

В.А. КОРШУНОВ, Д.А. ПОНОМАРЕВ, А.А. РОДИОНОВ
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОРПУСА КАТАМАРАНА С ЖИДКОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

Разработаны математические модели метода конечных элементов для исследования процессов динамического взаимодействия деформируемого корпуса катамарана с водо-воздушной средой в условиях волнения. Для выявления форм предельных состояний предложен метод подмоделирования, основанный на использовании кинематических параметров взаимодействия из полномасштабной модели в подмодели, которая физически эквивалентна модели более высокого уровня.

Ключевые слова: слеминг, нелинейное деформирование, численные модели, композиционные материалы, катамаран, предельное состояние.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Моделирование взаимодействия деформируемых конструкций корпуса катамарана с жидкостью в условиях морского волнения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 104–113.

УДК 629.5.022.2/.3:629.5.023

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-104-113

V.A. KORSHUNOV, D.A. PONOMAREV, A.A. RODIONOV
St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya str., 3, St. Petersburg, Russia

MODELING OF INTERACTION BETWEEN FLUID AND DEFORMABLE HULL STRUCTURES OF CATAMARAN IN SEAWAY

Mathematical FEM models are developed to investigate dynamic interaction processes between deformable hull structures of catamaran with water and air environment in seaway. Sub-modeling method is suggested for finding limiting states. The method is using kinematic interaction parameters taken from the full-scale model in the sub-model, which is physically equivalent to the higher-level model.

Key words: slamming, non-linear deformation, numerical models, composite materials, catamaran, limiting state.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Korshunov V.A., Ponomarev D.A., Radionov A.A. Modeling of interaction between fluid and deformable hull structures of catamaran in seaway. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 104–113 (in Russian).

UDC 629.5.022.2/.3:629.5.023

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-104-113

Введение

При высокой балльности морского волнения, когда судно подвергается сильной вертикальной и продольной качке, оконечности судна поднимаются над поверхностью воды, а затем снова погружаются. В это время корпус буквально врезается в поверхность воды. Судно воспринимает импульсные давления с большой амплитудой в зоне оконечностей, что может привести к значительному росту местных напряжений и разрушению конструкций корпуса. Для судов с низкой кормовой осадкой и относительно плоским дном наблюдается днищевой слеминг в кормовой оконечности, аналогичный носовой оконечности.

В реальных условиях угол входа конструкции в воду отличается от угла килеватости – в результате качки судна и неровной волновой поверхности. Вероятность опасных ударов при слеминге увеличивается при большой высоте и длине волны, соизмеримой с продольным размером корпуса. Существующие аналитические и полуаналитические модели не позволяют учитывать описанные факторы. В связи с этим большой интерес представляет полномасштабное численное моделирование поведения деформируемого корпуса в условиях морского волнения.

В статье приводятся результаты численного моделирования процессов деформирования и анализ предельных состояний конструкций корпуса судна катамаранного типа из трехслойных сэндвич-панелей в условиях морского волнения. В задаче рассматриваются все этапы процессов деформирования.

Разработка численных моделей взаимодействия

На базе численных процедур метода конечных элементов формулируется наиболее общая постановка задачи взаимодействия конструкций корпуса судна при его движении в условии морского волнения. Получение решения столь сложной задачи требует выработки специальных подходов, направленных на повышение эффективности вычислений.

В качестве объекта исследования рассматривается прототип судна катамаранного типа – аналог пассажирского катамарана пр. 23290. Конструкция судна представляет собой два корпуса, соединенных переходным мостом. Полная длина судна составляет 25,77 м, ширина – 9,3 м, осадка – 1,5 м.

В качестве первого шага к полномасштабному анализу всего процесса взаимодействия корпуса катамарана с водо-воздушной средой выполняется анализ кинематических и динамических параметров

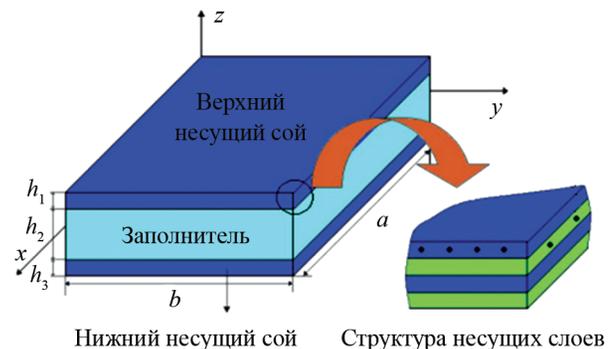
взаимодействия недеформируемого корпуса. К кинематическим параметрам относятся перемещения, скорости и ускорения, к динамическим – внешние нагрузки, возникающие в результате ударных воздействий водной среды на корпус катамарана. Ударное нагружение реализуется в результате моделирования морского волнения в рамках виртуального бассейна водо-воздушной среды.

