

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-37-44
УДК 624.042:629.5.024

Г.Н. Муру¹, В.И. Сутырин²

¹ АО «51 Центральный конструкторско-технологический институт судоремонта», Санкт-Петербург, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА КОРПУСОВ СУДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Объект и цель научной работы. Рассматриваются расчетные модели судовых корпусных конструкций, сформированные по методу конечных элементов (КЭ) и предназначенные для решения задач поддержки жизненного цикла. Большой порядок разрешающих систем уравнений актуализирует проблему повышения эффективности расчета. Анализируются подходы к решению указанной проблемы. Приводятся примеры расчетного анализа напряженного состояния реального корпуса судна, находящегося в условиях длительной эксплуатации.

Материалы и методы. Повышение эффективности расчета конструкции корпуса судна обеспечивается применением метода структуризации. При этом реализуется системный подход к расчетным исследованиям больших механических систем, алгоритмической основой которого служат методы подконструкций (Substructures) и суперэлементов (Super Elements), изложенные в работах Пржеменицкого (Przemienicki), Аргириса (Argiris), Мейснера (Meissner) и ряда других исследователей. Метод структуризации позволяет эффективно мобилизовать коллективные усилия инженеров. Каждый из них может не только сформировать модель подконструкции, но и осуществить ее анализ и конструирование с учетом смежных подсистем без пересчета системы в целом. Комплексные расчетные исследования прочности и устойчивости выделенных фрагментов выполняются с точными граничными условиями и различными конструктивными схемами.

Основные результаты. Получены обобщенные граничные условия для конструктивных отсеков корпуса судна, позволяющие оценить их напряженно-деформированное состояние (НДС) в зависимости от ряда конструктивно-технологических факторов. Дана расчетная прогнозная оценка влияния износов связей на НДС корпуса судна в различные периоды его эксплуатации. Приводится оценка влияния технологических схем ремонта корпуса методом замены на устойчивость конструкции надстройки судна.

Заключение. Предложенные подходы обеспечивают полноту, эффективность и комплексность инженерного анализа судового корпуса как большой механической системы. Они позволяют существенно сократить общее расчетное время, уменьшить трудоемкость формирования и анализа расчетных КЭ-моделей судовых корпусов, а также повысить эффективность коллективной работы специалистов, занимающихся проектированием, эксплуатацией и ремонтом судовых корпусных конструкций. Предложенные подходы можно рекомендовать к применению для решения инженерных задач поддержки жизненного цикла объектов морской техники.

Ключевые слова: корпусные конструкции, инженерный анализ, численные методы, конечно-элементная модель, метод структуризации, метод суперэлементов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-37-44
UDC 624.042:629.5.024

G. Muru¹, V. Sutyryn²

¹ JSC 51st Central Design & Technology Institute of Ship Repair, St. Petersburg, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University (IKBFU), Kaliningrad, Russia

THREE-DIMENSIONAL FINITE-ELEMENT MODELS FOR MORE EFFICIENT HULL DESIGN

Для цитирования: Муру Г.Н., Сутырин В.И. Пути повышения эффективности инженерного анализа корпусов судов с применением пространственных конечно-элементных моделей. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 37–44.

For citations: Muru G., Sutyryn V. Three-dimensional finite-element models for more efficient hull design. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 37–44 (in Russian).

Object and purpose of research. This paper discusses FE models of hull structures for lifecycle support applications involving highly complex equation systems, which makes calculation efficiency an urgent and relevant challenge. The paper contains several case studies of hull stress calculation for a ship in long-term service.

Materials and methods. The efficiency of hull analysis is improved by the method of structurization implementing a system approach to the calculations of large mechanical systems. The algorithms of this approach are based on the methods of substructures and superelements suggested by Przemienicki, Argiris, Meissner and a number of other researchers. Structurization methods enables efficient coordination of engineering efforts, when each expert can not only generate a model of substructure, but also analyse and engineer it with consideration of neighbouring subsystems and without the necessity to recalculate the system as a whole. Comprehensive strength and stability calculations for given fragments are performed with accurate boundary conditions and various design layouts.

Main results. Generalized boundary conditions for hull compartments yielded by this study made it possible to estimate their stress-strain state depending on a number of design and technological factors, as well as to predict structural wear effect upon hull stresses and strains at different stages of service life. The study also estimated the effect of various superstructure replacement techniques during ship repair upon structural stability of hull.

Conclusion. The approaches suggested in this paper offer comprehensive, efficient and integrated analysis of hull as large mechanical system, considerably reducing the total time of calculations and man-hours required to generate and analyse FE-based hull models, as well as making the collective efforts of hull design, operation and repair experts more coordinated and efficient. These approaches may be recommended for life cycle support applications in marine industry.

Keywords: hull structures, engineering analysis, numerical methods, FE model, structurization method, method of superelements.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Практика проектирования и эксплуатации судовых корпусных конструкций требует всестороннего анализа их реакций на внешние нагрузки. Реакции возникают в результате воздействия внешней среды (воды, ветра), выполнения производственно-технологических операций, а также как следствие работы гребных винтов, машин и механизмов. Для выполнения численного инженерного анализа конструкций специалисты активно применяют пространственные (3D) КЭ-модели, формируемые и анализируемые при помощи современных информационных систем поддержки принятия проектных решений CAD/CAE-систем (Computer-Aided Design/Engineering). Порядок решаемых систем уравнений может превышать 10^7 , что обеспечивает требуемую полноту и комплексность инженерного анализа судовых корпусов. Вместе с тем формирование подробной пространственной модели корпуса остается весьма трудоемким делом, поскольку средства автоматизации CAD/CAE в большинстве случаев не могут обеспечить всего многообразия требуемых графических построений с должной эффективностью. Проблемами являются также значительная продолжительность комплексного (многовариантного) анализа КЭ-моделей большого порядка и исключительно большой объем выходной информации.

