

УДК 629.12.001

М.Э. Францев
ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ
СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛОГО ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

АОЗТ «Нептун-Судомонтаж»

Выполнено проектное обоснование характеристик прочности судовых корпусных конструкций малого промыслового судна из композитов прибрежного лова. Предложено при проектировании промыслового судна такого типа максимально использовать зарубежный опыт сопредельных стран. Представлен обзор научных работ в области проектирования промысловых судов из композитов. Изложены основные принципы проектирования судовых корпусных конструкций из композиционных материалов, отраженные в нормативных документах отечественных Классификационных обществ. Особое внимание уделяется аспектами, связанным с обеспечением общей и местной прочности промыслового судна из композитов. Предложен принцип декомпозиции прочностной модели корпуса промыслового судна и переход к обеспечению прочности его отдельных элементов в виде многослойных пластин и оболочек из композитов. Предложен принцип перехода при расчетах от анизотропной структуры отдельных элементов судового корпуса из композитов к эквивалентной по прочности ортотропной структуре. Отмечена необходимость учета при проектировании корпуса промыслового судна из композитов взаимосвязи между технологическими особенностями формирования корпуса, его эксплуатационным поведением и снижением прочностных качеств судовых корпусных конструкций из композитов в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: промысловое судно, композиционные материалы, многослойная оболочка, нормирование прочности, эксплуатационные нагрузки, анизотропные структуры.

Введение

Сегодня большую часть мирового малотоннажного промыслового флота составляют суда, имеющие корпуса из композиционных материалов. Их конструкция описана в специальной литературе. Основные вопросы, возникающие при проектировании судов такого типа, за рубежом имеют нормативное обоснование [1, 2].

При проектировании отечественных маломерных промысловых судов для прибрежного лова важно как можно шире использовать опыт соседних зарубежных стран, где эта область традиционно хорошо развита. При этом необходимо учитывать схожесть природных и климатических условий. Поэтому при разработке проектов промысловых судов из композиционных материалов для Дальнего Востока следует использовать опыт рыбаков острова Хоккайдо, а при разработке проектов промысловых судов для лова в Баренцевом море необходимо учитывать и обобщать опыт проектирования и постройки судов в Норвегии и Исландии. В северных провинциях Канады, где природные условия имеют сходство с российскими условиями мореплавания, в прибрежном рыболовстве сейчас начинают использовать маломерные суда со скоростью хода до 45 узлов, обеспечивающие рыбакам большую безопасность за счет возможности своевременного ухода в укрытие при наступлении плохой погоды. Интересен опыт постройки и эксплуатации промысловых судов из композиционных материалов Австралии, поскольку большинство их ведет промысел в открытых районах Тихого океана. На рис. 1 представлены промысловые суда из композитов производства Великобритании (вверху слева), Норвегии (внизу слева), Японии (вверху справа) и Австралии (внизу справа). Подробнее о промысловых судах из композитов зарубежной постройки сообщалось в [3].



Рис. 1. Промысловые суда из композитов зарубежного производства

Необходимость в судах такого типа существует и в современной России, однако в нашей стране они пока не проектируются и не строятся. В рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники-2016» в составе ОКР «Прибрежка» разработан ряд перспективных концептуальных проектов промысловых судов для освоения сырьевых ресурсов прибрежной зоны. Например, для освоения сырьевых ресурсов прибрежной зоны до 4 миль спроектировано стальное промысловое судно, имеющее наибольшую длину 11,8 м на класс Российского Морского Регистра судоходства КМ Ice3 R3 Fishing vessel (рис. 2). Это приводит к переориентации ряда отечественных судовладельцев на продукцию зарубежного судостроения. В подтверждение можно привести многочисленные факты приобретения рыбаками Дальнего Востока промысловых судов из композитов, бывших в употреблении в Японии, где в эксплуатации находится более трехсот тысяч судов этого типа. Приобретают промысловые суда из композиционных материалов из Норвегии и рыбаки Европейского Севера России, в первую очередь, ведущие промысел в бассейне Белого моря.