Конструкции корпуса катамарана представляют собой трехслойные сэндвич-панели, выполненные из полимерных композиционных материалов. Несущие слои, образованные из пакета монослоев, формируют наружную поверхность конструктивного элемента, а наполнитель располагается между ними (рис. 1) [1, 2].

Конечноэлементная модель корпуса катамарана включает в себя все конструктивные элементы в явном виде. Для моделирования корпуса используются многослойные оболочечные конечные элементы в формулировке Лагранжа с одной точкой интегрирования на каждый слой. В качестве слоев оболочки определяются внешние несущие слои с приведенными характеристиками и характеристики среднего слоя – наполнителя. На рис. 2 представлена конечноэлементная модель судна; часть элементов обшивки и надстройки скрыта для демонстрации внутреннего набора.

Построение виртуальной модели движения судна катамаранного типа в условиях волнения предусматривает помимо создания конечноэлементной модели корпуса также разработку модели пространства, состоящего из водной и воздушной сред. Чтобы сократить размеры модели пространства, в котором движется судно, в настоящем исследовании применен принцип обращенного движения. Судно

Рис. 1. Структура сэндвич-панелей конструктивных элементов корпуса



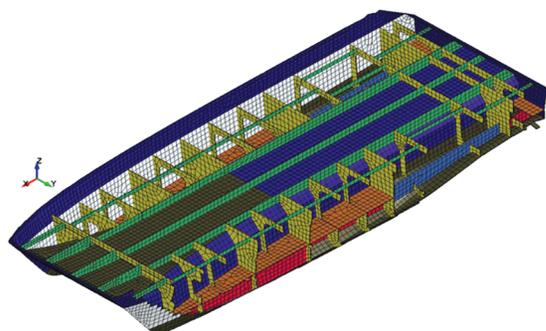


Рис. 2. Конечноэлементная модель корпуса катамарана (часть обшивки и надстройка не показаны)

фиксируется в пространстве, а навстречу ему движется поток водной и воздушной сред. Модель водо-воздушного пространства представляется в форме параллелепипеда, разделенного горизонтальной плоскостью на две равные части: верхняя часть – воздушная среда, нижняя часть – водная среда. На границе двух сред располагается модель корпуса катамарана, для фиксации которой в центре ее тяжести исключаются продольные и поперечные перемещения, а также углы поворота относительно продольной и вертикальной осей (угол крена и угол рыскания). В результате модель имеет возможность свободно перемещаться вдоль вертикальной оси (вертикальная качка) и вращаться вокруг поперечной оси (килевая качка). Положение модели судна по осадке и по углу дифферента поддерживается условиями равновесия.

Габаритные размеры модели водо-воздушного пространства приняты следующими: длина – 35 м, ширина – 14,0 м, высота – 12 м. Водо-воздушное пространство аппроксимируется объемными конечными элементами в формулировке Произвольной Лагранжа – Эйлера (ПЛЭ). Размер конечных элементов выбран из соображения приемлемого времени счета и адекватной работы контактного алгоритма сопряжения вычислительных сеток Лагранжа и ПЛЭ. Размер конечных элементов принят равным 0,25 м. Таким образом, общее число конечных элементов катамарана – 25 040. Полное количество конечных элементов водо-воздушного пространства составило 780 000. Общая схема виртуальной модели взаимодействия катамарана с водо-воздушной средой представлена на рис. 3.

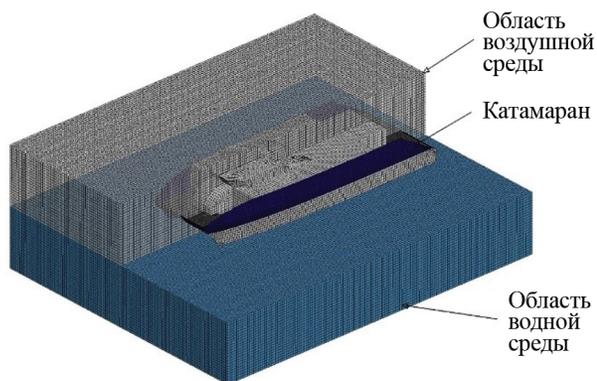


Рис. 3. Виртуальная модель катамарана в водо-воздушном пространстве (часть элементов воздуха не показана)

К узловым точкам передней грани области водной среды прикладывалась входная скорость набегающего потока, равная скорости движения катамарана. Такая же скорость истечения жидкости прикладывалась и к узловым точкам задней грани. На боковых гранях и дне задавались условия непротекания.

Для генерации двумерного регулярного волнения к узлам, расположенным на передней грани области жидкости, были приложены компоненты скорости для конечной глубины бассейна [3, 4]. Граничные условия, заданные для воздушного пространства, аналогичны таковым для области водной среды.