Повышение эффективности анализа КЭ-модели корпуса рационально осуществить с применением

метода структуризации, предусматривающего решение глобальной разрешающей системы уравнений метода конечных элементов (МКЭ) по частям. При подобном решении происходит целесообразное преобразование (стратификация) исходной расчетной схемы корпуса путем программной (серверной) генерации граничных условий для конструктивных фрагментов корпуса, имеющих произвольные размеры и расположение (т.е. многократный переход в расчетном исследовании конструкции по принципу «от общего к частному»). Порядок решаемой системы уравнений при этом существенно сокращается, а фрагментарные вариации характеристик корпуса не требуют пересчета всей конструкции.

Проблематика, цели и задачи исследования

Problems, purposes and tasks of the study

Теоретические основы МКЭ активно обсуждались в 70-е гг. [1, 2]. Однако в отечественной практике численного инженерного анализа судовых конструкций значение МКЭ значительно возросло лишь спустя десятилетие. Получившие широкое распространение в 80-х гг. вычислительные машины Единой Серии (типа ЕС) обеспечили возможности для расчета систем разрешающих уравнений МКЭ порядка 10^4 – 10^5 .

Сегодня благодаря компьютерной технике четвертого поколения программные комплексы CAD/

CAE (такие как ANSYS, FEMAP\NX NASTRAN и другие) получили возможность анализировать статику, устойчивость и динамику поведения конструкций как больших пространственных механических систем. Отражением указанной возможности стали Правила Международной ассоциации классификационных обществ МАКО (*IACS – International Association of Classification Societies*), содержащие весьма подробную регламентацию расчета МКЭ корпусов танкеров и сухогрузов [3]. Рекомендуемая Правилами разбивка геометрической модели конструкции корпуса судна на КЭ приводит к порядкам разрешающих систем уравнений МКЭ, находящихся в пределах 10^7 , что соответствует количественным возможностям персональной вычислительной техники.

Порядок решаемых систем МКЭ существенно увеличивается при использовании кластерных многопроцессорных вычислительных систем (суперкомпьютеров). Однако проблемы численного инженерного анализа корпусных конструкций при этом не исчезают. Наоборот, современные требования полноты и комплексности анализа приводят к их усложнению. Так, структурная (конструктивная) сложность корпуса становится причиной высокой трудоемкости и стоимости формирования КЭ-модели. В процессе расчетных исследований специалистам требуется выполнить ряд сложных проверочных и прогнозных расчетов, включая анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), устойчивости, вибрации и т.д. Многочисленные расчетные варианты связаны с применением весьма затратных по времени пошаговых и итерационных вычислительных процедур, что

влечет за собой весьма значительное увеличение расчетного времени.

Серьезной проблемой является также исключительно большой объем выходной расчетной информации, особенно при расчетах динамики. Как следствие, актуализируется проблема поиска путей повышения эффективности работы с пространственными (3D) моделями судовых корпусов. Опыт выполнения инженерного анализа судовых корпусных конструкций с применением пространственных КЭ-моделей позволяет выделить по крайней мере четыре пути повышения его эффективности (рис. 1).

1. *Фрагментация* предусматривает разделение моделей на составные части. В простейшем случае она выполняется путем деления корпуса поперечными плоскостями на ряд отсеков. Наличие у современных CAD/CAE-комплексов интерфейса, предназначенного для фрагментарного экспорта-импорта данных, который выполняется на уровне как геометрического, так и КЭ-моделирования, открывает возможности для организации эффективной коллективной работы над проектом. Кроме этого, современные сетевые технологии обеспечивают разработчиков удаленным доступом к серверу, формирующему и анализирующему глобальную расчетную модель в режиме «реального времени». Помимо фрагментарного формирования расчетной модели корпуса, важно организовать выборочный анализ выделенных фрагментов (подструктур).

2. *Автоматизация* формирования геометрических и КЭ-моделей корпусных конструкций обеспечивается встроенной системой программирования API (Application Programming Interface) расчетного

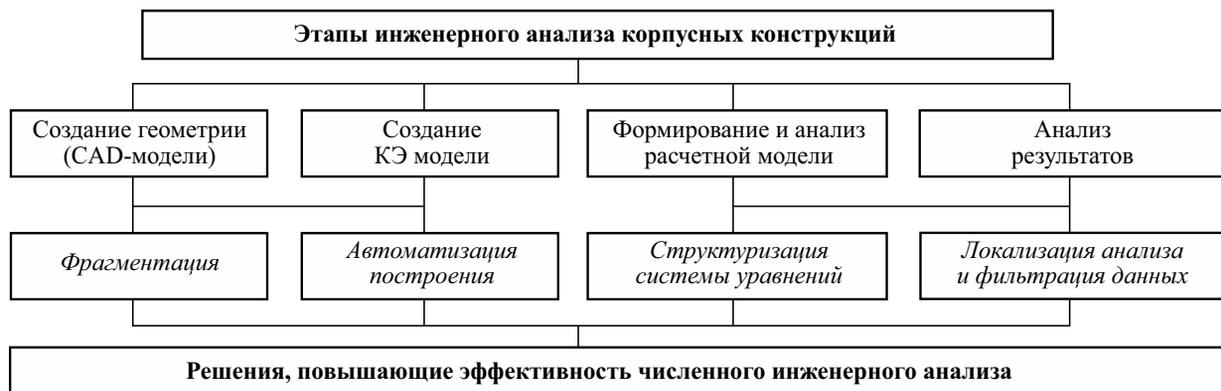


Рис. 1. Этапы и пути повышения эффективности расчетного анализа конструкций с применением современных программных CAD/CAE-комплексов

Fig. 1. Ways and stages of structural analysis efficiency improvement with modern CAD/CAE packages

комплекса. С целью автоматизации модельных построений формируются специализированные библиотеки программных модулей API. Модули обеспечивают автоматизированное построение электронного (компьютерного) варианта теоретического чертежа судна, формирование моделей пластин и оболочек перекрытий и обшивки, рассечение плоскостей и оболочек по линиям установки и соединения связей, формирование геометрических и КЭ-моделей связей судового корпуса и их автоматическую стыковку в различных конструктивных вариантах, автоматическое распределение многочисленных внешних нагрузок, корректировку геометрических характеристик связей с учетом времени эксплуатации и скорости изнашивания корпуса судна и т.д. Одна часть модулей носит универсальный характер и может применяться к любой модели. Другая часть подстраивается под конкретные конструктивные особенности рассчитываемых корпусов, что позволяет использовать модули с наибольшей вычислительной эффективностью.

