

На правах рукописи
УДК 629.1

Ван Ичжоу

**МЕТОДИКА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСОВ
АМФИБИЙНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН НА СТАДИИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические
средства и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024 г.

Работа выполнена на кафедре колесных машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: Зузов Валерий Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Колесные машины»
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты: Русанов Олег Александрович,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Динамика, прочность машин и сопротивление
материалов» ФГАОУ ВО «Московский
политехнический университет».

Филькин Николай Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автомобили и
металлообрабатывающее оборудование»,
ФГБОУ ВО «ИжГТУ» имени
М.Т. Калашникова».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Нижегородский государственный
технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Защита состоится «24» июня 2024 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская
ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «__» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Косицын Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. При постоянном расширении назначений амфибийных машин и усложнении условий их эксплуатации эти транспортные средства не всегда могут отвечать требованиям по необходимой скорости и маневренности, прочности и жесткости в том числе из-за увеличенной массы.

Для проектирований кузовов амфибийных машин с минимальной массой при обеспечении необходимой прочности и жесткости прежде всего необходимо анализировать напряженно-деформированные состояния (НДС) кузова при всех эксплуатационных режимах. При этом анализ НДС для критических режимов нагружения играет особую роль и позволяют более полно оценить соответствие конструкции требованиям по прочности и жесткости и, соответственно, еще на этапе проектирования принять необходимые решения о доработке конструкции. Поэтому поиск экстремальных режимов нагружения актуален с позиций использования их в расчетах для достижения достоверных результатов и обеспечения необходимых параметров конструкции при снижении ее массы.

С целью решения задачи снижения массы кузова часто применяют методы топологической и параметрической оптимизации, которые реализуются в ряде программ (ANSYS, Hypermesh, MATLAB и др.). Однако они имеют ограничения, которые затрудняют их применение и, в том числе, для кузовов из композиционных материалов. Универсальные методы топологической оптимизации не могут эффективно учитывать влияние панелей и взаимодействие между ними и каркасом для достижения оптимальных параметров по массе, прочности и жесткости. Широко используемые методы параметрической оптимизации имеют ограничения в аспектах погрешности результатов расчетов, машинного времени, сходимости результатов оптимизации и др.

Разработка новой методики проектирования скоростных амфибийных машин актуальна для создания кузовов с минимальной массой при обеспечении требуемых прочности и жесткости. Однако до настоящего времени вопрос разработки эффективных методик проектирования кузовов, способных удовлетворять требованиям прочности и жесткости конструкций, был изучен недостаточно, что подтверждает актуальность темы диссертации.

Цель диссертационной работы состоит в улучшении параметров конструкций кузовов скоростных амфибийных машин (минимальная масса, прочность, жесткость) на стадии проектирования за счёт разработки и применения методики создания каркаса и панелей кузова с оптимальными параметрами, базирующейся на методах топологической и параметрической оптимизации при экстремальных режимах нагружения.

Для достижения цели в работе были поставлены и решены **следующие задачи:** 1) Научно-обоснованы расчетные экстремальные режимы нагружения скоростных амфибийных машин из эксплуатационных при движении на суше и воде; 2) Проанализированы типовые конструкции кузовов (панелей, каркасных элементов) скоростных амфибийных машин с целью выявления конструктивных особенностей, влияющих на прочность и жёсткость конструкции; 3) Решены модельные задачи по оценке прочности и жесткости панелей и каркасных

элементов типовых конструкций кузовов скоростных амфибийных машин при действии нагрузок в виде давления и сосредоточенных сил, соответствующих экстремальным, с целью отработки принципов построения рациональных конечно-элементных моделей (КЭМ) применительно к оптимизационным задачам; 4) Разработаны методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузовов скоростных амфибийных машин и метод многокритериальной параметрической оптимизации применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям для снижения массы кузовов, позволяющие учесть влияние панелей и взаимодействие между ними и каркасом кузова и обеспечивающие сокращение машинного времени при проектировании конструкции по сравнению с существующими методами; 5) Проведена оптимизация кузовов скоростных амфибийных машин с различными особенностями конструкций на базе метода конечных элементов (МКЭ) с целью снижения массы и подтверждения эффективности и универсальности разработанной методики.

Научная новизна работы заключается в разработке методики совершенствования конструкций корпусов амфибийных колесных машин на стадии проектирования за счет нахождения оптимальных топологии и параметров каркаса и панелей из композитных/комбинированных материалов с заданными свойствами с целью минимизации массы и обеспечения прочности и жесткости кузова, включающей в себя: 1) Разработку рациональных моделей для гидродинамического анализа, моделирования движения и КЭМ кузовов, предназначенных для определения предельных нагрузочных режимов, исследования НДС и оптимизации, отличающихся обоснованно выбранными размерами конечных элементов (КЭ), обеспечивающих получение требуемой точности результатов расчетов при статическом и динамическом нагружениях с минимальными трудозатратами на подготовку и решение задач с помощью программных комплексов, что важно для многовариантных исследований (оптимального проектирования); 2) Определение на основе разработанных моделей расчетных научно-обоснованных экстремальных режимов нагружения кузовов скоростных амфибийных машин из эксплуатационных при движении по суще и воде, отличающихся тем, что позволяют получать силовые воздействия (квазистатические и динамические) в любой зоне кузова с высокой точностью; 3) Разработку методики нахождения оптимальной топологии каркаса на основе взвешенного метода TOPSIS, отличающейся учетом влияния панелей и взаимодействия между ними и каркасом кузова при оценке соответствия требуемым параметрам, определяющим прочность и жесткость; 4) Усовершенствование взвешенного метода TOPSIS для многокритериальной параметрической оптимизации, отличающегося снижением машинного времени и повышением сходимости решений при оптимизации за счет устранения влияния количества критериев и весовых коэффициентов целевых функций при обеспечении эффективного снижения массы кузова.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждались сопоставлением с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями, а также сравнениями теоретических

результатов с экспериментальными данными.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что: 1) Разработанная методика может быть использована при проектировании и доводке кузовов и каркасных элементов скоростных амфибийных машин для удовлетворения требованиям прочности и жесткости, а также уменьшения массы; 2) Проведенные исследования на основе разработанной методики позволили сформировать рекомендации по применению композитных/комбинированных материалов с заданными свойствами в панелях и каркасных конструкциях скоростных амфибийных машин (Humdinga и Quadski в данной работе) и найти оптимальную топологию каркаса для снижения массы кузова при обеспечении необходимой прочности и жесткости.

