

# СУДОСТРОЕНИЕ

Издается с 1898 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0039-4560

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СУДОВ**

**№ 5  
2020**

сентябрь–октябрь

**ВОЕННОЕ  
КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

**СУДОВОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ**

**ТЕХНОЛОГИЯ  
СУДОСТРОЕНИЯ**

**ИСТОРИЯ**



— контрольное вывешивание и предъявление центровки.

Также на ледоколе «Арктика» была опробована система определения нагрузок на опоры валопровода методом тензометрирования, разработанная ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Суть метода заключается в измерениях напряженно-деформированного состояния полностью собранного и смонтированного валопровода методом тензометрирования и последующем определении реакций опор. Тензометрирование проводится с помощью специальной

программы, разработанной ФГУП «КГНЦ», на основе полученных сигналов от тензодатчиков, наклеенных на валы между опорами валопровода. По полученным с помощью тензодатчиков значениям изгибных напряжений в валах с учетом расчетной схемы валопровода система определяет реакции опор в расчетных точках.

В ходе контрольных измерений системой тензометрирования были выявлены некоторые расхождения с нагрузками, полученными в процессе центровки. Однако эти значения не превышают величин допускаемых на-

грузок на подшипники и приняты поставщиком подшипников. Такое расхождение объясняется деформациями корпуса судна, которые неизбежны в процессе достройки, насыщения судна оборудованием, работ по балластировке, и другими факторами.

В заключение можно отметить, что описанная технология центровки методом вывешивания валопровода пр. 22220 на трёх точках была также использована АО «Балтийский завод» на втором ледоколе этой серии («Сибирь») самостоятельно, с некоторой доработкой опор для вывешивания.

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ МОРСКИХ СУДОВ

А. А. Петров, М. С. Шилкина (АО «ЦНИИМФ», e-mail: Petrov25@cniimf.ru)

УДК 004.94:629.5.083.7

APPLICATION OF COMPUTER-AIDED MODELLING UPON MODERNIZATION OF SEA VESSELS

A. A. Petrov, M. S. Shilkina (JSC CNIIMF)

Жизненный цикл судна укрупненно можно разделить на пять основных процессов, каждый из которых имеет свою продолжительность, зависящую от множества внешних факторов:

- технико-экономическое обоснование (от 1 до 2 лет);
- проектирование (от 1 до 3 лет);
- постройка (от 2 до 5 лет);
- эксплуатация (от 25 до 50 лет);
- утилизация (до 2 лет).

На сегодняшний день невозможно представить себе ни один из этих процессов без использования программного обеспечения как общего назначения (офисные и оформительские программы), так и специализированного (САЕ, САМ и САД пакеты). К последним относятся и программные комплексы (далее — ПК), реализующие численные методы моделирования физических процессов, в том числе метод конечных элементов (далее — МКЭ), применяемый для решения задач строительной механики корабля.

Традиционно расчеты прочности с помощью МКЭ выполняются на этапе проектирования судна, при-

чем они могут быть как обязательными (например, для танкеров и навалочных судов, проектируемых по Общим Правилам МАКО), так и дополнительными проверочными, или же выполняться на усмотрение проектанта. Однако в процессе эксплуатации судна зачастую могут возникнуть задачи, решение которых с помощью МКЭ может быть либо единственным, либо альтернативным, но более эффективным решением, по сравнению с аналитическими расчетами. В подтверждение этого далее будут приведены практические примеры использования МКЭ в различных проектах модернизации, однако прежде стоит дать короткую справку о нормативной базе для соответствующих расчетов.