3. *Структуризация* предусматривает решение глобальной системы уравнений МКЭ по частям. На рис. 2 (см. вклейку) показано отделение кормовой части модели корпуса судна.

Внешний суперэлемент, построенный в граничном поперечном сечении КЭ-модели корпуса (*External Superelement*), обладает рядом полезных свойств. Если он выстраивается со стороны основной части корпуса 1, то порядок решаемой системы уравнений существенно сокращается. При этом формируются граничные условия для кормы 2, за счет чего ее расчет, например, итерационными либо пошаговыми численными методами выполняется без пересчета глобальной системы уравнений. Наоборот, построение суперэлемента со стороны отсеченной кормовой части 2 обеспечивает возможность ее обобщенного представления суперузлами граничного сечения в преобразованной расчетной схеме основной части 1.

Известная алгебраическая процедура, позволяющая привести коэффициенты матрицы жесткости и вектора нагрузки фрагмента конструкции к граничным узлам его КЭ-разбиения, сводится к выполнению следующих матрично-векторных операций:

$$[C_{rr}] = [R_{rr}] - [R_{rn}][R_{nn}]^{-1}[R_{nr}]; \quad (1)$$

$$\{P\} = \{P_r\} + [L]^T \{P_n\}; \quad [L] = -[R_{nn}]^{-1}[R_{nr}], \quad (2)$$

где $[C_{rr}]$, $\{P\}$ – матрица коэффициентов жесткости и вектор нагрузки, приведенные к узлам внешнего суперэлемента; $[R_{nn}]$, $[R_{rr}]$ и $\{P_n\}$, $\{P_r\}$ – матрицы коэффициентов жесткости и векторы нагрузки ис-

ключаемых (n) и сохраняемых (r) фрагментов в исходной системе разрешающих уравнений; $[R_{nr}] = [R_{rn}]^T$ – блок-матрицы взаимного влияния; T – признак транспонирования. В процессе подобных вычислений матрицы коэффициентов жесткости и нагрузки корпусной конструкции преобразуются, алгебраически уплотняются и припасовываются в граничных узлах к аналогичным матрицам оставшейся (анализируемой) части конструкции. Таким образом, осуществляется преобразование исходной расчетной схемы системы корпуса, обеспечивающее систематическое понижение порядка и локализацию областей решаемой задачи при сохранении точности, полноты и целостности расчетного исследования. По существу, реализуется системный подход к расчетным исследованиям больших механических систем, алгоритмической основой которого служат методы подконструкций (*Substructures*) и суперэлементов (*Super Elements*), изложенные в работах Пржеменицкого (*Przemienicki*) [4], Аргириса (*Argiris*) [5], Мейснера (*Meissner*) [6]. Решению проблем, связанных с расчетами судовых конструкций с применением метода суперэлементов, посвящена работа [7]. В современных САЕ-комплексах иерархические подструктуры КЭ-моделей реализованы на основе матрично-векторных равенств, предложенных Айронсом (*B. Irons*) и Гайяном (*R. Guyan*) [8, 9].

На рис. 3 (см. вклейку) показано деление на отсеки (I, II...VII) всей КЭ-модели судна с последующим последовательным встречно ориентированным приведением ее жесткостей и нагрузок к узлам поперечных сечений (A, B, C, D, E, F, G) [10]. Подобную схему расчета можно назвать *встречной матричной прогонкой* (в терминологии работы [11]) либо *встречно скользящим суперэлементом* [12]. Приведенные матрицы расчетных сечений сохраняются в базе данных расчетного комплекса и используются в дальнейшем для организационного выбора расчета корпусного отсека произвольного расположения и размера. С этой целью достаточно поэлементно сложить коэффициенты матрицы жесткости запрашиваемого отсека с соответствующими коэффициентами приведенных матриц окаймляющих отсек граничных сечений (i , $i+1$) и решить сравнительно небольшую систему линейных уравнений [10]:

$$[R_0^{(i,i+1)} + \overrightarrow{C}_i + \overleftarrow{C}_{(i+1)}] \{q^{(i,i+1)}\} = \left\{ P_0^{(i,i+1)} + \overrightarrow{P}_i + \overleftarrow{P}_{(i+1)} \right\}, \quad (3)$$

где $[R_0^{(i,i+1)}]$, $\{P_0^{(i,i+1)}\}$ – блок-матрица (3×3) коэффициентов жесткости и вектор нагрузки запрашиваемого

Рис. 2. Схема формирования внешнего суперэлемента модели корпуса судна

Fig. 2. Flow chart of generating an outer superelement of hull model

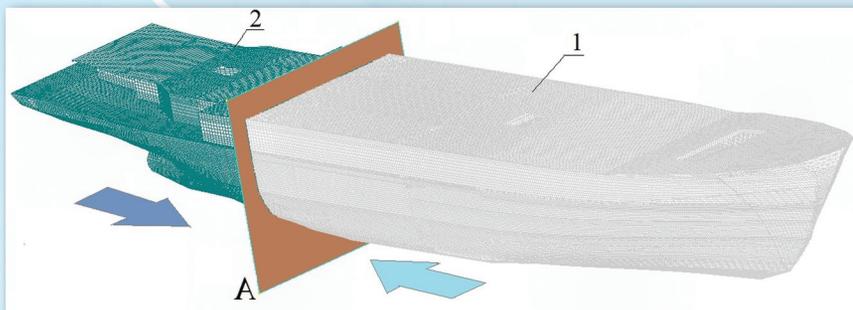


Рис. 3. Схема встречного формирования граничных подструктур модели корпуса

Fig. 3. Flow chart for coordinated generation of boundary substructures in hull model