При разработке основных типоразмеров промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного рыболовства необходимо учитывать критерии, закрепленные в отечественной нормативной правовой базе, регулирующей данную сферу деятельности, а также ресурсное обеспечение.

Постановка задачи и нормативы

По заданию ВАО «Соврыбфлот» разработан типовой ряд промысловых судов из композиционных материалов для ведения прибрежного промысла. Среди судов типового ряда имеется промысловое судно из композитов, имеющее наибольшую длину 13,2 м (рис. 3). Принципы проектирования промысловых судов из композитов изложены в [4-7]. При определении главных элементов и других проектных характеристик, включая технико-экономические ре-

зультаты промысла, для всех судов типового ряда использовался специализированный программный комплекс. Подробнее о принципах проектирования, заложенных в основу этого комплекса, и о самом программном комплексе сообщалось в [8].

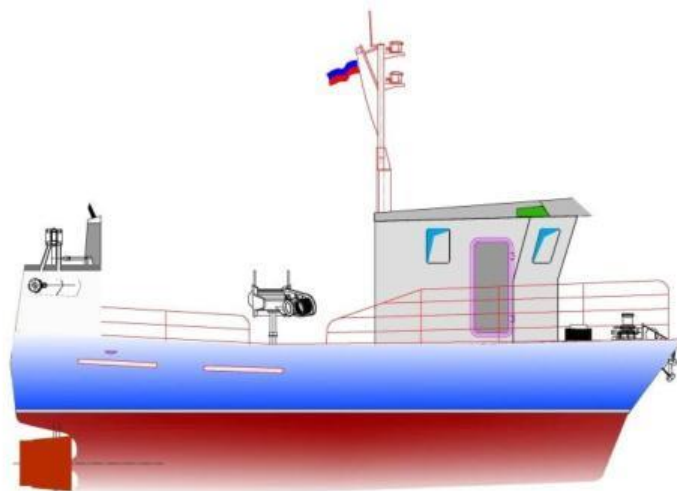


Рис. 2. Стальное промысловое судно прибрежного лова длиной 11,8 м, разработанное в рамках ФЦП РГМТ-2016 по шифру «Прибрежка»

Одной из главных задач при проектировании промыслового судна из композитов является обеспечение его прочности. При выполнении проектной оценки характеристик прочности промысловых судов из композитов целесообразно использовать существующие известные теоретические и практические положения в области физики, в особенности, механики композитов, а также положения нормативных документов, которые были разработаны и согласованы отечественными Классификационными обществами. При проектировании рассматриваемого промыслового судна из композитов использовались нормативные требования отечественных Классификационных обществ [9-12] и положения других нормативных документов, например, [13]. В связи с тем, что промысловые суда данного типа могут быть использованы как в закрытых морях – Азовском, Черном, Балтийском, Белом так и на крупных внутренних водоемах типа Ладожского и Онежского озер, а также на озере Байкал, проектирование рассматриваемого промыслового судна велось одновременно с учетом требований двух отечественных Классификационных обществ. Судно спроектировано на класс Российского Морского Регистра судоходства KM R3 Fishing vessel. Одновременно оно удовлетворяет требованиям класса О-ПР Российского Речного Регистра. Несмотря на то, что нормативные требования РМРС допускают использование ледовых подкреплений на корпусах судов из композитов, в проекте они не предусмотрены в связи с отсутствием таких требований заказчика.

При рассмотрении вопросов обеспечения прочности судовых корпусных конструкций из композитов использовались нормативные требования [10], а также [12]. Вопросы, не регламентированные указанными выше нормативными документами, уточнялись в соответствии с положениями [13]. Согласование проектных решений с РМРС и РРР заказчиком не требовалось, так как реализовывалась стадия эскизного проектирования, а дальнейшее проектирование и постройка судов планировались за рубежом. Особенностью данного промыслового судна являются двухрежимные обводы. Этот тип обводов облегчает выход судна на глиссирование с ограниченной нагрузкой (не более 50% от полной нагрузки). Они также имеют пониженное волнообразование при движении в переходном режиме с полной нагрузкой. Необходимо отметить, что отечественные Классификационные общества, имеют достаточно общие подходы в плане оценки прочности судовых корпусных конструкций из композитов при проектировании. В некоторой степени их требования дополняют друг друга.

