

## Методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузова амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS

© И. Ван, В.Н. Зузов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

С целью уменьшения влияния ограничений топологической оптимизации в универсальных программах (ANSYS, Hypermesh), упрощения процесса оптимизации кузова и снижения сложности соединений каркасных элементов предложена методика нахождения топологии каркаса кузова скоростных амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS, используемая для снижения массы каркаса при обеспечении прочности и жесткости кузова. Изложение, апробация и оценка эффективности предлагаемой методики приведены путем сравнения с оптимизацией на базе универсальной программы (Hypermesh) на примере оптимизации кузова амфибийной машины Humdinga. Представленная методика предполагает сначала добавление одномерных конечных элементов каркаса в «слабых» местах конечно-элементной модели панелей кузова по рациональной топологии каркаса (не оптимальной), а затем параллельно выполняется параметрическая оптимизация (перераспределение массы каркасных элементов) и топологическая оптимизация (удаление слабо влияющих элементов). Согласно результатам анализа, предлагаемая методика позволяет добиться существенного снижения массы каркаса при обеспечении прочности и жесткости кузова. Полученный в результате каркас днища кузова имеет массу на 44,7 % меньшую, чем у исходной конструкции. С помощью предлагаемой методики можно также проводить топологическую оптимизацию каркасных элементов с учетом панелей и упростить технологию соединений, чтобы добиться лучших результатов. По сравнению с результатами топологической оптимизации в универсальной программе (Hypermesh) количество точек соединений уменьшено на 42 %, прочность обшего днища кузова увеличена на 4,3 %, а прочность средней и задней частей днища — на 6,9 % и более. Следует отметить, что использование представленной методики в меньшей степени зависит от субъективных факторов исследователя при сопоставлении с топологической оптимизацией в универсальных программах, так как не требуется проводить интерпретацию.

**Ключевые слова:** топология каркаса, кузов амфибийной машины, метод TOPSIS, снижение массы, прочность, жесткость

**Введение.** Одна из главных задач при проектировании скоростных амфибийных машин — оптимизация структурного устройства кузова для снижения массы при обеспечении его требуемых прочности и жесткости [1], зависящих от параметров панелей и каркаса. Тип материала следует считать одним из основных параметров панелей. Так, если панели изготовлены из композитных материалов, то важную роль играют угол ориентации и последовательность укладки слоев. Что касается каркасных элементов, то для них главными параметрами

являются топология каркаса, форма и размер его сечения, а также материал каркаса и наполнителя, в случае если он используется [2]. Помимо того, на прочность и жесткость кузова влияют тип соединения каркаса и панелей.

В настоящее время для снижения массы при обеспечении прочности и жесткости корпуса применяют параметрическую и топологическую оптимизации с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Топологическая оптимизация направлена на поиск оптимальной топологии каркаса кузова при выбранных целевых функциях, например минимальной податливости. Параметрическую оптимизацию применяют для нахождения оптимальных толщины панелей, размеров каркасных элементов и др. Иными словами, топологическая и параметрическая оптимизации дополняют друг друга.

Топологическая оптимизация используется достаточно широко, однако у нее есть свои недостатки. Во-первых, результаты применения такой оптимизации требуется затем интерпретировать, что существенно зависит от субъективных факторов исследователя [4]. Во-вторых, с точки зрения технологии соединений, в результате топологической оптимизации зачастую предполагается большое количество точек соединения, что нецелесообразно для каркасных элементов со сложной формой сечений [5]. В-третьих, при такой оптимизации находится оптимальная топология каркаса без учета панелей, особенно для кузовов из композитных материалов, где роль панелей весьма важна [6].

Для скоростных амфибийных машин часто используется кузов из композитных материалов воднолыжной формы для снижения сопротивления при движении по воде [7]. Следует отметить, что до сих пор не существует методики нахождения оптимальной топологии каркаса для кузовов из композитных материалов с учетом и панелей, и каркасов одновременно, поэтому решение данной проблемы весьма актуально.

Цель работы — изложить разработанную методику нахождения оптимальной топологии каркаса кузова амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS для снижения массы при обеспечении прочности и жесткости кузова, ее апробация и оценка ее эффективности по сравнению с оптимизацией на базе универсальных программ на примере оптимизации кузова амфибийной машины Humdinga.

**Основные конструктивные параметры кузова Humdinga и разработка конечно-элементных моделей кузова.** В качестве объекта исследования выбрана скоростная амфибийная машина Humdinga. По доступным данным, приведенным в [8], скоростная амфибийная машина Humdinga имеет длину кузова 7012 м, ширину 2304 м и массу 3200 кг (рис. 1).

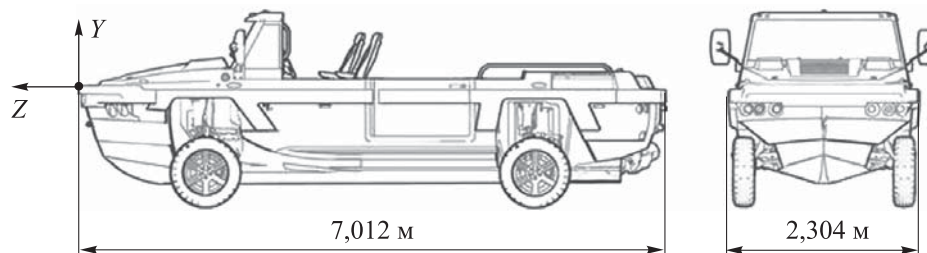


Рис. 1. Общий вид скоростной амфибийной машины Humdinga

По результатам предварительных исследований для кузова амфибийной машины Humdinga предлагается использовать при моделировании сэндвич-панели. Обшивка этих панелей состоит из четырех слоев препрега из углеродного волокна (Epoxy Carbon UD [9]). Толщина каждого слоя — 0,55 мм, углы ориентации углеродного волокна в каждом слое  $90^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ$ . Материал сердцевины — пена ПВХ (Divinycell H100 [10]) толщиной 19 мм.

Структура каркаса из алюминиевого сплава 5052 показана на рис. 2. Форма сечения каркасных элементов днища и боковой части кузова —  $\Omega$ -образная, форма сечения каркасных элементов передней части кузова — Z-образная. В разработанной в программе ANSYS конечно-элементной модели (КЭМ) панель кузова моделируется двумерными конечными элементами (Shell181) с размерами сторон 20 мм [11]. Остальные каркасные элементы моделируются одномерными конечными элементами (Beam188) длиной 10 мм [12]. Эти 1D и 2D конечные элементы «соединены» контактом Bonded (приварены).