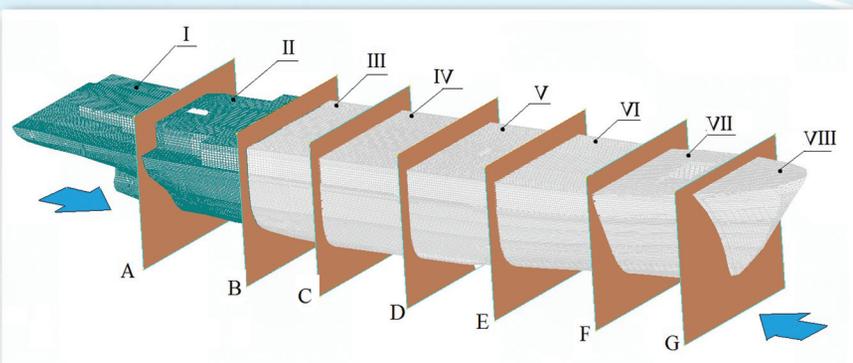
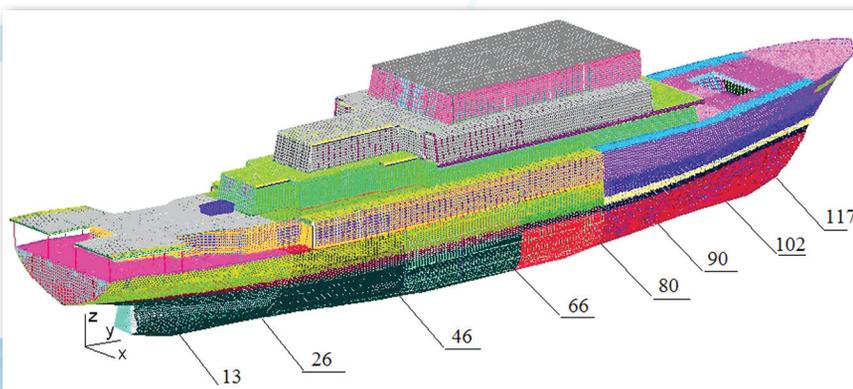
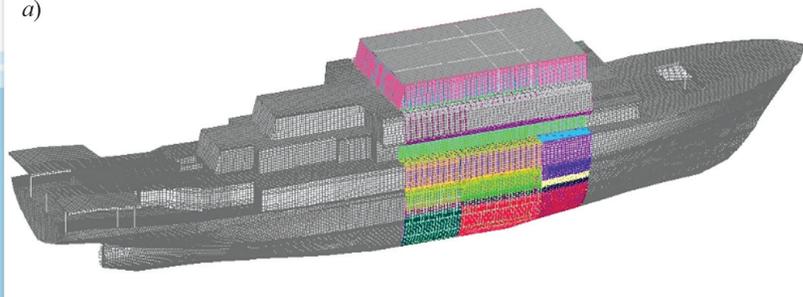


Рис. 4. Пространственная (3D) конечно-элементная модель судна, набранная преимущественно пластинчатыми элементами (типа Plate): применена раскраска по толщинам – типам элементов; цифрами обозначены номера шпангоутов поперечных переборок

Fig. 4. Three-dimensional FE model of ship mostly consisting of plate elements: different thicknesses and element types are shown with different colours; the numbers denote transverse bulkhead frames



a)



b)

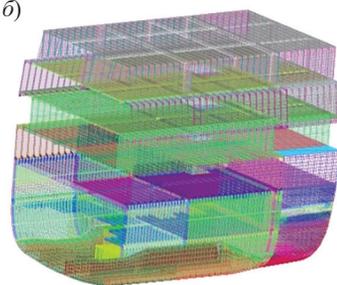
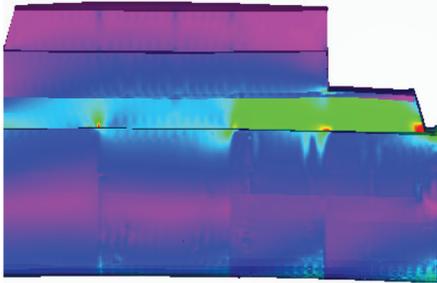
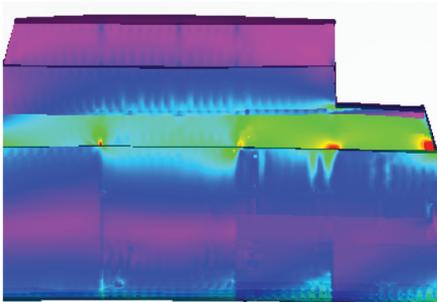
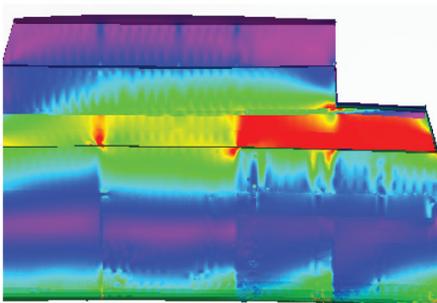
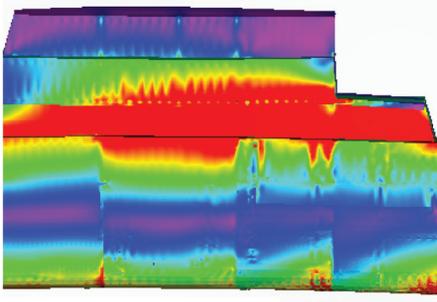


Рис. 5. Объекты расчетного анализа напряженно-деформированного состояния корпуса на предстоящий период эксплуатации T [15]: а) исходная конечно-элементная модель корпуса судна, элементы которой корректировались с учетом износов (исключаемые области выделены серым цветом); б) локализованный центральный отсек, подвергаемый прогнозируемому анализу напряженно-деформированного состояния

Fig. 5. Objects of hull stress-strain analysis *корпуса* over the intended service period T [15]: a) initial FE model of hull with wear corrections (the areas to be eliminated are shown in grey); b) separate compartment (central) for stress-strain predictions

Таблица 1. Прогнозные эквивалентные напряжения Мизеса (Па) в обшивке центрального отсека корпуса судна (красным цветом выделены конечные элементы, в которых напряжения достигают допустимых значений)

Table 1. Estimated equivalent von Mises stresses, Pa, in the plating of central compartment (finite elements with peak stresses shown in red)