### 1. Нормативная база

Любое конструктивное изменение судна может быть выполнено только под наблюдением классификационного общества (КО), с предварительным одобрением расчетов прочности, подтверждающих равноценный уровень надежности исходной и модернизированной конструкции. Такие расчеты должны выполняться в соответствии с действующими нормативными документами

КО и применительно к расчетам МКЭ эти нормативные документы должны содержать четкие указания по выполнению каждого из этапов компьютерного моделирования: от создания компьютерной модели до оценки полученных результатов. И если в деятельности иностранных КО такие указания содержатся либо в виде отдельных Руководств [1, 2], либо в соответствующих главах основных Правил классификации и постройки [3, 4] достаточно давно (по меньшей мере, с 2014–2015 годов), то для Российского морского регистра судоходства (РС) первый шаг в этом направлении был сделан в 2019 г. По результатам тендерной процедуры РС заключил с АО «ЦНИИМФ» договор на выполнение научно-исследовательской работы на тему «Разработка руководства РС по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов». Разработанный проект нормативного документа (НД) допускает использование МКЭ для:

- расчетного обоснования необходимого уровня эксплуатационной надежности элементов корпус-

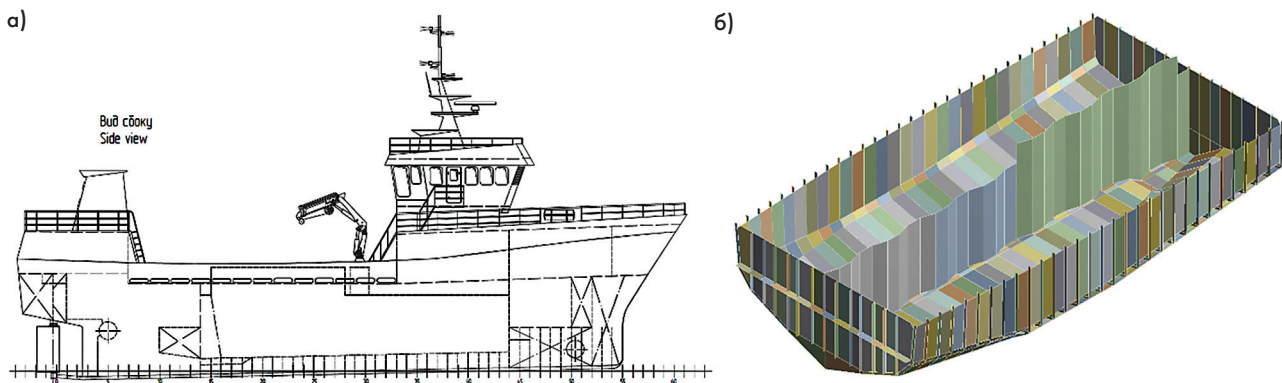


Рис. 1. Живорыбное судно: а — общий вид, б — компьютерная модель грузовой зоны

ных конструкций, не регламентируемых Правилами РС;

- расчетов прочности элементов корпусных конструкций, на которые действуют нагрузки, не регламентируемые Правилами РС;
- расчетов прочности в тех случаях, когда необходимо использовать методики, одобренные РС.

Структура и основные положения проекта нового НД описаны в статье [5], здесь же стоит отметить, что большинство практических задач, связанных с модернизацией судов с классом РС, в том числе и описанные далее, могут быть решены на основе данного НД.

**2. Практические примеры**

В отличие от ремонта, модернизация — это совокупность операций по изменению конструкции судна (элемента судна) с целью улучшения технико-эксплуатационных характеристик, условий труда и быта, приведение его в соответствие с новыми требованиями и нормами, тех-

ническими условиями, показателями качества [6]. Исходя из данного определения и с учетом опыта АО «ЦНИИМФ», модернизация судна (в зависимости от цели) может быть в основном связана с:

- изменением назначения / функциональных характеристик судна, например, установка какого-либо оборудования, внесение изменения в одну или несколько судовых систем, монтаж специфической конструкции и т. д.;
- изменением условий эксплуатации, например, расширение района плавания или повышение ледового класса;
- необходимостью проведения разовой морской операции, когда конструктивные изменения носят не постоянный, а временный характер, а после проведения операции судно приводится в исходное состояние.

Рассмотрим примеры каждого из этих типов модернизаций.