Взаимодействие корпуса катамарана с водо-воздушным пространством происходит в поле силы тяжести. Также учитывается гидростатическое давление в водной среде и действие атмосферного давления на свободной поверхности области водной среды.

Возможность деформирования конечноэлементной модели катамарана обеспечивается использованием упругой ортотропной модели материала для внешних несущих слоев и заполнителя всех трехслойных панелей элементов конструкций.

Для водной среды используется модель материала с уравнением состояния Ми – Грюнайзена, а для воздушной среды – модель материала с уравнением состояния, линейным относительно внутренней энергии и полиномиальным относительно плотности. Таким образом, вода является вязкой сжимаемой средой.

Весь процесс взаимодействия можно условно разделить на три интервала: промежуток с $t = 0$ с до $t = 5$ с соответствует движению на тихой воде, следующие 2,5 с отвечают за генерацию волнения, и с $t = 7,4$ с до $t = 10$ с происходит движение судна на

заданном волнении. Деформирование корпуса допускается на третьем интервале.

Описанная математическая модель метода конечных элементов позволяет с требуемой степенью точности получить в узловых точках и конечных элементах все необходимые параметры для оценки нагрузок, действующих на корпус катамарана, и его напряженно-деформированного состояния.

В каждый момент времени всего процесса взаимодействия регистрируются компоненты перемещений, скоростей и ускорений в узловых точках и конечных элементах корпуса, а также контактные давления, возникающие при взаимодействии корпуса и водной среды. Для конечноэлементной модели водной и воздушной сред определяются компоненты скорости, ускорения и давления. При учете сжимаемости воздуха и воды вычисляются соответствующие значения плотностей.

В процессе исследования варьировалась скорость хода судна и длина волны. Так, рассматривается движение со скоростями 20, 30 и 40 уз, длина волны составляла 25, 30, 35 м.

Для регистрации кинематических параметров взаимодействия в качестве зон контроля рассматриваются характерные точки кормы, носа и центра тяжести корпуса.

Для регистрации динамических параметров катамаран разбивается на 3 сектора по длине – кормовой сектор $x_k = 7,2$ м, сектор средней части $x_m = 13,4$ м, носовой сектор $x_n = 5,17$ м – и по ширине – сектор левого корпуса $y_L = 3,3$ м, сектор моста $y_M = 3,3$ м, сектор правого корпуса $y_R = 3,3$ м (рис. 4, 5).

Так как предполагается движение катамарана вразрез двумерному волнению с курсовым углом 0° и симметричность конструкций, то динамические параметры взаимодействия можно принять для секторов y_L, y_R одинаковыми.

Рис. 4. Схема разбивки корпуса на сектора по длине для регистрации динамических параметров взаимодействия

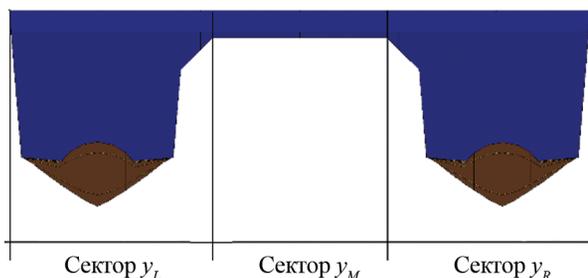
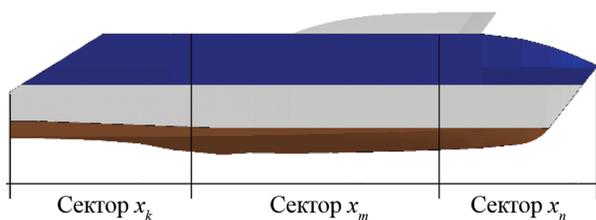


Рис. 5. Схема разбивки корпуса на сектора по ширине для регистрации динамических параметров взаимодействия, надстройка не показана

Результаты численного моделирования

В результате численного моделирования установлено следующее. Увеличение скорости хода катамарана приводит к перераспределению максимальных значений суммарных усилий, действующих на каждый сектор корпуса. Так, при максимальной скорости основной удар приходится в район носовых секторов, что приводит к возникновению экстремальных нагрузок. При умеренной скорости движения удару подвержены днищевые конструкции в секторах средней части.

При неизменных параметрах волнения и увеличении скорости хода изменяется характер взаимодействия корпуса катамарана со взволнованной поверхностью водной среды. Например, при движении судна на подошве волны происходит удар о набегающую вершину волны, при этом на небольшой скорости хода реализуется полное погружение носовой оконечности с заливанием палубы бака. Это приводит к возникновению экстремальных нагрузок на мост катамарана. С увеличением скорости режим движения с зарыванием в волну переходит в режим движения с малой осадкой.

Распределение экстремальных значений суммарных сил, действующих на сектора, а также смена режима движения катамарана представлены на рис. 6.