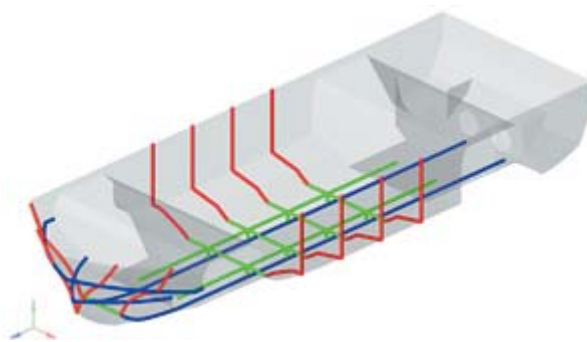


Рис. 2. Структура каркаса амфибийной машины Humdinga (без учета главных каркасных элементов)

**Нагрузочные режимы для расчетов.** В экстремальных режимах на кузов скоростной амфибийной машины могут действовать сосредоточенные силы (в системе поддрессоривания при движении по суше) и нагрузка в виде давления на корпус (при движении по воде).

Среди различных компонентов конструкции кузова именно днище воспринимает наиболее тяжелую нагрузку. Поэтому в качестве объекта исследования для проверки эффективности разработанной методики была выбрана нижняя часть кузова [13].

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) кузова амфибийной машины Humdinga проведен в эксплуатационных режимах и на суше, и на воде. Эксплуатационные режимы на суше включают вывешивание колеса (колес), движение по дороге со случайным профилем и движение по синусоидальной дороге, а на воде — прямолинейное движение и поворот по спокойной воде с низкой и высокой скоростью, движение против волны и поперек волны. По результатам предварительного исследования экстремальные режимы днища кузова представляют собой движение по спокойной воде со скоростью 50 км/ч и вывешивание колес (диагонально).

**Вывешивание колес (диагонально).** При движении по суше в общем случае на амфибийную машину могут действовать квазистатические, периодические и случайные нагрузки [14]. Однако наиболее тяжелым является вывешивание колес (колес). У амфибийной машины центр массы находится на середине машины, поэтому может быть диагональное вывешивание (например, левое переднее и правое заднее колеса вывешены). При таком диагональном вывешивании расчетная внешняя нагрузка на правое переднее и левое заднее колеса составляет соответственно  $F_x = 0$ ,  $F_y = 15696$  Н, тогда как нагрузка на два других колеса равна 0.

**Прямолинейное движение по спокойной воде со скоростью 50 км/ч.** При движении по воде в общем случае на амфибийную машину действует нагрузка в виде давления. По результатам моделирования в программе Star CCM+ угол дифферента кузова при скорости 50 км/ч составляет около  $5,5^\circ$ . Внешние нагрузки в основном действуют на среднюю и заднюю части днища кузова, а также на подкрылки задних колес. Максимальное расчетное давление на днище кузова — 7885 Па, а на подкрылки задних колес — 80 521 Па. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 3.

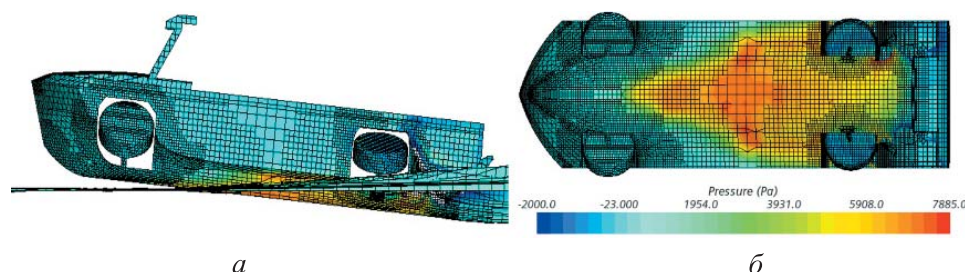


Рис. 3. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при моделировании прямолинейного движения по воде со скоростью 50 км/ч

**Основные положения разработанной методики нахождения оптимальной топологии на основе взвешенного метода TOPSIS.**

В настоящее время топологическая оптимизация реализована в ряде программ, среди которых ведущие места занимают ANSYS и Hypermesh. Однако они имеют ограничения, затрудняющие их применение, в том числе для кузова из композитных материалов.

- Программа ANSYS позволяет осуществлять только топологическую оптимизацию кузовов из изотропных материалов, т. е. преимущественно металлических кузовов. Для кузовов из композитных материалов снижение массы происходит путем параметрической оптимизации углов ориентации и толщин слоев.

- В программе Hypermesh топологическая оптимизация кузова (из изотропных и анизотропных материалов) выполняется на основе двумерной КЭМ панелей без учета каркасных элементов. Распределение КЭ большей толщины в результате оптимизации рассматривается как топология каркаса [15]. В результате интерпретации всегда получают большое количество точек соединения в конструкции и регулярные размеры сечений каркаса, для которых необходимо выполнять дополнительную параметрическую оптимизацию параметров и доработку перед производством.

Для того чтобы снизить влияние ограничений топологической оптимизации в универсальных программах (ANSYS, Hypermesh), упростить процесс оптимизации кузова и уменьшить сложность соединений каркасных элементов, предлагается методика нахождения топологии каркаса. По сравнению с топологической оптимизацией в ANSYS и Hypermesh особенности предлагаемой методики заключаются в следующем.

Во-первых, сначала создается рациональное распределение каркасных элементов на основе известной топологии каркасов существующих аналогов внедорожников и катеров, а также анализа напряженно-деформированного состояния, полученных при предварительных расчетах, которые далее используются для нахождения оптимальной топологии с учетом взаимодействия между каркасом и панелями. При этом предлагается добавлять одномерные КЭ каркасных элементов в «слабых» местах КЭМ панелей кузова (с большой деформацией и напряжением или с малым запасом прочности).

Во-вторых, топологическая оптимизация каркаса и параметрическая оптимизация сечения каркасных элементов выполняются параллельно, что позволяет добиться лучших результатов.

В-третьих, количество точек соединения в результатах, полученных с применением предлагаемой методики, можно контролировать искусственно на этапе предварительного исследования, что и полезно, и важно с точки зрения соединений каркасных элементов со сложной формой сечения.

Таким образом, рассматриваемая методика позволяет учитывать влияние каркасных элементов с различными топологиями на прочность и жесткость кузова с учетом взаимодействия между каркасом и панелями кузова. Среди всех универсальных комплексных методов оценки на результат взвешенного метода TOPSIS меньше всего влияют количество критериев и весовой коэффициент. Этот метод имеет меньше ограничений при решении сложных задач принятия решений, а результаты его ранжирования легко понять [16], поэтому он и был выбран в качестве критерия оценки при нахождении оптимальной топологии каркаса. Помимо того, что взвешенный метод TOPSIS используется для выбора лучшей схемы из всех потенциальных вариантов, его численные результаты служат основой для перераспределения параметров сечения каркасных элементов (толщин стенок).

Предлагаемая методика включает в себя три шага.