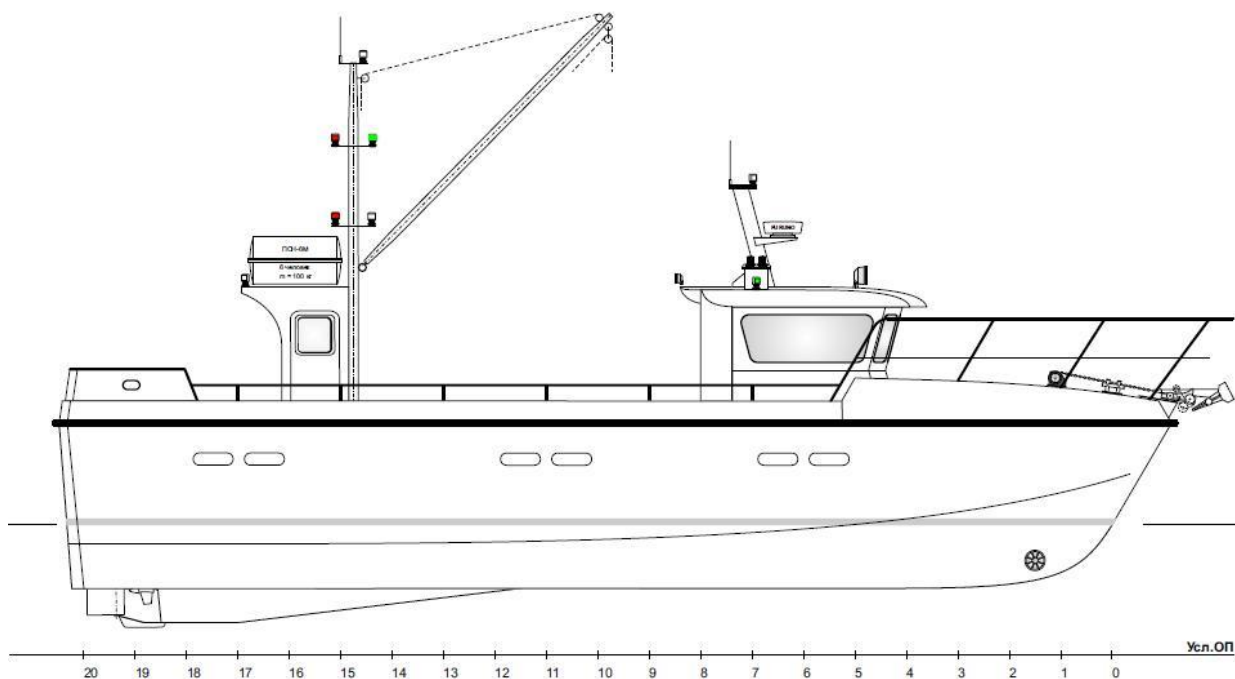


Рис. 3. Промысловое судно из композитов прибрежного лова длиной 13,2 м, разработанное по заданию ВАО «Соврыбфлот»

В [10, 13] приведена методика определения максимального изгибающего момента при общем изгибе корпуса. В соответствии с [12], определение расчетных изгибающих моментов и перерезывающих сил при общем изгибе и нагрузок при расчете местной прочности для судов из композитов должно проводиться по существующим методам для стальных судов. Расчет элементов эквивалентного бруса судов из композитов производится для расчетных случаев состояния нагрузки и поперечных сечений корпуса, оговоренных в разделе, регламентирующем конструкцию и прочность стального корпуса. При этом для судов из композитов длиной до 15 м достаточно рассматривать только миделевое сечение. Из-за наличия в палубе больших вырезов необходимо было выполнить проверочные расчёты по касательным напряжениям от перерезывающих сил. Указаний по применению специальных схем и методов расчета общей и местной прочности для судов из композитов в нормативных документах [10, 12] не имеется.