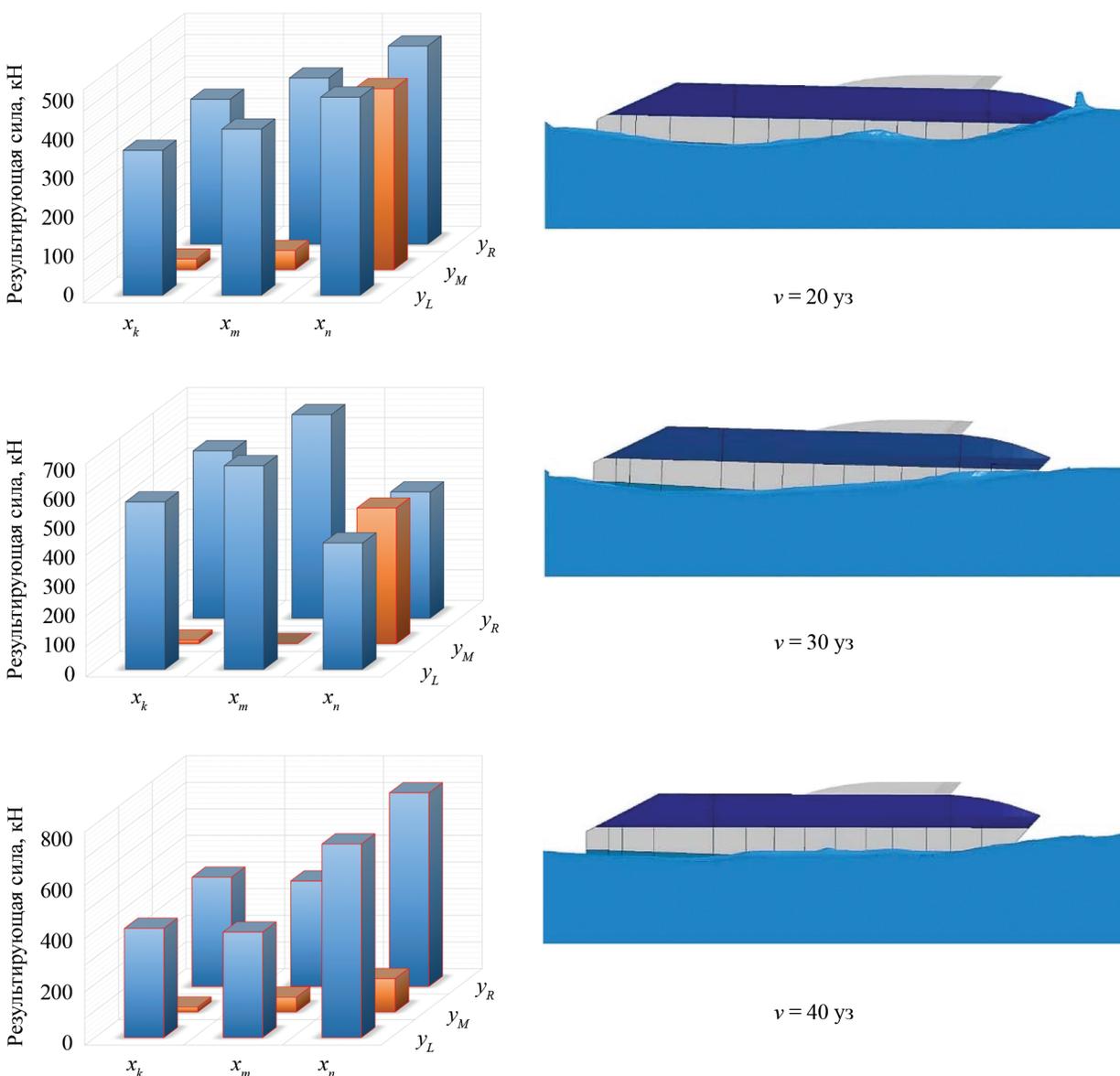
Характер взаимодействия катамарана с водной средой напрямую отражается на возникающих экстремальных значениях гидродинамических нагрузок. При максимальной рассматриваемой длине волны наиболее опасно нагруженным сектором оказывается средняя часть корпуса, что связано с полным выходом судна из водной среды с последую-

щим ударом. Также при варьировании длины волны происходит перераспределение гидродинамических нагрузок на мост катамарана от кормовой к носовой оконечности.

При увеличении длины волны с 25 до 35 м наблюдается изменение характера движения катамарана. Так, для длины волны, близкой к длине судна, реализуется режим прорезания волны с небольшой

продольной качкой. При этом оголение кормовой оконечности не происходит. С ростом длины волны режим прорезания переходит в режим «выпрыгивания», что приводит к частичному или полному оголению кормовой оконечности с последующим ударом о водную поверхность. Данные процессы и распределение экстремальных значений суммарных сил, действующих на сектора, представлены на рис. 7.

