

А.А. РОДИОНОВ

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

## НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ КОРАБЛЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ И ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены истоки и направления развития строительной механики. На основе анализа потребностей инженерной практики по созданию эффективных, надежных судов и объектов морской техники выявлены направления развития строительной механики из современных и перспективных материалов.

**Ключевые слова:** строительная механика корабля, внешние воздействия, внутренние реакции, предельные состояния, аварийная прочность, метод конечных элементов, металлические конструкции, конструкции из полимерных композиционных материалов, оптимизация конструкций.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Родионов А.А. Направления развития строительной механики корабля, обеспечивающие повышение эффективности судов и объектов морской техники. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 15–24.

УДК 629.5.021.001.76

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-15-24

A.A. RODIONOV

St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya str., 3, St. Petersburg, Russia

## TENDENCY OF DEVELOPMENT OF THE SHIP STRUCTURAL MECHANICS FOR INCREASING OF EFFICIENCY OF SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES

The origins and directions of development of structural mechanics were studied. Based on the analysis of the requirements engineering practices for developing effective, reliable vessels and marine facilities identified directions of development of modern structural mechanics and advanced materials.

**Key words:** structural mechanics of a ship, external influences, internal response, the limiting state of accidental strength, finite element method, metal structures, structures made of polymer composite materials, design and optimization of ship structures.

Author declares lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Rodionov A.A. Tendency of development of the ship structural mechanics for increasing of efficiency of ships and offshore structures. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 15–24 (in Russian).

UDC 629.5.021.001.76

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-15-24

### Ранний период формирования строительной механики

Чтобы выявить направления развития строительной механики корабля и разглядеть будущее, требуется высоко взобраться на плечи гигантов-основоположников, вспомнить истоки строительной механики. Строительная механика не могла появиться раньше, чем появились инженерные сооружения, хотя внимания этой дисциплины заслуживают и природные объекты.

Зарождение цивилизации характеризуется появлением искусственно возводимых сооружений [1].

По понятным причинам о древнейших постройках можно судить только по дошедшим до нашего времени мегалитическим (из больших камней) строениям. Это мальтийские мегалитические храмы (Мальта, ок. 3500 лет до н. э.), каменный дом на острове Папа Вестрей в Оркни (Шотландия, ок. 3700–2800 гг. до н. э.), культовое сооружение Ньюгранж (Newgrange) (Ирландия, ок. 3200 лет до н. э.), пирамида фараона Джосера (III династия, правил ок. 2668–2649 гг. до н. э.), что находится в Саккаре. Размеры пирамиды (высота – 60 м, стороны прямоугольного основания – 109 и 121 м) близки к размерам современной грави-



тационной МЛСП «Приразломная». Архитектором пирамиды был визирь при фараоне Джосере – Имхотеп. Огромный пирамидный комплекс был столь величественным, что после смерти Имхотеп был обожествлен, стал богом мудрости и покровителем архитекторов.

Первый дошедший до нас трактат об архитектуре, строительстве и механике – это десятитомник Марка Витрувия Поллиона (I в. до н. э.) – римского инженера и архитектора [2]. В армии Цезаря, а позднее и Августа, он руководил военно-инженерными работами, ввел ряд инноваций в строительстве водопроводов. Им впервые были сформулированы три качества, которыми обязательно должна обладать архитектура: UTILITAS (польза), FIRMITAS (прочность конструкции) и VENUSTAS (красота). Витрувий создал систему гармонических пропорций, соразмерных масштабам человека, универсально применимых к архитектуре и механике. Этой системой пользовался и Леонардо да Винчи.

Строительная механика начала формироваться из руководств по возведению каменных сооружений. Не всегда строителям древности сопутствовал успех, ведь мы любим лишь немногими сохранившимися постройками. Известно, что сооружения рушились и в процессе строительства и после его завершения. Но эти катастрофы обычно воспринимались как наказания свыше, а не как следствие технической необразованности.

Строители, плотники и корабельщики старых времен работали на совесть и, по-видимому, даже не задумывались над тем, почему конструкция способна выдерживать нагрузку. Во всяком случае в старые времена строители не обдумывали и не проектировали свои сооружения в нынешнем смысле этих слов. Некоторые свидетельства их мастерства весьма впечатляющи, но «правила» или «тайнства» в своей интеллектуальной основе близки по уровню к поваренной книге. Тогдашние строители считали своей задачей создание чего-то, похожего на уже удачно возведенное ранее. И в наше время существует такой подход к проектированию, который именуется «проектированием по прототипу» или «проектированием с помощью метода малых (линейных) вариаций».