Российским Морским Регистром Судоходства нормирован круг вопросов, связанный с определением внешних нагрузок на корпуса морских глиссирующих судов в [11]. Определение внешних усилий, действующих на корпус глиссирующего судна, также детально разработано в [14]. В соответствии с этими положениями прочность промыслового судна, помимо удовлетворения обычным требованиям, должна быть также обеспечена с учетом наибольших усилий от удара волн, которым оно может подвергаться при движении в расчетном режиме против волн. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок судов из композиционных материалов, в том числе, промысловых судов, движущихся с повышенными скоростями, также выполнена в [15]. В то же время, в нормативных документах [10, 12] отсутствует рассмотрение вопросов прочности глиссирующего промыслового судна из композитов как самостоятельного типа, имеющего специфические эксплуатационные особенности и подверженного специфическим нагрузкам.

Решение

В соответствии с положениями [10, 13], изгибающий момент, действующий на корпус судна из композитов, с учетом влияния волн и скорости судна может быть определен как

$$M_{\max} = \frac{DL}{k_1} \quad (1)$$

где M_{\max} – изгибающий момент корпуса от общего изгиба;

D – полное водоизмещение судна;

L – расчетная длина корпуса;

k_1 – коэффициент, учитывающий влияние волн и скорости судна.

$$k_1 = (3 + 23,4e^{-1,1Fr_D}) \sqrt{\frac{2,5}{h_s}} \quad (2)$$

где Fr_D – число Фруда по водоизмещению;

h_s – расчетная высота волны.

В соответствии с положениями [10, 13], давление, обусловленное ударными нагрузками на днищевое перекрытие на третьем шпангоуте, по упрощенной методике может быть рассчитано по формуле:

$$P_{03} = \frac{39,3M_{\max}}{L^2 B_{03}} \quad (3)$$

Давление, обусловленное ударными нагрузками на днищевое перекрытие на семнадцатом шпангоуте, по этой же методике:

$$P_{17} = \frac{0,5P_{03}B_{03}}{B_{17}} \quad (4)$$

Давление, обусловленное ударными нагрузками на днищевое перекрытие на j -ом шпангоуте, по этой же методике:

$$P_j = \frac{5\varphi M_{\max}}{L^2 B_j} \quad (5)$$

где B_{03} B_{17} B_j – ширина корпуса на соответствующем шпангоуте;

φ – коэффициент.

В результате расчета давлений, действующих на днищевое перекрытие промышленного судна из композитов, может быть построена эпюра давлений, позволяющая определить наиболее опасные участки перекрытия, для которых должен быть выполнен расчет местной прочности.

Решение уравнения прочности корпуса промышленного судна из композитов:

$$M_{\max} = k\sigma_0 W \quad (6)$$

где M_{\max} – предельный изгибающий момент от общего изгиба судна в наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки;

σ_0 – предел прочности композита;

k – коэффициент пропорциональности;

W – момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе судна.

позволяет перейти к определению момента сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе промышленного судна из композитов, который может быть представлен как:

$$W = \frac{\eta_k FH}{2} \quad (7)$$

где F – площадь поперечного сечения эквивалентного бруса в наиболее опасном сечении (на миделе);

η_k – коэффициент утилизации профиля эквивалентного бруса.

Приравнявая выражения (1) и (6) с учетом (7) получим:

$$\frac{DL}{k_1} = \frac{k\sigma_0\eta_k FH}{2} \quad (8)$$

Известно, что наибольшую часть массы корпуса судна из композитов составляет масса наружной обшивки корпуса, палубы и надстройки, а на долю переборок, выгородок, а также продольного и поперечного набора, фундаментов и подкреплений редко приходится более 15 % массы корпуса. Поэтому на начальных стадиях расчетов прочности корпус промышленного судна из композитов может рассматриваться как балка с непрямоугольным сечением.

Из уравнения прочности при общем изгибе (8) может быть определено допускаемое напряжение для композита корпуса промышленного судна:

$$\sigma_0 = \frac{2DL}{kk_1\eta_k FH} \quad (9)$$

Момент сопротивления эквивалентного бруса без учета площади продольного набора, которая, как правило, невелика, на этом этапе проектного обоснования может быть представлен, как:

$$W = \eta_k (B + H)t_{cp} H \quad (10)$$

где t_{cp} – средняя толщина обшивки.