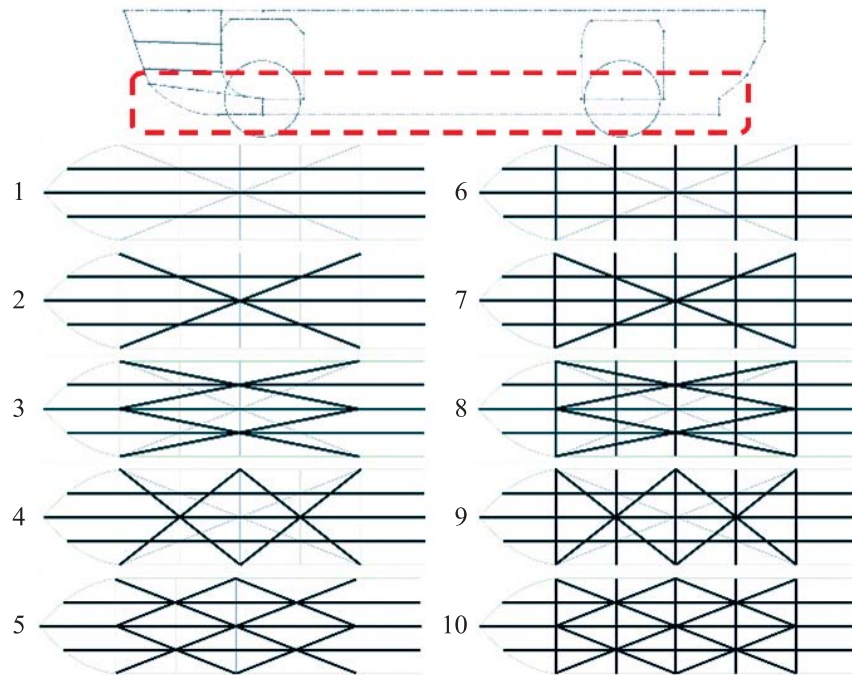
**Шаг 1.** Предварительный расчет напряженно-деформированного состояния днища кузова при экстремальных режимах и нахождение рациональной топологии каркаса с помощью взвешенного метода TOPSIS (в качестве показателей используются максимальная и средняя деформация, среднее напряжение и средний запас прочности), при которой напряжения в каркасных элементах более равномерны и количество избыточных каркасных элементов минимально. Рациональной схемой является пока неоптимальная топология каркаса днища кузова, но она будет рассматриваться как наиболее близкая к оптимальной.

**Шаг 2.** Перераспределение массы каркасных элементов на основе рациональной схемы и численных результатов взвешенного метода TOPSIS и учета слабо влияющих элементов. На этом шаге особое внимание уделяется корреляции между толщиной стенки каркасных элементов и напряженно-деформированным состоянием днища кузова. Сильная корреляция означает, что прочность и жесткость кузова можно значительно улучшить, изменяя толщину стенок. Значение толщины стенки вследствие перераспределения массы зависит от дисперсии корреляции каждого каркасного элемента после нормализации (при низкой дисперсии значения толщины стенок близки, при высокой — различаются).

**Шаг 3.** Удаление слабо влияющих элементов для снижения массы каркаса кузова до тех пор, пока прочность кузова не станет близкой к прочности исходной конструкции. Взвешенный метод TOPSIS используется для сравнения прочности днища кузова до и после последовательного удаления слабо влияющих элементов (последовательно от самого слабого к самому сильному).

Если необходимо, каркасные элементы следует разделить на сегменты по узлам для более подробного исследования. Покажем эффективность рассматриваемой методики на приведенном ниже примере.

**Предварительный расчет НДС днища кузова при экстремальных режимах и нахождение рациональной топологии каркаса с помощью взвешенного метода TOPSIS.** Предварительный анализ проводится для всех потенциальных силовых схем 1–10 (рис. 4), основанных на оптимальной плотности распределения каркасных элементов и массы.



**Рис. 4.** Потенциальные силовые схемы каркаса днища кузова (1–10)

На основе исходной топологии (схема 1) осуществляется поиск новых силовых схем, создаваемых добавлением дополнительных каркасных элементов и изменением их ориентаций. По типу распределения каркас можно подразделить на ромбовидную сетку (схемы 2–5) и квадратную сетку (6). По плотности распределения представлены следующие варианты ромбовидной сетки: X (схема 2), X2 (3), XX (4), X4 (5). Дальнейшие альтернативы (схемы 7–10) могут быть получены путем комбинирования вышеупомянутых схем. Напряженно-деформированное состояние днища кузова в экстремальных режимах при разных схемах приведено в табл. 1 и 2.

В качестве показателей приняты максимальная и средняя деформации, среднее напряжение и средний запас прочности днища кузова в экстремальных режимах. Взвешенный метод TOPSIS используется для нахождения рациональной схемы, которую можно рассматривать как наиболее близкое решение к оптимальной топологии. По результатам

анализа схема 7 «X+Сетка» является наилучшей топологией каркаса днища кузова, при которой обеспечивается следующее:

– при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч максимальная деформация днища кузова по новой схеме уменьшается на 2,8 %, средняя деформация — на 1,7 %, среднее напряжение — на 2,8 %, средний запас прочности — на 2,4 % по сравнению с аналогичными параметрами у начальной конструкции;

– при вывешивании колес (диагонально) максимальная деформация днища кузова по новой схеме уменьшается на 12,3 %, средняя деформация — на 2,7 %, среднее напряжение — на 9,3 %, а средний запас прочности увеличивается на 7,4 % по сравнению с аналогичными параметрами у начальной конструкции.

Таблица 1

**НДС днища кузова при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч**

| Топология каркаса | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Параллельный      | 1,0777                      | 0,42256                | 3,0954                  | 163,89                  |
| Сетка             | 1,0568                      | 0,41943                | 2,9942                  | 162,44                  |
| X                 | 1,0649                      | 0,41739                | 3,0913                  | 161,18                  |
| X4                | 1,0549                      | 0,41842                | 3,0872                  | 159,12                  |
| X+Сетка           | 1,0480                      | 0,41519                | 3,0076                  | 160,01                  |
| X4+Сетка          | 1,0394                      | 0,41622                | 3,0157                  | 158,34                  |
| XX                | 1,0533                      | 0,41998                | 3,0617                  | 159,34                  |
| XX+Сетка          | 1,0423                      | 0,41793                | 3,0007                  | 158,05                  |
| X2                | 1,0756                      | 0,42217                | 3,1058                  | 159,85                  |
| X2+Сетка          | 1,0654                      | 0,42084                | 3,0305                  | 160,68                  |

Таблица 2

**НДС днища кузова при вывешивании колес (диагонально)**

| Топология каркаса | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Параллельный      | 1,1456                      | 0,12973                | 1,6841                  | 332,09                  |
| Сетка             | 1,0298                      | 0,12891                | 1,5096                  | 347,74                  |
| X                 | 1,1031                      | 0,12672                | 1,6732                  | 345,97                  |
| X4                | 1,1057                      | 0,12668                | 1,6724                  | 342,54                  |
| X+Сетка           | 1,0048                      | 0,12621                | 1,5279                  | 356,50                  |
| X4+Сетка          | 1,0121                      | 0,12644                | 1,5471                  | 351,50                  |
| XX                | 1,0780                      | 0,12731                | 1,6648                  | 340,12                  |
| XX+Сетка          | 1,0051                      | 0,12723                | 1,5352                  | 348,71                  |
| X2                | 1,1191                      | 0,12725                | 1,6754                  | 335,11                  |
| X2+Сетка          | 1,0166                      | 0,12656                | 1,5441                  | 346,39                  |