Рис. 6. Смена режима движения катамарана и перераспределение экстремальных нагрузок по секторам корпуса при увеличении скорости хода



При уменьшении длины волны оголение конечностей катамарана уменьшается, тем самым полного выхода корпуса из воды не происходит, что вызывает снижение суммарной гидродинамической нагрузки (рис. 8).

При проектировании важным параметром являются ускорения, вызванные качкой судна. В настоящем исследовании предполагается возможность

только килевой качки. Оценка максимальных возможных вертикальных ускорений корпуса в зависимости от скорости движения показана на рис. 9.

Увеличение длины волны при постоянной скорости хода приводит к перераспределению вертикальных ускорений по длине корпуса (рис. 10).

Учет деформируемости корпуса приводит к снижению суммарной внешней нагрузки примерно

Рис. 7. Смена режима движения катамарана и перераспределение экстремальных нагрузок по секторам корпуса при увеличении длины волны

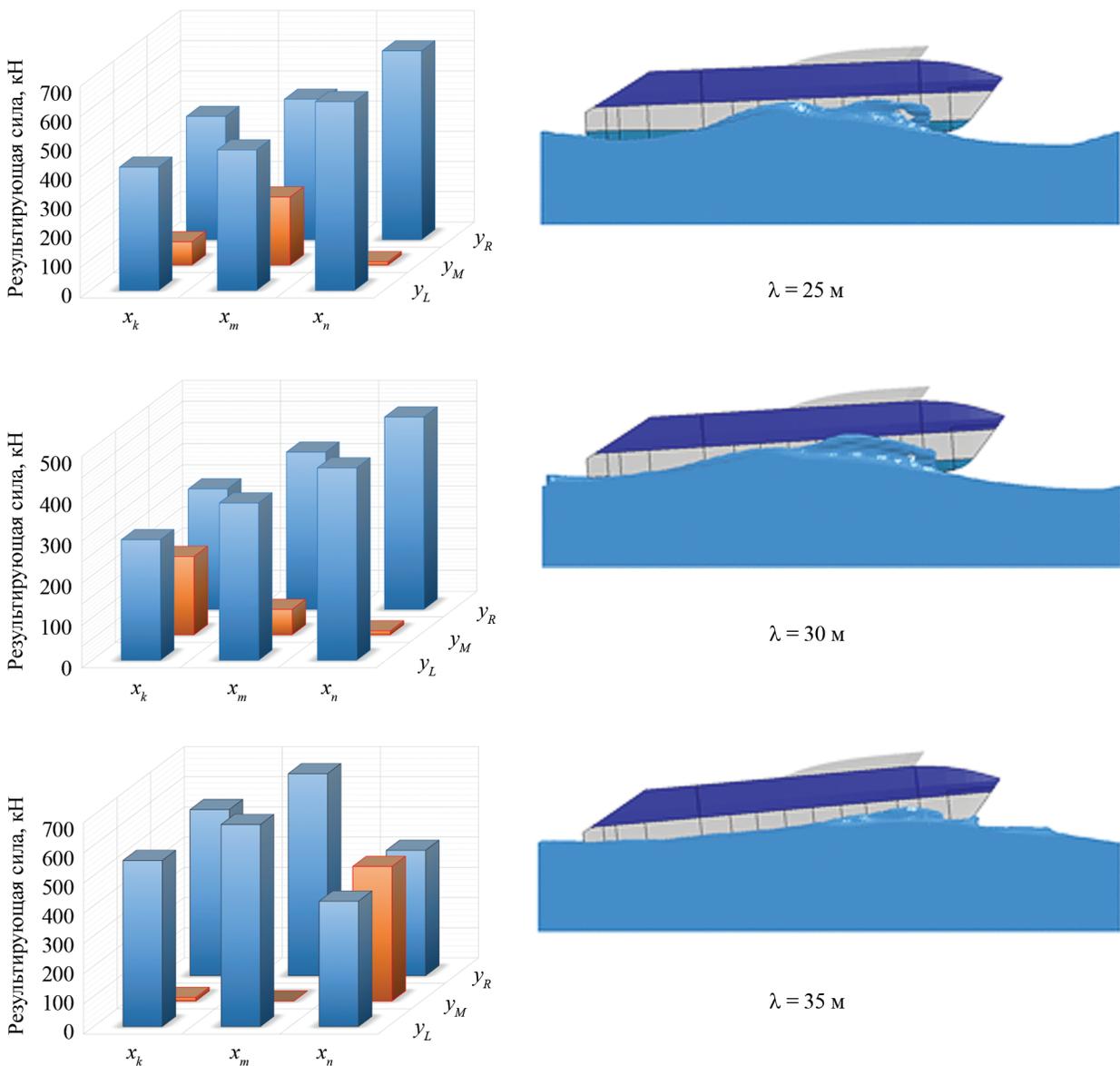




Рис. 8. Изменение суммарной гидродинамической силы в процессе взаимодействия деформируемых корпусов катамарана



