

УДК 629.12.001

М.Э. Францев¹, О.В. Зайцев², И.Д. Золотаренко²**МОДЕЛЬ ПРОЕКТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ НАДСТРОЙКИ
ИЗ КОМПОЗИТОВ ПАССАЖИРСКОГО СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ**АОЗТ «Нептун-Судомонтаж» (г. Долгопрудный)¹,
МГТУ им. Н.Э. Баумана²

Проектирование надстройки из полимерных композиционных материалов для пассажирского судна на подводных крыльях (далее СПК), как элемента судна, неразрывно связано с проектированием самого судна. Надстройка входит в подсистему «Корпус» в качестве подсистемы. Оптимизация конструкции надстройки СПК из композитов напрямую связана с оптимизацией всего судна.

Критерием экономической эффективности СПК является условие минимизации расхода топлива на перемещение 1 т дедвейта (полезной нагрузки) на 1 км пути. Минимизация водоизмещения порожнем пассажирского СПК обеспечивается за счет обеспечения минимизации массы корпуса (в состав которого входит и надстройка) при прочих равных других статьях весовой нагрузки при необходимости обеспечения характеристик его прочности.

Модель проектного обеспечения прочности надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях с использованием численных методов включает следующие этапы: определение внешних нагрузок от общего изгиба, декомпозицию подсистемы «Корпус», определение исходных матричной и армирующей фаз композита, схем армирования, технологии изготовления надстройки СПК, материалов и схем, и способов закрепления закладных деталей надстройки, разработку конструктивно-силовой схемы и схемы взаимного расположения элементов надстройки СПК из композитов, разработку 3D-модели надстройки СПК из композитов численными методами, проверку прочности элементов надстройки СПК из композитов и оптимизацию конструкции. При анализе результатов произведенных расчетов можно видеть, что прочность надстройки обеспечена во всех расчетных случаях.

Ключевые слова: проектная модель, прочность, судно на подводных крыльях, надстройка из композитов, внешние нагрузки, общий изгиб, численные методы.

Введение

Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0103 с Министерством образования и науки Российской Федерации. (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0103), в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

Проектирование надстройки из полимерных композиционных материалов для пассажирского судна на подводных крыльях (далее СПК), как элемента судна, неразрывно связано с проектированием самого судна. Так как СПК является системой, состоящей из подсистем, то на первом уровне декомпозиции оно рассматривается как совокупность подсистем, выделенных по функциональному признаку. Подсистема «Корпус» является доминирующей по отношению ко всем остальным подсистемам судна. При этом надстройка, в свою очередь, входит в подсистему «Корпус» в качестве подсистемы.

Подсистема «Гидродинамический комплекс», включающая обводы погруженной части корпуса с частью надводного борта, собственно, подводные крылья со стойками, а также движитель с опорой гребного вала, находящийся под корпусом и рулями, расположенными за кормовым крылом при проектировании надстройки, рассматривались в качестве готового модуля, примененного из проекта 17091 пассажирского СПК «Полесье».

Для детализации свойств надстройки должна быть выполнена декомпозиция подсистемы «Корпус» на отдельные подсистемы, одной из которых является подсистема «Надстройка СПК из композитов». При этом на этом этапе декомпозиции определяются гра-

нические условия подсистемы «Надстройка», а также определяются связи, которыми надстройка взаимодействует с подсистемой «Корпус». Таким образом, оптимизация конструкции надстройки СПК из композитов напрямую связана с оптимизацией всего судна.

Оптимизация пассажирского судна на подводных крыльях определяется критериями его экономической эффективности, как транспортного средства, которая учитывает и понятие конкурентоспособности. Критерием экономической эффективности СПК является условие минимизации расхода топлива на перемещение 1 т дедвейта (полезной нагрузки) на 1 км пути в виде:

$$P_{DW} = \frac{qN}{D\eta v} \rightarrow \min . \quad (1)$$

Из условия (1) для пассажирского СПК вытекает условие минимизации расхода топлива на перемещение одного пассажира на 1 км пути в виде:

$$P_{ПАСС} = \frac{qN}{nv} \rightarrow \min , \quad (2)$$

где D – полная масса;

N – мощность главных двигателей;

DW – дедвейт (полезная нагрузка);

q – удельный расход топлива двигателей на номинальном режиме;

v – эксплуатационная скорость;

n – пассажироместимость, чел.

