

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.9

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82

К ВОПРОСУ О НАХОЖДЕНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЙ АМФИБИЙНЫХ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

И. Ван

ORCID: 0009-0006-6659-5993 e-mail: scott_bah@hotmail.com

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**В.Н. Зузов**

ORCID: 0000-0003-1512-9299 e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Проведен поиск экстремальных режимов нагружения кузовов скоростных амфибийных машин из эксплуатационных условий при движении по воде с целью использования их в расчетах для достижения достоверных результатов при обеспечении необходимой точности и в конечном итоге – оптимизации кузова для снижения его массы. В программном комплексе *Star CCM+* разработана динамическая модель для расчета нагрузочных режимов по воде, включающих вход в воду, движение по спокойной воде на низкой и высокой скоростях, движение против волны на предельной скорости и движение поперек волны при качке. Критическое состояние в рабочем режиме определяется по соответствующим стандартам безопасности. Расчет НДС при выбранных внешних нагрузках осуществляется на базе метода конечных элементов (МКЭ). Для расчета напряженно-деформационного состояния (НДС) кузова амфибийной машины была разработана конечно-элементная модель (КЭМ) в программе *Ansys*. Выявлено, что передняя часть кузова подвержена экстремальным нагрузкам при нахождении во впадине волны при движении против волны на максимальной скорости (50 км/ч). Днище кузова испытывает экстремальные нагрузки, проявляющиеся при прямолинейном движении по спокойной воде на максимальной скорости (50 км/ч). Для боковой части кузова экстремальным режимом является движение поперек волн при качке (скорость, близкая к 0 км/ч).

Ключевые слова: зубчатый дифференциальный механизм, дифференциал, замыкающая часть, кинематические возможности механизма, метод обращенного движения, условие соосности, главное и дополнительные условия синтеза, передаточное отношение механизма.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ван И. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде / И. Ван, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 82-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82

RESEARCH ON EXTREME LOAD MODE OF AMPHIBIOUS VEHICLE DURING OPERATION ON WATER

Y. Wang

ORCID: 0009-0006-6659-5993 e-mail: scott_bah@hotmail.com

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.N. Zuzov

ORCID: 0000-0003-1512-9299 e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. An extensive research of extreme loading modes of the bodies of high-speed amphibious vehicles from operating conditions when moving on water has been conducted. The obtained results should be used in calculations to achieve reliable results while ensuring the necessary accuracy and, ultimately, optimizing the body to reduce its weight. The dynamic model was constructed using Star CCM+ software to simulate load conditions in water, including entry into the water, movement in calm water at low and high speeds, movement against the wave at maximum speed and movement across the wave during rolling. This research aimed to investigate the impact of extreme operational conditions on water, therefore the criticality of these conditions was evaluated in accordance with pertinent safety standards prior to calculating external loads. Finite element model (FEM) of amphibious vehicle body was created in *Ansys* software to further analyze the response of the body structure under selected external loads. It was revealed that the front part of the body is subject to extreme loads when located in the trough of a wave when moving against the wave at maximum speed (50 km/h). The underbody experiences extreme loads that occur when driving straight through calm water at maximum speed (50 km/h). An extreme mode for the side body is movement across the waves when rolling (speed close to 0 km/h).

Key words: gear differential mechanism, differential, closing part, kinematic capabilities of the mechanism, reverse motion method, coaxiality condition, main and additional synthesis conditions, gear ratio.

FOR CITATION: Wang Y. Research on extreme load mode of amphibious vehicle during operation on water. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 82-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82

Введение

Одной из главных задач при проектировании амфибийных машин является снижение массы кузова при обеспечении требуемых прочности и жесткости. Эксплуатационные режимы могут быть разделены на два типа: движение на суше и движение по воде. Режимы движения на суше, за исключением опасных режимов (удар или опрокидывание) включают: вывешивание колеса, движение по дорогам с синусоидальным и другими заданными профилями, движение по дороге со случайным профилем и др. [1]. Режимы движения по воде (без учета опасных ситуаций – наезд на скалы или затопления) включают: вход в воду, прямолинейное движение и поворот по спокойной воде и движение против волны и поперек волны. При исследовании и оптимизации конструктивных параметров кузова амфибийных машин необходимо анализировать НДС кузова при всех эксплуатационных режимах, однако это сложный и трудоемкий процесс. Во-первых, для расчета внешних нагрузок из всех эксплуатационных режимов необходимо найти критические состояния амфибийных машин (по НДС, параметрам кузова и с учетом соответствующих стандартов). Внешние нагрузки в критических состояниях могут быть рассмотрены как предельные для данного режима. Во-вторых, в каждом эксплуатационном режиме возникают различные внешние нагрузки, и их влияние на НДС кузова является комплексным. Несмотря на сходство положения кузова в различных режимах, необходимо проанализировать величину и распределение внешних нагрузок по кузову при каждом режиме отдельно.

Расчет НДС при выбранных внешних нагрузках осуществляется на базе *метода конечных элементов* (МКЭ). Проведенные нами исследования включали следующие этапы: 1) оценка возможных предельных состояний из эксплуатационных режимов; 2) расчет величин внешних нагрузок для этих состояний; 3) расчет НДС конструкции кузова в целом и в отдельных его элементах (локальных зонах) при соответствующих эксплуатационных режимах и нахождение из них экстремальных для проведения в дальнейшем оптимизации конструкции с целью снижения массы.

Целью работы является нахождение расчетных научно-обоснованных экстремальных режимов нагружения кузовов скоростных амфибийных машин из возможных эксплуатационных при движении по воде на основе моделирования применительно к оптимальному проектированию кузовов таких машин.

Разработка моделей кузова

В качестве объекта исследования выбрана скоростная амфибийная машина *Humdinga*. Для изучения нагрузочных режимов при эксплуатации необходимо построить три модели: кинематическую модель для расчета внешних нагрузок при движении на суше, конечно-элементную модель (КЭМ) для расчета внешних нагрузок при движении по воде и КЭМ для расчетов НДС кузова.

1. Кинематическая модель

По доступным данным, амфибийная машина *Humdinga* имеет длину кузова 7,012 м, ширину 2,304 м, и массу 3200 кг (рис. 1). Центр массы находится в точке (0 м, -0,8 м, -3,73 м) в системе координат кузова. Моменты инерции относительно осей x, y, z равны (11459 кг · м², 11619 кг · м², 2319 кг · м²). Система подвески амфибийной машины *Humdinga* представляет собой гидравлическую складную независимую систему с использованием запатентованной технологии *Gibbs HAS*, которая относится к независимой подвеске на двойных поперечных рычагах.