Рис. 11. Изменение суммарной гидродинамической силы в процессе взаимодействия

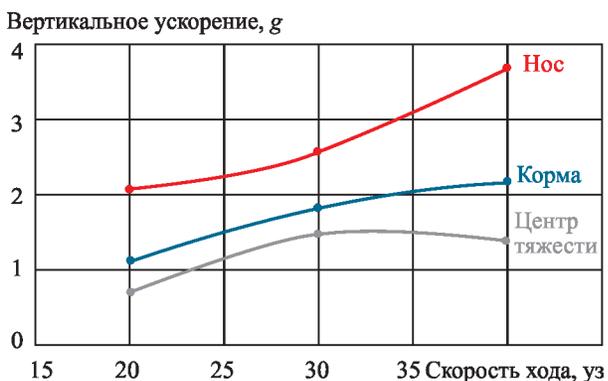


Рис. 9. Зависимость максимальных значений вертикальных ускорений от скорости хода

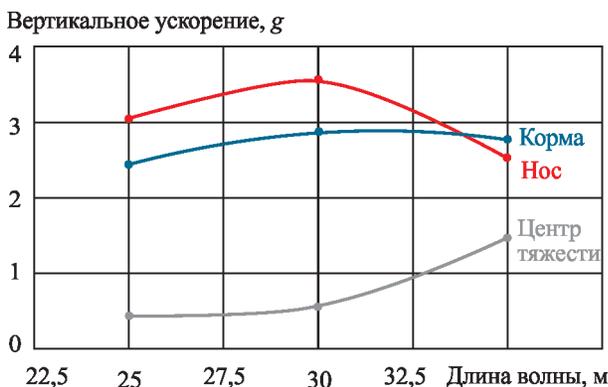


Рис. 10. Зависимость максимальных значений вертикальных ускорений от длины волны

на 15–20 % по отношению к недеформируемой модели катамарана. На рис. 11 представлена зависимость суммарной гидродинамической силы, действующей на весь катамаран, от времени. На графиках отражается изменение характера взаимодействия катамарана с водной средой; в частности, в момент времени $t = 9,2$ с для недеформируемого корпуса наблюдается снижение внешней нагрузки до 0, что свидетельствует о полном выходе судна из водной среды.

В случае учета деформируемости материала корпуса модели кроме кинематических и динамических параметров взаимодействия вычисляется обширная информация о напряженно-деформированном состоянии конструкций корпуса. При прохождении взволнованной поверхности водной среды корпус катамарана испытывает переменные ударные нагрузки, что приводит к смене форм деформирования конструкций. Например, в момент времени $t = 9,2$ с происходит перегиб корпуса катамарана в носовой оконечности, в момент времени $t = 9,8$ с — прогиб корпуса. Общий изгиб корпуса сопровождается колебаниями панелей обшивки и рамного набора. На рис. 12, 13 показаны формы деформирования в указанные моменты времени в полях нормальных напряжений σ_x .

Компоненты распределения нормальных и касательных напряжений во всех конструкциях судна, получаемые в результате численного моделирования взаимодействия деформируемого корпуса катамарана, позволяют определить интегральные значения внутренних силовых факторов. Другими словами, для всего корпуса могут быть получены распреде-

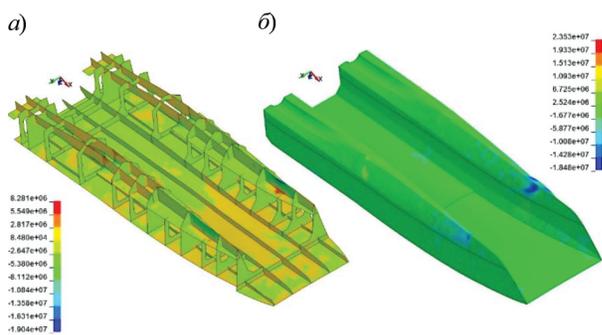


Рис. 12. Поля напряжений и деформированное состояние в увеличенном масштабе в момент времени $t = 9,2$ с: а) вид на набор, наружная обшивка не показана; б) наружная обшивка, вид с дна

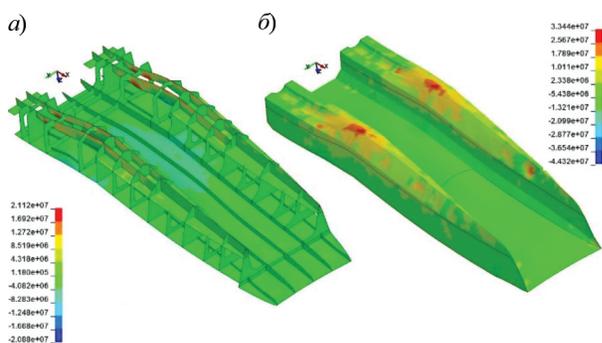


Рис. 13. Поля напряжений и деформированное состояние в увеличенном масштабе в момент времени $t = 9,8$ с: а) вид на набор, наружная обшивка не показана; б) вид на наружную обшивку

ления изгибающих и крутящих моментов, а также перерезывающих сил по всем главным направлениям, соответствующим шести степеням свободы, что принципиальной сложности не составляет.