Строительная механика отвечает за прочность, а прочность корабля – качество, позволяющее ему надежно функционировать при многообразии внешних воздействий, – всегда интересовало его создателей. В подтверждение этому вспоминают даже легенду о Всемирном потопе, когда

всевышний ниспослал Ною сведения о размерах связей гигантского трехъярусного ковчега, который тот должен был построить для спасения всего живущего на Земле.

Но если вернуться к реальности, то надо отметить, что первые исследования по прочности корпуса корабля были проведены Леонардом Эйлером (1707–1783) – великим ученым-математиком и механиком швейцарского происхождения, с 1727 г. работавшим в Петербургской академии наук [3]. Им были разработаны правила нагрузки корабля, правила устройства связей и выработана рациональная система конструкции деревянных судов. Он рассмотрел задачу об изгибе корпуса корабля как балки, создал теорию устойчивости упругих систем.

Переход от деревянного судостроения к металлическому, наметившийся в середине XIX века, привел к появлению многих работ, посвященных расчетам прочности (наиболее известны у нас работы английского инженера Дж. Рида).

## Становление строительной механики корабля как науки

Строительная механика корабля возникла в начале XX века как наука о прочности корабля (в ранних источниках она именовалась «крепостью» корабля, а один из ее разделов так и называется – «прочность корабля»). Она создана трудами русского ученого, инженера, известного как автора проектов линейных кораблей и нескольких серий первых русских подводных лодок, Ивана Григорьевича Бубнова (1872–1919).

Следует отметить, что, хотя в название науки входит понятие «корабль», сегодня это скорее дань традиции, чем определение, и вовсе не означает, что наука занимается только конструкцией военных кораблей. Предметом ее изучения являются в том числе конструкции морских и речных гражданских судов всех типов и назначений, а также различных морских инженерных сооружений. Первый в мире курс строительной механики корабля создан в 1909–1914 гг. именно И.Г. Бубновым [4] – учеником выдающегося русского математика и кораблестроителя А.Н. Крылова, самого немало сделавшего для развития строительной механики корабля и ее применения в реальном проектировании. Фундаментальные основы строительной механики корабля, постоянно совершенствуясь, сохранили в себе главные положения, сформулированные еще ее основателем. Названные И.Г. Бубновым основные проблемы, которыми при-

звана заниматься строительная механика корабля, в современной трактовке можно изложить следующим образом [5]:

1. Проблема внешних воздействий. Выявление и количественное определение величин всех воздействий на конструкцию корпуса в условиях эксплуатации и в экстремальных ситуациях.
2. Проблема внутренних реакций (откликов). Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса и отдельных его конструкций при возможных внешних воздействиях.
3. Проблема нормирования. Установление допускаемых величин параметров НДС (либо предельных величин внешних воздействий), позволяющих обеспечить безопасность и надежную эксплуатацию корабля с приемлемыми условиями экономичности.

Все три указанные проблемы тесно взаимосвязаны, и полнота решения каждой из них зависит от способов решения других. Например, более высокая приближенность определения действующих напряжений по отношению к их реальным значениям позволяет уменьшить «запасы», закладываемые в заданные допускаемые величины. К сожалению, такое понимание еще не нашло достаточного отражения в нормативных документах.

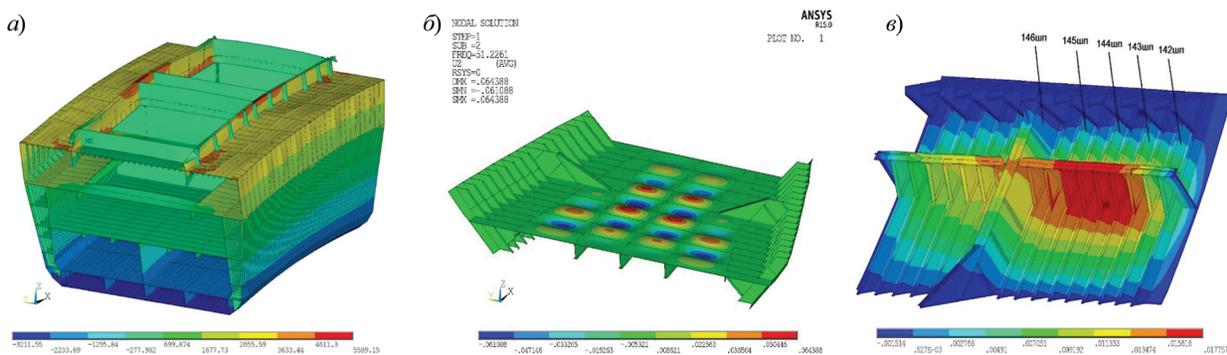
### **Метод конечных элементов и его значение для строительной механики корабля**