**2.1. Изменение назначения/функциональных характеристик судна**

На живорыбном судне (рис. 1, а) с момента постройки выгрузка рыбы осуществлялась с помощью вакуумного рыбонасоса, что, хоть и является широко распространенной практикой, но все же способствует стрессованию рыбы, поскольку за короткое время она испытывает поочередно влияние вакуума и избыточного давления. Альтернативой такому способу является выгрузка рыбы только с помощью избыточного давления, подаваемого в трюм. Однако установка соответствующей системы без должного обоснования не представлялась возможной, т. к. конструкция судна изначально не была рассчитана на такое давление (0,6 бар). В связи с этим на первом этапе проекта модернизации было необходимо выполнить оценку прочности конструкций трюма на действие дополнительного давления. Трудность аналитического решения заключалась в сложной геометрии трюма, наличии неравномерной по высоте гофрированной переборки, а также в схеме разгрузки: проектом предусматривалась как параллельная разгрузка двух трюмов, так и последовательная, когда один трюм остается пустым, а давление подается в другой. Данная задача была решена с помощью статического линейного анализа прочности в ПК ANSYS Mechanical. Трехмерная модель грузовой зоны приведена на рис. 1, б.

В результате расчета было определено, что при последовательной разгрузке под действием суммарного гидростатического и до-