Условия (1) и (2) определяют условия минимизации мощности главных двигателей N . В связи с тем, что размерный ряд двигателей для пассажирских СПК, как правило, ограничен, наиболее широкие возможности по повышению эффективности эксплуатации судов этого типа связаны с повышением их коэффициента утилизации по полезной нагрузке η при фиксированных значениях скорости, определяемых особенностями гидродинамического комплекса судна. Максимум коэффициента утилизации по полезной нагрузке η для пассажирского СПК определяет максимум его пассажироместимости n .

Для обеспечения необходимых характеристик экономичности пассажирское СПК должно иметь наибольшее соотношение между его полезной нагрузкой и полной массой:

$$\eta = \frac{DW}{D} \rightarrow \max . \quad (3)$$

При анализе уравнений (1)–(3) при фиксированных размерах судна ($L, B, H = \text{const}$), обусловленных особенностями гидродинамического комплекса, определяется условие обеспечения минимального водоизмещения порожнем (собственного веса судна). Минимизация водоизмещения порожнем пассажирского СПК обеспечивается за счет обеспечения минимизации массы корпуса (в состав которого входит и надстройка) при прочих равных других статьях весовой нагрузки при необходимости обеспечения характеристик его прочности:

$$P_k \rightarrow \min . \quad (4)$$

Надстройка СПК из композитов представляет собой многослойную оболочку. Для любого скоростного судна, в том числе и для пассажирского СПК, имеющего надстройку из композитов, при фиксированных геометрических размерах корпуса условие его весовой эффективности (4) трансформируется в условие минимизации толщины его обшивки:

$$t_{cp} \rightarrow \min . \quad (5)$$

Толщины обшивки нижней части корпуса, вступающие в контакт с водной поверхностью, обусловлены комплексом гидростатических и гидродинамических нагрузок и изменены в сторону уменьшения быть не могут. В то же время, существует резерв уменьшения массы надстройки СПК из композитов за счет снижения толщины ее отдельных слоев.

Декомпозиция подсистемы «Корпус» и определение внешних нагрузок

При проектировании надстройки СПК в виде многослойной оболочковой конструкции из композитов необходимо ясно представлять картину действующих на нее нагрузок. Это позволяет обеспечить необходимую прочность конструкции при ее оптимальных массовых параметрах. Различные элементы надстройки СПК в эксплуатации находятся в различных условиях, с точки зрения действующих на них внешних усилий. Действие определенных усилий может распространяться как сразу на группу элементов надстройки СПК, так и на отдельные ее фрагменты. Учет суммарного воздействия всех внешних усилий на элемент надстройки СПК, как правило, затруднителен. В строительной механике корабля принят метод, позволяющий рассчитывать конструкции на обеспечение прочности от действия преимущественных нагрузок по отдельности и в дальнейшем суммировать их влияние.

Модель проектного обеспечения прочности надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях с использованием численных методов включает следующие этапы:

- определение внешних нагрузок от общего изгиба, действующих на подсистему «Корпус» пассажирского судна на подводных крыльях в основных эксплуатационных режимах движения;
- декомпозиция подсистемы «Корпус» на подсистемы «Собственно корпус СПК» и «Надстройка СПК из композитов»;
- определение исходных матричной и армирующей фаз композита, схем армирования, технологии изготовления надстройки СПК, материалов и схем и способов закрепления закладных деталей надстройки;
- разработка конструктивно-силовой схемы и схемы взаимного расположения элементов надстройки СПК из композитов;
- разработка 3D-модели надстройки СПК из композитов;
- проверка прочности элементов надстройки СПК из композитов и оптимизация конструкции;
- доработка исходной конструктивно-силовой схемы надстройки СПК из композитов по результатам проверки прочности.

Определение внешних нагрузок от общего изгиба, действующих на подсистему «Корпус» пассажирского судна на подводных крыльях в основных эксплуатационных режимах движения, производилось в соответствии с требованиями Раздела 5 Части I ПСВП (Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания Российского Речного Регистра) [1].

При проверке общей прочности корпуса СПК вместе с надстройкой рассматриваются следующие расчетные случаи при движении СПК:

- СПК движется в водоизмещающем положении на тихой воде;
- СПК движется в водоизмещающем положении на волнении (прогиб и перегиб);
- СПК движется в расчетном режиме (на крыльях на тихой воде).