Личный вклад автора состоит в том, что представленные результаты получены автором или при его непосредственном участии. Автором лично разработаны методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузова амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS и метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям, а также выполнены экспериментальные исследования для верификации результатов расчетов МКЭ.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся: методика совершенствования конструкций корпусов амфибийных колесных машин на стадии проектирования, позволяющая определять расчетные режимы нагружения с высокой точностью, а также оптимальные топологии путем нахождения её на основе взвешенного метода TOPSIS и параметры панелей и каркаса методом многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного в диссертационной работе взвешенного метода TOPSIS для этих режимов с целью снижения массы кузовов скоростных амфибийных машин при обеспечении требуемых прочности и жесткости.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на: 1) Научных семинарах кафедры колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020-2024 г.); 2) 114-ой Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) (Нижний Новгород, 2023 г.); 3) XVI Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2023 г.); 4) Международном автомобильном научном форуме (МАНФ-2023) (Москва, 2023 г.).

Реализация работы: материалы диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке инженеров на кафедре колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана и в научно-исследовательской работе «Проектирование и внедрение амфибийного многовинтового аппарата для экологического мониторинга» (проект 2021JDRC0092, Юго-Западный университет науки и технологий, КНР).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 научных работы общим объёмом 3,77 п.л. в рецензируемых журналах, рекомендуемых перечнем ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения,

четырёх глав, общих выводов и заключения, а также списка литературы и приложений. Работа выполнена на 220 листах машинописного текста, включает 130 рисунков и 74 таблицы. Список литературы насчитывает 103 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В Введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложено содержание глав диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов.

В Главе 1 проведены обзор и анализ литературы по классификации амфибийных машин, способам доработки кузовов и эксплуатационным условиям. Установлено, что скоростные амфибийные машины играют важную роль в аварийно-спасательных работах, и в этом случае не всегда могут быть заменены тихоходными автомобилями-амфибиями. Разработка методики проектирования скоростных амфибийных машин имеет практическую ценность для содействия развитию аварийно-спасательных транспортных средств. В главе рассмотрено современное состояние развития и ограничения расчетно-экспериментальных методик амфибийных машин и методов топологической и параметрической оптимизаций в универсальных программах, в том числе кузовов скоростных амфибийных машин.

Проанализированы существующие и разрабатываемые методики проектирования кузовов скоростных амфибийных машин и факторы, влияющие на прочность и жесткость конструкций из полимерных композиционных материалов. Среди работ российских и зарубежных ученых особенно отмечены труды: В.Н. Зузова, А.П. Степанова, В.С. Макарова, М.Ю. Тимофеева, Д.Ю. Малахова, С.В. Зайцева, Г.О. Котиева, М.Ю. Филиппова, научных школ МАМИ, МАДИ и НГТУ им. Р.Е. Алексеева, С.Л. Hwang, Y. Peng, Y. Jiu и др.

В настоящее время слабо изучены вопросы по методам нахождения экстремальных режимов нагружения и получения их силовых воздействий (квазистатических и динамических) в любой зоне кузова с высокой точностью. Метод топологической оптимизации, реализованный в универсальных программах, не в полной мере применим к проектированию кузовов из композитных материалов, поскольку в них не учитываются влияние панелей и взаимодействие между каркасом и панелями кузова. Широко используемые методы параметрической оптимизации имеют ограничения в аспектах погрешности результатов расчетов, затрат машинного времени и сходимости результатов. На основе проведенного обзора сделаны следующие выводы: 1) Основными параметрами, влияющими на прочность и жесткость кузовов скоростных амфибийных машин, являются форма кузова, тип и материал панелей, а также структура и материал каркаса. Выбор наилучшего варианта силовой схемы кузовов скоростных амфибийных машин представляет собой одну из главных задач при проектировании кузова с минимальной массой при обеспечении требуемых прочности и жесткости; 2) Композитные материалы в настоящее время достаточно широко используются в автомобильной и судостроительной промышленности благодаря их низкой плотности, хорошим структурным свойствам, отличной коррозионной стойкости и удобству

обработки. Однако проведены ограниченные исследования, посвященные оценке их характеристик, необходимых для применения таких материалов в кузовах скоростных амфибийных машин; 3) Эксплуатационные режимы скоростных амфибийных машин подразделяются на сухопутные и водные, а также комбинированные (при входе и выходе из воды). В настоящее время методы определения экстремальных режимов нагружения из всех эксплуатационных не в полной мере позволяют получить силовые воздействия (квазистатические и динамические) в любой зоне кузова с высокой точностью, что необходимо для создания оптимальных конструкций; 4) Пути снижения затрат машинного времени при обеспечении требуемых прочности и жесткости, исследование влияния размеров КЭ на точность результатов расчетов и разработка рациональных КЭМ конструкций кузовов амфибийных машин являются задачами, которые надо решить перед проведением длительных оптимизационных расчетов; 5) На данный момент снижение массы кузовов скоростных амфибийных машин осуществляется за счет топологической и параметрической оптимизаций, которые выполняются в универсальных программах (ANSYS, Hypermesh, MATLAB и др.). Однако они имеют ограничения в аспектах сходимости результатов, погрешности расчетов и машинного времени, затрудняющие их применение и в том числе для кузовов из композитных материалов.

В Главе 2 предложен подход к определению экстремальных режимов нагружения скоростных амфибийных машин на суше и воде, разработаны КЭМ, которые позволяют оценить воздействия от дороги и воды на корпус с высокой точностью, а также проведены оценка влияния размеров КЭ на точность результатов расчетов и верификация КЭМ с рекомендуемыми размерами КЭ. Поскольку в настоящее время амфибийные машины широко используются в аварийно-спасательных работах и при этом предпочтения отдаются скоростным машинам, то, с учетом повышенных требований к кузову (по массе, прочности и жесткости) в качестве объекта исследований была выбрана скоростная амфибийная машина Humdinga.