**Перераспределение массы каркасных элементов на основе рациональной схемы и численных результатов взвешенного метода TOPSIS, а также учет слабо влияющих элементов.** Форма сечения каркасных элементов днища кузова принята  $\Omega$ -образной. Его свойства (жесткость на изгиб и жесткость на кручение) в основном связаны с толщиной стенки и размером сечения, особенно с высотой. Как известно, размер сечения оказывает большее влияние на прочность и жесткость кузова, чем толщина стенки. В данной работе топологическая оптимизация выполняется при постоянном размере сечения, так как на этом этапе важно определить конфигурацию каркасных элементов, а поиск оптимальных размеров сечения каркасных элементов будет выполняться в дальнейшем с помощью параметрической оптимизации.

При перераспределении массы каркасных элементов внимание сосредоточено на корреляции между толщинами стенок каркасных элементов  $t$  (рис. 5) и НДС днища кузова при экстремальных режимах нагружения (основные параметры: максимальная деформация, средняя деформация, среднее напряжение, средний запас прочности). Исследование корреляции параметров выполнено с помощью модуля Parameter correlation в программе ANSYS (результаты приведены в табл. 3 и табл. 4).

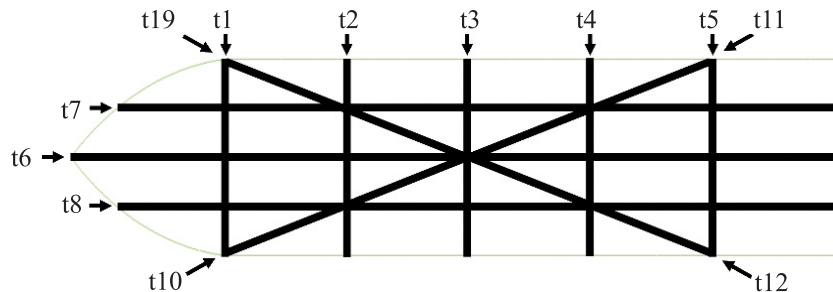


Рис. 5. Основные параметры каркасных элементов днища кузова

Если принимать в качестве показателей корреляцию между толщинами каркасных элементов и напряженно-деформированным состоянием днища кузова, то численные результаты взвешенного метода TOPSIS будут использоваться для нахождения слабо влияющих элементов. В результате будет получено следующее:

- каркасные элементы 1, 3, 5 и 11/12 — основные несущие конструкции;
- каркасные элементы 2, 6 и 9/10 — слабо влияющие элементы;
- каркасные элементы 4 и 7/8 играют важную роль, но не главную.

Таблица 3

**Корреляция между толщинами каркасных элементов и НДС днища кузова при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч**

| Толщина каркасного элемента | Максимальная деформация | Средняя деформация | Среднее напряжение | Средний запас прочности | Толщина (до перераспределения массы), мм | Толщина (после перераспределения массы), мм |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--|---|
| t1                          | 0,002937704             | 0,186985207        | -0,542711299       | 0,05546913              | 2,08                                     | 2,00  |
| t2                          | -0,034467671            | -0,341058407       | -0,121147302       | 0,379463852             | 2,08                                     | 1,29  |
| t3                          | 0,06590041              | -0,130509063       | 0,004805889        | 0,317237308             | 2,08                                     | 2,17  |
| t4                          | 0,033509271             | -0,174984374       | -0,092367526       | 0,202229321             | 2,08                                     | 1,97  |
| t5                          | -0,713973193            | 0,42373776         | -0,789054795       | -0,206736579            | 2,08                                     | 3,84  |
| t6                          | -0,01760000             | -0,004347524       | -0,07819293        | 0,349003403             | 2,08                                     | 1,83  |
| t7                          | 0,010000694             | -0,179748594       | 0,115771929        | 0,08908952              | 2,08                                     | 1,95  |
| t8                          | -0,104673936            | -0,171241058       | -0,00475033        | 0,257760956             | 2,08                                     | 1,95  |
| t9                          | 0,024307244             | -0,629529828       | -0,023897493       | 0,503146052             | 2,08                                     | 1,73  |
| t10                         | -0,009208973            | -0,032613376       | -0,013625946       | 0,115653865             | 2,08                                     | 1,73  |
| t11                         | 0,050149316             | 0,007181054        | 0,032752274        | 0,041551497             | 2,08                                     | 2,94  |
| t12                         | -0,649260365            | -0,386360164       | -0,083998889       | 0,44743385              | 2,08                                     | 2,94  |

Таблица 4

**Корреляция между толщинами каркасных элементов и НДС днища кузова при вывешивании колес**

| Толщина каркасного элемента | Максимальная деформация | Средняя деформация | Среднее напряжение | Средний запас прочности | Толщина (до перераспределения массы), мм | Толщина (после перераспределения массы), мм |
|-----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--|---|
| t1                          | 0,014841338             | 0,01255299         | -0,17265506        | -0,113849446            | 2,08                                     | 2,00  |
| t2                          | -0,029213483            | -0,018710129       | -0,150940445       | 0,066699593             | 2,08                                     | 1,29  |
| t3                          | -0,676190476            | -0,199078075       | -0,349927975       | 0,082504013             | 2,08                                     | 2,17  |
| t4                          | -0,083228382            | -0,072675639       | -0,435255381       | 0,062271062             | 2,08                                     | 1,97  |
| t5                          | -0,004058114            | -0,101683335       | -0,755920484       | -0,006083056            | 2,08                                     | 3,84  |
| t6                          | -0,270115652            | -0,339753879       | -0,083738733       | 0,635708112             | 2,08                                     | 1,83  |
| t7                          | -0,286117628            | -0,368218299       | -0,073564638       | 0,647775446             | 2,08                                     | 1,95  |
| t8                          | -0,286117628            | -0,368218299       | -0,073564638       | 0,647775446             | 2,08                                     | 1,95  |
| t9                          | -0,324953698            | -0,547384451       | 0,007202535        | -0,21249537             | 2,08                                     | 1,73  |
| t10                         | -0,324953698            | -0,547384451       | 0,007202535        | -0,21249537             | 2,08                                     | 1,73  |
| t11                         | -0,50703379             | -0,616281845       | -0,086504507       | 0,327851175             | 2,08                                     | 2,94  |
| t12                         | -0,50703379             | -0,616281845       | -0,086504507       | 0,327851175             | 2,08                                     | 2,94  |

**Удаление слабо влияющих элементов для снижения массы каркаса кузова до тех пор, пока прочность кузова не станет близкой к прочности исходной конструкции. Каркасные элементы удалены в зависимости от их влияния на прочность и жесткость днища**

кузова (в порядке от самого слабого к самому сильному). Взвешенный метод TOPSIS используется для сравнения НДС днища кузова до и после доработки. Цель состоит в том, чтобы найти топологию каркаса с наименьшей массой, при которой прочность и жесткость кузова будут не хуже, чем у исходной конструкции. Напряженно-деформированное состояние днища кузова при экстремальных режимах нагружения приведено в табл. 5 и 6.