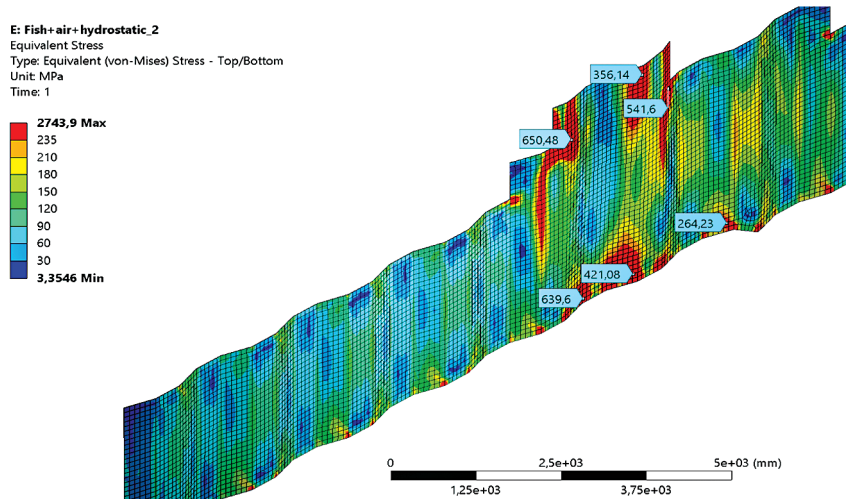


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в продольной переборке



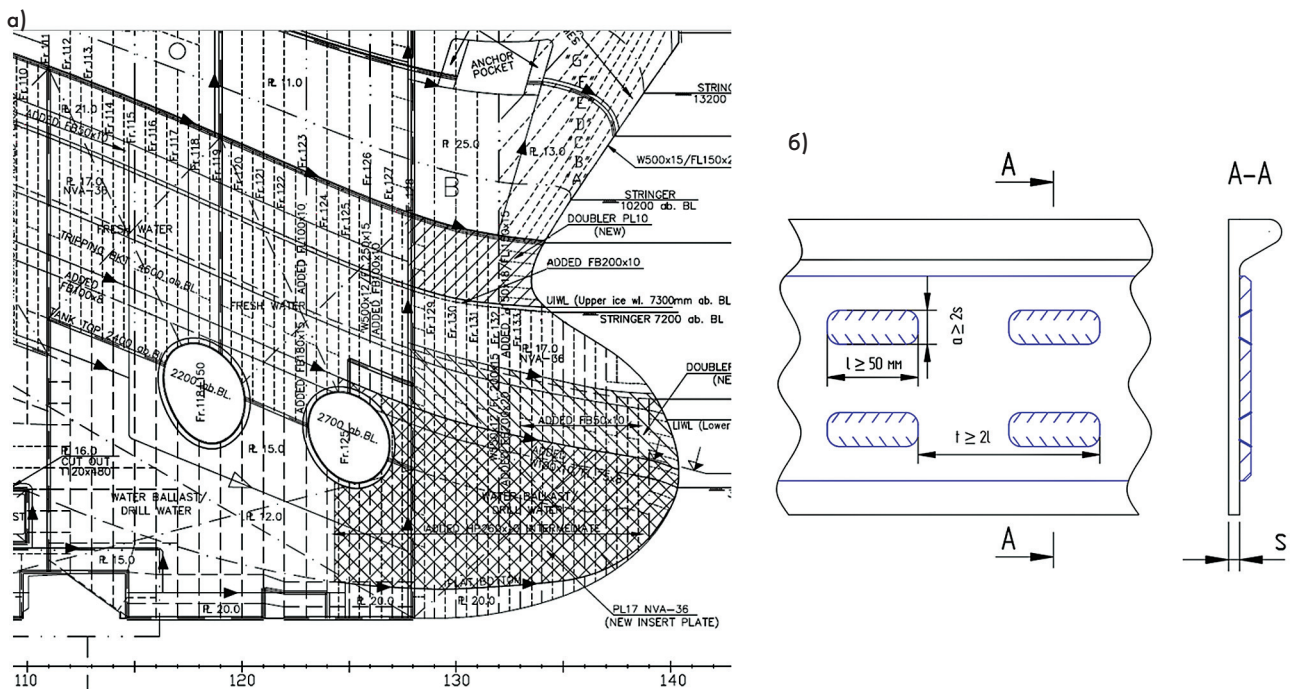


Рис. 3. Конструкция носовой оконечности судна: а — исходная компоновка набора борта, б — предложенный способ усиления балок

полнительного давления в гофрированной переборке (рис. 2) и днищевой обшивке трюма возникают напряжения, существенно превышающие предел текучести материала, ввиду чего данная схема разгрузки оказалась неприемлемой.

Учитывая то, что эксплуатационными особенностями системы обеспечить строго параллельную разгрузку невозможно, а установка подкрепляющего набора по переборке может привести к порче груза, судовладельцу было предложено демонтировать продольную переборку. Выполненные дополнительные расчеты местной прочности и устойчивости подтвердили такую возможность.

**2.2. Изменение условий эксплуатации**

Развитие транспортной инфраструктуры Северного морского пути (СМП) в ближнесрочной перспективе труднореализуемо только за счет постройки новых судов. Вместе с тем для круглогодичной эксплуатации судна в арктическом регионе необходимо наличие ледового класса не ниже Arc4, а таких судов на вторичном рынке крайне мало. Поэтому зачастую судовладельцы вынуждены приобретать суда иностранной постройки близких ледовых классов (Ice IA — Ice IA Super) и дооборудовать корпус до соответствия требо-

ваниям РС, предъявляемым к судам классов Arc4—Arc5. В результате проверочных расчетов (гл. 3.10 части II [7]) судовладельцу предлагается проект модернизации конструкции ледового пояса, заключающийся в основном в замене существующих элементов конструкции или установке дополнительных. Однако не редко возникают сложности с реализацией данного способа в связи с особенностями архитектурно-конструктивного оформления (расположение ответственных помещений в носовой части) или технологическими трудностями (например, при уменьшенной шпации 0,30 м установка промежуточных балок может быть невозможна). Подобный случай имел место при расчете ледового класса Arc5 для многофункционального судна снабжения, имевшего с постройки ледовый класс Ice IA Super. Для решения этой проблемы был рассмотрен метод подкрепления существующей конструкции ледового пояса (рис. 3, а) с помощью дополнительных элементов (рис. 3, б) с применением оптимизационно-поисковых процедур математического программирования (далее — ОПП) [8]. Так как при выполнении аналитического расчета требуемых размеров ледовых усиления по Правилам РС необходимо получить единственное решение, применение ОПП

позволяет быстро и точно определить характеристики дополнительных элементов.