Для СПК внутреннего плавания влияние волнения учитывается следующим образом. Напряжения от общего изгиба при движении на крыльях суммируются с напряжениями от ударов волны. В качестве расчетных случаев рассматриваются два случая: лобовой удар носовой части корпуса о поверхность воды, связанный с зарыванием носовых подводных крыльев в волну, и удар волны в носовое крыло.

Методики расчета внешних нагрузок от общего изгиба, действующих на подсистему «Корпус» пассажирского СПК в основных эксплуатационных режимах движения, известны и изложены в специализированной литературе [2–4].

При проведении оценочных расчетов при декомпозиции подсистемы «Корпус» и при разработке конструктивно-силовой схемы и схемы взаимного расположения элементов

надстройки СПК из композитов удобно не производить поэлементного расчета массы конструкции, а пользоваться приближенными удельными значениями, приведенными к единице площади поверхности или объема конструкции, поэтому необходимо иметь возможность расчета массы надстройки и механических характеристик ее отдельных элементов в укрупненном виде на основе уравнения прочности.

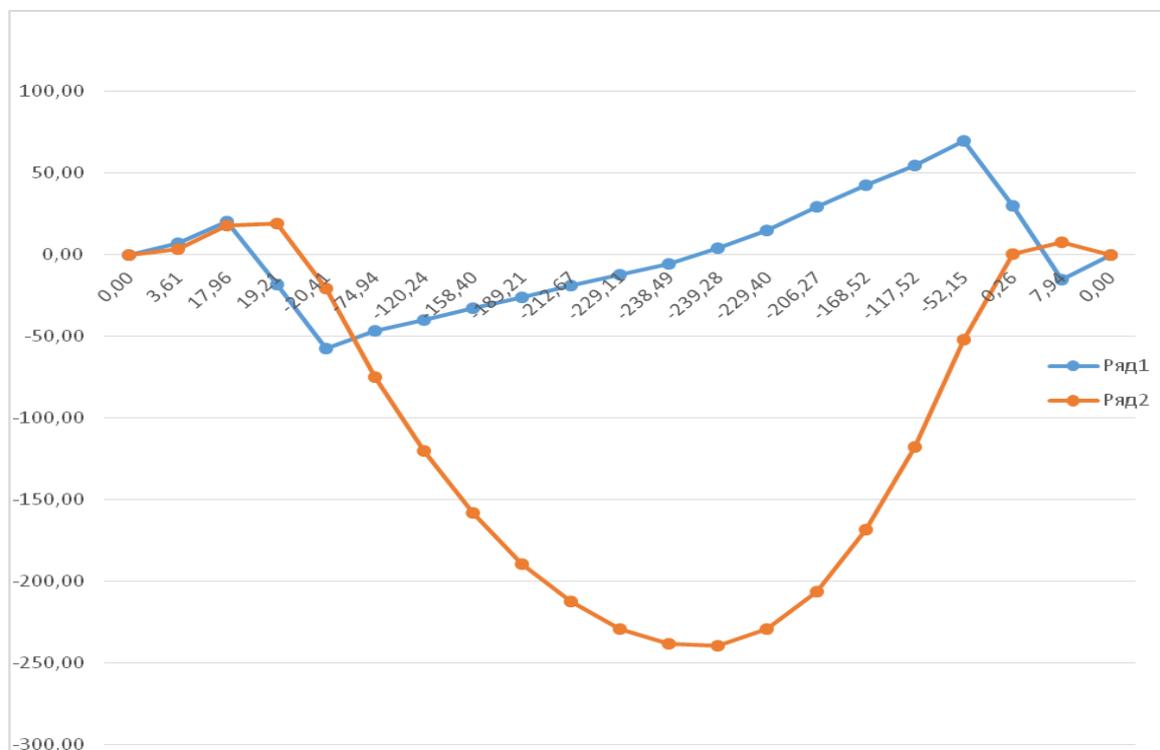


Рис. 1. Эпюры изгибающих моментов (ряд 2) и перерезывающих сил (ряд 1), действующих при движении СПК на крыльях на тихой воде

Методика определения допустимых напряжений композита и его среднюю толщину в наиболее нагруженных сечениях при условии совместной деформации при общем изгибе эквивалентного бруса, состоящего из нижней части (собственно корпуса), изготовленного из легких сплавов, и верхней части (надстройки), изготовленной из композита приведена в [5]. Для этого используется уравнение прочности СПК.