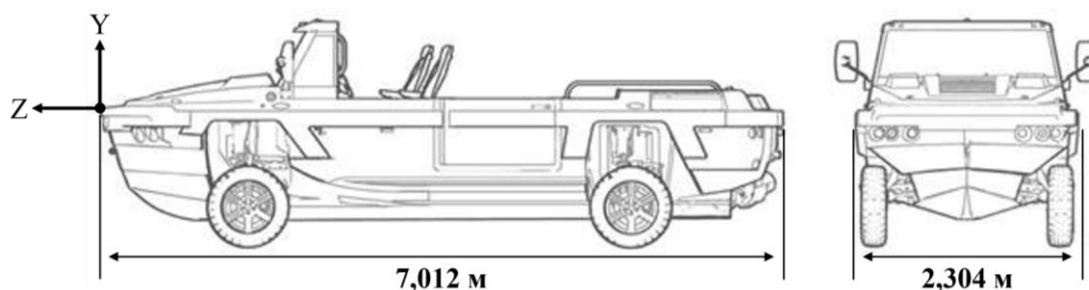


Рис. 1 Общий вид скоростной амфибийной машины *Humdinga*

Fig. 1. General view of high-speed amphibious vehicle *Humdinga*

На основании указанных параметров кузова в программе *Adams* была создана упрощенная кинематическая модель амфибийной машины *Humdinga* (рис. 2). Эта упрощенная модель состоит из кузова амфибии, системы поддрессоривания, двигателя и колес. Соединение кузова с системой поддрессоривания осуществляется с помощью шарниров. Кузов и двигатель соединены четырьмя втулками. Поскольку данная статья посвящена определению предельных нагрузок при движении по воде, то эта модель приведена для представления общего подхода к определению нагрузок на кузов амфибийной машины.

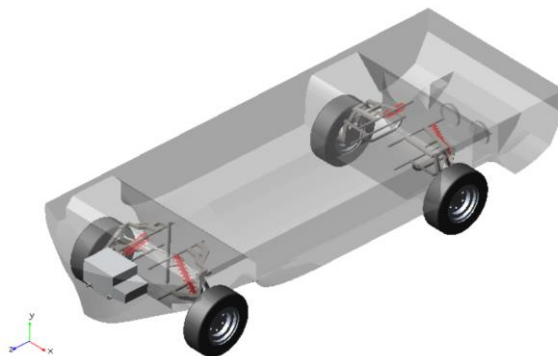


Рис. 2. Упрощенная кинематическая модель амфибийной машины *Humdinga*

Fig. 2. Simplified kinematic model of the *Humdinga* amphibious vehicle

2. Конечно-элементная модель для расчета внешних нагрузок

При движении по воде внешняя нагрузка в основном включает давление воды и опорную силу, приложенную к колесам при входе в воду. Для расчета внешних нагрузок в этих режимах создана КЭМ в программе Star CCM+. Для режима движения по воде КЭМ состоит из трехмерных конечных элементов (КЭ) (всего 243716), включая область возле кузова (всего 215801) и окружающую водную среду (всего 27915) (рис. 3). В окружающей водной среде используется КЭ с длиной стороны 100-400 мм, а в области возле кузова используется КЭ с длиной стороны 30-150 мм. Размеры КЭ подбирались на основе анализа результатов предварительных расчетов с учетом формы геометрической модели. С помощью перекрывающихся сектор КЭ двух областей объединяются, а параметры передаются на стыке. Модель VOF (volume of fluid) используется для моделирования водной поверхности, а модель DFBI (dynamic fluid body interaction) используется для определения массы, положения центра масс и момента инерции амфибийной машины *Humdinga*. Задавая скорость и направление потока и ограничивая степени свободы корпуса, можно получить внешнюю нагрузку и положение кузова при движении по воде.

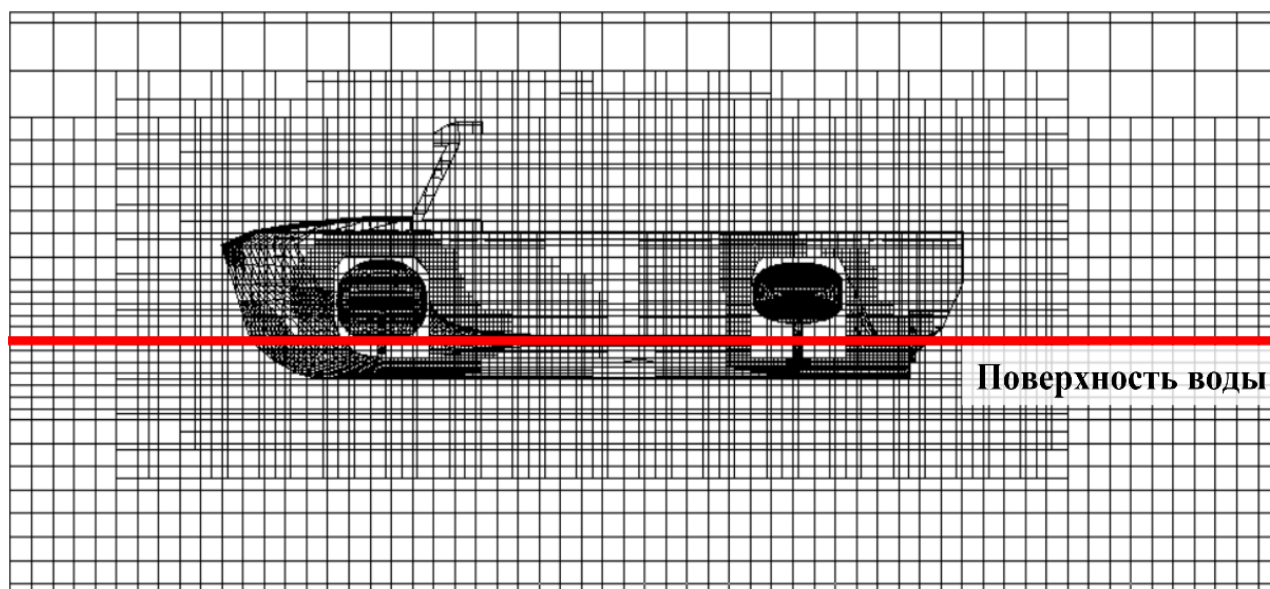


Рис. 3. КЭМ амфибийной машины *Humdinga* и окружающей среды при движении по воде

Fig. 3. Finite element model (FEM) of the *Humdinga* amphibious vehicle and the environment when moving through water

Для режима при входе в воду КЭМ состоит из трехмерных КЭ (всего 324197), включая область возле кузова (всего 160671) и окружающую водную среду (всего 163526) (рис. 4). В окружающей водной среде используется КЭ с длиной стороны 62,5-1000 мм, а в области возле кузова используется КЭ с длиной стороны 50-200 мм. Для обеспечения точности результатов размеры КЭ области у поверхности воды и у склона меньше чем в остальных. Кроме того, КЭМ также содержит 5 слоев сеток пограничного слоя толщиной 20 мм. В модель DFBI добавлен контакт между колесом и склоном для имитации опорных сил (на колесах) в процессе входа в воду. Задав начальную скорость амфибии и ограничив степени свободы кузова, можно получить распределение внешней нагрузки амфибийной машины при входе в воду.