Отсюда может быть выражена средняя толщина обшивки корпуса в сечении, где действует наибольший изгибающий момент:

$$t_{cp} = \frac{W}{\eta_k (B + H)H} \quad (11)$$

Полученное значение средней толщины корпуса промышленного судна из композитов, определенное из условия обеспечения общей прочности, проверяется по условиям обеспечения местной прочности и при необходимости корректируется.

Корпус промышленного судна из композитов имеет конструкцию, выполненную в виде многослойной оболочки с избыточным надводным бортом, интегрированными в палубу верхними строениями, не входящими в эквивалентный брус, и достаточно большим количеством вырезов. Эта оболочка по форме отдаленно напоминает параллелепипед, с соотношениями размеров, примерно, равными $L/B/H=4/1/1$. Если рассматривать данную форму оболочки как непрямоугольную балку, то, в соответствии с принципами строительной механики корабля, считается, что балки с такими соотношениями длины пролета и высоты сечения, работают преимущественно на срез, а не на изгиб. В соответствии с [13], особенности конструкции корпуса промышленного судна из композитов позволяют применить положения теории тонких оболочек. В целях расчета местной прочности можно рассматривать каждый элемент корпуса, палубы и надстройки, как отдельную пластину или оболочку. При этом вся поверхность корпуса и верхних строений разбивается на семейство многослойных пластин и оболочек из композитов, для каждой из которых существует методика расчета:

- двухслойная пластина;
- трехслойная пластина с легким средним слоем;
- трехслойная пластина с жестким на растяжение средним слоем;
- цилиндрическая двухслойная оболочка;
- цилиндрическая трехслойная оболочка с легким средним слоем;
- цилиндрическая трехслойная оболочка с жестким на растяжение средним слоем;
- коническая двухслойная оболочка;
- коническая трехслойная оболочка с легким средним слоем;
- коническая трехслойная оболочка с жестким на растяжение средним слоем;
- сферическая двухслойная оболочка;
- сферическая трехслойная оболочка с легким средним слоем;
- сферическая трехслойная оболочка с жестким на растяжение средним слоем [13].

Перечисленное семейство пластин и оболочек позволяет с достаточно высокой степенью достоверности описать практически любую поверхность корпуса, палубы и верхних строений судна из композитов. Такая разбивка, являясь достаточно условной, в тоже время, позволяет упростить задачу в пределах достоверности. Ниже приводятся примеры расчетных моделей, разработанных автором на основании конструктивных узлов, схем армирования и примененных технологических процессов формования корпусных конструкций глиссирующего судна из композитов по технической документации ГНПРКЦ «ЦСКБ «Прогресс» (г. Самара):

- килевая зона (200 мм на каждый борт от линии киля) – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- скуловая зона (250 мм выше и ниже от линии скулы) – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- обшивка днища между реданами – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- борт без подкреплений – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- палуба без подкреплений – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- примыкание днища к транцу (500 мм в нос от линии примыкания) – абсолютно жесткая пластина двухслойной конструкции;
- борт в районе подкреплений – абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с легким наполнителем;
- палуба в районе подкреплений – абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с легким наполнителем;
- транец – абсолютно жесткая пластина трехслойной конструкции с жестким на растяжение средним слоем.

Расчет многослойных оболочек из материалов с различными упругими характеристиками конструктивных слоев и упругими свойствами каждого слоя, различающимися в разных направлениях, требует вычисления жесткостей каждого слоя.