Таблица 5

**НДС днища кузова при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч**

| Топология каркаса                           | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|---|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Начальный                                   | 1,0777                      | 0,42256                | 3,0954                  | 163,89                  | 21,98     |
| Без каркасного элемента 2                   | 1,0474                      | 0,4150                 | 3,0074                  | 160,10                  | 21,45     |
| Без каркасных элементов 2 и 9/10            | 1,0531                      | 0,4175                 | 3,0089                  | 161,61                  | 19,15     |
| Без каркасных элементов 2, 6 и 9/10         | 1,0562                      | 0,4191                 | 3,0207                  | 159,45                  | 15,42     |
| Без каркасных элементов 2, 4, 6 и 9/10      | 1,0580                      | 0,4197                 | 3,0331                  | 159,33                  | 14,62     |
| Без каркасных элементов 2, 4, 6, 7/8 и 9/10 | 1,0658                      | 0,4218                 | 3,0431                  | 158,17                  | 7,19      |

Таблица 6

**НДС днища кузова при вывешивании колес (диагонально)**

| Топология каркаса                   | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Начальный                           | 1,1456                      | 0,12973                | 1,6841                  | 332,09                  | 21,98     |
| Без каркасного элемента 2           | 0,9875                      | 0,1271                 | 1,5141                  | 351,76                  | 21,45     |
| Без каркасных элементов 2 и 9/10    | 0,9876                      | 0,1283                 | 1,5144                  | 346,29                  | 19,15     |
| Без каркасных элементов 2, 6 и 9/10 | 0,9886                      | 0,1283                 | 1,5196                  | 343,30                  | 15,42     |

| Топология каркаса                           | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|---|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Без каркасных элементов 2, 4, 6 и 9/10      | 0,9895                      | 0,1286                 | 1,5295                  | 341,25                  | 14,62     |
| Без каркасных элементов 2, 4, 6, 7/8 и 9/10 | 0,9966                      | 0,1295                 | 1,5369                  | 335,33                  | 7,19      |

Результаты оценки взвешенного метода TOPSIS показали, что после удаления каркасных элементов 2, 4, 6 и 9/10 прочность днища кузова осталась выше начальной. Однако после удаления каркасных элементов 7/8 прочность днища кузова стала значительно хуже начальной. Для более подробного исследования и максимального снижения массы каркасные элементы 7/8 были разбиты на сегменты с постоянными размерами сечений, но разными толщинами стенок  $t$  (рис. 6). Сегменты выбирались на основе анализа результатов предварительных расчетов. Далее объект анализа рассматривался состоящим из сегментов. Дополнительные расчеты выполнены для того, чтобы найти слабо влияющие сегменты (результаты расчета приведены в табл. 7 и 8).

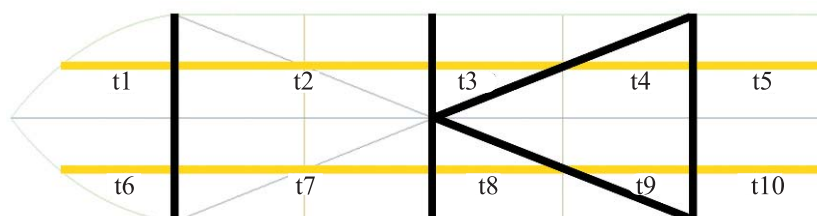


Рис. 6. Параметры сегментов днища кузова

Таблица 7

**Корреляция между толщинами сегментов и НДС днища кузова при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч**

| Толщина сегмента | Максимальная деформация | Средняя деформация | Среднее напряжение | Средний запас прочности | Толщина (до перераспределения массы), мм | Толщина (после перераспределения массы), мм |
|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--|---|
| t1               | -0,076302521            | -0,054117647       | -0,167346939       | 0,759327731             | 1,95                                     | 1,88  |
| t2               | -0,714189676            | -0,738487395       | 0,374885954        | 0,469195678             | 1,95                                     | 2,24  |
| t3               | -0,616710684            | -0,586362545       | 0,070828331        | 0,332821128             | 1,95                                     | 1,90  |
| t4               | 0,024345738             | 0,028859544        | -0,1527491         | 0,071116447             | 1,95                                     | 1,53  |
| t5               | 0,00062425              | -0,035390156       | -0,90060024        | 0,160912365             | 1,95                                     | 1,87  |

| Толщина сегмента | Максимальная деформация | Средняя деформация | Среднее напряжение | Средний запас прочности | Толщина (до перераспределения массы), мм | Толщина (после перераспределения массы), мм |
|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--|---|
| t6               | -0,076302521            | -0,054117647       | -0,167346939       | 0,759327731             | 1,95                                     | 1,88  |
| t7               | -0,714189676            | -0,738487395       | 0,374885954        | 0,469195678             | 1,95                                     | 2,24  |
| t8               | -0,616710684            | -0,586362545       | 0,070828331        | 0,332821128             | 1,95                                     | 1,90  |
| t9               | 0,024345738             | 0,028859544        | -0,1527491         | 0,071116447             | 1,95                                     | 1,53  |
| t10              | 0,00062425              | -0,035390156       | -0,90060024        | 0,160912365             | 1,95                                     | 1,87  |

Таблица 8

**Корреляция между толщинами сегментов и НДС днища кузова при вывешивании колес**

| Толщина сегмента | Максимальная деформация | Средняя деформация | Среднее напряжение | Средний запас прочности | Толщина (до перераспределения массы), мм | Толщина (после перераспределения массы), мм |
|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--|---|
| t1               | -0,069387755            | -0,489843938       | -0,659447779       | 0,368739496             | 1,95                                     | 1,88  |
| t2               | 0,096758703             | -0,778343337       | 0,680672269        | 0,315726291             | 1,95                                     | 2,24  |
| t3               | 0,027611044             | 0,068139256        | -0,27942377        | -0,047490996            | 1,95                                     | 1,90  |
| t4               | -0,64302521             | -0,302088836       | 0,110012005        | 0,553997599             | 1,95                                     | 1,53  |
| t5               | -0,73032413             | -0,086098439       | -0,125954382       | 0,631692677             | 1,95                                     | 1,87  |
| t6               | -0,069387755            | -0,489843938       | -0,659447779       | 0,368739496             | 1,95                                     | 1,88  |
| t7               | 0,096758703             | -0,778343337       | 0,680672269        | 0,315726291             | 1,95                                     | 2,24  |
| t8               | 0,027611044             | 0,068139256        | -0,27942377        | -0,047490996            | 1,95                                     | 1,90  |
| t9               | -0,64302521             | -0,302088836       | 0,110012005        | 0,553997599             | 1,95                                     | 1,53  |
| t10              | -0,73032413             | -0,086098439       | -0,125954382       | 0,631692677             | 1,95                                     | 1,87  |

В результате сегменты 2/7 стали основными несущими конструкциями, а сегменты 4/9 оказывают слабое влияние. Результаты расчетов, проведенных после перераспределения массы сегментов и удаления слабо влияющих сегментов, представлены в табл. 9 и 10.