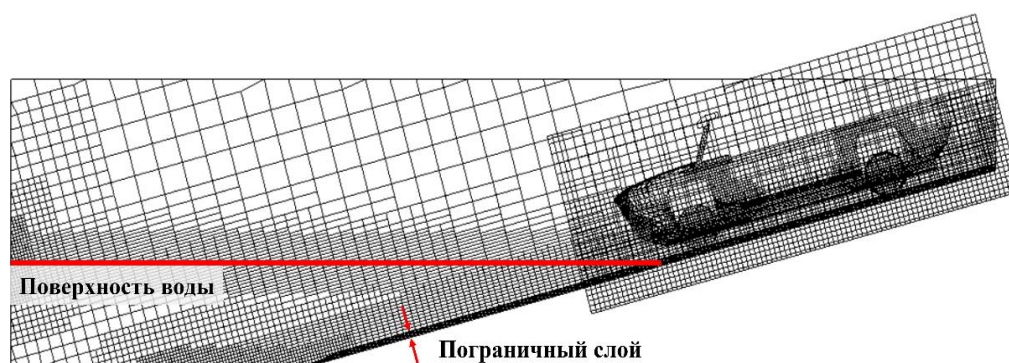


Рис. 4. КЭМ амфибийной машины *Humdinga* и окружающей среды при входе в воду

Fig. 4. FEM of the *Humdinga* amphibious vehicle and the environment when entering the water

3. Конечно-элементная модель для расчета НДС кузова

Анализ предварительных сравнительных расчетов для кузова в целом и отдельных его зон на начальной стадии проектирования (включая многовариантные) допустимо рассчитывать НДС локальных конструкций кузова. Это позволяет сократить машинное время при обеспечении необходимой точности результатов, что особенно важно для многовариантных расчетов (оптимизации) выбранных внешних нагрузок. Исходя из характера действия нагрузок в кузове, рассматривались три зоны: передняя, боковые и днище, с учетом расположения каркасных элементов (рис. 5). В программе статического анализа *Ansys* панели кузова моделируются двумерными конечными элементами (*Shell181*) с размерами сторон 20 мм. Рама на предварительных этапах моделируются одномерными конечными элементами (*Beam188*) длиной 10 мм и в дальнейшем двумерными конечными элементами. При этом 1D- и 2D-конечные элементы соединены контактом *Bonded*.

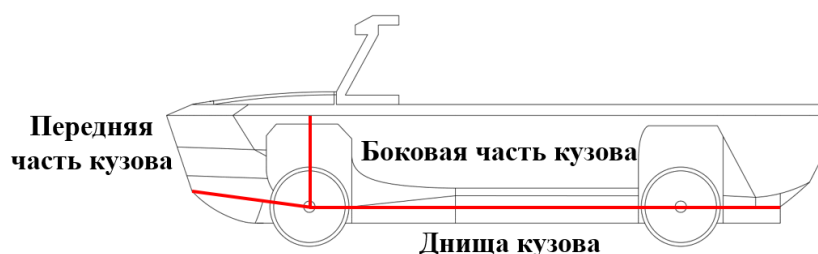


Рис. 5. Локальные зоны конструкция кузова амфибийной машины *Humdinga*

Fig. 5. Local zone body structure of the *Humdinga* amphibious vehicle

Постановка задачи

Условия эксплуатации амфибийных машин включают движение по суше и воде, вход и выход из воды. Дороги на суше делятся на дороги с твердой поверхностью и бездорожье [2]. В данной работе поставлена задача определения экстремальных нагрузочных режимов по воде и входе в воду.

Расчет нагрузочных режимов по воде и входе в воду

1. *При входе в воду.* Для нахождения экстремальных режимов для передней части кузова необходимо определить внешние нагрузки при входе в воду. Перед расчетом внешней нагрузки необходимо провести анализ критического состояния входа в воду, определив максимальный безопасный угол входа и соответствующую предельную скорость. Процесс входа в воду начинается с того момента, когда кузов касается водной поверхности, и заканчивается,

когда опорная сила передних колес становится равной нулю. В целях обеспечения безопасности водителя и эксплуатации амфибии вода не должна заливать капот при входе в воду (быть выше линии, проходящей через точку А (рис. 6)).

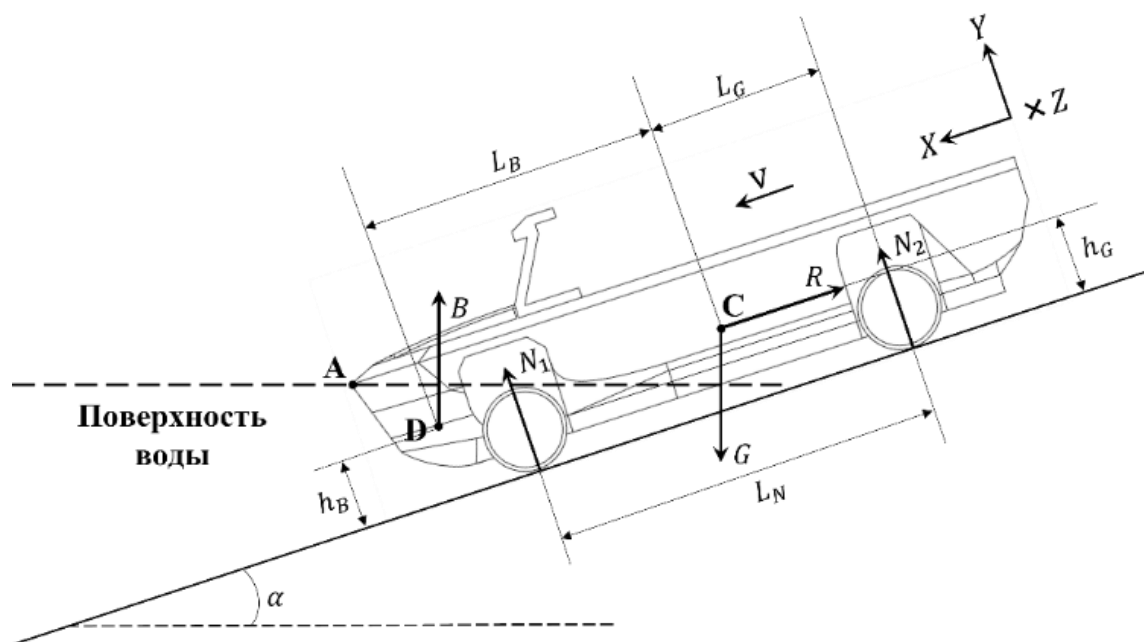


Рис. 6. Внешние нагрузки при входе амфибии в воду

Fig. 6. External loads when an amphibian enters the water

По условиям успешного входа в воду в критическом состоянии максимальный безопасный угол входа составляет около 18° [3]. На практике амфибийные машины обычно входят в воду по склону с небольшой скоростью. Следовательно, фактический максимальный безопасный угол входа в воду будет немного меньше, чем результат расчета математической модели. По результатам предварительных исследований в качестве максимально безопасного угла входа в воду амфибийной машины *Humdinga* определен угол 15° . Расчет предельной скорости амфибийной машины *Humdinga* при угле входа в воду $\alpha = 15^\circ$ осуществляется на базе МКЭ. Параметры для расчетов: угол входа в воду $\alpha=15^\circ$, начальная скорость задавалась как 10 км/ч, 12 км/ч и 14 км/ч соответственно. Траектория точки А передней части кузова показана на рис. 7. По результатам расчета траектория точки А касается поверхности воды только при начальной скорости $v_0 = 10$ км/ч, т.е. капот не будет затоплен водой. Поэтому предельная скорость при угле входа в воду 15° составляет не более 10 км/ч.