Строительная механика, характеризуемая большими объемами расчетов, одна из первых стала использовать вычислительные методы математического моделирования. Огромную роль в развитии строительной механики корабля сыграл метод конечных элементов (МКЭ). Он появился в 40–50 гг. прошлого столетия в работах, посвященных решению задач строительной механики с помощью матричных методов расчета сложных статически неопределимых систем. Первоначально рассматривались стержневые системы, которые естественным образом представляются в виде совокупности одномерных элементов, соединяемых между собой узлами, с конечным числом параметров в узле. Затем этот подход был обобщен на пластинчатые и оболочечные конструкции, которые представляют собой сплошные или континуальные среды. Само понятие конечного элемента введено в работе М. Тэрнера, Р. Клафа, Х. Мартина и Л. Топпа [6]. Слово «конечный» в определении элемента и самого метода означает, что элемент и вся рас-

четная модель сплошной среды приближенно описываются конечным числом узловых параметров. Теоретические основы МКЭ были заложены выдающимся математиком польского происхождения Рихардом Курантом (1888–1972) – профессором Геттингенского (с 1920 г.) и Нью-Йоркского (с 1934 г.) университетов США, почетным членом Академии наук СССР (1966). Работая над решением сложных краевых задач математической физики, Курант предложил оригинальные вариационно-разностные методы, описание которых опубликовал в журнале американского математического общества [7]. Вначале МКЭ развился по двум независимым направлениям: прикладному – из решения задач строительной механики; математическому – из вариационно-разностных краевых задач. Дальнейшее объединение этих направлений превратило МКЭ в теоретически обоснованный метод решения инженерных и физических задач. В частности, было установлено, что уравнения, определяющие конечные элементы, могут быть получены с помощью вариантов метода взвешенных невязок, таких как метод Бубнова – Галёркина или метод наименьших квадратов. Это позволило применять МКЭ для решения многих типов дифференциальных уравнений. Таким образом, МКЭ превратился в общий метод численного решения дифференциальных уравнений или систем дифференциальных уравнений.

В настоящее время метод эффективно применяется для решения широкого класса задач – механики, прочности и вибрации при проектировании судов, самолетов, ракет и различных пространственных оболочек, конструкций инженерных сооружений; распространения тепла в конструкциях и средах; гидромеханики, в частности задач обтекания объектов и течения жидкости в пористой среде; диффузии, распределения электрического поля, теории поля. Рассмотрение любой задачи сводится к решению интегральных или дифференциальных уравнений.

Активному внедрению в практику расчетов и научного анализа способствовало бурное развитие вычислительной техники и создание профессиональных программных продуктов. Здесь уместно вспомнить разговор с Мишей Бернблитом более четверти века тому назад (в мае 1991 г.). Он работал на приборостроительном факультете ЛКИ – СПбГМТУ и подрабатывал гидом-переводчиком. Общался с иностранцами и был в курсе всех политических и научных событий. Он заявил, что на западе появились такие



**Рис. 1.** Использование МКЭ для решения второй проблемы строительной механики: а) решение задачи об общем изгибе корпуса; б) формы колебаний перекрытия в машинном отделении; в) деформации бортовой обшивки под действием локальной ледовой нагрузки

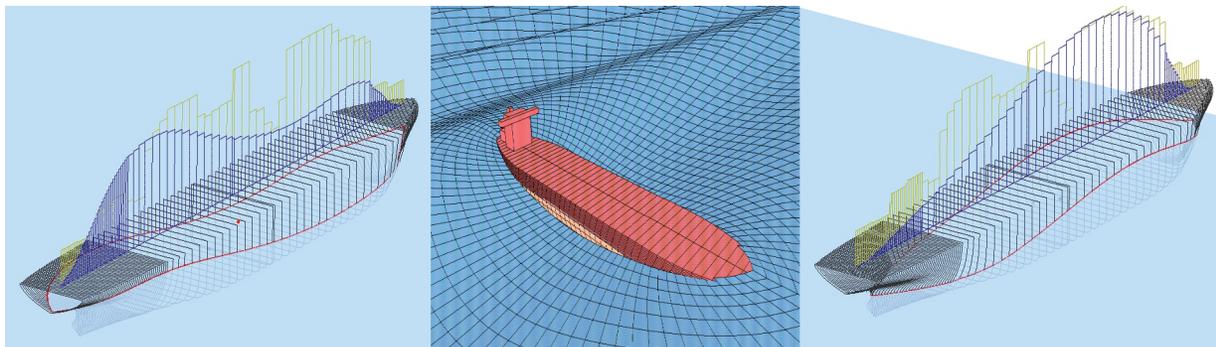
мощные программные продукты МКЭ, не требующие больших усилий в подготовке исходных данных, что никакой расчет прочности уже не является проблемой. Наука расчетов прочности на этом завершилась – заключил он. Мне стало немного не по себе. Единственным утешением был тот факт, что за год до этого разговора я защитил докторскую диссертацию. Время показало, что М.В. Бернблит глубоко ошибался.