Изгибающий момент рассматривается для наиболее неблагоприятного случая нагрузки при движении СПК в двух основных режимах на подводных крыльях и в водоизмещающем положении для каждого из режимов отдельно.

Эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил, действующих при движении СПК на крыльях на тихой воде, представлены на рис. 1

При ходе СПК на крыльях по взволнованной поверхности воды к его изгибающему моменту на тихой воде следует добавлять изгибающие моменты, возникающие на корпусе от ударов в него и в крылья (стартовые элементы) волны. При этом следует учитывать, что указанные силы действуют одновременно, в разных плоскостях и разное по длительности время, а, следовательно, вызывают разные механические явления на корпусе. Так, если воздействие нестационарных сил на несущие элементы относительно длительно по времени и вызывает общее перемещение судна, то удары волны в корпус и, особенно, в крылья скоротечны и приводят к быстро затухающим вибрационным колебаниям корпуса с периодом свободных колебаний первого тона.

Методика определения изгибающих моментов при движении СПК на крыльях изложена в [2-4].

Результаты расчетов ударных нагрузок представлены на рис. 2.



Рис. 2. Результаты расчетов ударных нагрузок, действующих на СПК

При ходе СПК по взволнованной поверхности в водоизмещающем положении общий изгиб корпуса от гидростатических сил, возникающих на тихой воде, дополняется общим изгибом на волновом профиле, а также изгибающими моментами от гидродинамических усилий, возникающих при ударах волн в носовую оконечность судна и в стартовые элементы его крыльев. Удары волн в корпус и в крылья также вызывают свободные колебания корпуса первого тона, которые к моменту очередного удара успевают затухать.

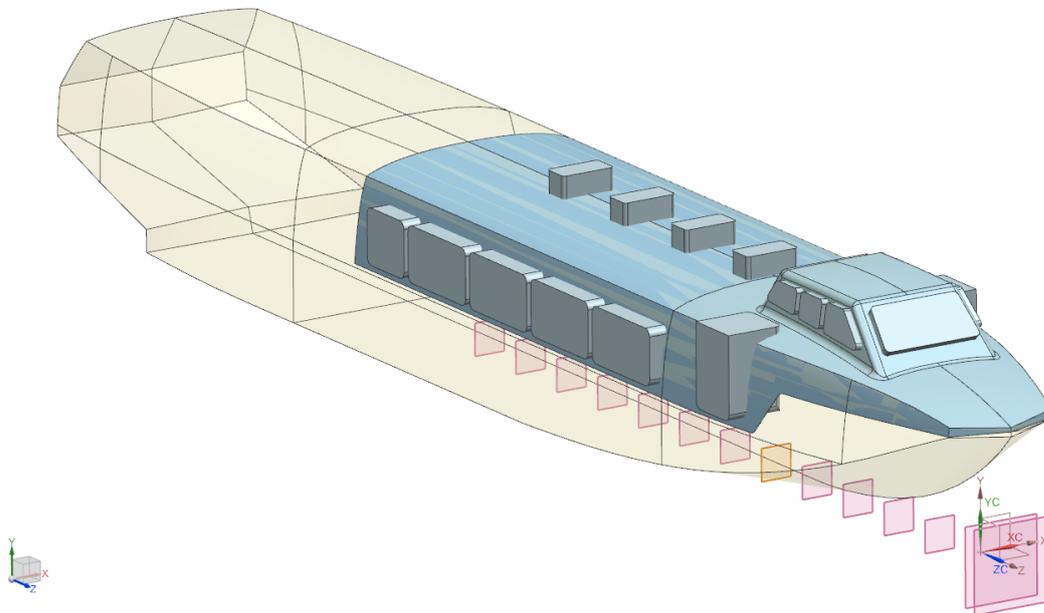


Рис. 3. Промежуточный результат декомпозиции теоретического контура надстройки

При ходе СПК по взволнованной поверхности в водоизмещающем положении общий изгиб корпуса от гидростатических сил, возникающих на тихой воде, дополняется общим изгибом на волновом профиле, а также изгибающими моментами от гидродинамических усилий, возникающих при ударах волн в носовую оконечность судна и в стартовые элементы его крыльев. Удары волн в корпус и в крылья также вызывают свободные колебания корпуса первого тона, которые к моменту очередного удара успевают затухать.

Методика определения изгибающих моментов при движении СПК в водоизмещающем положении изложена в [2–4].