Расчетные экстремальные режимы, рассматриваемые в работе:

1. Движение по суше. В результате анализа публикаций, известных статистических данных и результатов предварительных расчетов из всех эксплуатационных режимов нагружения на суше выделены 3 наиболее тяжелые применительно к амфибиям: вывешивание колес (диагонально), движение по синусоидальной дороге (с резонансом) и движение по дороге со случайным профилем.

1) При расположении центра тяжести посередине кузова наиболее тяжелым режимом является **диагональное вывешивание колес** (для Humdinga реакция на колесе - 15696 Н).

2) Для расчетов нагрузочных режимов при движении по суше были составлены динамические модели Humdinga на основе известных подходов (модели *MDI_Demo_Vehicle_lt.asy* в программе Adams/Car).

Режим движения по синусоидальной дороге представляет собой предельный резонансный режим. При движении по синусоидальной дороге

возмущение от дороги представляем как гармоническое, поскольку задача в большинстве случаев может рассматриваться в линейной постановке. Период колебаний должен соответствовать собственной частоте кузова или системы подпрессоривания (из расчетов для Humdinga около 2 Гц). Амплитуду возмущения определяем на основе стандарта испытаний (ГОСТ 31191.1-2004) с учетом предельного вертикального ускорения водителя (максимальная расчетная амплитуда для Humdinga составляет 135 мм). Для простоты считаем, что неровности по обоим бортам одинаковые. Расстояние между двумя ближайшими максимумами задаем равным (или кратным – у нас равно половине) колесной базе, и эквивалентную скорость (км/ч) определяем по формуле:

$$v = 3,6 \cdot f \cdot l,$$

где: f – собственная частота, Гц, l – колесная база кузова (для двухосной машины, у нас $l/2$), м.

По результатам расчетов скорость составляет 14,2 км/ч, пиковое значение сосредоточенной силы от системы подпрессоривания – около 17000 Н.

Движение по дорогам со случайным профилем рассматривалось с асфальтовым покрытием, а также по булыжным и грунтовым (по ГОСТ 33101-2014 асфальтовые дороги имеют класс D, булыжные – класс E, грунтовые – класс F). Неровности дорог генерировались с помощью известной модели *2d_stochastic Uneven.rdf*. Допустимые скорости определялись с учетом максимальной скорости машины на асфальте, влияния вибраций на степень комфорта водителя по стандарту испытаний ГОСТ 31191.1-2004 и допустимых скоростей по стандарту вождения СП 34.13330.2012. Результаты показывают, что: а) максимальная скорость для Humdinga на асфальтовой дороге составляет 128 км/ч, при этом расчетные сосредоточенные силы (реакции от дороги) на колесах изменяются в пределах от 7453 до 8200 Н; б) допустимая расчетная скорость на булыжной дороге составляет 40 км/ч, при этом сосредоточенные силы (реакции от дороги) на колесах изменяются в пределах от 7448 до 8009 Н; в) допустимая скорость на грунтовой дороге составляет 20 км/ч, при этом расчетные сосредоточенные силы (реакции от дороги) на колесах изменяются в пределах от 7323 до 8240 Н.

Отсюда в качестве тяжелого режима (для Humdinga) было выбрано движение по асфальтовой дороге класса D со скоростью 128 км/ч. Следует отметить, что для разных амфибийных машин значения скоростей и реакций на колесах будут другими и предельные режимы должны определяться исходя из этого.

2. Движение при входе/выходе из воды. Для расчетов нагрузочных режимов при входе/выходе из воды разработаны КЭМ кузова, спокойной воды и берега, обеспечивающие получение требуемой точности результатов расчетов с минимальными трудозатратами за счет рационального уменьшения размеров КЭ (в 2-4 раза на основе проведенных исследований) в ключевых зонах (поверхность воды, берег) с помощью анизотропных КЭ (трехмерные КЭ с разными длинами сторон в трех направлениях). Параметры воды (положение поверхности воды и скорость потока) и кузова (масса, положение центра тяжести, момент инерции и степень свободы) определяются с помощью внутренних моделей программы

(модели VOF, модели DFBI, кузов рассматривается как плоская модель).

Поскольку выход из воды может осуществляться с помощью вспомогательного оборудования (тягового оборудования), то более опасным является вход в воду, поэтому внимание было сосредоточено именно на нем. На основе расчетов на базе математической модели, заимствованной из литературных источников, максимальный безопасный угол входа в воду для Humdinga α равен 15° и начальная скорость не должна превышать 10 км/ч. В процессе входа в воду внешние нагрузки в основном действуют на переднюю часть кузова и передние колеса (максимальное значение 9475 Па).

3. Движение по воде. Для расчетов нагрузочных режимов при движении по воде проведены дополнительные исследования по влиянию размеров КЭ на результаты расчетов (угла дифферента и силы сопротивления) и разработаны КЭМ кузова, спокойной воды и волн, отличающиеся тем, что позволили получить силовые воздействия от воды в любой зоне кузова с высокой точностью. В результате анализа статистических данных и предварительных расчетов из всех эксплуатационных режимов нагружения скоростных амфибийных машин на воде выделены 4 наиболее тяжелых: прямолинейное движение (50 км/ч), поворот на спокойной воде (50 км/ч), движение против волны (50 км/ч) и удары волн о борт (0 км/ч). Из расчетов следует: 1) При прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч, угол дифферента кузова Humdinga составляет около $5,5^\circ$, внешние нагрузки в виде давления в основном действуют на заднюю часть днища кузова и подкрылки задних колес с максимальными значениями 7885 Па и 80521 Па соответственно; 2) При повороте на спокойной воде со скоростью 50 км/ч и с предельным углом крена кузова 8° , внешние нагрузки в виде давления в основном действуют на внешний борт кузова с максимальным значением 32836 Па; 3) При движении против волны давление достигает пикового значения при соотношении длины волны к длине корпуса равном 1,25 (длина волны составляет 8,765 м). Внешние нагрузки в виде давления в основном действуют на переднюю часть кузова с максимальным значением 88327 Па; 4) При ударах волн о борт максимальное давление достигает своего максимума при угле крена 10° (длина волны составляет 2,304 м). Внешние нагрузки в виде давления в основном действуют на боковую часть кузова со стороны воздействия волны с максимальным значением 5382 Па. Следует также отметить, что для разных амфибийных машин значения углов крена, дифферента и величин давлений будут другими.