Распределения внутренних силовых факторов и оценки экстремальных значений могут быть использованы проектными организациями непосредственно на стадии проектирования конструкций корпуса, исходя из общей и местной прочности.

Анализ возможных предельных состояний конструкций корпуса

Возможности численного моделирования не ограничиваются получением обширной информации для внешних нагрузок и распределения внутренних силовых факторов. Важным с точки зрения предельной прочности является анализ несущей способности кон-

струкций в экстремальных условиях, который позволяет выявить формы предельных состояний. Для проведения подробного анализа несущей способности предлагается использовать метод подмоделирования.

Подмодель строится с учетом всех особенностей конструкций. В явном виде учитывается наполнитель в панелях и слоистая структура несущих слоев. Наполнитель моделируется твердотельными элементами с использованием кусочно-линейной упругопластической модели материала. В качестве критерия разрушения используется деформационный, при котором анализируется пластическая деформация в элементе, и, если превышено предельное значение, он удаляется из расчетной модели. Слоистая структура несущих слоев моделируется с помощью многослойных оболочечных конечных элементов с ортотропной упругопластической моделью материала. С точки зрения теории композиционных материалов необходимо рассматривать более сложные критерии по накоплению повреждений [5]. Как правило, они относятся к отдельно взятому монослою и основываются на данных испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг. Критерий разрушения определяет критическую комбинацию действующих в монослое напряжений (деформаций), приводящую к его разрушению. В общем случае анализ прочности композиционного пакета сводится к определению его напряженно-деформированного состояния и оценке коэффициентов запаса [6].

В рамках данного исследования проводится анализ форм предельных состояний шпангоутной рамы в носовой оконечности. Связь полной модели и подмодели осуществляется с помощью кинематических параметров взаимодействия. Киль корпуса рассматриваемого судна катамаранного типа выполнен полностью из стеклопластика и по сравнению с трехслойными панелями обшивки обладает большей жесткостью. В связи с этим кинематические параметры задаются для килевого участка шпангоутной рамы. Конструкция корпуса и характер взаимодействия являются симметричными, поэтому рассматривается половина сечения относительно ДП. На карлингсе, расположенном на оси симметрии, задаются ограничения перемещений по всем направлениям, т.к. форма деформирования также является симметричной. Конечноэлементная модель показана на рис. 14.

В результате численного моделирования получены формы деформирования и формы разрушения элементов конструкций шпангоутной рамы. При

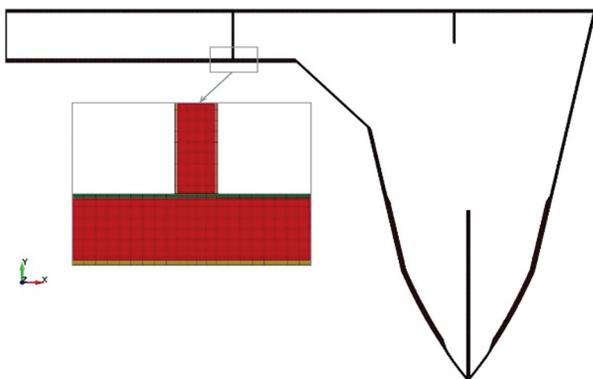


Рис. 14. Конечноэлементная модель шпангоутной рамы для оценки предельных состояний

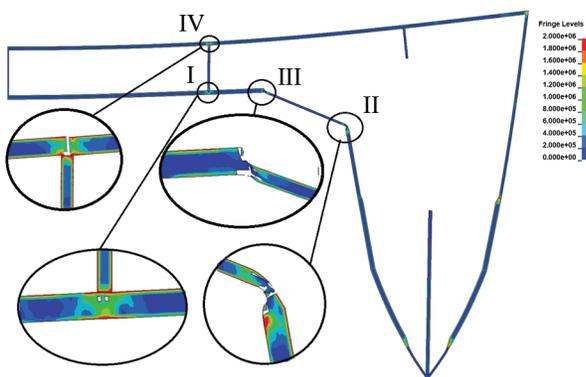


Рис. 15. Форма потери несущей способности шпангоутной рамы в полях эквивалентных напряжений



Рис. 16. История изменения вертикального усилия в процессе деформирования

росте вертикальных и горизонтальных перемещений, полученных из полной модели, наблюдается рост пластических деформаций в наполнителе. При накоплении предельного значения пластических деформаций происходит трещинообразование в панели днищевой обшивки в районе соединения с карлингсом моста катамарана при $t = 0,16$ с. Затем следует перераспределение напряжений с локализацией пластических зон в соединениях скуловой панели с ветвью шпангоута и панелью днищевой обшивки.