Местные нагрузки учитываются в качестве различных величин расчетного напора, действующих на различные элементы надстройки. Методика определения местных нагрузок, действующих на надстройку пассажирского СПК в основных эксплуатационных случаях, изложена в [1].

При проведении оценочных расчетов при декомпозиции подсистемы «Корпус», при разработке конструктивно-силовой схемы и схемы взаимного расположения элементов надстройки СПК из композитов удобно не производить поэлементного расчета массы кон-

струкции, а пользоваться приближенными удельными значениями, приведенными к единице площади поверхности или объема конструкции, поэтому необходимо рассчитывать массу надстройки СПК и механические характеристики ее отдельных элементов в укрупненном виде на основе уравнения прочности.

Основой для декомпозиции является уравнение прочности СПК. При этом допускаемые напряжения в композите, а также его средняя толщина в наиболее нагруженных сечениях определяются из условия совместной деформации при общем изгибе эквивалентного бруса. Эквивалентный брус состоит из нижней части (собственно, корпуса СПК), изготовленного из легких сплавов, и верхней части (надстройки СПК), изготовленной из композитов. Методика такого расчета приведена в [5].

Подготовка исходных данных для расчетов численными методами

Определение исходных матричной и армирующей фаз композита и схем армирования, а также обоснование выбора материалов, схем и способов закрепления закладных деталей надстройки СПК производится с учетом предполагаемых технологий ее изготовления. В качестве основных технологий изготовления надстройки СПК рассматривались контактное формование и вакуумная инфузия. Предпочтение отдано контактному формованию, как наиболее гибкой технологии на стадии НИОКР. В качестве основных матричных и армирующих материалов с учетом необходимости импортозамещения выбраны стеклоткань, стеклоткань и полиэфирная смола отечественного производства. В качестве вспененного материала среднего слоя выбран импортный поливинилхлоридный пенопласт.

В качестве исходных документов при разработке конструктивно-силовой схемы и схемы взаимного расположения элементов надстройки СПК из композитов используются теоретический чертеж корпуса и надстройки СПК, чертеж общего расположения СПК, а также конструктивный чертеж корпуса СПК.

Разработке прочностной модели надстройки пассажирского СПК из композитов предшествует разработка 3D-модели ее конструкции с использованием CAD/CAE технологий, позволяющих получить компьютерную модель, пригодную для передачи в программы конечно-элементного анализа в качестве исходной геометрии. Разработка компьютерной модели надстройки СПК проводится в два этапа.

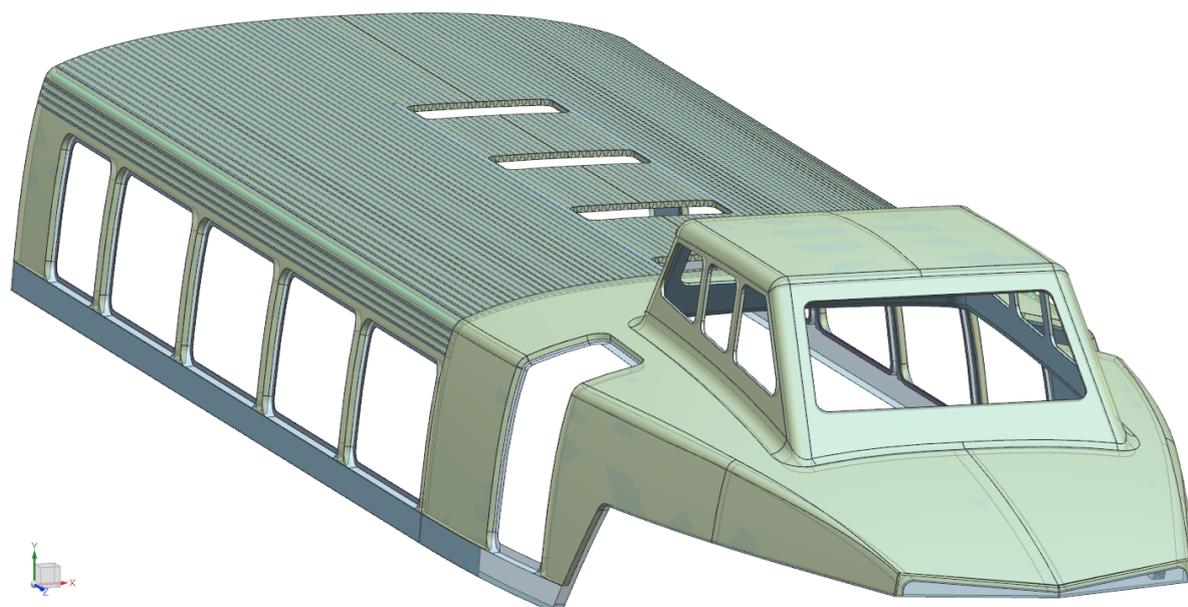


Рис. 4. Надстройка СПК из композитов (исходная геометрия)