С целью нахождения экстремальных режимов из эксплуатационных были составлены предварительные КЭМ кузова на основе имеющегося опыта (КЭМ с длиной сторон КЭ – 20 мм и количеством КЭ – 92968) для расчетов НДС. Экстремальные режимы определяются с помощью многокритериального метода принятия решений (ММПР), при этом в качестве критерия используются максимальная и средняя деформации и напряжение кузова. Основные геометрические параметры кузова Humdinga взяты с официального сайта компании Gibbs. В связи с отсутствием информации о материале и толщине панелей эти параметры определены из анализа публикаций, и из данных по наиболее близкому аналогу – амфибийной машины Amphi-Ranger 2800SR. В

результате получено, что наиболее тяжелыми режимами для днища кузова являются прямолинейное движение по спокойной воде с высокой скоростью и вывешивание колес (диагонально), для передней части кузова – движение против волны, а для боковой части кузова – удары волн о борт.

С целью верификации результатов расчетов МКЭ проведены сравнительные исследования на основе экспериментальных данных для глисссирующего катера DTMB Серия-62, заимствованных из литературы. Сила сопротивления и угол дифферента катера рассчитывались нами МКЭ при числе Фруда $Fr=0-6$. При этом получено, что средние погрешности между результатами эксперимента и расчетов составляют 5,6% и 12,8% соответственно. Анализ влияния размеров КЭ в локальных зонах на результаты моделирования показывает, что при составлении КЭМ для расчетов силы сопротивления и угла дифферента для повышения эффективности расчетов рекомендуется в зоне задней части корпуса использовать сетку из КЭ меньших размеров, чем в остальных частях.

В связи с отсутствием экспериментальных данных о НДС корпуса для верификации КЭМ с рекомендуемыми размерами КЭ, которые важны при проектировании кузова, был проведен дополнительный эксперимент в бассейне спортивного комплекса МГТУ им. Н.Э. Баумана. Учитывая, что днище кузовов скоростных амфибийных машин имеет воднолыжную форму, а максимальная скорость амфибийной машины Humdinga по воде составляет 50 км/ч, в качестве экспериментального объекта была выбрана масштабная модель (скоростной радиоуправляемый катер UDI005), позволяющая развивать близкую скорость (Рис. 1, а). На днище корпуса установлены четыре тензодатчика симметрично по обеим сторонам днища корпуса (датчики №2 и №4 – спереди, датчики №1 и №3 – сзади) (Рис. 1, б).

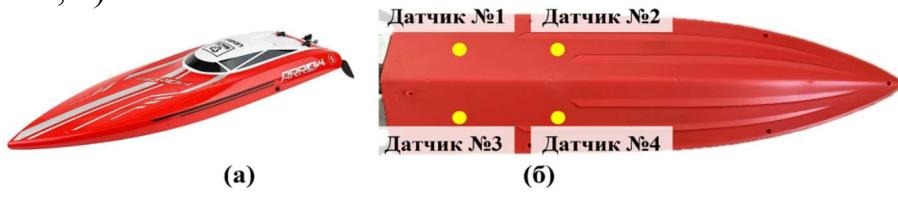


Рис. 1. Скоростной радиоуправляемый катер UDI005 и места установки датчиков

Для исследования влияния размеров КЭ на погрешность результатов расчетов и на продолжительность решения (что важно для оптимизационных задач) были разработаны КЭМ корпуса катера в программе ANSYS с различными уровнями сложности (на основе имеющегося опыта): «низким», «средним» и «высоким». Длины сторон КЭ в этих КЭМ составляют 10 мм, 3 мм и 1 мм соответственно, а количество КЭ в КЭМ этих уровней – 2225, 14365 и 127903. Анализ результатов расчетов позволил сделать следующие выводы: 1) МКЭ на базе разработанных в работе КЭМ позволяет получить силу сопротивления и угол дифферента скоростной амфибийной машины в программе Star CCM+ с приемлемой для практики погрешностью (для катера DTMB Серия-62, средняя погрешность силы сопротивления составляет 5,6%, средняя погрешность угла дифферента – 12,8%; для катера UDI005 средняя погрешность угла дифферента равна 5%); 2) При расчете НДС кузовов скоростных амфибийных машин на базе КЭМ среднего уровня (рациональная КЭМ)

обеспечивается достаточная точность. Для этой модели с использованием теории подобия рекомендуемое соотношение длин сторон КЭ к длине кузова не должно превышать 1:200 (при этом КЭМ имеет длину КЭ 3 мм, средняя погрешность НДС корпуса с длиной 645 мм составляет 5%).

Поиск наилучших параметров панелей кузова и каркасных элементов проводился в Главе 3 на основе опытов проектирований амфибийных машин, катеров и автомобилей. При рассмотрении каркасных элементов уделяется внимание структуре, форме сечения, материалу (металлический, композитный, комбинированный из композитов и металла) и типу соединения с панелями (традиционный, встроенный), а также целесообразности заполнения их внутренних полостей наполнителями (пеноалюминий, пена ПВХ с разными плотностями). Параметры панелей включают материал (металлический, композитный, комбинированный из разных композитов) и тип (сплошной, слоистый, сэндвич) панелей, а также углы и последовательность слоев обшивки при использовании сэндвич-панелей. Наилучшая схема определяется с использованием взвешенного метода TOPSIS, который позволяет оценить вариант на основе их расстояний от пиковых значений целевых функций вариантов (минимальные деформация и напряжение и максимальный запас прочности в данной задаче). Для комплексного учета многих целевых функций используются весовые коэффициенты, которые определяются на основе дисперсии значений целевых функций вариантов с помощью метода энтропийных весов (весовые коэффициенты для максимальной и средней деформаций составляют около 0,25, для среднего напряжения – около 0,3, для среднего запаса прочности – около 0,2). Стоит отметить, что они разные для задач оптимизации разных параметров кузова.