Целевая функция ОПП определяет массу требуемого металла, необходимого на подкрепление локального участка конструкции ледового пояса, в соответствии с ограничениями-неравенствами, формирующимися на основе требований гл. 3.10 части II [7].

$$G(X) = x_1 \cdot x_2 + x_3 + x_5 \cdot x_6, \quad (1)$$

где:  $x_1 \dots x_6$  — независимо варьируемые параметры профиля: толщина листовой конструкции  $s_{pl} = x_1$ , мм, расстояние между балками основного набора (шпация)  $a = x_2$ , м, площадь сечения изолированного балочного элемента  $f_a = x_3$ , см<sup>2</sup>, предел текучести стали, балок  $R_{eH} = x_4$ , МПа, высота дополнительной стенки  $h_{wall} = x_5$ , мм и толщина дополнительной стенки  $t_{wall} = x_6$ , мм.

Постановка задачи выполнялась в упрощенном виде, поэтому искомыми являлись параметры, характеризующие дополнительный элемент —  $x_5$  и  $x_6$ , но для получения единственного решения ОПП, один из варьируемых параметров необходимо зафиксировать — высоту дополнительной стенки. В расчете было принято: от нижнего края балки фиксированное значение 30 мм;

отстояние от верхней кромки балки определяется из геометрических построений (через подобие треугольников). Данный способ позволяет учесть геометрические характеристики каждого полособульбового профиля и обеспечить доступ сварочного аппарата.

Ввиду того, что данный метод ремонта напрямую не регламентирован Правилами РС, в качестве обоснования его применимости был выполнен проверочный расчет прочности с помощью МКЭ, включающий в себя сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния (далее — НДС) бортового перекрытия с исходным конструктивным оформлением и при установке дополнительных элементов (рис. 4). Расчетным участком бортового перекрытия являлся средний балластный отсек, в пределах которого выполнялся линейный расчет НДС конструкции под действием ледовой нагрузки<sup>1</sup>. В результате расчета было определено, что установка дополнительных подкрепляющих элементов на стенках балок привела к уменьшению действующих напряжений на 25–40%. Поскольку прочные размеры корпусных конструкций назначаются в результате аналитических расчетов по Правилам РС, использование МКЭ в данном случае имело цель показать качественное изменение несущей способности и отсутствие опасных концентраторов напряжений при использовании метода ремонта не регламентированного Правилами РС.

Определение применимости ледовых нагрузок из гл. 3.10 части II [7] в расчете МКЭ не являлось предметом исследования.

### 2.3. Модернизация для разовой операции

Для постройки морского сооружения возникла необходимость в установке в грунт оболочек большого диаметра (ОБД) с их последующим бетонированием. При возведении этих конструкций крайне важно было точно спозиционировать ОБД и опустить их на грунт с минимальным отклонением от вертикальной

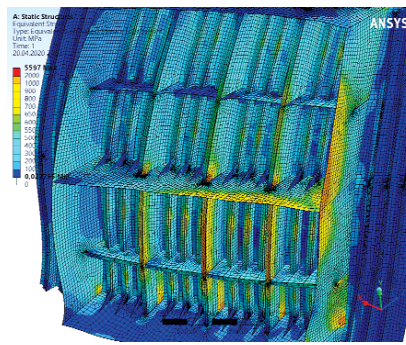


Рис. 4. НДС бортового перекрытия

оси, для чего к борту кранового судна (рис. 5, а) предполагалось приварить направляющую ферменную конструкцию — упор (рис. 5, б). Поскольку судно имело действующий класс РС, а Правилами РС не регламентированы ни подобные конструкции, ни возникающие специфические нагрузки, оценка безопасности этой операции с точки зрения прочности упора и примыкающих бортовых конструкций могла быть выполнена только с помощью МКЭ.