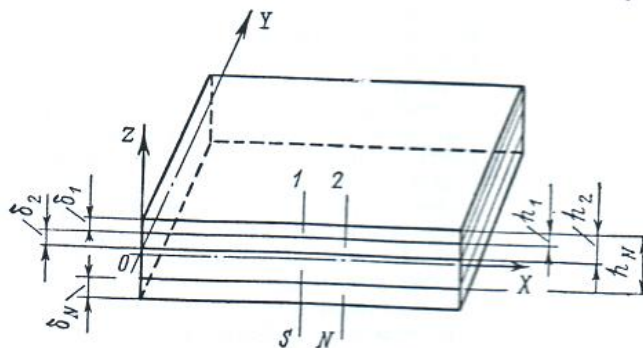


Рис. 4. Элемент многослойной конструкции

При практическом расчете оболочек реальная анизотропная структура может быть заменена эквивалентной по механическим свойствам ортотропной структурой, имеющей одинаковые с первой нормальные модули упругости и коэффициенты Пуассона в различных направлениях. Элемент многослойной конструкции при этом рассматривается как пластина или оболочка, состоящая из n числа слоев, изготовленных из ортотропных материалов (рис. 4). Метод расчета анизотропной конструкции, основанный на сведении ее к ортотропной, позволяет с достаточной для практических целей точностью решить целый ряд инженерных задач, в том числе, и рассматриваемую задачу. Суть преобразований приведенных жесткостей состоит в том, что для общего случая конструктивно многослойных оболочек с ортотропными слоями, отличающимися по геометрическим размерам и материалам, упругие свойства приводятся к условному изотропному материалу внутреннего слоя. Параметры жесткостей конструкции приводятся к срединной поверхности оболочки. При расчете оболочек при выводе формул пренебрегается влиянием сближения внешних и внутренних слоев, что позволяет принять модуль

упругости заполнителя в направлении нормали к срединной поверхности равным бесконечности. Принимается равным нулю нормальный модуль упругости заполнителя, то есть в выражение изгибной жесткости трехслойной конструкции вводятся данные только несущих слоев. Учет анизотропии производится использованием приведенных модуля упругости и коэффициента Пуассона, вычисленных как среднее геометрическое этих величин по направлениям осей координат композиционного материала.

Так, например, величина модуля упругости E_{np} определяется в случае анизотропии материала для пластины двухслойной конструкции или трехслойной конструкции с легким заполнителем по формуле:

$$E_{np} = [E_{1u} E_{2e} E_{1n} E_{2n}]^{1/4} \quad (12)$$

где $E_{1e} E_{2e} E_{1n} E_{2n}$ – модули упругости по направлениям соответственно для верхнего и нижнего слоев;

Для ортотропной двухслойной или трехслойной с легким заполнителем панели коэффициенты Пуассона могут быть определены как:

$$\nu_e = [\nu_{1u} \nu_{2e}]^{1/2} \quad \nu_n = [\nu_{1n} \nu_{2n}]^{1/2} \quad (13)$$

где $\nu_{1e}, \nu_{2e}, \nu_{1n}, \nu_{2n}$ – коэффициенты Пуассона по направлениям для верхнего и нижнего слоев соответственно.

В указанных моделях учитывается анизотропия материала по изложенной выше схеме. Слой конструкции, полученный методом напыления, рассматривается, как изотропный. Поверхности обшивки корпуса рассматриваются, как пластины, жестко заделанные на опорном контуре, (линия киля, линии слома борта, линии сочленения борта и палубы, линия примыкания транца), и свободно опертые на открытых зигах, (реданы, декоративные зиги бортов и т.п.) При конструировании многослойной оболочки из полимерного композита и сопутствующему ему расчете прочности слоистых пластин и оболочек целесообразно ориентироваться на результаты исследований, изучающих влияние геометрических размеров сечения двух- и трехслойных пластин на механические характеристики конструкции.

Необходимо отметить, что при разреженном среднем слое с малой жесткостью могут возникать существенные взаимные смещения внешнего и внутреннего слоев оболочки. Существует методика, позволяющая учитывать нелинейные деформации поперечного сдвига. При этом механические характеристики многослойных конструкций в большой степени зависят от технологии их изготовления и различных тонкостей технологических процессов. Полученные обобщенные результаты позволяют проектанту при разработке конструкции многослойной оболочковой конструкции выбрать оптимальные соотношения между толщиной внешнего и внутреннего слоев, размерами ячеек каркаса среднего слоя и жесткостью вспененного наполнителя. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок, которое необходимо учитывать при проектировании промыслового судна из композитов, описано в [16]. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов, разработанные по результатам исследований эксплуатационного поведения корпусов судов из композитов, приведены в [17].