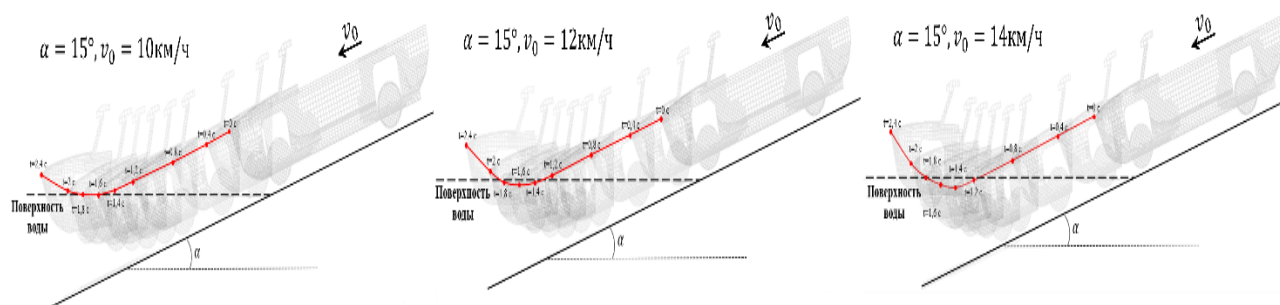


Рис. 7. Траектория точки А при разных скоростях входа в воду

Fig. 7. Trajectory of point A at different speeds of entry into the water

В качестве критического состояния в этом эксплуатационном режиме выбран момент, когда ускорение кузова достигает минимума, т.е. $t = 1,23$ с. По результатам в программе *Star CCM+* в процессе входа в воду внешней нагрузкой является давление, действующее на корпус передней части кузова. Максимальная нагрузка возникает в передней части кузова, и пик максимального давления составляет 9475 Па. Изменения ускорения кузова и максимального давления представлены на рис. 8, положение кузова и распределение внешних нагрузок в критическом состоянии – на рис. 9.

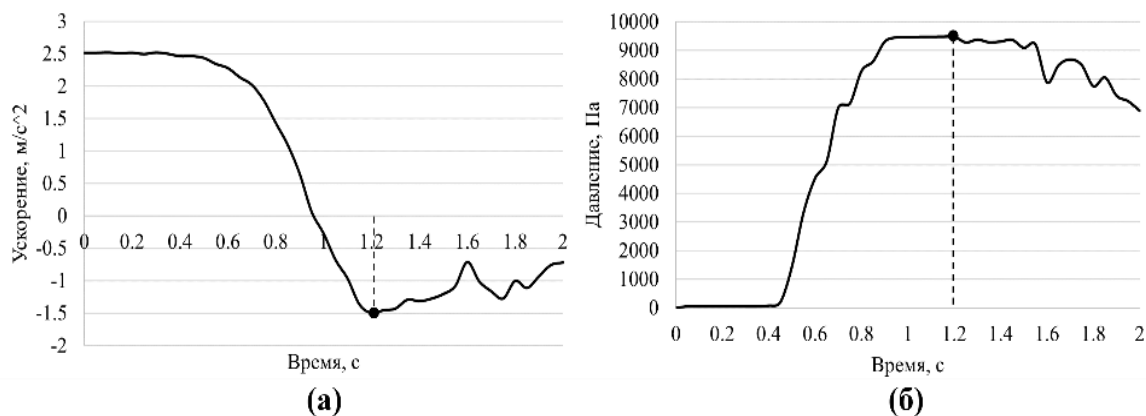


Рис. 8. Изменения ускорения кузова (а) и максимального давления на переднюю часть кузова (б) при входе в воду

Fig. 8. Curves of body acceleration (a) and maximum front body pressure (b) when entering the water

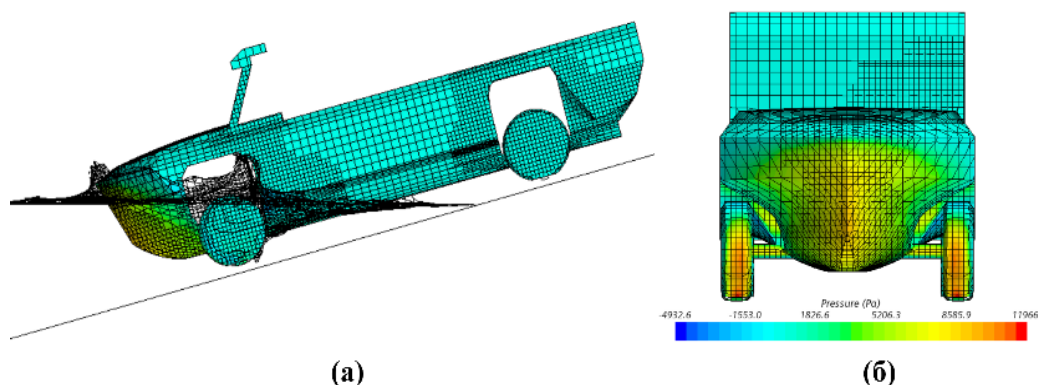


Рис. 9. Положение кузова (а) и распределение давления (б) в критическом состоянии при входе в воду

Fig. 9. Body attitude (a) and pressure distribution (b) in critical state when entering the water

2. При прямолинейном движении по спокойной воде. Для нахождения экстремальных воздействий на днище кузова необходимо рассчитать внешние нагрузки при прямолинейном движении по воде на низкой и высокой скоростях. По официальной информации у скоростной амфибийной машины *Humdinga* максимальная скорость движения по водной поверхности составляет не менее 48 км/ч [4]. В данной статье в качестве минимальной скорости движения выбрана равная 3 км/ч, а скорость 50 км/ч – как максимальная. По результатам моделирования в программе *Star CCM+* при скорости 3 км/ч угол наклона кузова амфибии почти равен 0° . Внешней нагрузкой является давление, прикладываемое к всему днищу. Величина давления в основном связана с глубиной погружения в воду и мало связана со скоростью движения. Максимальное расчетное давление, действующее на днище кузова, составляет 4794 Па. Положение кузова и распределение давления показаны на рис. 10.

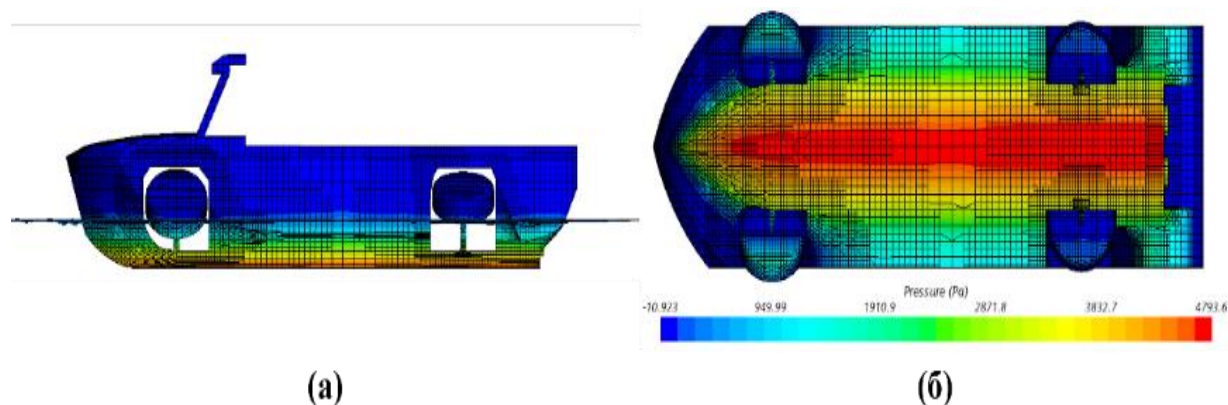


Рис. 10. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при прямолинейном движении по воде со скоростью 3 км/ч

Fig. 10. Body attitude (a) and pressure distribution (b) during rectilinear movement through water at a speed of 3 km/h

При скорости 50 км/ч угол наклона кузова амфибии составляет около $5,5^\circ$. Внешние нагрузки в основном действуют на среднюю и заднюю части днища кузова, а также на подкрылки задних колес. Максимальное давление на днище кузова – 7885 Па, а на подкрылки задних колес – 80521 Па. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 11.