Вариант расчетного анализа	Картина напряженного состояния бортовой обшивки	Шкала напряжений
Расчет по проектным данным		<p>216000000,</p> <p>202500000,</p> <p>189000000,</p> <p>175500000,</p> <p>162000000,</p> <p>148500000,</p> <p>135000000,</p> <p>121500000,</p> <p>108000000,</p> <p>94500000,</p> <p>81000000,</p> <p>67500000,</p> <p>54000000,</p> <p>40500000,</p> <p>27000000,</p> <p>13500000,</p>
После десяти лет эксплуатации		
После тридцати лет эксплуатации		
После сорока лет эксплуатации		

отсека, заключенного между i -м и $(i+1)$ -м поперечными сечениями корпуса; $[C_i]$, $[C_{(i+1)}]$, $\{P_i\}$, $\{P_{(i+1)}\}$ – приведенные с противоположных сторон матрицы жесткости и векторы нагрузки, характеризующие внешние по отношению к отсеку части судового корпуса; $\{q^{(i,i+1)}\}$ – искомый вектор узловых перемещений исследуемого отсека, компоненты которого используются для расчета внутренних усилий и напряжений в КЭ [1, 2]. При необходимости обратным ходом, используя найденные перемещения граничных узлов отсека, можно последовательно определить узловые перемещения и, соответственно, внутренние усилия (напряжения) в КЭ других отсеков конструкции. Например, узловые перемещения в рамках смежного отсека с исходной блок-матрицей (2×2) жесткости внутренних узлов $[R_n^{(i,i-1)}]$ определяются в соответствии с равенством:

$$\begin{aligned} \{q_n^{(i,i-1)}\}^T &= \\ &= [R]^{-1} \left\{ P_n^{(i,i-1)} + P_{(i-1)}^{\rightarrow} \right\}^T - [R_n]^{-1} \begin{bmatrix} R_{ni} \\ [0] \end{bmatrix} \{q_i\}, \quad (4) \end{aligned}$$

где $[R_n] = [R_n^{(i,i-1)} + C_{i-1}^{\rightarrow}]$; $\{q_i\}$, $\{q_{(i-1)}\}$ – векторы узловых перемещений границ i и $(i-1)$; $\{P_n^{(i,i-1)}\}$, $\{q_n^{(i,i-1)}\}$ – векторы внешней нагрузки и узловых перемещений внутренних (n) узлов (без учета внешней границы i) анализируемого отсека, заключенного между указанными граничными сечениями i , $(i-1)$. Таким образом, происходит целесообразное преобразование (стратификация) исходной расчетной схемы путем программной (серверной) встречно ориентированной генерации граничных условий для отсеков корпуса, имеющих произвольные размеры и расположение (т.е. переход в расчетном исследовании конструкции по принципу «от общего к частному»). Порядок (размер фрагмента) анализируемой системы уравнений может назначаться заранее, а вариации характеристик отсеков корпуса могут выполняться без пересчета всей конструкции, что существенно повышает производительность выборочного численного анализа сложного объекта, выполняемого коллективом специалистов.

Пример расчетного анализа

Case study

Жизненный цикл морской техники объединяет этапы ее эксплуатации, технического обслуживания и ремонта (ТОиР). Обеспечивая эксплуатационные

требования к морским судам, важно не только эффективно определять характеристики технического состояния корпусных конструкций (решать задачи инженерного анализа), но и давать надежные оценки изменений указанных характеристик во времени, решая задачи прогнозирования технического состояния (ТС) корпусов и обеспечивая оптимальные стратегии ТОиР. Решение указанных задач целесообразно выполнять, применяя пространственные КЭ-модели корпусов судов. Первые примеры подобных решений относятся к 80-м гг. [13]. Успехи информатики, вычислительной математики и вычислительной механики, достигнутые в последние десятилетия, позволяют формировать сложные КЭ-модели корпусов, которые могут служить своеобразными паспортами их фактического технического состояния. Статистические данные о толщинах конструктивных элементов эксплуатируемых корпусов судов, полученные на основе систематизированного анализа актов дефектации, позволяют определять скорости изнашивания связей и использовать КЭ-модели для формирования прогнозных оценок ТС.

На рис. 4 (см. вклейку) приведена конструктивно-подобная КЭ расчетная модель корпуса судна, имеющего длину 75 м. В ней учтены все основные конструктивные элементы корпуса, включая обшивку, шпангоуты, карлингсы, стрингеры, флоры, пиллерсы, настилы палуб, двойного дна и платформ, продольные и поперечные переборки, комингсы люков и т.д. Корпус моделировался на всю высоту поперечного сечения, включая конструкции надстройки, расположенные над верхней палубой. Общее число степеней свободы модели конструкции – 2 929 000.

Все (291 000) конструктивные элементы корпуса распределялись по толщинам на 600 типовых групп. В свою очередь, типовые группы были укрупнены по скоростям изнашивания. Остаточная толщина рассматриваемой связи корпуса S_{cp}^T , входящей в укрупненную группу, определялась на период эксплуатации судна T следующим образом:

$$S_{cp}^T = S_{cp}^o - u_c T, \quad (5)$$

где S_{cp}^o – проектная толщина элемента; u_c – средне-статистическая скорость изнашивания связи, которая определялась преимущественно по дефектовочным ведомостям судов указанного типа.

При отсутствии указанных данных использовались среднестатистические скорости изнашивания связей, приведенные в [14]. В расчетном анализе КЭ-модели (рис. 5, см. вклейку) рассмотрены сроки эксплуатации судна T в диапазоне 10–40 лет. Поскольку в расчетах учитывались износы всех кон-

структивных связей, обобщенные матрицы жесткости и нагрузки, характеризующие граничные условия корпусных отсеков рассчитывались для каждого назначенного срока эксплуатации. В табл. 1 (см. вклейку) приводятся прогнозные картины эквивалентных напряжений в КЭ бортовой обшивке центрального отсека, относящиеся к различным срокам эксплуатации судна при нормативной моментной нагрузке «на вершине волны» [14].

Вычислительные операции обратного хода позволяют выборочно определить характеристики НДС смежных конструктивных узлов изношенного корпуса. В качестве примера в табл. 2 (см. вклейку) приводятся графические иллюстрации распределения эквивалентных напряжений в поперечных переборках корпуса судна «в полном грузу» на этапах эксплуатации 0–30 лет.

