DOI: 10.2514/6.1979-1455.
4. *Jameson A.* Solution of the Euler equations for two dimensional transonic flow by a multigrid method // Applied Mathematics and Computation. 1983. Vol. 13, No. 3–4. P. 327–355. DOI: 10.1016/0096-3003(83)90019-X.
5. Численное моделирование гидродинамических процессов в тракте теплоносителя забортного теплообменного аппарата / *А.М. Белов, С.С. Гоняева, В.В. Кожемякин, Н.А. Морозов* // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4(58). Ч. 2. С. 87–91. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.010.
6. *Кожемякин В.В., Аполлова А.В.* Определение средней температуры воды в забортном теплообменнике // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 4(38). Т. 1. С. 141–146.
7. Расчетно-теоретическое исследование конструктивных характеристик забортного теплообменного аппарата / *В.В. Кожемякин, А.В. Аполлова, Е.С. Игнатъева, Р.А. Иванов* // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 1(43). Т. 1. С. 83–87.
8. *Кожемякин В.В., Аполлова А.В., Игнатъева Е.С.* Программа конструктивного расчета забортного теплообменника. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611952. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам Российской Федерации, 2019.
9. *Аполлова А.В.* Забортный теплообменник с горизонтальным расположением труб // Изобретательство:



- проблемы, решения, факты : научно-практический журнал. 2018. Вып. 4, Т. 18. С. 23–30.
10. Хаузен Х. Теплопередача при противотоке, прямо-токе и перекрестном токе / Пер. с нем. И.Н. Дулькина. Москва : Энергоиздат, 1981. 384 с.
  11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва : Наука, 1972. 720 с.
  12. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Москва : Энергия, 1977. 343 с.
  13. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. Москва : Энергия, 1967. 411 с.
  14. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника: свойства веществ : Справочник. 3-е изд., доп. и перераб. Москва : Агропромиздат, 1985. 208 с.

## References

1. Cuthill E.H., McKee J. Reducing the Bandwidth of Sparse Symmetric Matrices // ACM'69: Proceedings of the 1969 24<sup>th</sup> National Conference. New York : Association for Computing Machinery, 1969. P. 157–172. DOI: 10.1145/800195.805928.
2. Gibbs N.E., Poole W.G.Jr., Stockmeyer P.K. An algorithm for reducing the bandwidth and profile of a sparse matrix // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1976. Vol. 13, No. 2. P. 236–250. DOI: 10.1137/0713023.
3. Brandt A. Multi-level Adaptive Computations in Fluid Dynamics // A collection of technical papers : 4<sup>th</sup> AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. New York : American Inst. of Aeronautics and Astronautics, 1979. P. 79–1455 (9 p.). DOI: 10.2514/6.1979-1455.
4. Jameson A. Solution of the Euler equations for two dimensional transonic flow by a multigrid method // Applied Mathematics and Computation. 1983. Vol. 13, No. 3–4. P. 327–355. DOI: 10.1016/0096-3003(83)90019-X.
5. Numerical simulation of hydrodynamic processes in the coolant path of an outboard heat exchanger / A.M. Belov, S.S. Gonyaeva, V.V. Kozhemyakin, N.A. Morozov // Marine Intellectual Technologies. 2022. No. 4(58). Part. 2. P. 87–91. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.010 (in Russian).
6. Apollova A.V., Kozhemyakin V.V. Determination of average seawater temperature // Marine Intellectual Technologies. 2017. No. 4(38). Vol. 1. P. 141–146 (in Russian).
7. Computational and theoretical research of constructive characteristics of the outboard heat exchanger / V.V. Kozhemyakin, A.V. Apollova, E.S. Ignateva, R.A. Ivanov // Marine Intellectual Technologies. 2019. No. 1(43). Vol. 1. P. 83–87 (in Russian).
8. Kozhemyakin V.V., Apollova A.V., Ignatyeva Ye.S. Design calculation software for outboard heat exchanger. State Registration Certificate for Software No. 2019611952. Federal Service of the Russian Federation for Intellectual Property, Patents and Trademarks (Rospatent), 2019 (in Russian).
9. Apollova A.V. Outboard heat exchanger with horizontal tubes // Izobretatelstvo: Problemy, Resheniya, Fakty: Nauchno-Praktichesky Zhurnal (Inventions: Challenges, Solutions, Facts: Science & Engineering Journal). 2018. No. 4, vol. 18. P. 23–30 (in Russian).
10. Hausen H. Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom / Russian translation by I. Dulkan. Moscow : Energoizdat, 1981. 384 p.
11. Vargafik N.B. Thermal Physics of Gases and Fluids. Reference Book. Moscow : Nauka, 1972. 720 p. (in Russian).
12. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Fundamentals of heat transfer. Moscow : Energiya, 1977. 343 p. (in Russian).
13. Petukhov B.S. Heat exchange and resistance of laminary flow in tubes. Moscow : Energiya, 1967. 411 p. (in Russian).
14. Bogdanov S.N., Ivanov O.P., Kupriyanova A.V. Refrigeration equipment: properties of coolants. Reference Book. 3<sup>rd</sup> edition, rev. and enl. Moscow : Agropromizdat, 1985. 208 p. (in Russian).