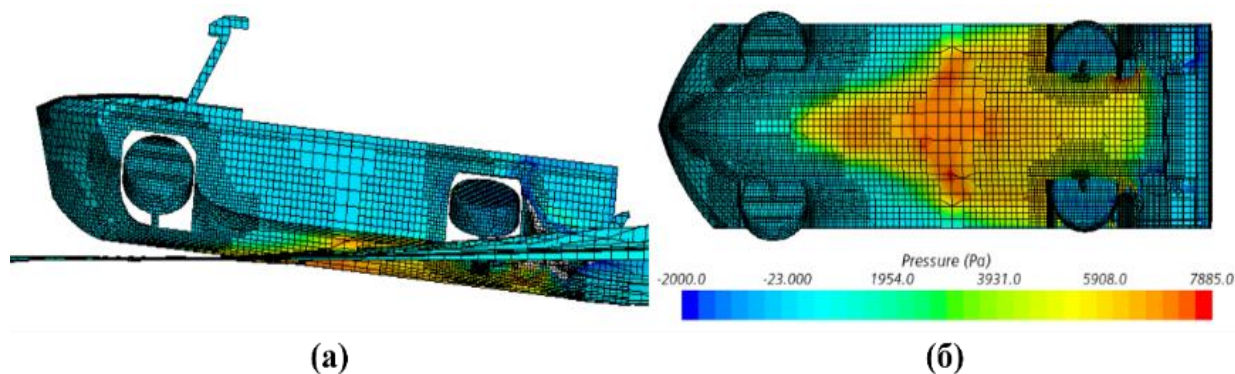


Рис. 11. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч

Fig. 11. Body attitude (a) and pressure distribution (b) during rectilinear movement through water at a speed of 50 km/h

3. При повороте при спокойной воде. Для нахождения экстремального режима боковой части кузова необходимо рассчитать внешние нагрузки при повороте в воде на низкой и высокой скоростях. Как и в случае с начальными условиями, при прямолинейном движении выбрана скорость 3 км/ч при повороте (на низкой скорости) и 50 км/ч при повороте на высокой скорости. При повороте в воде со скоростью 3 км/ч траектория движения, изменения угла крена и угла тангажа показаны на рис. 12. По результатам моделирования в программе Star CCM+ при повороте со скоростью 3 км/ч углы крена и наклона практически близки к 0° . Внешние нагрузки в этом режиме аналогичны внешним нагрузкам при движении по воде со скоростью 3 км/ч. Нагрузки слишком малы, чтобы их можно было использовать для изучения НДС боковой части кузова амфибийных машин.

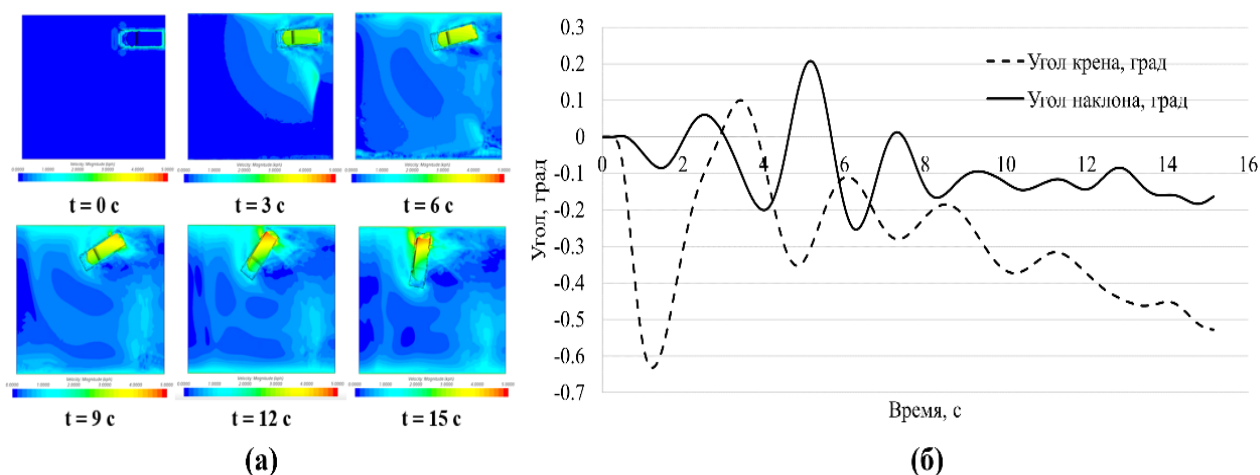


Рис. 12. Траектория движения (а), кривые изменений угла крена и угла тангажа (б) при повороте при движении по воде со скоростью 3 км/ч

Fig. 12. Trajectory (a), roll angle and pitch angle curves (b) when turning in the water at a speed of 3 km/h

При повороте на высокой скорости должна быть обеспечена безопасность водителя и пассажиров. Перед расчетом внешней нагрузки необходимо сначала определить максимальный безопасный угол поворота. По стандарту [5] при повороте по спокойной воде с высокой скоростью угол крена не должно быть больше 8° . По результатам предварительного исследования для амфибийной машины *Humdinga* определено, что угол поворота α составляет 4° при угле крена около 8° . В этом режиме внешние нагрузки в основном действуют на корпус задней части борта кузова и правой части днища кузова. Максимальная нагрузка возникает вблизи подкрылков задних колес и составляет около 32836 Па. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 13.

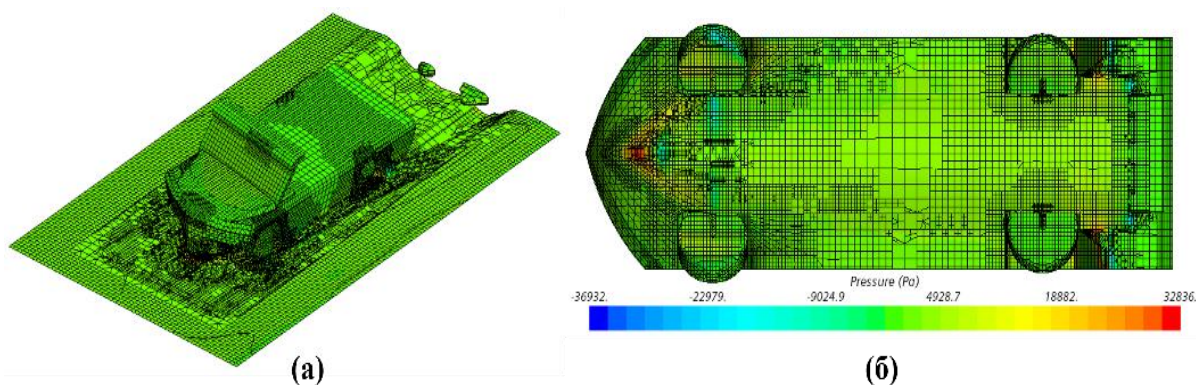


Рис. 13. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при повороте со скоростью 50 км/ч

Fig. 13. Body attitude (a) and pressure distribution (b) when turning at a speed of 50 km/h

4. При движении против волны. Движение амфибийных машин по воде с волнами включает: движение по волне, движение против волны и движение поперек волны. М.Ю. Филиппов провел углубленный анализ опасной ситуации амфибийных машин при движении по воде с волнами с точки зрения устойчивости кузова [6], и некоторые выводы сводятся к следующему:

- 1) при движении против волны опасность потери остойчивости вследствие снижения от воздействия волнения минимальна (тем не менее, в этом случае следует помнить о высокой ударной нагрузке от встречных волн на корпус);
- 2) при движении поперек волны для оценки поперечной остойчивости амфибийных машин следует использовать основной критерий остойчивости, предлагаемый Речным Регистром России [7].