4. *Локализация* расчетного анализа связана с дальнейшим (более глубоким) преобразованием расчетной схемы путем назначения дополнительных границ суперэлементов уже внутри расчетных отсеков [15]. На рис. 6 (см. вклейку) показана последовательность решения задачи об устойчивости (по оценке коэффициента запаса по устойчивости β) конструкции палубы надстройки верхнего яруса. По условиям задачи необходимо определить, в каких пределах изменяется β палубы в связи с удалением фрагментов обшивки, выполняемым в процессе ремонта надстройки судна.

Решение задачи по расчету устойчивости конструкции судового корпуса в рамках традиционного подхода МКЭ предусматривает анализ глобальной системы уравнений большого порядка, что приводит к весьма затратной многошаговой вычислительной процедуре. При этом последовательно, в рассматриваемом случае методом Ланцоша (Lanczos), определяются все критические нагрузки (коэффициенты запаса β) в заданном интервале. Проблема заключается в том, что среди многих сотен собственных значений необходимо выбрать единственное, определяющее минимальную критическую нагрузку рассматриваемого конструктивного фрагмента. Его локализация эффективно решает указанную проблему. По существу, речь идет о фильтрации низших коэффициентов запаса по устойчивости частей сложной механической системы с локально изменяющимися параметрами и точными обобщенными граничными условиями.

При решении данной задачи преобразование расчетной схемы обеспечило снижение порядка разрешающей системы уравнений в 75 раз. Результаты анализа представлены в табл. 3 (см. вклейку).

Величина ξ в табл. 3 представляет собой отношение коэффициента запаса по устойчивости β измененной конструкции надстройки к аналогичному коэффициенту β_p , определенному в данном случае для проектного варианта конструкции корпуса при нагрузке «собственный вес судна на тихой воде».

Результаты расчетов показывают, что удаление листов обшивки палубы надстройки приводит к ослаблению конструкции и к существенному снижению ее коэффициента запаса по устойчивости. При удалении листов обшивки бортов надстройки коэффициент запаса β ее палубы, наоборот, увеличивается, что можно объяснить ослаблением связей, втягивающих палубу в общий изгиб корпуса судна. Эффект ослабления заметно усиливается при удалении всех листов обшивки и настила верхнего яруса.

Дополнительные резервы эффективности расчетов корпусов судов могут быть получены за счет кластерных вычислительных систем, выполняющих параллельные вычисления. В Балтийском федеральном университете им. И. Канта для указанных целей используется многопроцессорный кластерный суперкомпьютер высокой производительности, позволяющий эффективно формировать и анализировать сложные 3D КЭ-модели судовых корпусов, на порядки сокращая при этом общее расчетное время.

Основные выводы

Conclusion

1. Поиск путей повышения эффективности инженерного анализа судовых корпусов с применением 3D КЭ-моделей представляется сложной многоаспектной проблемой, требующей комплексного решения.
2. Эффективность решений во многом зависит от вычислительных возможностей применяемых компьютерных средств, а также от используемого программного обеспечения CAD/CAE-класса, которое активно развивается, вбирая в себя достижения прикладной математики, информатики и вычислительной механики.
3. Современные требования полноты и комплексности, предъявляемые к численному инженерному анализу объектов морской техники, приводят к существенному усложнению их КЭ моделей и, как следствие, к возникновению дополнительных проблем, связанных с увеличением объемов выходной информации, общей трудоемкости и стоимости решения задач.

Таблица 2. Изменение напряженного состояния (эквивалентных напряжений Мизеса) поперечных переборок 26, 46, 66 и 90 шпангоутов судна в процессе эксплуатации

Table 2. Stress-strain state changes (variations of equivalent von Mises stresses) for transverse bulkheads of Frames 26, 46, 66 and 90: in-service stresses are within acceptable limits)