Таблица 9

**НДС днища кузова при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч**

| Топология каркаса             | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|-------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Начальный                     | 1,0777                      | 0,4226                 | 3,0954                  | 163,89                  | 21,98     |
| После перераспределения массы | 1,0579                      | 0,4196                 | 3,0337                  | 159,36                  | 14,62     |
| Без сегментов 4/9             | 1,0582                      | 0,4197                 | 3,0347                  | 159,23                  | 13,63     |
| Без сегментов 4/9 и 5/10      | 1,0583                      | 0,4199                 | 3,0413                  | 159,50                  | 12,15     |

| Топология каркаса                  | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Без сегментов 1/6, 4/9 и 5/10      | 1,0584                      | 0,4199                 | 3,0421                  | 159,61                  | 11,22     |
| Без сегментов 1/6, 3/8, 4/9 и 5/10 | 1,0631                      | 0,4209                 | 3,0442                  | 158,88                  | 10,01     |
| Без всех сегментов                 | 1,0658                      | 0,4218                 | 3,0431                  | 158,17                  | 7,19      |

Таблица 10

## НДС днища кузова при вывешивании колес (диагонально)

| Топология каркаса                  | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Начальный                          | 1,1456                      | 0,1297                 | 1,6841                  | 332,09                  | 21,98     |
| После перераспределения массы      | 0,9900                      | 0,1286                 | 1,5299                  | 341,08                  | 14,62     |
| Без сегментов 4/9                  | 0,9935                      | 0,1288                 | 1,5319                  | 339,70                  | 13,63     |
| Без сегментов 4/9 и 5/10           | 0,9965                      | 0,1288                 | 1,5333                  | 338,41                  | 12,15     |
| Без сегментов 1/6, 4/9 и 5/10      | 0,9965                      | 0,1291                 | 1,5367                  | 337,54                  | 11,22     |
| Без сегментов 1/6, 3/8, 4/9 и 5/10 | 0,9966                      | 0,1291                 | 1,5384                  | 336,94                  | 10,01     |
| Без всех сегментов                 | 0,9966                      | 0,1295                 | 1,5369                  | 335,33                  | 7,19      |

После удаления сегментов 4/9 и 5/10 значения прочности днища кузова получились близкими к значениям прочности исходной конструкции. Картины с наилучшей топологией каркаса и деформаций днища кузова показаны на рис. 7. По результатам расчетов до и после снижения массы (табл. 11 и 12) были сделаны следующие выводы:

– масса каркаса днища кузова уменьшилась на 44,7 %, а прочность и жесткости днища кузова остались не хуже, чем были у исходной конструкции;

– по сравнению с начальной конструкцией прочность днища кузова, имеющего каркас с предлагаемой топологией, стала выше при такой же массе (особенно при вывешивании колес).

Кроме того, при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч максимальная деформация днища кузова уменьшилась на 2,8 %, средняя деформация — на 1,3 %, среднее напряжение — на 2 %, средний запас прочности — на 1,4 %. При вывешивании колес (диагонально) максимальная деформация днища уменьшилась на 14,7 %, средняя деформация — на 1 %, среднее напряжение — на 11,2 %, а средний запас прочности увеличился на 2,8 %.

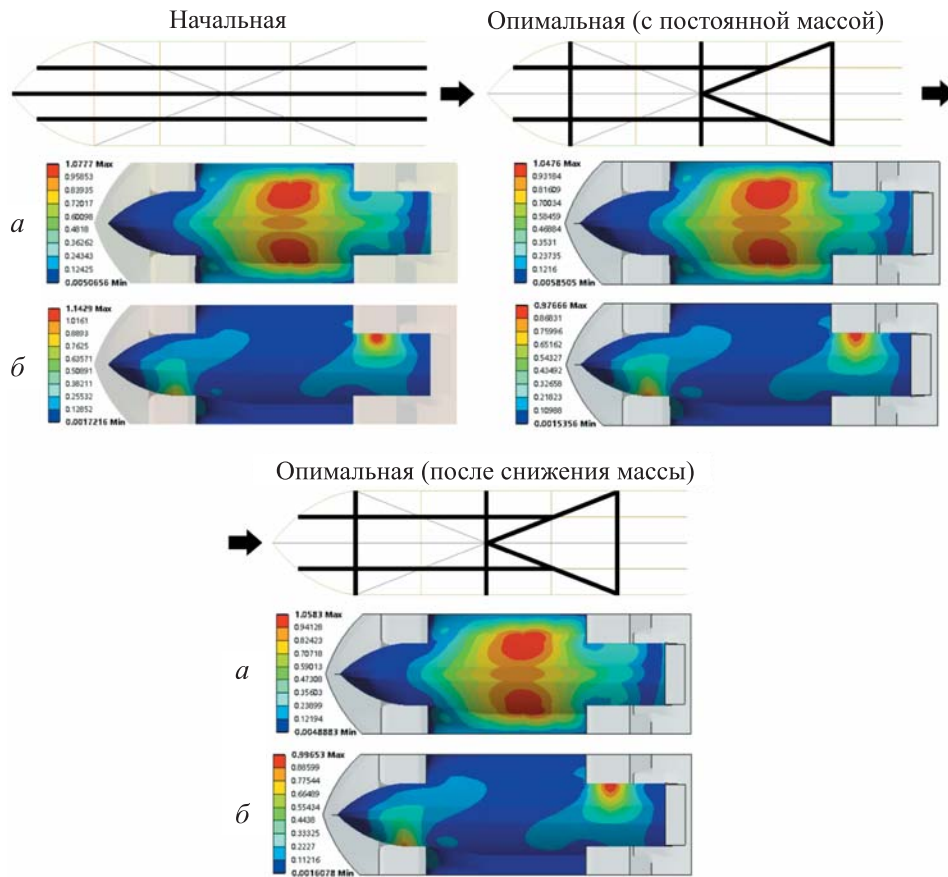


Рис. 7. Топология каркаса днища кузова и деформации кузова при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч (а) и при вывешивании колес (диагонально) (б)

Необходимо отметить, что полученные большие запасы прочности в дальнейшем позволят еще больше уменьшить массу кузова с помощью параметрической оптимизации.