При определении нагрузок учитывалась следующее: поскольку в момент монтажа ОБД не имеет жесткой связи с упором, а, следовательно, и с корпусом судна, при возникновении крена ОБД, свободно подвешенная к грузовому крану, сохранит вертикальное положение. Наиболее опасным следует считать крен на правый борт, поскольку в таком случае ОБД будет воздействовать

на нижнюю кромку упора (рис. 6, а). Максимально возможный угол крена при бортовой качке, а также ее параметры были определены в программных комплексах SafeSea 2.0 и Stabedit Pro 3.2, сертифицированных РС, исходя из погодных ограничений при проведении операции. Схема распределения нагрузок на упор представлена на рис. 6, б.

После расчета ускорения судна при качке в соответствии с 1.3.3 части II [7] было определено значение  $F_N = 469,6$  кН, что с учетом схемы расположения упора и справочными данными [9] составило 30,3 кН/м погонной нагрузки на нижнюю балку упора. Помимо нагрузок от ОБД в расчете учитывались гидростатические нагрузки со стороны моря и от балласта. Расчет выполнялся в линейной постановке, были определены эквивалентные (по Мизесу) напряжения (рис. 7), показавшие достаточный запас прочности как бортовых конструкций и упора, так и самих ОБД (материал ОБД — высокопрочная сталь с пределом текучести  $R_{eH} = 390$  МПа).

В результате выполненных расчетов было подготовлено техническое обоснование возможности установки упора на судно, впоследствии согласованное с РС. После успешного проведения операции конструкция упора была демонтирована, и судно продолжило эксплуатацию в штатном режиме.

**Заключение.** Различные ПК, реализующие численные методы моделирования физических процессов, в частности МКЭ, достаточно давно и успешно применяются при проектировании объектов морской техники. Вместе с тем и в процессе эксплуатации этих объектов зачастую могут возникать различные задачи, решение которых традиционными аналитическими методами трудоемко или вовсе невозможно. К таким задачам можно отнести рассмотренные в данной статье примеры модернизации судов. Учитывая то, что для судов, находящихся в эксплуатации, отведенное на модернизацию время иг-



Рис. 5. Схема установки упора на судно: а — зона установки на борту, б — ферменная конструкция — упор

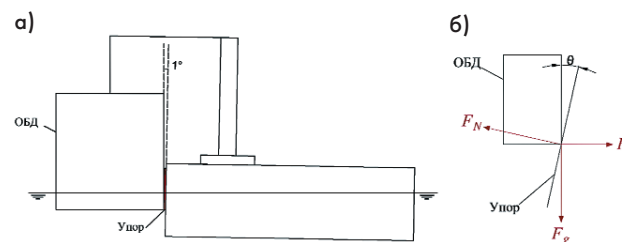


Рис. 6. Взаимодействие ОБД с корпусом судна: а — общий вид, б — схема распределения нагрузок ( $F_g$  — сила веса,  $F_a$  — инерционная сила,  $F_N$  — результирующая сила)

<sup>1</sup>Определение применимости ледовых нагрузок из гл. 3.10 части II [7] в расчете МКЭ не являлось предметом исследования.

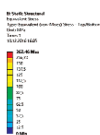


Рис. 7. Результат расчета

рает важнейшую роль, применение МКЭ для соответствующих обоснований, требуемых КО, может быть эффективной альтернативой аналитическим расчетам. Стоит ожидать,

что в будущем, при должном совершенствовании нормативной базы, компьютерное моделирование займет прочное место в техническом сопровождении эксплуатации морских судов.

#### Литература

1. ABS SafeHull Finite Element Analysis of Hull Structures, 2014.
2. Class guideline — DNVGL-CG-0127 Finite element analysis, 2015.
3. DNV GL Rules for Classification: Ships, Part 3 Hull, Chapter 7. Finite element analysis, 2016.
4. Bureau Veritas Rules for the Classification of Steel Ships Part B - Hull and Stability, Chapter 7 — Hull Scantlings, App. 1 — Analyses Based on Three Dimensional Models, 2018.
5. Петров А. А. Разработка и верификация нового нормативного документа Российского

морского регистра судоходства по расчетам прочности конструкций корпуса с использованием метода конечных элементов [Электронный ресурс] / Сборник научных трудов Центрального научно-исследовательского института морского флота. СПб.: 2020. — С. URL: <http://cniimf.ru/press-tsentr/publikatsii/1073/> (дата обращения: 23.07.2020).