В данной работе основное внимание уделяется анализу влияния внешних нагрузок на НДС конструкции кузова при движении по воде с волнами: против волны и поперек волны. При движении против волны величина внешнего воздействия в основном связана с относительной скоростью амфибии и параметрами волны, такими как длина и высота волны. Известно [8], что с увеличением отношения длины волны к длине кузова пиковое значение внешней нагрузки сначала увеличивается, а затем уменьшается. Максимальное значение появляется при отношении длины волны к длине кузова 1,25. На основе зависимости между параметрами глубоководной волны [9, 10] при длине волны $L_B = 8,765$ м, скорости волны $C_B = 13,3$ км/ч, высоте волны $H = 0,86$ м, периоде волны $T_{\text{волна}} = 2,37$ с значение внешней нагрузки наибольшее. В качестве предельного состояния на этом режиме выбран момент нахождения амфибийных машин во впадине волны, т.е. при $t = 8,79$ с (для указанных выше параметров волны). Для расчетов в программе Star CCM+ в этом состоянии внешней нагрузкой является давление, действующее на корпус передней части кузова и задней части днища кузова. Максимальная нагрузка возникает в передней части кузова, и пик максимального давления составляет около 88327 Па. Изменения ускорения кузова и максимального давления представлены на рис. 14. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 15.

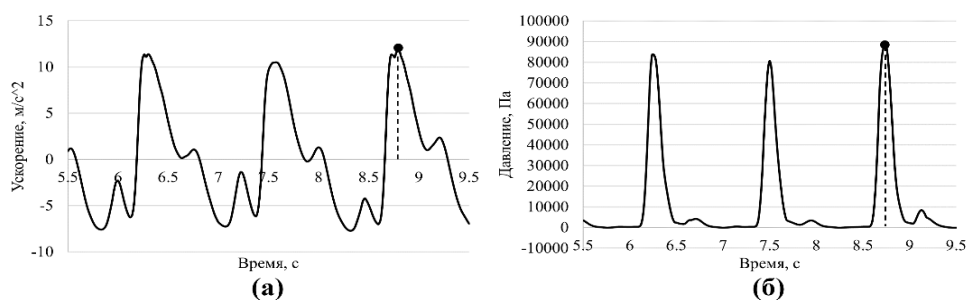


Рис. 14. Изменения ускорения кузова (а) и максимального давления на переднюю часть кузова (б) при движении против волны

Fig. 14. Curves of body acceleration (a) and maximum front body pressure (b) when moving against the wave

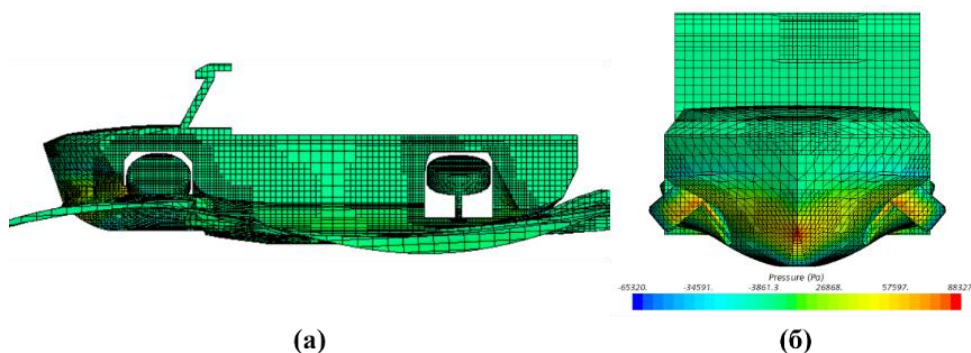


Рис. 15. Положение кузова (а) и распределение давления (б) в критическом состоянии при движении против волны

Fig. 15. Body attitude (a) and pressure distribution (b) in critical state when moving against the wave

5. При движении поперек волны. Для нахождения экстремального режима боковой части кузова необходимо рассчитать внешние нагрузки при движении поперек волны. В условиях движения амфибийных машин поперек волн возникает периодическое перекачивание кузова, а также возникают периодические ударные нагрузки на боковые части кузова вследствие воздействия волн. По стандарту [5] при движении пассажирских судов на спокойной воде суммарный угол крена не должен превышать 10° при совместном действии кренящего момента из-за неравномерного распределения пассажиров и груза и кренящего момента бокового ветра. В расчете принята падающая волна, длина волны равна длине ватерлинии, а в нашей работе длина волны примерно равна ширине кузова [11]. На основе зависимости между параметрами глубоководной волны [9, 10], в нашей работе приняты длина волны $L_B = 2,304$ м, скорость волны $C_B = 6,8$ км/ч, высота волны $H = 0,318$ м, период волны $T_{\text{волна}} = 1,21$ с.

В качестве критического состояния в этом режиме выбираем момент максимального ускорения кузова, т.е. $t = 2,9$ с. По результатам расчета в программе Star CCM+ в критическом состоянии внешней нагрузкой является давление, действующее на корпус нижней части борта кузова и правой части днища кузова. Максимальная нагрузка возникает вблизи ватерлинии кузова, и пик максимального давления составляет около 5382 Па. Изменения ускорения кузова и максимального давления представлены на рис. 16, положение кузова и распределение внешних нагрузок – на рис. 17.

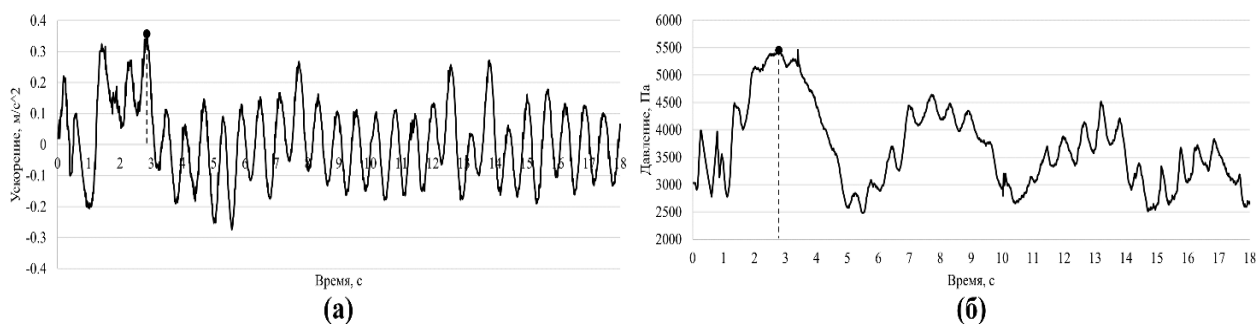


Рис. 16. Изменения ускорения кузова (а) и максимального давления на боковую часть кузова (б) при движении поперек волны