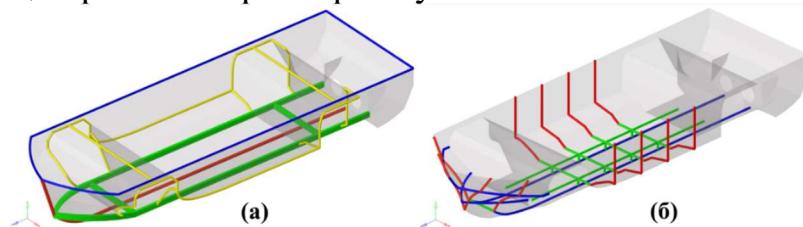


Рис. 2. Топология каркаса кузова амфибийной машины Humdinga: (а) главные несущие конструкции, (б) дополнительные каркасные элементы

По результатам расчетов можно сформулировать следующие выводы: 1) В предлагаемой рациональной структуре (Рис. 2) каркаса кузова амфибийной машины (Humdinga) рекомендуется в передней части кузова использовать каркасные элементы с Z-образным сечением, а для днища и боковой части кузовов – элементы с омегообразным сечением; 2) Наилучшим материалом для каркасных элементов передней части кузова является алюминиевый сплав, а для каркасов днища и боковой части кузова – комбинированный материал из углеродного волокна и алюминиевого сплава (благодаря высокой изгибной прочности и особенности постепенного отказа – углеродное волокно не склонно к поломке); 3) Для скоростных амфибийных машин нецелесообразно использовать наполнители в каркасных конструкциях. Эффективными методами усиления являются увеличение толщины стенок, изменение размера сечения и применение новых типов соединений между каркасными элементами и панелями,

таких как встроенное соединение (каркас встроен в сэндвич-панели обшивки с помощью чередующихся слоев препрега); 4) Благодаря низкой плотности и хорошей устойчивости к воздействиям в виде давления наилучшим материалом для панелей кузова является сэндвич-композитный материал. При этом обшивка состоит из углеродного волокна, а сердцевина представляет собой жесткую пену ПВХ; 5) Предлагаемые угол и последовательности слоев сэндвич-панелей, полученные на основе параметрической оптимизации, составляют $90^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ$. Первые четыре цифры указывают на слои препрега с одной стороны, последние четыре – с другой стороны, а цифра 0 посередине представляет ориентацию сердцевины из пены ПВХ, которая не влияет на прочность панелей.

Далее снижение массы кузова осуществляется путем топологической и параметрической оптимизаций, основанных на выбранных схемах. В связи с тем, что методы оптимизации, реализованные в универсальных программах (ANSYS, Hypermesh, Matlab), имеют ограничения, затрудняющие их применение и в том числе для кузовов из композитных материалов, разработана методика нахождения оптимальной топологии каркаса на основе взвешенного метода TOPSIS и усовершенствованного в данной работе взвешенного метода TOPSIS многокритериальной параметрической оптимизации для снижения массы кузова при обеспечении требуемых прочности и жесткости. Такое исследование представлено в **Главе 3**.

В настоящее время топологическая оптимизация реализована в ряде программ, среди которых ведущие места занимают ANSYS и Hypermesh. Однако они имеют ограничения в аспектах универсальности для конструкций из композитных материалов, учета взаимодействия между каркасами и панелями, технологической сложности результатов оптимизации и др. Для того, чтобы снизить влияние ограничений топологической оптимизации в универсальных программах, упростить процесс оптимизации кузова и уменьшить сложность соединений каркасных элементов, предложена новая методика нахождения топологии каркаса.

Конкретные этапы разработанной методики заключаются в следующем: сначала из ряда возможных схем выбирается лучшая с помощью взвешенного метода TOPSIS. Выбранная схема рассматривается как наиболее близкая к оптимальной. Затем происходит перераспределение массы каркасных элементов для нахождения слабо влияющих на основе корреляции параметров сечения с НДС кузова. Наконец, удаляются слабо влияющие элементы в порядке важности до тех пор, пока прочность кузова не приблизится к исходной конструкции.

Отличительная особенность заключается в том, что: 1) предложенная методика позволяет учесть взаимодействия между каркасом и панелями с помощью соединения «*Bonded*» между одномерными и двухмерными КЭ. Изменения параметров каркаса (размер сечения) не влияют на соединение, т.е. такое соединение имеет место на протяжении всего процесса оптимизации; 2) топологическая и параметрическая оптимизации выполняются параллельно, что позволяет добиться лучших результатов. На основе анализа численных результатов решений взвешенным методом TOPSIS осуществлены

перераспределение массы каркасных элементов и нахождение слабо влияющих из них. После удаления слабо влияющих элементов получена новая топология; 3) количество точек соединения в результатах, полученных с применением предлагаемой методики, можно контролировать искусственно на этапе предварительного исследования, что полезно и важно с точки зрения соединений каркасных элементов со сложной формой сечения.

С использованием новой методики проведена топологическая оптимизация различных элементов каркаса кузова. Результаты указывают на возможность выявления оптимальной топологии каркаса, обеспечивающей прочность и жесткость при снижении его массы. В результате оптимизации масса каркаса передней части и днища кузова Humdinga была снижена на 11,9% и 44,7% соответственно. Масса боковой части каркаса остается неизменной, но картина НДС улучшается за счет перераспределения массы каркасных элементов (прочность и жесткость кузова увеличивается до 3,3%).

Для сравнения результатов, полученных по предлагаемой методике, с результатами топологической оптимизации, проведенной в универсальных программных средствах (Hypermesh), была выполнена оптимизация топологии каркаса в области, несущей максимальную нагрузку (днище кузова). Из анализа результатов следует, что использование представленной методики дает возможность упростить технологию соединений (количество точек соединения между каркасными элементами днища кузова уменьшается на 42 %). Кроме того, по сравнению с результатом в Hypermesh, использование новой методики позволяет создавать конструкции с более высокой прочностью при той же массе (прочность общего днища кузова на 4,3 % выше, а прочность средней и задней частей днища кузова выше на 6,9 % и более). Стоит отметить, что разработанная методика в меньшей степени «зависит» от субъективных факторов исследователя, поскольку не требуется проводить интерпретацию результатов топологической оптимизации.

При проведении многокритериальной параметрической оптимизации одно из ведущих мест занимают прямой метод и метод поверхности отклика. Для задач с дискретными независимыми переменными также возможно применение взвешенного метода TOPSIS (который применен в данной работе). Однако эти методы имеют ограничения в аспектах погрешности результатов расчетов, сходимости результатов оптимизации и машинного времени. С целью уменьшения влияния ограничений многокритериальной параметрической оптимизации, связанного с использованием универсального метода, предлагается применить разработанный в данной работе метод многокритериальной параметрической оптимизации, который представляет собой усовершенствованный взвешенный метод TOPSIS.