Таблица 11

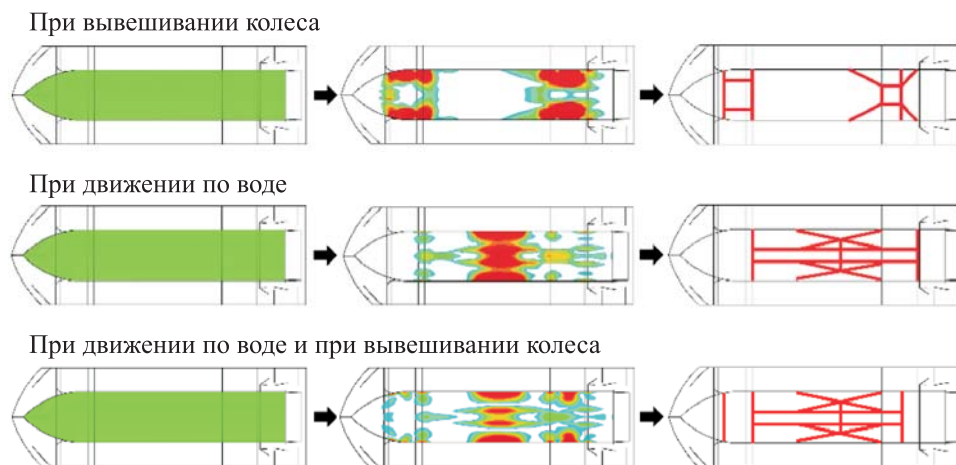
НДС днища кузова при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч

| Топология                          | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Начальная                          | 1,0777                      | 0,4226                 | 3,0954                  | 163,89                  | 21,98     |
| Оптимальная (с постоянной массой)  | 1,0476                      | 0,4172                 | 3,0328                  | 161,68                  | 21,98     |
| Оптимальная (после снижения массы) | 1,0583                      | 0,4199                 | 3,0413                  | 159,50                  | 12,15     |

НДС днища кузова при вывешивании колес (диагонально)

| Топология                          | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности | Масса, кг |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| Начальная                          | 1,1456                      | 0,1297                 | 1,6841                  | 332,09                  | 21,98     |
| Оптимальная (с постоянной массой)  | 0,9767                      | 0,1286                 | 1,4961                  | 341,30                  | 21,98     |
| Оптимальная (после снижения массы) | 0,9965                      | 0,1288                 | 1,5333                  | 338,41                  | 12,15     |

**Сравнение результатов, полученных по предлагаемой методике, с результатами топологической оптимизации, проведенной в программе Hypermesh.** Для оценки эффективности предлагаемой методики была проведена топологическая оптимизация в программе Hypermesh при тех же граничных условиях и нагрузочных режимах. Топологическая оптимизация в программе Hypermesh основана на двумерной КЭМ панелей без каркасных элементов. По результатам оптимизации распределение КЭ с большой толщиной в КЭМ панелей рассматривается как топология каркаса [17]. Результаты оптимизации и ее интерпретации представлены на рис. 8.



**Рис. 8.** Результаты оптимизации топологии каркаса в Hypermesh после интерпретации:

■ — область оптимизации; ■ — каркас после интерпретации результата оптимизации

Целью топологической оптимизации является минимальная податливость, а ограничением — доля остальных элементов конструкции относительно начальной (обычно объемная доля, в данной работе равна 0,4). Поскольку внешние экстремальные нагрузки действуют



симметрично или кососимметрично, каркас днища кузова должен быть симметричным относительно продольной плоскости симметрии кузова. Поэтому при оптимизации было введено условие симметрии. Днище кузова было оптимизировано с учетом обоих экстремальных режимов нагружения как отдельно, так и одновременно.

Анализ приведенных результатов позволяет оценить эффективность предложенной методики. Итоговый вариант оптимальной топологии каркаса кузова по этой методике имеет меньшее количество точек соединений каркасных элементов (для топологической оптимизации — 12, для предлагаемой методики — 7). Разница между силовыми схемами по двум методикам оптимизации в основном проявляется в топологии каркаса средней и задней частей днища кузова. Кроме того, по результатам программной топологической оптимизации каркас получился более компактный, а основная несущая конструкция расположена ближе к средней части днища кузова. По результатам предлагаемой методики каркас стал более равномерный, а главная несущая конструкция оказалась ближе к задней части днища кузова.

Для сравнения результатов по этим двум методикам разработана КЭМ корпуса кузова в программе ANSYS и проведены расчеты НДС днища кузова при экстремальных режимах. Поскольку различие двух топологий каркаса заключается в средней и задней частях днища кузова, помимо общей оценки НДС днища кузова в центре внимания также находились его средняя и задняя части. Напряженно-деформированное состояние днища кузова и локальных его частей приведены в табл. 13 и 14, деформация и топология каркаса днища кузова показаны на рис. 9.

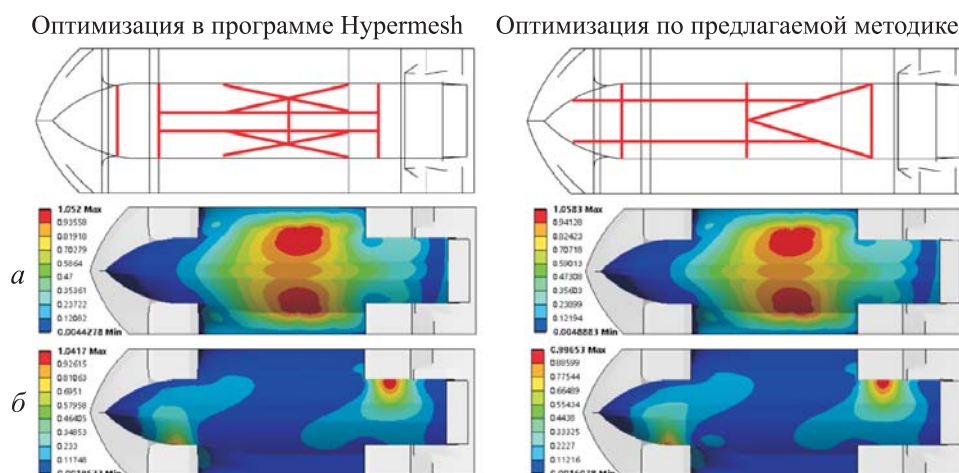
Таблица 13

Основные параметры НДС днища кузова после оптимизации по двум методикам

| Экстремальный режим        | Методика                                 | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности |
|----------------------------|--|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Движение по спокойной воде | Топологическая оптимизация (в Hypermesh) | 1,0520                      | 0,4181                 | 3,0061                  | 159,14                  |
|                            | Предлагаемая методика                    | 1,0583                      | 0,4199                 | 3,0413                  | 159,50                  |
| Вывешивание колес          | Топологическая оптимизация (в Hypermesh) | 1,0417                      | 0,1274                 | 1,5647                  | 334,79                  |
|                            | Предлагаемая методика                    | 0,9965                      | 0,1288                 | 1,5333                  | 338,41                  |