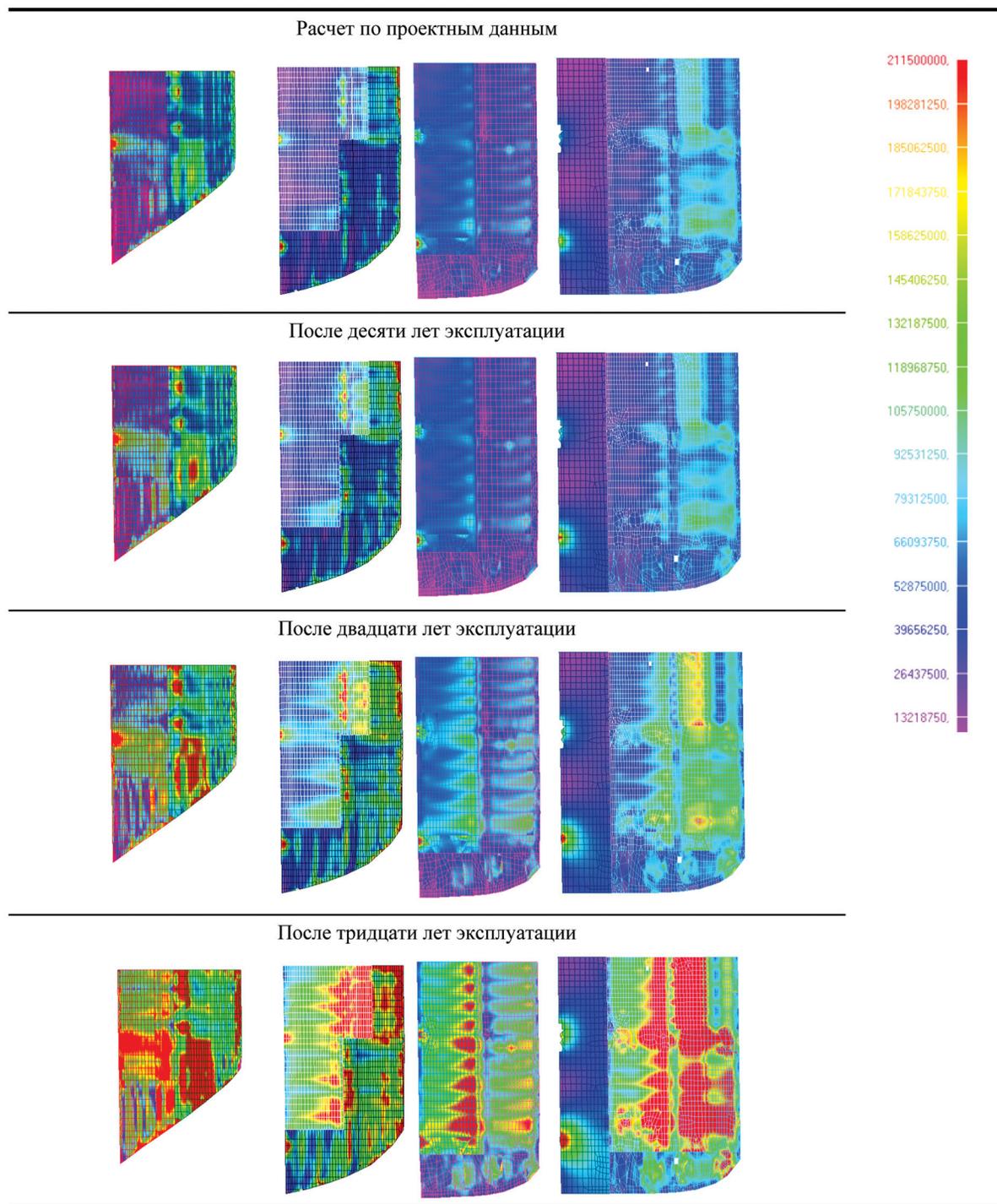
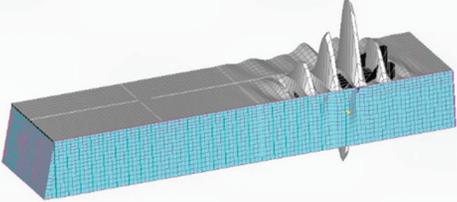
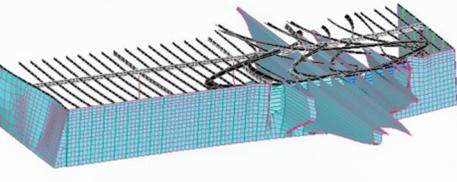
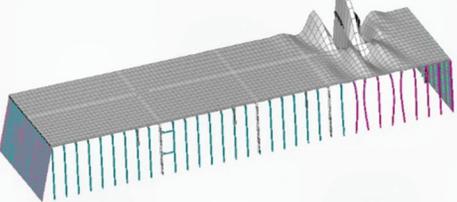
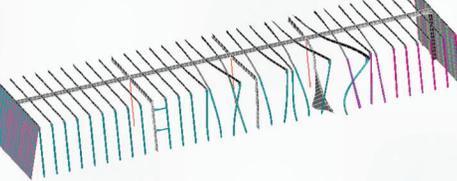


Таблица 3. Результаты расчета устойчивости палубы надстройки верхнего яруса с учетом технологических схем ремонта корпусной конструкции методом замены

Table 3. Structural stability calculation results for upper-tier superstructure deck taking into account superstructure replacement techniques

Расчетный вариант	Форма потери устойчивости	$\xi = \beta/\beta_p$
Расчет по проектным данным		1 ($\beta_p = 4,08$)
Удалены листы настила палубы		0,64
Удалена бортовая обшивка		1,49
Удалены листы настила палубы и обшивки борта		5,24

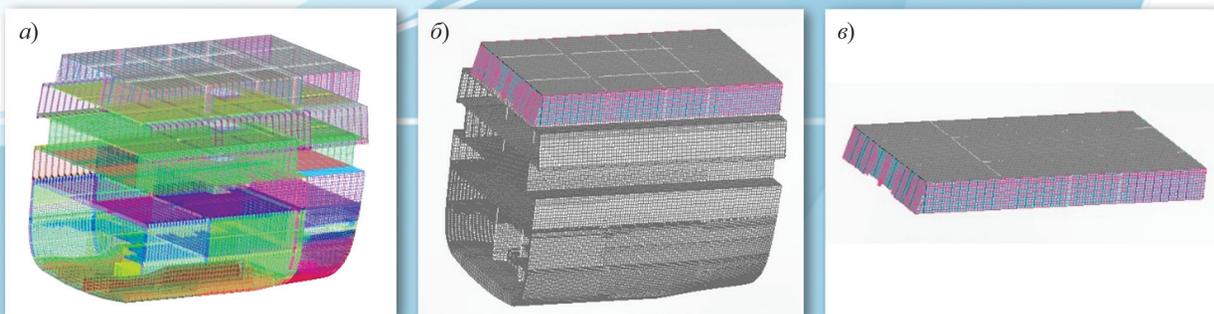


Рис. 6. Объекты и этапы локализации надстройки центрального отсека корпуса судна для определения минимальных коэффициентов запаса по устойчивости палубы верхнего яруса: а) предварительно локализованный центральный отсек корпуса; б) формирование внешнего суперэлемента на нижней границе надстройки (исключаемая область окрашена в серый цвет); в) анализ устойчивости (коэффициентов запаса) изменяемой конструкции надстройки с точными граничными условиями

Fig. 6. Objects and stages in the separation of central compartment superstructure to calculate minimum structural stability margins for upper-tier decks: a) pre-separated central compartment; b) generation of outer superelement at lower superstructure boundary (area to be eliminated is shown in grey); c) structural stability analysis (strength margin calculation) for modified superstructure with exact boundary conditions

4. Рациональным путем решения указанных проблем представляется обращение к структуризации – разделению механической системы на составные части с последующим их численным исследованием с учетом взаимовлияния.
5. Методология численного инженерного анализа конструкций по частям позволяет организовать эффективную коллективную работу специалистов и минимизировать временные и финансовые издержки, связанные с построением и анализом пространственных КЭ расчетных моделей объектов морской техники.
13. *Виноградов Е.В., Розендент Б.Я., Сутырин В.И.* Комплекс программ расчета прочности методом суперэлементов на ЭВМ ЕС // Прочность и надежность судов смешанного плавания: тезисы докл. науч.-техн. конф. «Шестые Бубновские чтения». Горький, 1982. С. 16–17.
14. Правила классификации и постройки морских судов (НД № 2-020101-124). Ч. II: Корпус. Санкт-Петербург: Рос. морской регистр судоходства, 2020. 298 с.
15. *Сутырин В.И.* Численные методы решения прочностных задач судоремонта // Судостроение. 1988. № 11. С. 29–34.