Отличительная особенность его заключается в том, что он позволяет уменьшить затраты машинного времени и повысить сходимость решений при оптимизации за счет устранения влияния количества критериев и весовых коэффициентов целевых функций на время расчетов и сходимость результатов при многокритериальной оптимизации. Усовершенствование взвешенного метода TOPSIS отражено в следующих аспектах: 1) Реализована итерация

подмножества из множества всех вариантов за счет определения количества итераций и количества особей в итерации в начальных условиях и сочетания с генетическим алгоритмом для сокращения машинного времени и количества точек выборки при обеспечении сходимости результатов оптимизации (Рис. 3); 2) Использованы численные результаты взвешенного метода TOPSIS в качестве функции приспособленности генетического алгоритма для уменьшения влияния количества критериев и субъективных факторов при определении весовых коэффициентов на получаемые результаты; 3) Введены глобальные экстремальные особи в качестве критерия оценки взвешенного метода TOPSIS на каждой итерации для повышения сходимости результатов оптимизации по предлагаемому методу; 4) Составление базы данных во избежание повторного расчета одной и той же особи в разных итерациях с целью дальнейшего сокращения машинного времени.

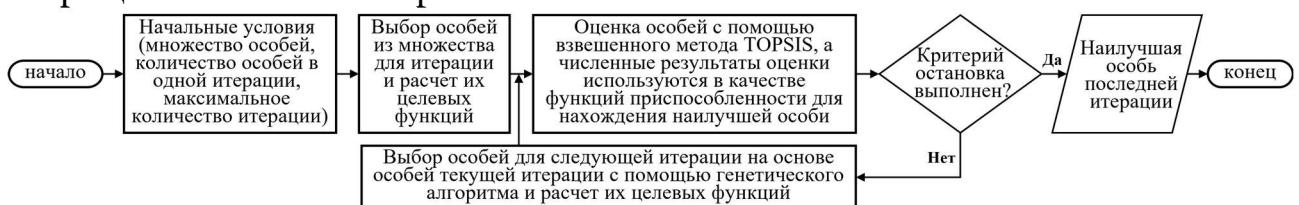


Рис. 3. Блок-схема усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS

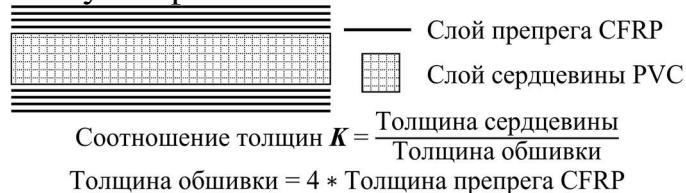


Рис. 4. Соотношение толщин сердцевины и обшивки K

Эффективность метода продемонстрирована при оптимизации толщин обшивки и сердцевины сэндвич-панелей днища кузова (Рис. 4). С целью наибольшего снижения массы панелей кузова данная работа была разделена на два шага: 1) Многокритериальная параметрическая оптимизация для нахождения оптимального соотношения толщин сердцевины и обшивки K ; 2) Уменьшение толщин обшивки и сердцевины с сохранением оптимальной пропорции между ними. В результате оптимизации получено, что оптимальное соотношение толщин K составляет 12, при этом масса панелей днища кузова снижается примерно на 51%. При этих значениях прочность и жесткость днища выше, чем у исходной конструкции, особенно при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч (максимальная деформация днища кузова уменьшается на 28,8%, средняя деформация увеличивается на 8%, среднее напряжение снижается на 9,2%).

Для сравнения результатов, полученных по предлагаемому методу, с результатами многокритериальной параметрической оптимизации, проведенной по универсальным методам, была проведена многокритериальная параметрическая оптимизация при тех же граничных условиях и нагружочных режимах разными методами. В результате установлено: 1) При использовании прямого метода и метода поверхности отклика, масса панелей днища кузова снижается примерно на 44% и 42% соответственно, что хуже, чем по предложенному методу (51%); 2) При использовании взвешенного метода

TOPSIS процент снижения массы согласуется с предлагаемым методом, но машинное время в 4 раза больше по сравнению с предлагаемым методом.

Поскольку запас прочности выше требуемого после оптимизации по предлагаемым методикам, то далее проводится дополнительная параметрическая оптимизация в соответствии с действующими стандартами, в том числе со стандартом прочности конструкций из полимерных композиционных материалов и стандартом производства препрегов из углеродного волокна. Применение предложенных методик привело к снижению общей массы кузова скоростной амфибийной машины *Humdinga* на 64% по сравнению с кузовом из широко используемых материалов для таких машин: 1) Масса панелей днища кузова снижается на 80%, масса каркаса днища кузова снижается на 44,7%; 2) Масса панелей передней части кузова снижается на 50%, масса каркаса передней части кузова снижается на 11,9%.

Для сравнительного исследования по оценке прочности и жесткости кузова была создана КЭМ высокого уровня с увеличением количества КЭ на 104%. Длина стороны КЭ передней части кузова снижена с 10 мм до 7 мм, длина стороны КЭ остальных частей снижена с 20 мм до 15 мм. НДС кузова скоростной амфибийной машины *Humdinga* оценивалось для всех эксплуатационных режимов (глава 2). В результате был сделан вывод, что КЭМ среднего уровня обеспечивает достаточную точность (средняя погрешность составляет 3,4% по сравнению с результатами расчетов на базе КЭМ высокого уровня).

Глава 4 посвящена разработке методики совершенствования конструкций корпусов амфибийных колесных машин на стадии проектирования с целью снижения массы при сохранении удовлетворения требованиям по прочности, жесткости, снижению массы (Рис. 5) и апробации её эффективности на примере кузова скоростной амфибийной машины *Quadski*.

Основные этапы методики заключаются в следующем. Перед началом процесса проектирования необходимо определить условия эксплуатации амфибийной машины с учетом ее назначения и требуемых показателей эксплуатационных свойств в соответствии со стандартами РС (Российский морской регистр судоходства), CCS (Китайское классификационное общество) и др. После этого создаются динамическая модель машины и КЭМ кузова с рекомендуемыми размерами КЭ для определения нагрузочных режимов на суше и на воде. Вводятся начальные параметры и свойства материалов кузова. Далее проводится расчетное предварительное исследование для нахождения экстремальных режимов эксплуатации. Затем предлагается провести комплекс предварительных расчетов (статические, квазистатические и динамические) для получения НДС кузова и нахождения слабых мест при экстремальных режимах нагружения.