Первоначально активнее всего МКЭ использовался для решения второй проблемы строительной механики – проблемы внутренних реакций на заданные внешние воздействия. Это были расчеты НДС, устойчивости и колебаний конструкций (рис. 1). Значительно позднее МКЭ стал применяться для решения первой проблемы строительной механики – проблемы внешних сил: определение давлений спокойной и взволнованной воды, моментов и перерезывающих сил на тихой воде и волнении (рис. 2). Но надо отметить, что расчеты НДС выполнялись

в линейной постановке, а расчеты внешних сил проводились в предположении недеформируемости корпуса и конструкций.

Наиболее сложной для МКЭ оказалась третья проблема – проблема нормирования, которая требовала детального анализа предельных состояний. Но здесь мы немного отвлечемся от решения третьей проблемы – наиболее зрелищной, поскольку прочность зримо проявляет себя, только когда ее не хватает, – и обратимся к главному предназначению строительной механики корабля – обеспечение создания прочных и надежных объектов морской техники. Прочность – это хотя и важное, но не единственное качество, которое требуется от создаваемого объекта. В процессе проектирования и согласования различных требований изменяются конфигурация и параметры конструкции. Требуется повторная проверка прочности модифицируемых конструкций. В связи с этим строительная механика может быть сформулирована в двух формах – прямой и обратной задачи.

**Рис. 2.** Использование МКЭ для решения первой проблемы строительной механики



## Строительная механика и оптимизация конструкций

В настоящее время в строительной механике корабля наибольшее внимание уделяется прямой задаче, или задаче проверочного расчета, состоящей в отыскании характеристик НДС и определении истинных запасов прочности конструкции, заданных размеров при заданных внешних воздействиях.

Обратная задача, или задача проектировочного расчета, состоящая в отыскании размеров конструкции при заданных внешних воздействиях и регламентируемых запасах прочности, изучалась в теории строительной механики корабля реже. Например, среди множества важнейших задач строительной механики корабля, решенных И.Г. Бубновым и П.Ф. Папковичем, обратными являются задачи «о подборе сечения изогнутой балки по заданной величине усилий, передающихся через это сечение» и «о необходимой жесткости перекрестных связей, обеспечивающих заданную величину критических напряжений потери устойчивости перекрытия» [8].

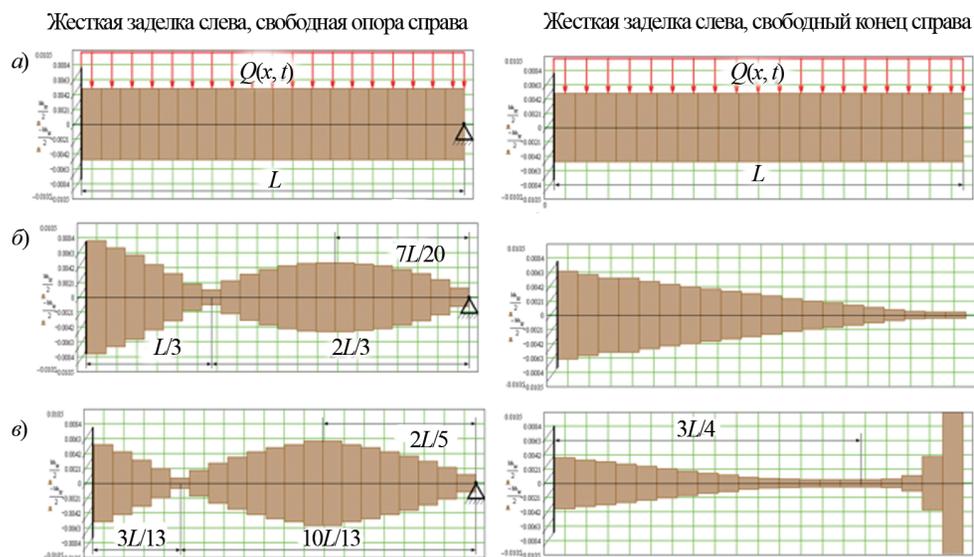
Надо сказать, что и сейчас строительная механика продолжает развиваться главным образом в направлении совершенствования возможностей расчета. В настоящее время уже не вызывает принципиальных затруднений расчет даже сложной конструкции и определение с необходимой точностью значений перемещений, деформаций, напряжений под действием статических и динамических нагрузок, а также частот и форм колебаний. Однако результаты этих расчетов не содержат непосред-