В первую очередь разрабатывается электронная модель теоретического чертежа корпуса СПК с надстройкой из композитов. После предварительной оцифровки исходных данных в двумерном редакторе полученный промежуточный файл передается в основную среду разработки. При этом выполняется повторное согласование теоретического чертежа. В качестве базовых кривых могут использоваться кривые Безье (кубические сплайны), построенные через точки излома сечений шпангоутов в зонах, в которых форма теоретических поверхностей нелинейна в продольном направлении. Базовое семейство кривых формирует продольные и поперечные кривые компьютерной модели надстройки, которые, в свою очередь, формируют поверхности. Далее на основе полученных поверхностей создаются схемы армирования надстройки, схема расположения каркаса легкого среднего слоя и схема локальных подкреплений надстройки. После завершения всех процессов моделирования элементов надстройки СПК, включая закладные детали, полученная компьютерная модель пригодна для передачи в программы конечно-элементного анализа в качестве исходной геометрии.

Создание рабочего проекта производится в среде моделирования ANSYS Workbench. Первым шагом является выбор типа решаемой задачи (статический анализ) для подготовки FEM модели и дальнейшего решения задачи статики. Для моделирования композиционного материала выбирается модуль ACP. Для дальнейшего анализа на прочность надстройки из композита, модули ACP (Pre) и Static Structural соединяются с ACP (Post). Далее производится импорт геометрии из внешнего файла. Импорт геометрии осуществляется через внешний файл в формате Parasolid V21.