Затем анализируются результаты расчетов для оценки прочности и жесткости кузова амфибийной машины в соответствии с требованиями (РС, CCS и т.д.). Если требования удовлетворяются, то проводится топологическая оптимизация каркаса и параметрическая оптимизация каркаса и панелей кузова для снижения его массы при обеспечении прочности и жесткости. Если

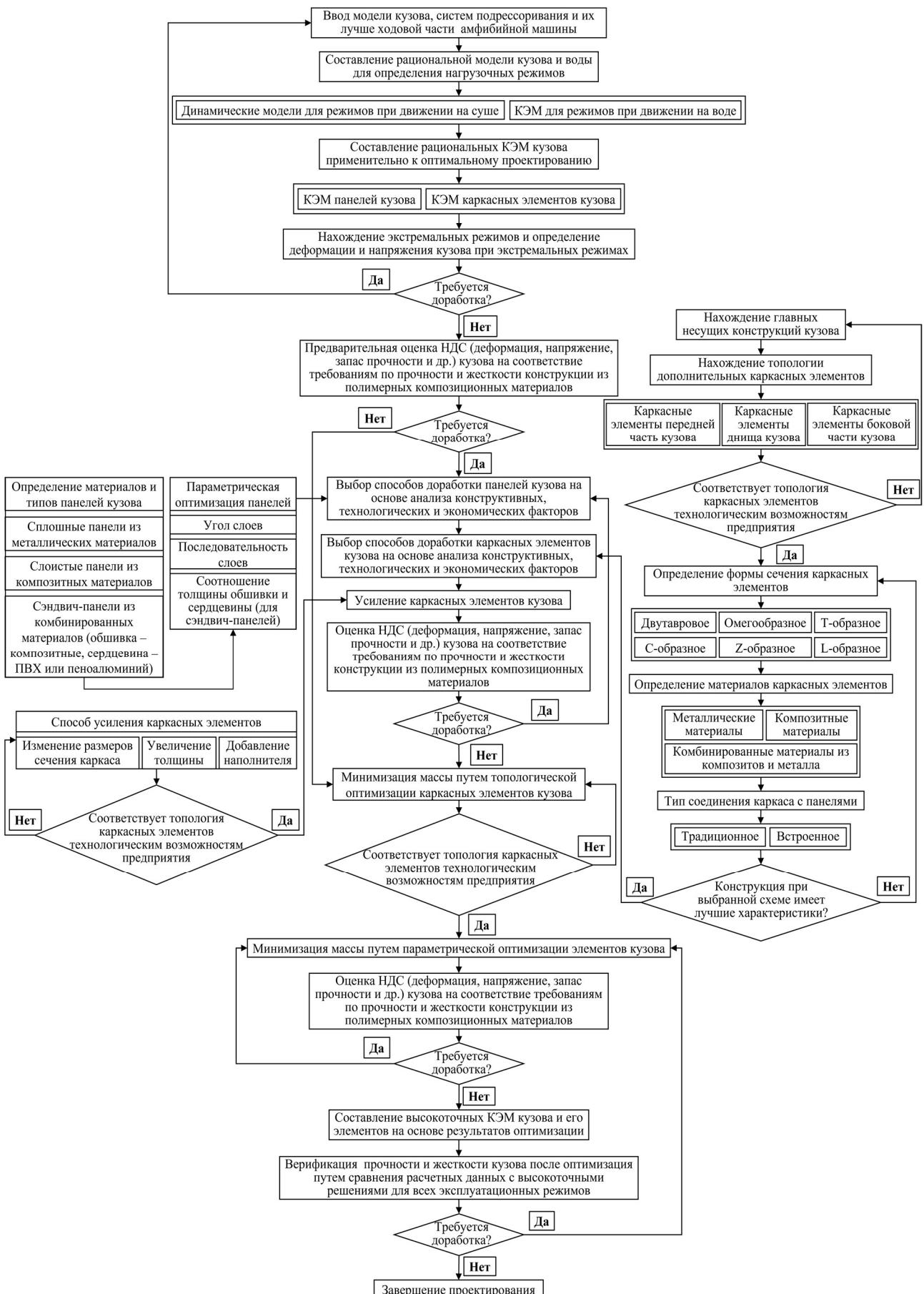


Рис. 5. Блок-схема методики совершенствования конструкций корпусов амфибийных колесных машин на стадии проектирования

требования не удовлетворяются, то необходима корректировка параметров с учетом конструктивных, технологических и экономических факторов и повторение этапов оптимизации. Для оптимизации выбираются целевые функции и ограничения. В качестве целевых функций выбираются: равнопрочность, жесткость, минимальный запас прочности по критериям отказа композитных материалов. Для комплексного учета нескольких экстремальных режимов в одной задаче оптимизации и объединения всех целевых функций используются весовые коэффициенты, которые определяются на основе опытов проектирования (субъективный подход) или распределения (дисперсии) значений целевых функций вариантов (объективный подход). В этой работе используется метод энтропийных весов для определения весовых коэффициентов целевых функций на основе дисперсии значений вариантов. При топологической оптимизации снижение массы осуществляется за счет удаления слабо влияющих каркасных элементов. В случае параметрической оптимизации масса снижается путем изменения геометрических параметров каркасных и панельных элементов кузова при сохранении их оптимальной топологии.

Далее требуется составление высокоточной КЭМ конструкции и проведение проверочных расчетов для оценки соответствия всем требованиям для всех эксплуатационных режимов. Если разработанная конструкция нуждается в дальнейшем совершенствовании, то при оптимизации параметров можно выбрать варианты с увеличенным запасом. Если она отвечает всем требованиям, то амфибийная машина готова к изготовлению и проведению натурных испытаний.