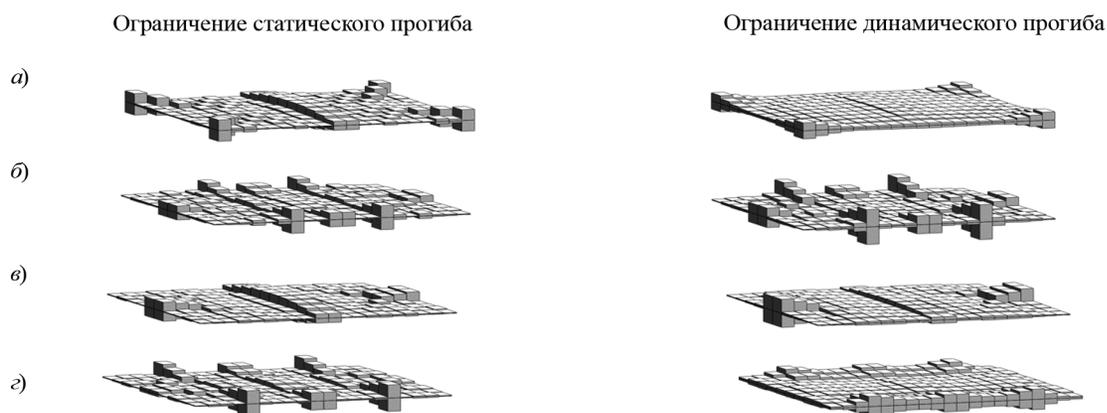
ственно рекомендаций о том, какую конфигурацию должна иметь конструкция, как следует ее модифицировать, чтобы удовлетворить требованиям прочности, жесткости и т.п. Такие рекомендации можно получить только при решении обратной задачи.

Следует обратить внимание, что прямая задача строительной механики имеет единственное решение, в то время как для обратной задачи существует бесконечное множество решений. В рамках обратной задачи, если сформирована функция качества (функция цели), математически строго может быть получено единственное решение задачи оптимизации конструкции – одного из наиболее перспективных направлений [9].

Оптимизация конструкций судового корпуса осложняется необходимостью удовлетворения ограничений не только на переменные проектирования, но и на переменные состояния (перемещения, деформации, напряжения, критические напряжения – в статических и динамических процессах). Это требует от строительной механики поиска более эффективных методов решения обратных задач, которые в конечном итоге формируются на базе углубленного анализа прямых задач. В настоящее время происходит переход от частных задач, посвященных оптимизации отдельных видов конструкции, к оптимизации такой сложной конструкции, какой является корпус морского инженерного сооружения или судна в целом [10, 11]. Но наиболее зрелищными остаются частные задачи оптимизации, которые здесь и демонстрируются [12] (рис. 3, 4). При перераспределении материала в про-

**Рис. 3.** Результаты оптимизации балки в условиях статического и динамического плоского изгиба: а) исходный вариант; б) вариант минимальной массы при активном ограничении на статический прогиб; в) вариант минимальной массы при активном ограничении на динамический прогиб





**Рис. 4.** Результаты оптимизации прямоугольной жесткой пластины под действием поперечной нагрузки при варьировании граничных условий на опорном контуре: а) свободное опирание по всем краям; б) жесткая заделка по всем краям; в) длинные края свободно оперты, короткие жестко заделаны; г) длинные края жестко заделаны, короткие свободно оперты

цессе оптимизации конструкции принимают причудливые формы, схожие с биологическими объектами (рис. 3). И это не случайно: природа в совершенстве владеет методами оптимизации, а разгадать замысел создателя в каждом конкретном случае – функцию цели и ограничения – это наша задача.

Различные граничные условия и ограничения на статические и динамические параметры приводят к различным конфигурациям оптимальных вариантов. У вытянутых пластин образуются ребра жесткости, что позволяет проследить формирование силовых связей – костей скелета живого организма (рис. 4).

Использование оптимизации в процессе проектирования конструкций позволяет: получить вариант конструкции с заданными свойствами при минимальной материалоемкости или стоимости изготовления; выявить условия работы отдельных связей конструкции и закономерности распределения внутренних усилий; определить предпочтительные тенденции модификации конструкции; проверить обоснованность накладываемых ограничений. В любом случае систематическое применение методов оптимизации позволяет снизить массу конструкции от 5 до 30 %.