Fig. 16. Curves of body acceleration (a) and maximum pressure on the side of the body (b) when moving across the wave

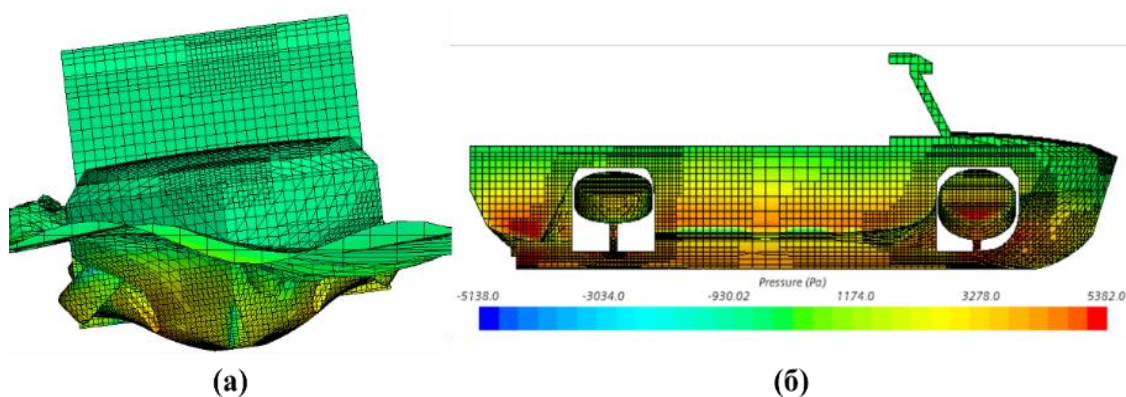


Рис. 17. Положение кузова (а) и распределение давления (б) в критическом состоянии при движении поперек волны

Fig. 17. Body attitude (a) and pressure distribution (b) in critical state when moving across the wave

Нахождение экстремальных режимов в локальных зонах конструкции кузова

Для отдельных зон кузова, в соответствии с предложенным в предыдущем разделе разделения конструкции кузова на отдельные зоны и характером действия давления на разных режимах, был выбран «свой» экстремальный режим.

1. *Днище кузова.* По предварительной оценке днище кузова воспринимает самые тяжелые внешние нагрузки при прямолинейном движении по воде и при вывешивании колес при движении по суше (диагональном), которое можно разложить на изгиб и кручение кузова [1] (приведено для сравнения). НДС днища кузова при этих четырех эксплуатационных режимах приведены в табл. 1, а картины деформированных состояний – на рис. 18.

Таблица 1.
Основные параметры НДС днища кузова

Table 1.
Main parameters of the underbody structure response

Нагрузочный режим	Максимальное перемещение, мм	Среднее значение перемещений, мм	Среднее напряжение, МПа
Давление (движение по воде со скоростью 50 км/ч)	7,906	2,102	11,34
Давление (движение по воде со скоростью 3 км/ч)	5,048	1,352	7,12
Кручение (при вывешивании колес)	19,42	4,045	26,18
Изгиб (при вывешивании колес)	2,638	0,6373	4,06

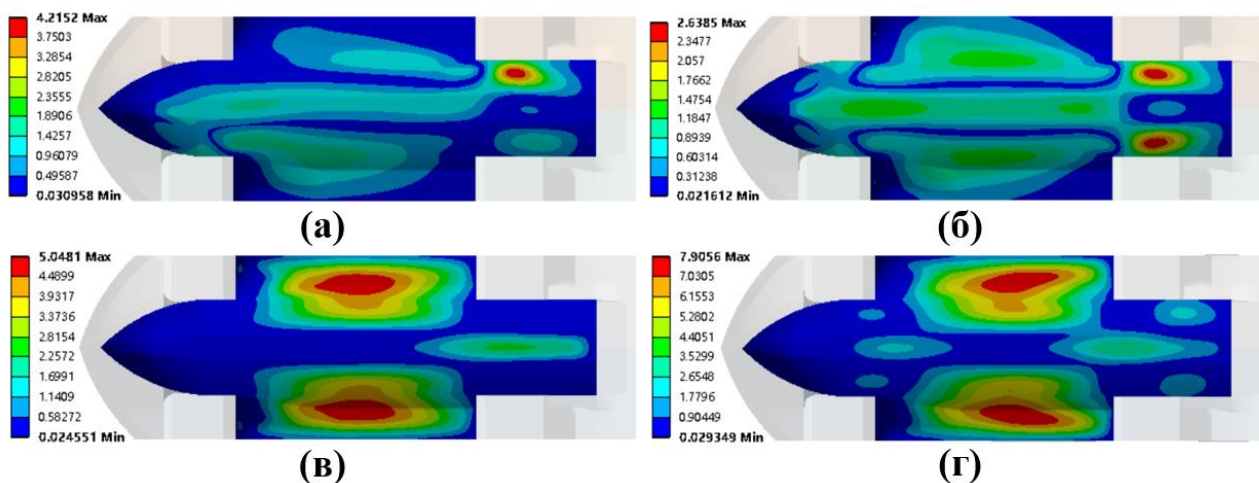


Рис. 18. Картины деформированных состояний днища кузова:

(а) при вывешивании колеса (кручение), (б) при вывешивании колеса (изгиб),
(в) при прямолинейном движении по воде (3 км/ч), (г) при прямолинейном движении по воде (50 км/ч)

Fig. 18. Deformation of the underbody:

(a) when wheel suspend (torsion) (b) when wheel suspend (bending) (c) during rectilinear movement through water (3 km/h) (d) during rectilinear movement through water (50 km/h)

Из анализа результатов расчетов делаем вывод, что экстремальными режимами для днища кузова являются режим при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч и режим при вывешивании колеса (кручение):

- 1) при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч максимальное перемещение равно 7,906 мм (находится в районе подвески задних колес); среднее значение перемещений – 2,102 мм, а среднее напряжение – 11,34 МПа;
- 2) при вывешивании колес (диагонально) при движении по суше максимальное перемещение равно 19,42 мм (имеет место с обеих сторон днища кузова); среднее значение перемещений – 4,045 мм, а среднее напряжение – 26,18 МПа.

2. *Передняя часть кузова.* Предварительные исследования показали, что передняя часть кузова воспринимает самые тяжелые внешние нагрузки при входе в воду и при движении против волны. Поэтому экстремальное состояние в передней части кузова выбирается из этих двух режимов. Основные параметры НДС передней части кузова представлены в табл. 2, а картины деформированных состояний – на рис. 19.