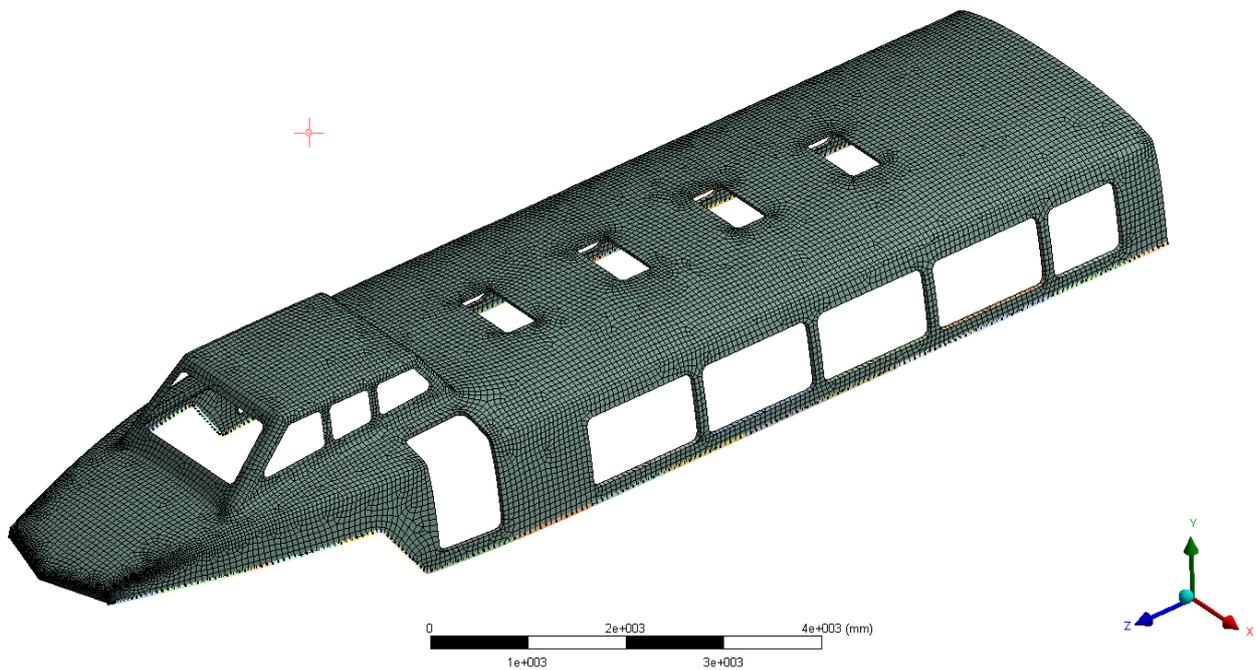


Рис. 5. Разбиение конечно-элементной сетки по надстройке СПК из композитов

Задание свойств композита для монослоя производится путем занесения в установленную форму характеристик материалов. После этого производится присвоение свойств материала к геометрии. При этом выбирается геометрия и ее элементам присваиваются заранее заданные свойства материала. После этого производится задание симметричного композитного пакета, описываемого углами и толщинами укладок. Затем осуществляется указание размеров элементов выбранных тел и число разбиений сетки на выбранных поверхностях. Следующим шагом является указание поверхностей, имеющих регулярную зону для построения конечно-элементной сетки (рис. 5).

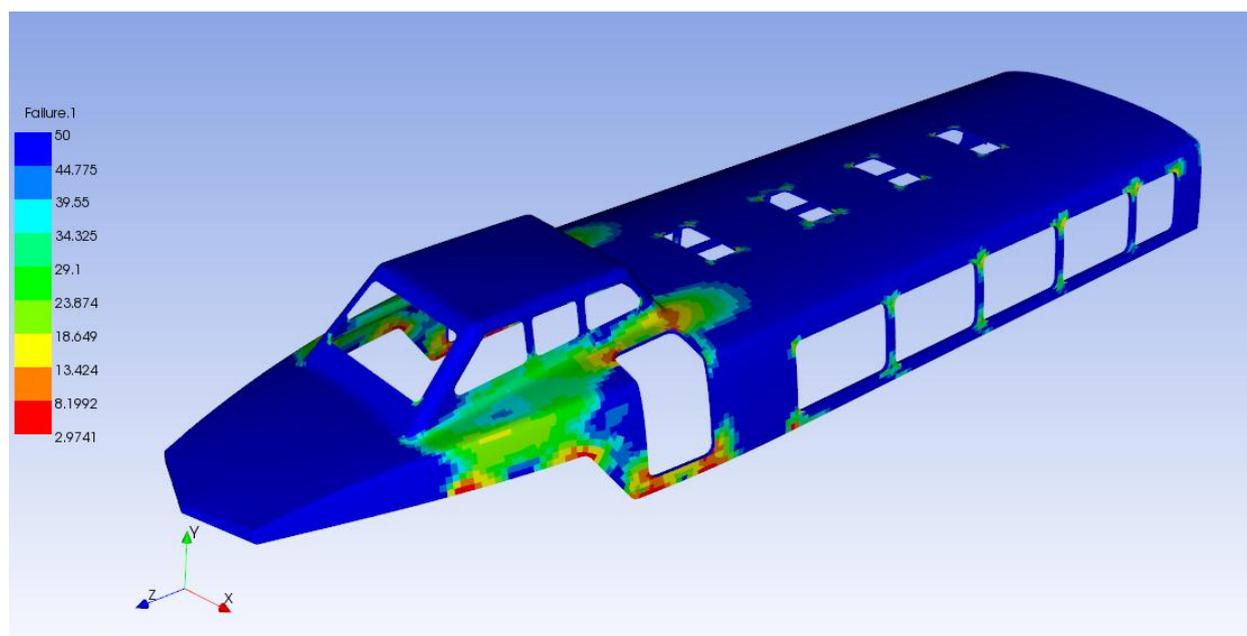


Рис. 6. Перегрузки от действия изгибающего момента в надстройке СПК из композитов

Сетка должна разрешать интересующие зоны, подробности геометрии, а также градиенты основных переменных. Для определения зон, где возникают наибольшие градиенты, может применяться адаптация (автоматическое сгущение) сетки. При этом необходимо учитывать, что размерность сетки всегда ограничена компьютерными ресурсами, поэтому необходимо, исходя из доступных вычислительных ресурсов, оценить максимальное количество ячеек в модели. Кроме того, необходимо определить сложность моделей и количество уравнений, решаемых для каждой ячейки.

При выборе альтернативы между структурированной сеткой гексаэдров или неструктурированной сеткой тетраэдров необходимо руководствоваться особенностями решаемой задачи. При этом нужно учитывать, что сетка гексаэдров/четырёхугольников может дать более качественное решение с меньшим количеством ячеек/узлов в сравнении с сеткой тетраэдров/треугольников.