Регулярное применение методов оптимизации открывает новое направление – управления или оптимального управления свойствами создаваемого инженерного сооружения. Чрезвычайно важно управление параметрами конструкции в аварийных ситуациях, возникающих при эксплуатации в особых условиях. Понимание необходимости минимизации

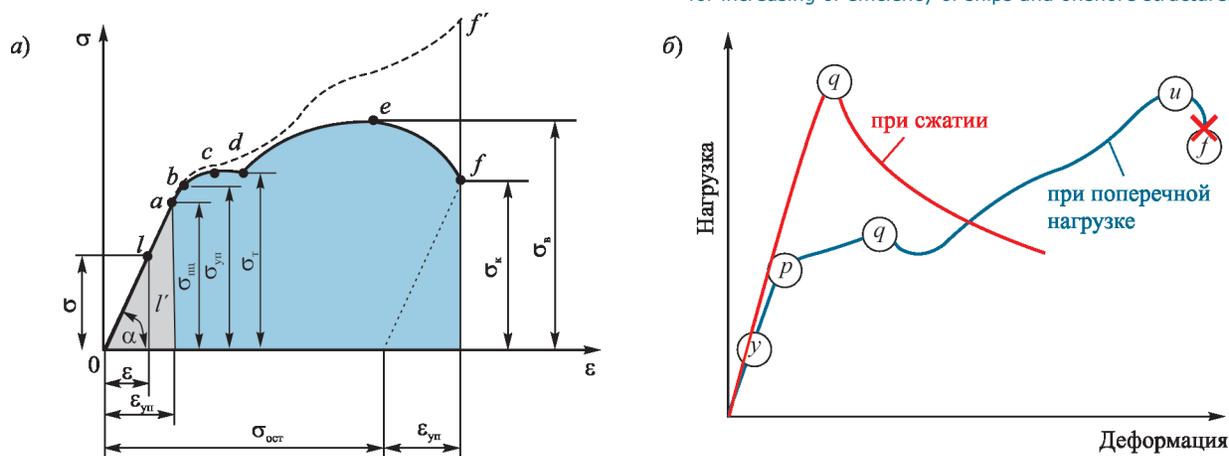
потерь в аварийных ситуациях привело к появлению аварийной прочности, т.е. к управлению предельными состояниями.

### Расширение диапазона задач строительной механики

И здесь можно вернуться к третьей проблеме строительной механики – к проблеме опасных состояний, проблеме нормирования. Из анализа кривых деформирования стального образца и стальной конструкции (рис. 5) видно, что нормативная работа конструкции определяется лишь малым начальным упругим, линейным участком этих кривых, а до полного разрушения материал и конструкция проходят несколько стадий. При этом поглощаемая энергия пластического деформирования (голубой цвет (рис. 5а)) существенно превосходит начальную упругую стадию (серый цвет).

Предельные состояния конструкций в зависимости от степени возможных последствий могут быть различных типов: предельное состояние по пригодности к эксплуатации; предельное состояние по потере несущей способности; аварийное предельное состояние.

Решение задач глубокого пластического деформирования с помощью МКЭ, когда перемещения конечных элементов как жесткого целого существенно превосходят деформационные перемещения, потребовало изменения схем численного интегрирования – перехода от неявных схем к явным, а затем и изменения самой формулировки задачи [13–15].



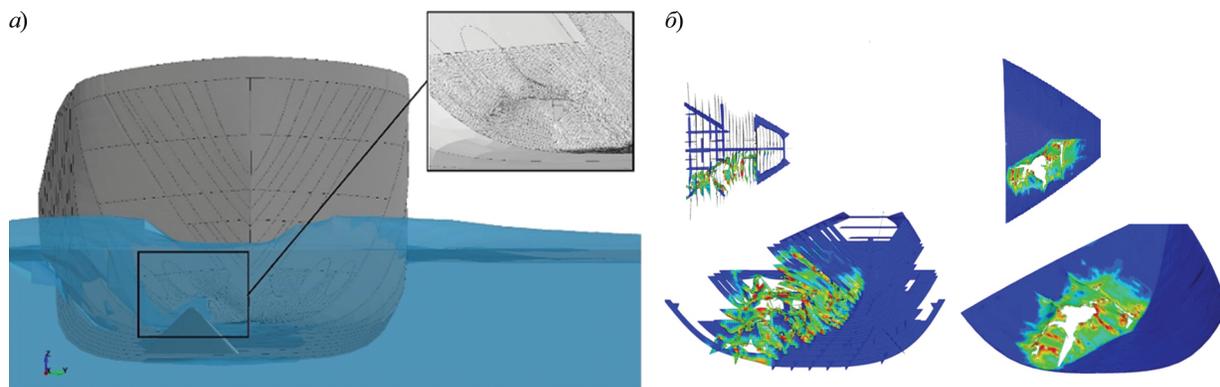
**Рис. 5.** Диаграммы сопротивления изделий из стали: а) диаграмма деформирования образца, где  $a$  – предел пропорциональности,  $b$  – предел упругости,  $c$  – предел текучести;  $d$  – начало упрочнения,  $e$  – временное сопротивление,  $f$  – разрушение; б) кривая нагружения конструкции, где  $y$  – появление первой текучести,  $p$  – состояние пригодности к эксплуатации,  $q$  – потеря несущей способности,  $u$  – аварийное предельное состояние,  $f$  – разрушение