Таблица 2.
Основные параметры НДС передней части кузова
Table 2.
Main parameters of the front body structure response

Нагрузочный режим	Максимальное перемещение, мм	Среднее значение перемещений, мм	Среднее напряжение, МПа
Давление (вход в воду)	0,665	0,212	3,745
Давление (движение против волны)	3,704	1,069	18,39

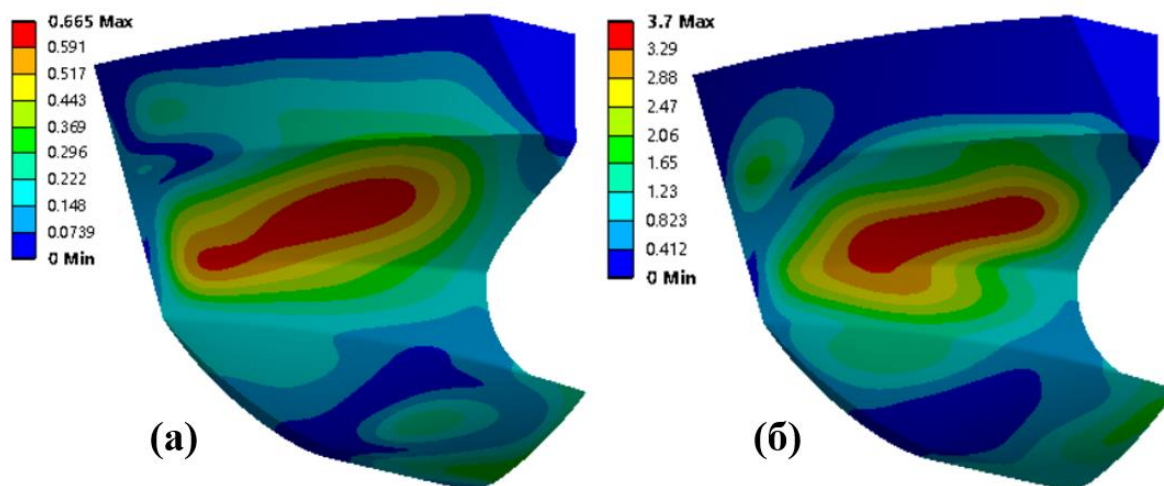


Рис. 19. Картины деформированных состояний в передней части кузова:
(а) при входе в воду, (б) при движении против волны

Fig. 19. Deformation of the front body:
(a) when entering the water (b) when moving against the wave

Анализ результатов расчетов позволил сделать вывод, что экстремальным режимом передней части кузова являются режим при движении против волны:

- 1) при движении против волны максимальное перемещение равно 3,704 мм, среднее значение перемещений – 1,069 мм, а среднее напряжение – 18,39 МПа;
- 2) при входе в воду и при движении против волны наибольшая деформация возникает в центре передней части кузова, ее величина существенно ниже, чем при предыдущем режиме. В обоих режимах зона максимальной деформации в основном одинаковая.

3. *Боковая часть кузова.* Боковая часть кузова воспринимает самые тяжелые внешние

нагрузки при повороте на воде и при движении поперек волны. Поэтому экстремальное состояние боковой части кузова выбирается из этих двух режимов. Основные параметры НДС боковой части кузова представлены в табл. 3, а картины деформированных состояний – на рис. 20.

Таблица 3.

Основные параметры НДС боковой части кузова

Table 3.

Main parameters of the side body structure response

Нагрузочный режим	Максимальное перемещение, мм	Среднее значение перемещений, мм	Среднее напряжение, МПа
Давление (поворот по воде со скоростью 50 км/ч)	6,954	0,751	5,682
Давление (движение поперек волны)	17,25	5,436	22,84

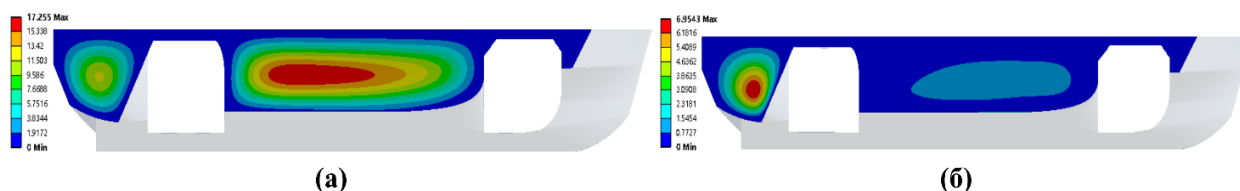


Рис. 20. Картины деформированных состояний боковой части кузова: (а) при движении поперек волны, (б) при повороте на воде (50 км/ч)

Fig. 20. Deformation of the side body:

(a) when moving across the wave (b) when turning in the water (50 km/h)

Из анализа результатов следует, что экстремальным режимом в боковой части кузова является режим при движении поперек волны, при этом в кузове:

- 1) максимальное перемещение равно 17,25 мм, среднее значение перемещений – 5,436 мм, а среднее напряжение – 22,84 МПа;
- 2) максимальная деформация имеет место в средней части борта. При повороте по воде со скоростью 50 км/ч максимальная деформация возникает в задней части борта.

Заключение

При расчете НДС кузова скоростной амфибийной машины при эксплуатации в водной среде необходимо учитывать движение по спокойной воде с максимальной скоростью, движение против волны и поперек волны (при движении по суше – вывешивание колеса). При этом:

- при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч максимальное перемещение в кузове равно 7,906 мм (имеет место в зоне подвески задних колес);
- при вывешивании колеса (диагональном) при движении по суше максимальное перемещение в кузове равно 19,42 мм (по обеим сторонам днища кузова);
- при движении против волны максимальное перемещение равно 3,704 мм (в центре передней части кузова);
- при движении поперек волны максимальное перемещение равно 17,25 мм (в средней части борта).

Представленные выводы основаны на приведенном анализе одиннадцати эксплуатационных режимов. Однако для ситуаций, не охватываемых этими режимами, рекомендуется проводить дополнительные исследования на основе специфических целей и задач.

Библиографический список

1. **Афанасьев, Б.А.** Проектирование полноприводных колесных машин учебник для вузов. Т. 1 / Б.А. Афанасьев, Г.И. Гладов, Л.Ф. Жеглов [и др.]. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 496 с.
2. **Гильманов, В.С.** Виды дорожного покрытия автомобильных дорог // Экономика и социум. 2020. № 11 (78). С. 578-584.
3. **Wu, K.** Research on water entry and exit characteristics of amphibious vehicles / K. Wu, D. Yang, Y. Zhao // Agricultural Equipment and Vehicle Engineering. 2008. № 12. Pp. 20-22.
4. **Sheppard, D.** Amphibious Innovation: Engineering the Aquada // E. nz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise, 2005. Vol. 6. №4. Pp. 23-25.
5. Технического регламента обязательного освидетельствования судов внутреннего плавания (2019 г.) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.msa.gov.cn/page/article.do?articleId=2ED63311-23DE-4EA6-BF75-343220C726C9>
6. **Филиппов, М. Ю.** Остойчивость амфибийных машин на волнении : диссертация ... кандидата технических наук : 05.05.03. – Москва, 2004. – 133 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов часть IV остойчивость [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://rfclass.ru/assets/Uploads/pkps_ms_4.pdf
8. **Jiu, Y.** Research on the sailing characteristics of high-speed amphibious vehicles headed directly into the waves: диссертация – Beijing, 2016. – 64 p.
9. **Sorensen, R.M.** Basic wave mechanics: for coastal and ocean engineers. John Wiley & Sons, 1993. – 304 p.
10. **Peng, Y.** Basis of Ship Seakeeping. National Defense Industry Press, 1989. – 189 p.
11. **Petacco, N.** IMO second generation intact stability criteria: General overview and focus on operational measures / N. Petacco, P. Gualeni // Journal of Marine Science and Engineering, 2020. Vol. 8. № 7. Pp. 494.

*Дата поступления
в редакцию: 03.07.2023*

*Дата принятия
к публикации: 10.10.2023*