6. Общие положения классификационной и иной деятельности. СПб.: РМРС. 2020.
7. Правила классификации и постройки морских судов: в 17 ч. СПб.: РМРС, 2019.
8. Тряскин В. Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкции корпуса судна / Учебное пособие. СПб.: СПбГМТУ. 2010.
9. Шиманский Ю. А. Справочник по строительной механике корабля. Т. 1. Л.: Судпромгиз, 1958.

## МОДУЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

А. З. Багерман, канд. техн. наук, И. П. Леонова, В. Г. Хорошев, докт. техн. наук (ФГУП «Крыловский государственный научный центр», e-mail: bagerman.a.z@mail.ru), А. А. Киришина (e-mail: kirshinaalyona@gmail.com), А. А. Левихин, канд. техн. наук (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова)

УДК 669.018.44:669.245

### MODULAR APPROACH TO ESTIMATION AND FORECASTING OF HEAT EXCHANGE RATE IN NICKEL-BASED THERMAL-RESISTANT ALLOYS

A. Z. Bagerman, Candidate of Engineering science, I. P. Leonova, V. G. Horoshev, Doctor of Engineering science (Krylov State Research Centre), A. A. Kirshina, A. A. Livikhin, Candidate of Engineering science (Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D. F. Ustinov)

#### Теплопроводность сплавов и составляющих их элементов

Исследование теплопроводности —  $\lambda$ , теплоемкости —  $c$  и температуропроводности металлов —  $\alpha$  при их работе в составе жаропрочных сплавов показало, что для каждой температуры может быть сформирован модуль — набор « $\lambda$ ,  $c$ ,  $\alpha$ », одинаковый для всех жаропрочных сплавов.

В связи с этим была рассмотрена модель, по которой все одноименные металлы в составе сплавов при одинаковых температурах могут иметь одинаковые значения теплопроводности независимо от состава сплава.

В таблице 1 представлены значения коэффициента теплопроводности девяти металлов в диапазоне температур от 20°C до 900°C.

Если считать коэффициенты, приведенные в табл. 1, неизменными при работе металла в сплавах, то с их помощью можно определять располагаемое количество тепла,

которое может проводить рассматриваемый металл в составе сплава. Для этого значение коэффициента из табл. 1 умножается на весовую долю этого металла в составе сплава ( $g_i$ ), что составляет удельное количество теплоты, передаваемое каждым металлом.

Если просуммировать количество теплоты, полученное по всем металлам, составляющим сплав, то получится удельное располагаемое количество тепла, которое может пропустить сплав.

Реально сплав пропускает количество тепла, которое оценено коэффициентом теплопроводности данного сплава, приведенным в справочниках, который оказывается меньше располагаемого.

Допускаем, что относительное снижение теплопроводности у всех составляющих сплава будет одинаково и равно отношению коэффициента теплопроводности сплава к удельному располагаемому теплу.

Определяем доли теплопроводности каждого металла в рассматриваемом сплаве. Для этого делим располагаемую теплопроводность отдельного металла на располагаемую теплопроводность сплава.

Полученную величину умножаем на коэффициент теплопроводности сплава. Результатом будет реальная теплопроводность каждого металла, входящего в сплав («базовая» теплопроводность).

Значения, приведенные в справочниках [1, 2, 3], можно считать полученными в результате независимых экспериментов, поэтому значения коэффициентов разных металлов для разных сплавов были обработаны по правилам статистики. В первую очередь были исключены аномальные значения.

В том, что модель, принятая в этой работе, отражает взаимосвязь параметров, показывают, например, такие результаты, полученные в составе сплавов: ЭИ893, ЭИ826, ЭИ929, ЭИ886, ЭИ708, ЭИ698