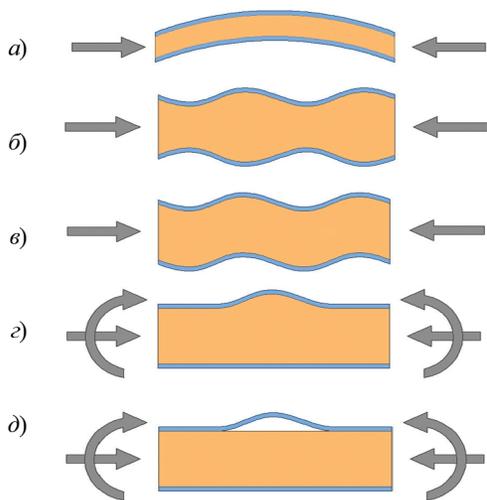
При больших деформациях и разрушении поведение материала конструкции больше похоже на поведение текучей среды (жидкости). В связи с этим целесообразен переход от лагранжевой формулировки задачи, когда сетка деформируется вместе с материалом (традиционно используется в механике деформируемого твердого тела), к эйлеровой формулировке, когда сетка неподвижна, а материал перемещается относительно этой сетки (традиционно используется в динамике жидкости и газа). Открывается возможность решения задачи деформирования и разрушения конструкций в их естественной водо-воздушной среде [16]. Рамки

строительной механики расширяются до решения междисциплинарных задач: столкновение плавающего судна с неподвижной стенкой; столкновение плавающих судов – поперечный таран; столкновение плавающего судна с подводной скалой [17, 18] (рис. 6). Создаваемые виртуальные модели позволяют в реальном времени отслеживать процессы деформирования и разрушения конструкций в самых сложных аварийных ситуациях.

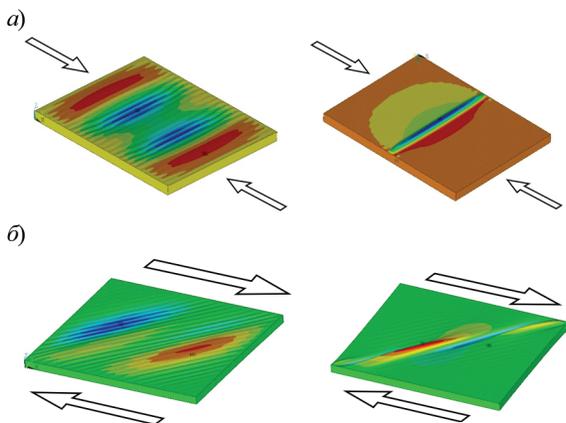
Современная строительная механика корабля сформировалась и выстроилась как результат использования металлических конструкций. Методы и методики были ориентированы на этот материал.

**Рис. 6.** Решение задачи аварийной прочности: а) расчетная модель движущегося в жидкости корпуса, сталкивающегося со скалистым образованием на дне; б) результаты исследования повреждения конструкции корпуса в виде полей пластических деформаций набора днищевого перекрытия (слева) и обшивки днища в районе носовой оконечности, соответствующие окончанию контакта со скалистым образованием с учетом разрушения (вид в аксонометрии – снизу, вид сверху – выше)





**Рис. 7.** Возможные формы потери устойчивости трехслойных конструкций из ПКМ:  
 а) общая; б) симметричная;  
 в) антисимметричная; г) локальная;  
 д) локальная с отслоением



**Рис. 8.** Формы потери несущей способности пластинчатых конструкций из ПКМ:  
 а) пластины в условиях одноосного сжатия;  
 б) пластины в условиях сдвига (слева – линейный наполнитель, справа – нелинейный)

Применение в судостроении новых конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) открывает в строительной механике новую отрасль – строительная механика конструкций из ПКМ. Чаще используются трехслойные конструкции, которые характеризуются двумя несущими наружными тонкими достаточно жесткими слоями, между которыми помещается толстый слой мягкого заполнителя. Деформирование, предельные состояния и формы разрушения таких конструкций существенно отличаются от того, с чем привыкла иметь дело современная строительная механика [19, 20]. На рис. 7 представлены результаты исследования форм устойчивости конструкций из ПКМ. Первая форма потери устойчивости характерна и для традиционных стальных конструкций, а четыре следующие свойственны исключительно конструкциям из ПКМ. При исследовании несущей способности трехслойных пластин из ПКМ необходимо учитывать нелинейное поведение мягкого заполнителя, что существенно изменяет формы потери несущей способности (рис. 8). Формы разрушения ПКМ, обнаруживаемые при анализе аварийной прочности, имеют характерные для ПКМ особенности (рис. 9).