Библиографический список

1. *Постнов В.А., Хархурим И.Я.* Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. Ленинград: Судостроение, 1974. 342 с.
2. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 540 с.
3. Общие правила по конструкции и прочности навалочных и нефтеналивных судов. ND 2-020101-136-R-E. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2020. 824 с.
4. *Przemieniecki J.S.* Theory of Matrix Structural Analysis. New York: McGraw-Hill, 1968. 468 p.
5. *Argiris J.H.* Energy theorems and structural analysis // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1954. Vol. 26, № 10. S. 347–356; № 11. P. 383–394; № 12. P. 410–422; 1955. Vol. 27, № 2. P. 42–58; № 3. P. 80–94; № 4. P. 125–134.
6. *Meissner C.J.* A multiple coupling algorithm for stiffness method of structural analysis // AIAA Journal. 1968. Vol. 6. № 11. P. 2184–2185.
7. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений / [Постнов В.А., Дмитриев С.А., Елтышев Б.К., Родионов А.А.]. Ленинград: Судостроение, 1979. 288 с.
8. *Irons B.* Structural eigenvalue problems: elimination of unwanted variables // AIAA Journal. 1965. Vol. 3, № 5. P. 961–962.
9. *Guyan R.J.* Reduction of stiffness and mass matrices // AIAA Journal. 1965. Vol. 3, № 2. P. 380.
10. *Сутырин В.И.* Системотехнический подход к автоматизированному инженерному анализу судовых конструкций. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2019. 377 с.
11. *Вороненок Е.Я., Палий О.М., Сочинский С.В.* Редуцированные элементы в расчетах прочности и вибрации судов // Судостроение. 1984. № 11. С. 9–13.
12. *Сапожников А.И.* Метод контурных и расчетных точек при расчетах соединений // Строительная механика и расчет сооружений. 1980. № 5. С. 59–61.

References

1. *V. Postnov, I. Kharkhurim.* Finite-element method in calculations of ship structures. Leningrad, Sudostroyeniye, 1974. 342 p. (*in Russian*).
2. *O. Zenkevich.* Finite-element method in engineering. Moscow: Mir, 1975. 540 p. (*in Russian*).
3. ND 2-020101-136-R-E. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 824 p. (*in Russian*).
4. *Przemieniecki J.S.* Theory of Matrix Structural Analysis. New York: McGraw-Hill, 1968. 468 p.
5. *Argiris J.H.* Energy theorems and structural analysis // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 1954. Vol. 26, № 10. S. 347–356; № 11. S. 383–394; № 12. S. 410–422; 1955. Vol. 27, № 2. S. 42–58; № 3. S. 80–94; № 4. S. 125–134.
6. *C.J. Meissner.* A multiple coupling algorithm for stiffness method of structural analysis // AIAA Journal. 1968. Vol. 6. № 11. P. 2184–2185.
7. *V. Postnov, S. Dmitriev, B. Yeltyshv, A. Rodionov.* Method of superelements in calculations of engineering structures. Leningrad: Sudostroyeniye, 1979. 288 p. (*in Russian*).
8. *B. Irons.* Structural eigenvalue problems: elimination of unwanted variables // AIAA Journal. 1965. Vol. 3, № 5. P. 961–962.
9. *R.J. Guyan.* Reduction of stiffness and mass matrices // AIAA Journal. 1965. Vol. 3, № 2. P. 380.
10. *V. Sutyurin.* System approach to automated engineering analysis of ship structures. Kaliningrad: Publishing House of IKBFU, 2019. 377 p. (*in Russian*).
11. *S. Sochinsky, O. Paliy, Ye. Voronenok.* Method of reduced elements for structural calculations. Leningrad, Sudostroyeniye, 1984. № 11. P. 9–13 (*in Russian*).
12. *A. Sapozhnikov.* Method of outline and calculation points in calculation of joints // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 1980. No. 5. P. 59–61 (*in Russian*).

13. *E. Vinogradov, B. Rozendent, V. Sutyryn*. Software package for structural calculations as per superelement method on ES-series computers // Strength and reliability of mixed-navigation vessels. Compendium of Papers, 6th Bubnov Readings scientific & technical conference, Gorky, 1982. P. 16–17 (*in Russian*).
14. ND No. 2-020101-124. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 298 p. (*in Russian*).
15. *V. Sutyryn*. Numerical methods for structural calculations in ship repair // Sudostroyeniye (Shipbuilding). 1988. No. 11. P. 29–34 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Муру Георгий Николаевич, к.т.н., исполнительный директор АО «51 Центральный конструкторско-технологический институт судоремонта». Адрес:

190000, Санкт-Петербург, Английская наб., д. 38. Тел.: +7 (812) 315-49-45; +7 (812) 423-16-00. E-mail: office@51cktis.ru.

Сутырин Валерий Игоревич, д.т.н., профессор, Балтийский федеральный университет им. И. Канта. Адрес: 236016, Калининград, ул. А. Невского, д. 14. Тел.: +7 (921) 263-61-56. E-mail: vsutyryn@mail.ru.

About the authors

Georgy N. Muru, Cand. Sci. (Eng.), Executive Director, JSC 51st Central Design & Technology Institute of Ship Repair. Address: 38, Angliiskaya Embankment, St. Petersburg, Russia, post code 190000. Tel.: +7 (812) 315-49-45; +7 (812) 423-16-00. E-mail: office@51cktis.ru.

Valery I Sutyryn, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Immanuel Kant Baltic Federal University. Address: 14, Alexander Nevsky st., Kaliningrad, Russia, post code 236016. Tel.: +7 (921) 263-61-56. E-mail: vsutyryn@mail.ru.

Поступила / Received: 14.01.20
Принята в печать / Accepted: 21.08.20
© Муру Г.Н., Сутырин В.И., 2020