При полном нарушении целостности наполнителя конструкция шпангоутной рамы продолжает воспринимать нагрузку, т.к. целостность несущих слоев не нарушена и полного разрушения панели не произошло. Тем не менее разрушение среднего слоя приводит к ослаблению сечения панели и в конечном итоге к значительным перемещениям и деформациям. При дальнейшем нагружении напряжения в несущих слоях достигают предельных значений с большой скоростью, после чего происходит полное разрушение всей конструкции (рис. 15).

На рис. 16 приведена история изменения вертикального усилия в процессе деформирования шпангоутной рамы катамарана с характерными точками деформирования в зонах I–IV (рис. 15): 1 – момент времени зарождения трещины в зоне I; 2 – момент времени инициализации трещины и дальнейшее ее распространение по толщине наполнителя в зоне II; 3 – развитие трещин и разрушение наполнителя по всей толщине в зоне III; 4 – полное разрушение наполнителя в панели в зонах II и III; 5 – накопление пластических деформаций в соединении карлингса и панели палубы пассажирского салона с последующим трещинообразованием; 6 – полное нарушение целостности панелей шпангоутной рамы.

Выводы

В рамках представленной работы построены математические модели метода конечных элементов для исследования процессов взаимодействия корпуса судна катамаранного типа с водо-воздушной средой в условиях волнения. С помощью этих моделей проведен анализ полного взаимодействия деформируемых конструкций корпуса катамарана с водо-воздушной средой. В результате исследования влияния скорости хода судна выявлено перераспределение гидродинамических нагрузок на отдельные сектора корпусов и моста катамарана. Варьирование длины волны при постоянной ско-

рости хода приводит к изменению характера взаимодействия конструкций катамарана с водной средой. Так, при длине волны, равной длине корпуса, реализуется режим прорезания вершины волны. С последующим увеличением длины волны наблюдается рост вертикальных перемещений, что обусловлено «выпрыгиванием» судна из волны.

Поглощение энергии, связанное с процессом деформирования элементов конструкций, приводит к снижению суммарной гидродинамической нагрузки. Помимо динамических и кинематических параметров взаимодействия получена обширная информация о напряженно-деформированном состоянии конструкций. Распределение напряжений позволяет получить распределения внутренних силовых факторов, которые могут быть использованы на стадии проектирования. Также получены оценки экстремальных внешних нагрузок.

Для выявления форм предельных состояний предложено использовать метод подмоделирования, основанный на использовании кинематических параметров взаимодействия из полномасштабной модели в подмодели, которая представляет собой подробную конечноэлементную модель опасных сечений. Опасные сечения, в которых возможна потеря несущей способности конструктивных элементов, определяются исходя из районов действия экстремальных нагрузок, возникающих в процессе динамических воздействий водо-воздушной среды.

В результате анализа форм предельного состояния опасного сечения выявлены характерные стадии с соответствующими формами деформирования. Для полученных стадий выделены характерные точки трещинообразования и полного разрушения элементов конструкции.

Библиографический список

1. Коршунов 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.
2. Коршунов 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.
3. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Виртуальные модели движения судна в условиях волнения // Тезисы Конференции по строительной механике корабля, посвященной памяти академика Ю.А. Шиманского. ВНТО судостроителей им. акад. А.Н. Крылова. СПб., 19–20 декабря 2013 г. С. 115–116.
4. Коршунов В.А., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Численное моделирование процессов деформирования судового корпуса при динамическом воздействии водовоздушной среды // Морской Вестник. 2017. Специальный выпуск № 1(13). С. 49–55.
5. Сычева С.Н., Родионов А.А. Моделирование прогрессирующего разрушения деталей корпусных конструкций из полимерных композиционных материалов при столкновении с жестким препятствием // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 91(375). С. 53–62.
6. Гришин В.И., Дзюба А.С., Дударьков Ю.И. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. М.: Издательство физико-математической литературы, 2013.
7. LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. 971. Livermore Software Technology Corporation.

Сведения об авторах

Коршунов Владимир Александрович, к.т.н., доцент кафедры строительной механики СПбГМТУ. Адрес: 190121, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ломанская, 3. Телефон: +7 (812) 494-09-42. E-mail: vovankorshunov@yandex.ru.

Пономарев Дмитрий Александрович, ассистент кафедры строительной механики корабля, СПбГМТУ. Телефон: +7 (812) 494-09-42. E-mail: ponomarev.smk@corp.smtu.ru.

Родионов Александр Александрович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой строительной механики корабля, СПбГМТУ. Телефон: +7 (812) 494-09-42. E-mail: rodionovsmk@yandex.ru.

Поступила / Received: 05.03.18
Принята в печать / Accepted: 03.05.18
© Коллектив авторов, 2018