---

## Сведения об авторах

Белов Алексей Михайлович, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. E-mail: belov\_alj@mail.ru.  
Гоняева Софья Сергеевна, ассистент кафедры судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Адрес: 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3. E-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru.  
Кожмякин Вячеслав Вячеславович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой судовой ядерной и водородной энергетики, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. Адрес: 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3. E-mail: kogh2022@mail.ru.

## About the authors

Alexey M. Belov, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: belov\_alj@mail.ru.  
Sofia S. Gonyaeva, Assistant of Department of Ship Nuclear and Hydrogen Energetics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: sofja.gonyaeva@yandex.ru.  
Vyacheslav V. Kozhemyakin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Ship Nuclear and Hydrogen Energetics, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: kogh2022@mail.ru.

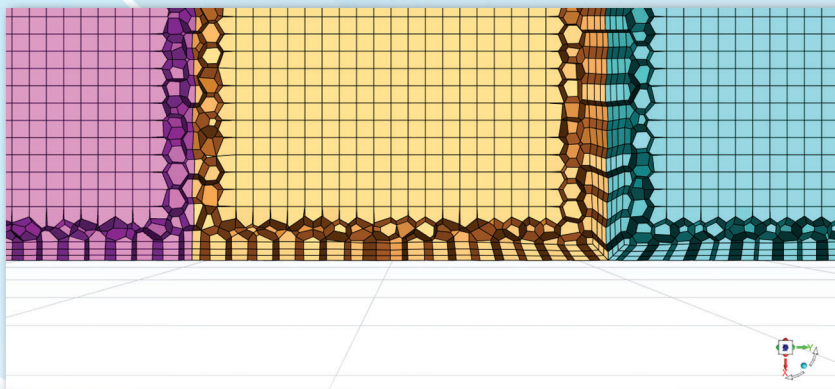
Поступила / Received: 19.01.23

Принята в печать / Accepted: 25.08.23

© Белов А.М., Гоняева С.С., Кожемякин В.В., 2023

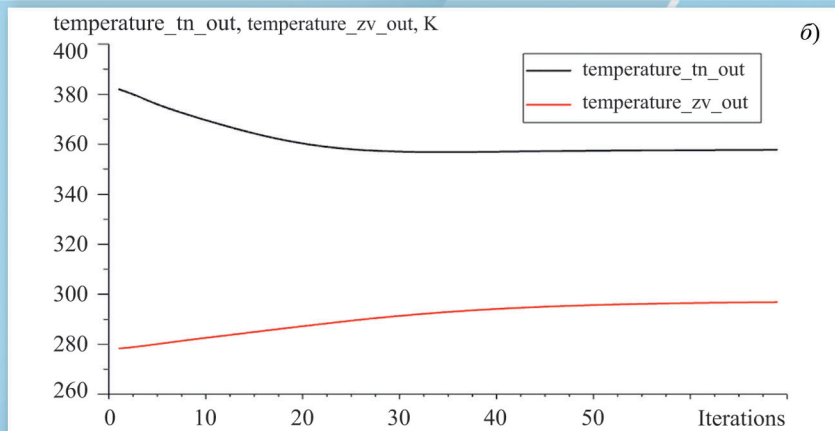
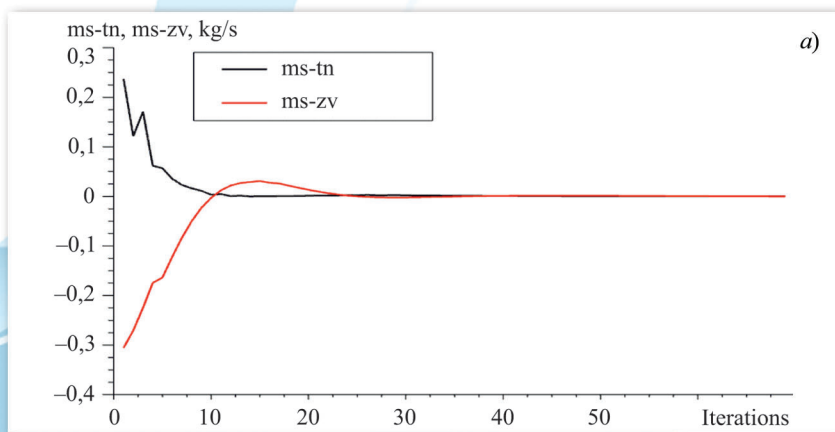
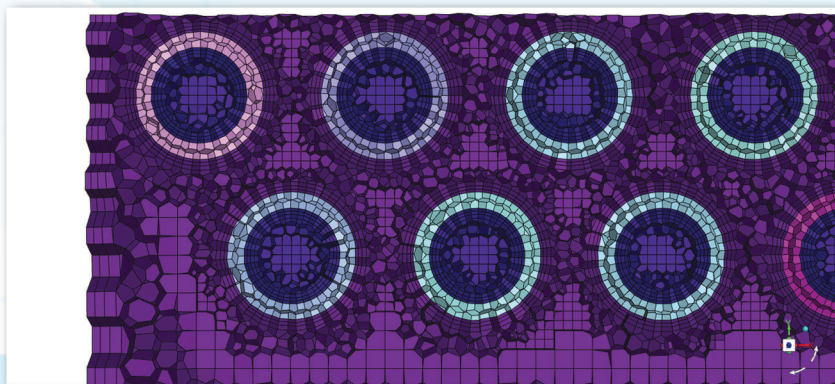
**Рис. 6.** Два вида стенок – мнимая и проницаемая