Использование различных технологий изготовления судовых корпусных конструкций из композита сопровождается появлением технологических дефектов типа «расслоение и непроклей», которые влекут за собой снижение характеристик прочности конструкции. В дальнейшем под влиянием доминирующих факторов эксплуатации возможен рост внутренних дефектов типа «расслоение» технологической и эксплуатационной природы. Это обстоятельство может потребовать от проектанта выполнения при оценке прочности судового корпуса из композитов специального расчета, направленного на учет влияния технологического дефекта на прочность элемента конструкции. Методика определения степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития внутреннего дефекта типа «расслоение» изложены в [18].

Выводы

Рассмотрена модель обеспечения прочности промыслового судна из композиционных материалов. Оно может быть использовано для промысла как в закрытых морях – Азовском, Черном, Балтийском, Белом, так и на крупных внутренних водоемах типа Ладожского и Онежского озер, а также на озере Байкал. Суда данного типа могут применяться для промысла в устьях и губах сибирских рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана. Описанная модель обеспечения прочности опирается на нормативные требования отечественных Классификационных обществ – Российского Морского Регистра Судоходства и Российского Речного Регистра.

Библиографический список

1. Greene E. Marine composites. Second Edition. Eric Greene Associates, Inc., Annapolis, 1999.
2. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) – IMO, 2008 Edition.
3. Францев, М.Э. Проектные особенности зарубежных промысловых судов из композиционных материалов для прибрежного лова [Текст] // Судостроение. 2010. № 5(792).
4. Францев, М.Э. Перспективы применения на малых рыболовных судах новых конструктивных схем и материалов [Текст] / М.Э. Францев, Ф.В. Деревянкин, Д.В. Трухачев, Б.А. Царев // Материалы «Круглого стола» по проблеме конкурентоспособности судостроительной промышленности, секция 1, СПб., 2008. С. 80-83.
5. Францев, М.Э. Задачи и особенности проектирования рыболовных судов с повышенной скоростью [Текст] // Морской вестник. 2009. № 4(32). С. 109-111.
6. Францев, М.Э. Особенности оптимизации проектных характеристик рыболовных судов с повышенной скоростью [Текст] / М.Э. Францев, Н.Ю. Часовников // В сборнике: Единение науки и практики. – СПб.: НТОС им. акад. А.Н. Крылова, 2010. С. 6-7.
7. Францев, М.Э. Постановка задачи проектного обоснования конструктивных решений для судов с повышенными характеристиками ходкости и мореходности [Текст] // Морской вестник. 2010. Т. 1. № 3(35). С. 107-111.
8. Францев, М.Э. Использование численных методов при реализации задачи параметрического проектирования промыслового судна прибрежного лова из композитов [Текст] / М.Э. Францев, И.М. Францев // Судостроение, 2014. № 4. С. 30-34.
9. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки малых морских рыболовных судов, СПб, 2005.
10. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов часть XVI «Конструкция и прочность корпусов судов и шлюпок из стеклопластика», СПб, 2018.
11. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов, СПб, 2008.
12. Российский Речной Регистр. Правила (в 5-ти томах). М., 2015.
13. ОСТ5.1068-75 «Корпуса и корпусные конструкции из стеклопластика. Расчеты прочности». ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Л., 1975.
14. Шиманский, Ю.А. Расчет прочности глиссирующих катеров [Текст] // Труды ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова. 1946. Вып. 10. – 119 с.
15. Францев, М.Э. Проектная оценка эксплуатационных нагрузок и характеристик долговечности корпусов судов из композиционных материалов [Текст] // Морской вестник. 2008. № 4(28). С. 93-98.
16. Францев, М.Э. Эксплуатационное поведение элементов корпуса глиссирующего судна из композиционных материалов в условиях воздействия гидродинамических нагрузок [Текст] // Труды Государственного Крыловского Научного Центра. 2013. Вып. 75(359). С. 192-200.
17. Францев, М.Э. Проектные рекомендации по определению наиболее нагруженных и уязвимых элементов корпуса судна из композиционных материалов [Текст] // Конструкции из композиционных материалов. 2011. № 3. С. 86-97.
18. Францев, М.Э. Определение степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение [Текст] // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 1. С. 67-73.