## Заключение

Структура строительной механики как науки, сформированная основоположниками и развитая многими поколениями выдающихся ученых, достаточно прочна и надежна, чтобы со всей полнотой и многосторонностью исследовать формы разрушения конструкций из ПКМ. Строительная механика корабля как прикладная наука опирается на все достижения современной математики от аналитических до численных методов, использует аналоговые и цифровые технологии, применяет методы вычислительной механики, искусственные нейронные сети для идентификации, прогнозирования, оптимизации и управления сложными процессами. Для нее характерны методологии анализа (углубления) и синтеза (интегрирования и расширения). Она ориентирована на новые материалы, изучение новых явлений и новых объектов морской техники от традиционных кораблей и судов до морских инженерных сооружений для освоения богатств Мирового океана. Задачи строительной механики можно сформулировать следующим образом: построение все более точных виртуальных моделей изучаемых процессов и явлений, а также проведение анализа этих моделей – анализа чувствительности к варьируемым параметрам.



Рис. 9. Формы разрушения конструкций из ПКМ, используемые при анализе аварийной прочности

### Библиографический список

1. Самые древние сооружения на Земле // Блог о камне. URL: <http://blogokamne.ru/katalog-rabot/interesnoe/top-10-samyx-drevnix-stroenij-mira.html> (дата обращения: 26.03.18).
2. Витрувий. Десять книг об архитектуре. Т. 1. М.: Изд-во Всесоюзной Академии архитектуры, 1936.
3. Механика и физика XVIII в. М.: Наука, 1976.
4. Бубнов И.Г. Строительная механика корабля. Ч. I. СПб., 1912. Ч. II. СПб., 1914
5. Бубнов И.Г. Избранные труды. Л.: Судпромгиз, 1956.
6. Turner M.I., Glough R.W., Martin H.C., Topp L. Stiffness and deflection analysis of complex structures // J. Aeronaut. Sci. 1956. Vol. 23.
7. Curant R. Variable methods for the solution of problems of equilibrium and vibration // Bull. Amer. Math. Soc. 1943. 49. № 1.
8. Папкович П.Ф. Строительная механика корабля. Ч. II. Л.: Судпромгиз, 1941. Ч. I, Т. 1. М.: Морской транспорт, 1945. Ч. I, Т. 2. М.: Морской транспорт, 1947.
9. Родионов А.А. Математические методы проектирования оптимальных конструкций судового корпуса. Л.: Судостроение, 1990.
10. Родионов А.А. Исследование математических моделей оптимизации судовых конструкций // Судостроение. 1992. № 8, 9. С. 6–10.
11. Кормилицин Ю.Н., Малышевский Ю.В., Родионов А.А. Совершенствование методов проектирования корпусных конструкций подводных лодок нового поколения // Судостроение. 2006. № 1. С. 32–35.
12. Миронов М.Ю., Родионов А.А. Развитие непрямых методов оптимизации конечно-элементных моделей жестких пластин // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 6(215). С. 58–62.

13. *Коришунов В.А., Родионов А.А.* Исследование форм глубокого пластического деформирования судовых панелей при сжатии // Морские интеллектуальные технологии. 2011. 4(14). С. 16–20.
14. *Коришунов В.А., Родионов А.А.* Исследование форм глубокого пластического деформирования судовых панелей при поперечном давлении // Морские интеллектуальные технологии. 2011. 4(14). С. 21–26.
15. *Коришунов В.А., Родионов А.А.* Исследование характеристик предельной прочности бортового перекрытия при различных значениях остаточных толщин связей // Морской вестник. 2012. 1(9). С. 35–42.
16. *Родионов А.А., Аунг Куи Мьинт.* Численное моделирование аварийного разрушения днищевого перекрытия при контакте с подводным камнем // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 82(366). С. 31–36.
17. *Родионов А.А., Аунг Куи Мьинт, Коришунов В.А., Пономарев Д.А.* Исследование динамических характеристик при посадке судна на мель // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 89.2(373.2). С. 109–122.
18. *Коришунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А.* Численное моделирование процессов деформирования пространственных конструкций судов и морских инженерных сооружений при динамическом воздействии водо-воздушной среды // Морской вестник. 2017. Спецвыпуск № 1(13). С. 49–55.
19. *Коришунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А.* Анализ предельных форм потери несущей способности конструктивных связей корпуса из полимерных композиционных материалов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 92(376). С. 9–18.
20. *Коришунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А.* Численная реализация возможных форм нелинейной потери устойчивости сэндвич-панелей из полимерных композиционных материалов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 17–26.

### Сведения об авторе

*Родионов Александр Александрович*, д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительной механики корабля СПбГМТУ. Адрес: 190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Телефон: +7 (812) 494-09-42. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

Поступила / Received: 03.03.18  
Принята в печать / Accepted: 03.05.18  
© Родионов А.А., 2018