**Fig. 6.** Two types of walls: imaginary and permeable



**Рис. 7.** Расчетная сетка

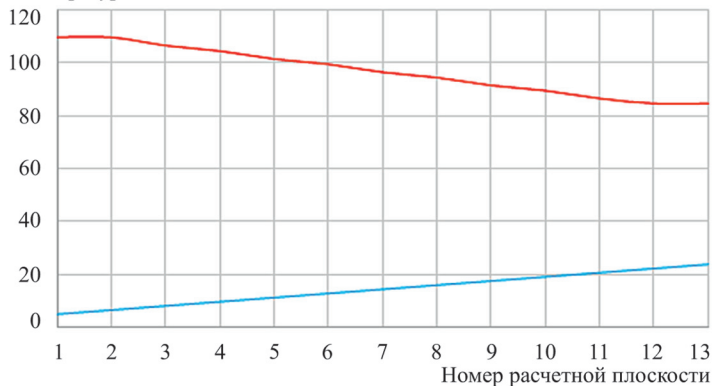
**Fig. 7.** Calculation mesh



**Рис. 14.** Критерии сходимости задачи: температура выходов теплоносителя и забортной воды (а); разность расходов входов и выходов теплоносителя и забортной воды (б)

**Fig. 14.** Convergence criteria: outlet temperatures for coolant and sea water (a); difference of flow rates at inlets and outlets of coolant and sea water (b)

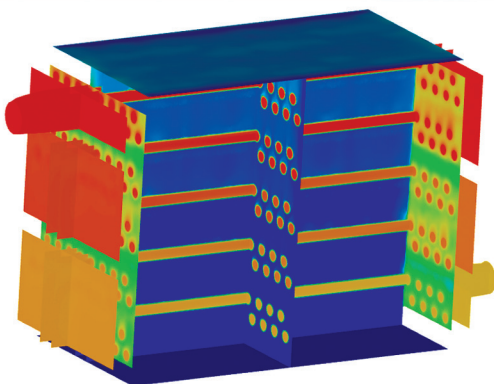
Температура, °C



**Рис. 15.** Изменение температуры на протяжении всего тракта теплоносителя и забортной воды

**Fig. 15.** Thermal changes along the entire channel of coolant and sea water

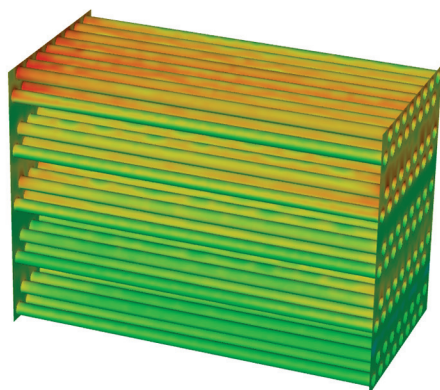
contour-5  
Total Temperature  
3.83e+02  
3.72e+02  
3.62e+02  
3.51e+02  
3.41e+02  
3.30e+02  
3.20e+02  
3.09e+02  
2.99e+02  
2.88e+02  
2.78e+02  
[K]



**Рис. 16.** Поле температур забортного теплообменного аппарата

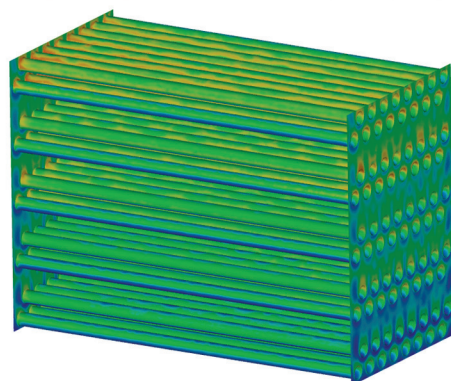
**Fig. 16.** Thermal field of outboard heat exchanger

contour-4  
Total Temperature  
3.83e+02  
3.72e+02  
3.62e+02  
3.51e+02  
3.41e+02  
3.30e+02  
3.20e+02  
3.09e+02  
2.99e+02  
2.88e+02  
2.78e+02  
[K]



a)

contour-4  
Total Temperature  
3.83e+02  
3.72e+02  
3.62e+02  
3.51e+02  
3.41e+02  
3.30e+02  
3.20e+02  
3.09e+02  
2.99e+02  
2.88e+02  
2.78e+02  
[K]



б)

**Рис. 17.** Поле температур внутренней (а) и внешней (б) стенок труб

**Fig. 17.** Thermal field for inner (a) and outer (b) tube walls