Сетка гексаэдров/четырёхугольников в ряде случаев дает меньшую численную диффузию, но для построения такой сетки, как правило, требуется больше времени и усилий.

В ряде случаев создаются гибридные сетки, которые обычно комбинируют сетку тетраэдров/треугольников с другими типами в заданных областях, например, с треугольными призмами. Такая сетка дает большую точность и эффективность, чем только тетраэдры/треугольники.

После разбиения надстройки на конечные элементы по поверхностям производится задание граничных условий для надстройки пассажирского СПК. При этом запрещаются перемещения в стенке в местах отверстий по всем осям, в том числе запрещаются углы поворота (заделка). Следующим этапом является приложение к надстройке нагрузок, определенных при расчете общего изгиба корпуса СПК в различных эксплуатационных случаях, а также местных нагрузок. Вычисленные значения перерезывающей силы и изгибающего момента, а также расчетных давлений прикладываются к конечно-элементной модели для проведения расчета. Отдельным этапом является расчет устойчивости элементов надстройки СПК из композитов. Для этого готовится отдельная модель. После этого производится отправка моделей в решатель.

Заключение

При анализе результатов произведенных расчетов можно видеть, что прочность надстройки СПК из композитов обеспечена во всех расчетных случаях (рис. 6). Распределение внутренних усилий, действующих в надстройке, в целом, имеет характер, описанный в специализированной литературе [2-4], что свидетельствует о корректном определении внешних нагрузок.

Библиографический список

1. Российский Речной Регистр. Правила. Т. 2. – М., 2008. – 400 с.
2. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б.А. Колызаев [и др.]. – Л.: Судостроение, 1980.
3. **Маттес, Н.В.** Прочность судов на подводных крыльях / Н.В. Маттес, А.В. Уткин. – Л.: Судостроение, 1966. – 193 с.
4. **Зиганченко, П.П.** Суда на подводных крыльях (Конструирование и прочность) / П.П. Зиганченко, Б.П. Кузовенков, И.К. Тарасов. – Л.: Судостроение, 1981. – 313 с.
5. **Францев, М.Э.** Проектное обоснование повышения полезной нагрузки амфибийного судна на воздушной подушке за счет применения в его конструкции композиционных материалов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2015. – № 1. – С. 197–202.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2016*

М. Е. Frantsev¹, О. V. Zaytsev², I. D. Zolotarevko²

**THE MODEL OF THE PROJECT'S ENSURING OF THE STRENGTH
OF THE SUPERSTRUCTURE FROM COMPOSITES
FOR A PASSENGER HYDROFOIL
CRAFT IS USING THE NUMERICAL METHODS**

АОЗТ Neptune-Sudomontazh" (Dolgoprudny) ¹,
Moscow state technical university n. a. Bauman ²

The design of the superstructure made of polymer composite materials for passenger hydrofoils, is a part of the design of vessel. The superstructure enters to subsystem "hull" as a subsystem. Design optimization of superstructure from composites is directly related to the optimization of the entire vessel. The subsystem "Hydrodynamic complex", including contours immersed part of the body with a part of the freeboard actually underwater wings with racks and propulsion to support the propeller shaft, which is under the hull and rudders located behind the aft wing in the design of the superstructure considered as a finished module applied from the project 17091 passenger SEC "Polesie". The criterion of economic efficiency of the hydrofoil craft is the condition to minimize fuel consumption on the movement of 1 dwt (payload) at 1 km. Minimization of empty displacement of the passenger hydrofoil craft is provided by ensuring minimization of the mass of the body (which includes and superstructure) ceteris paribus other articles weighing load characteristics of the need to ensure its durability. The model of the project to ensure the strength of the superstructure of the composites for passenger hydrofoil craft is using numerical methods includes the following steps: determination of external loads of the total bending decomposition subsystem "hull", the definition of the original matrix and reinforcing phase for composites and schemes of reinforcement and technology of the superstructure materials and schemes and methods of fixing, fixings superstructure, the development of a constructive force scheme and the mutual arrangement of the elements of the superstructure from composites for hydrofoil craft, development of 3D-model of the superstructure from composites by numerical methods, testing the strength of the superstructure elements from composite design and optimization. When analyzing the results of calculations made by it can be seen that the strength of the superstructure is provided in all cases the settlement.

Key words: design model, the strength of the hydrofoil craft, superstructure from composites, external loads, the overall bending, numerical methods.