Для иллюстрации эффективности разработанной методики была проведена апробация её для доработки кузова скоростной амфибийной машины Quadski, обладающей схожими условиями эксплуатации на суше и аналогичным предназначением, как у скоростной амфибийной машины Humdinga. Она имеет складную независимую подвеску и аналогичную структуру силовых каркасных элементов кузова. У обеих скоростных амфибийных машин корпуса изготовлены из композитных материалов с воднолыжной формой, схожее распределение и воздействие внешних нагрузок при движении по воде и суше. Стоит отметить, что скоростная амфибийная машина Quadski имеет более высокую максимальную скорость на воде (у Humdinga – 50 км/ч, у Quadski – 72 км/ч). По этим причинам можно сделать вывод, что Quadski представляет интерес в рамках поставленной задачи. Геометрическая модель Quadski была создана в программе Solidworks на основе доступных данных из официального сайта компании Gibbs. Поскольку толщина корпуса и структура каркаса полностью неизвестны, то в качестве исходных данных для панелей кузова амфибийной машины Quadski используем параметры корпуса гидроцикла Yamaha GP1300r (корпус из SMC стекловолокна с толщиной 4 мм), а рациональную структуру каркаса находим на основе опыта проектирования амфибийных машин и гидроциклов. В программе ANSYS создана КЭМ среднего уровня для расчета НДС днища кузова, а дальнейшие топологическая и параметрическая оптимизации выполнялись с использованием разработанной методики.

Учитывая форму кузова и максимальную скорость на воде Quadski, на базе

проведенных в работе исследований основное внимание уделяется днищу кузова. По результатам предварительного исследования НДС днища выявлены экстремальные режимы для передней части (движение против волны) и для средней и задней частей (диагональное вывешивание колес), а также повышенные значения НДС во всех частях днища кузова при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 72 км/ч.

После оптимизации масса каркаса передней части днища кузова была снижена на 20%, при этом прочность и жесткость передней части днища кузова повысились (в том числе прочность на 3,5% выше при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 72 км/ч, и на 21% выше при движении против волны). Масса каркаса средней и задней частей днища кузова остается прежней, при этом прочность и жесткость значительно улучшены за счет изменений топологии и перераспределения массы между каркасными элементами (прочность на 13,7 % выше при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 72 км/ч, и на 4,6% выше при вывешивании колес). Оптимальное соотношение толщин K также составляет 12. После снижении толщин слоев панелей с сохранением этой пропорции, масса панелей днища кузова снижается на 83% при обеспечении требуемых прочности и жесткости.

После оптимизации с использованием предложенной методики, общая масса днища кузова скоростной амфибийной машины Quadski снижена на 73% по сравнению с кузовом из выбранных широко используемых материалов, в том числе масса панелей днища кузова снижена на 83%, масса каркаса передней части днища кузова снижена на 20%. Следует отметить, что эти цифры имеют относительный характер, т.к. смоделированная конструкция не в полной мере соответствует оригиналу.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработана методика совершенствования конструкций корпусов амфибийных колесных машин на стадии проектирования, позволяющая создавать конструкции с оптимальными параметрами (по прочности, жесткости и массе) для эксплуатационных режимов нагружения (в том числе экстремальных) при движении на суше и воде;

2. Определены расчетные научно-обоснованные экстремальные режимы нагружения кузовов скоростных амфибийных машин из эксплуатационных при движении на суше и воде (вывешивание колес (диагонально) при движении на суше, движение против волны, прямолинейное движение по спокойной воде с высокой скоростью, удары волн о борт) на базе разработанных моделей, которые позволяют определять с высокой точностью величины и направления воздействий в любой зоне кузова для достоверных расчетов НДС и оптимизации;

3. На основе расчетно-экспериментальных исследований предложены рациональные размеры КЭ с точки зрения затрат машинного времени и точности результатов расчетов (рекомендуемое соотношение длины стороны КЭ к длине кузова не должно превышать 1:200, при этом средняя погрешность по напряжениям будет не более 5%);

4. Для разработанных в работе КЭМ среднего уровня при рекомендуемых размерах КЭ получено, что для модели амфибии (глиссирующий катер DTMB

Серия-62 4667-1) вычисленные средние погрешности силы сопротивления и угла дифферента составляют 5,6% и 12,8% соответственно. Для масштабной модели (скоростной радиоуправляемый катер UDI005) средняя погрешность угла дифферента составляет 5%. Средняя погрешность расчетов по напряжениям катера UDI005 составляет 5% по сравнению с экспериментальными данными;

5. Включение в совместную работу всех элементов конструкции (каркасные элементы и панели кузова) при использовании методики нахождения оптимальной топологии каркаса на основе взвешенного метода TOPSIS позволяет проводить топологическую оптимизацию с учетом взаимодействия между ними (в то время как в программе Hypermesh нахождение топологии каркаса осуществляется без учета панелей, а в программе ANSYS - невозможно выполнить топологическую оптимизацию для кузова из композитных материалов) и упростить технологию соединений между каркасными элементами (количество точек соединения между каркасными элементами днища кузова уменьшается на 42%);

6. Применение метода многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS, разработанного в данной работе, позволило снизить массу кузова в большей степени, чем при использовании известных методов (в случае применения предлагаемого подхода снижение массы составило 51%, а для универсальных методов – 42-44%) и сократить машинное время оптимизации (на 75% меньше по сравнению с обычным методом TOPSIS);

7. Применение разработанной методики к реальным объектам показали ее эффективность. Массы конструкций кузовов скоростных амфибийных машин при обеспечении требований по прочности и жесткости согласно стандартам РС и CCS снижены: для Humdinga – на 64%, для Quadski – на 73% по сравнению с кузовами из выбранных широко используемых материалов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ван И., Зузов В.Н. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 82-96. (1,5 п.л. / 0,77 п.л.);

2. Ван И., Зузов В.Н. Методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузова амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. вып. 12. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-12-2323 (2,3 п.л. / 1,15 п.л.);

3. Ван И., Зузов В.Н. Метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям // Инженерный журнал: наука и инновации, 2024, вып. 1. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-1-2329 (2,1 п.л. / 1,02 п.л.);

4. Ван И., Зузов В.Н. Иваненков В.В. Особенности поиска, выполняемого на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS, оптимальных конструктивных параметров каркасных элементов скоростных амфибийных машин при движении по воде // Инженерный журнал: наука и инновации, 2024, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2024-3-0000 (1,7 п.л. / 0,83 п.л.).