**Основные параметры НДС в средней и задней частях днища кузова после оптимизации по двум методикам**

| Экстремальный режим        | Методика                                 | Максимальная деформация, мм | Средняя деформация, мм | Среднее напряжение, МПа | Средний запас прочности |
|----------------------------|--|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Движение по спокойной воде | Топологическая оптимизация (в Nupermesh) | 1,0520                      | 0,9020                 | 3,6418                  | 113,46                  |
|                            | Предлагаемая методика                    | 1,0583                      | 0,9048                 | 3,6478                  | 113,99                  |
| Вывешивание колес          | Топологическая оптимизация (в Nupermesh) | 0,1614                      | 0,06969                | 0,5973                  | 511,98                  |
|                            | Предлагаемая методика                    | 0,1503                      | 0,06961                | 0,5658                  | 533,85                  |



**Рис. 9.** Топология каркаса днища кузова и деформация кузова при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч (а) и при вывешивании колеса (б)

Из анализа результатов видно, что топология каркаса, полученная с помощью представленной методики, обеспечивает более высокую прочность днища кузова, особенно при вывешивании колес, чем при использовании топологической оптимизации (в Nupermesh):

– при вывешивании колес максимальная деформация днища кузова по сравнению с результатами топологической оптимизации уменьшается на 4,3 %, среднее напряжение — на 2 %, а средняя деформация и средний коэффициент запаса прочности почти не изменились;

– при вывешивании колес максимальная деформация средней и задней частей днища кузова по сравнению с результатами топологической оптимизации уменьшается на 6,9 %, средняя деформация почти не изменяется, среднее напряжение снижается на 5,3 %, а средний коэффициент запаса прочности увеличивается на 4,3 %.

**Заключение.** На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Методика нахождения оптимальной топологии каркаса кузова скоростных амфибийных машин на основе взвешенного метода TOPSIS позволяет добиться существенного снижения массы каркаса при обеспечении прочности и жесткости кузова (полученный в результате предлагаемой методики каркас днища кузова имеет массу на 44,7 % меньше, чем у исходной конструкции). Кроме того, с ее помощью можно проводить топологическую оптимизацию каркасных элементов с учетом панелей, в то время как в программе Nurermesh нахождение топологии каркаса осуществляется без учета панелей, а в программе ANSYS невозможно выполнить топологическую оптимизацию для кузова из композитных материалов. Использование представленной методики также дает возможность упростить технологию соединений (количество точек соединения между каркасными элементами днища кузова уменьшается на 42 %). По сравнению с результатом топологической оптимизации по универсальным алгоритмам днище кузова с новой топологией каркаса имеет более высокую прочность 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. И наконец, методика на основе взвешенного метода TOPSIS в меньшей степени «зависит» от субъективных факторов исследователя, поскольку не требуется проводить интерпретацию.

#### ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Степанов А.П. *Проектирование амфибийных машин*. Москва, Мегалион, 2007, 420 с.
- [2] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Известия МГТУ МАМИ*, 2018, т. 12, № 2, с. 2–9.  
<https://doi.org/10.17816/2074-0530-66811>
- [3] Козлов М.Ю., Аркатов В.Ю., Гроль М.С. Совершенствование подхода к проектированию внутреннего корпуса камеры сгорания с целью снижения массы с сохранением прочностной надежности на основе топологической оптимизации. *Вестник УГАТУ*, 2019, т. 23, № 2 (84), с. 98–105.
- [4] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Особенности поиска оптимальных параметров усилителей задней части кабины грузового автомобиля на базе параметрической и топологической оптимизации с целью обеспечения требований по пассивной безопасности по международным правилам и получения ее минимальной массы. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2019, № 2, с. 163–170.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2019\_2\_163

- [5] Wang D. Streamline stiffener path optimization (SSPO) for embedded stiffener layout design of non-uniform curved grid-stiffened composite (NCGC) structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, vol. 344, pp. 1021–1050. DOI: 10.1016/j.cma.2018.09.013
- [6] Ciampaglia A. Design and analysis of automotive lightweight materials suspension based on finite element analysis. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, vol. 235 (9), pp. 1501–1511. DOI: 10.1177/0954406220947457
- [7] Еникеев Р.Д., Месропян А.В., Платонов Е.А., Рахматуллин Р.Р. К вопросу о создании перспективных технических средств преодоления водных преград. *Вестник УГАТУ*, 2019, т. 23, № 4 (86), с. 74–83.
- [8] Sheppard D. Amphibious Innovation: Engineering the Aquada. *Enz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise*, 2005, vol. 6 (4), pp. 23–25. DOI: 10.3316/informit.007323739318493
- [9] Lee J.M., Min B.J., Park J.H., Kim D.H., Kim B.M., Ko D.C. Design of lightweight CFRP automotive part as an alternative for steel part by thickness and lay-up optimization. *Materials*, 2019, vol. 14 (12), p. 2309. DOI: 10.3390/ma12142309
- [10] *Divinycell H — excellent mechanical properties to low weight*. URL: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/> (дата обращения: 05.10.2023).
- [11] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н., Чайко Д.Н. Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1856
- [12] Лю И., Зузов В.Н. Исследование влияния размеров конечных элементов на точность моделирования клеевого соединения в конструкциях. *Известия МГТУ «МАМИ»*, 2021, т. 15, № 3, с. 31–41. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41
- [13] Зузов В.Н. *Разработка методов создания несущих систем колесных машин с оптимальными параметрами: дис. ... д-ра техн. наук*. Москва, 2002, 347 с.
- [14] Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. *Проектирование полноприводных колесных машин: в 3 т.* А.А. Полунгян, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 432 с.
- [15] Qian X., Zhou Y., Wang M., Cai L., Pei F. Structural design of composite stiffened panel for a flat wing micro-aircraft. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s42452-020-2559-9
- [16] Bhole G.P., Deshmukh T. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and its applications. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2018, vol. 6, pp. 899–915. DOI: 10.22214/ijraset.2018.5145
- [17] Polavarapu S., Thompson L.L., Grujicic M. Topology and free size optimization with manufacturing constraints for light weight die cast automotive backrest frame. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2009, vol. 13, pp. 641–655. DOI: 10.1115/IMECE2009-10823

Статья поступила в редакцию 13.11.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-12-2323>

**Ван Ичжоу** — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: scott\_bah@hotmail.com

**Зузов Валерий Николаевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области исследования несущих систем колесных машин. e-mail: valeryuz@yandex.ru

## Methodology for determining the optimal topology of amphibious vehicle framework based on the weighted TOPSIS method

© Y. Wang, V.N. Zuzov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The study presents a rigorous methodology based on the weighted TOPSIS method to systematically determine the optimal topology of the amphibious vehicle framework, aiming to achieve the dual objectives of reducing overall weight while ensuring the structural strength and stiffness of the body. This research further involves the comprehensive testing and evaluation of the effectiveness of this methodology, particularly in contrast to optimization approaches based on universal programs. To exemplify this methodology, we apply it to the optimization of the Humdinga amphibious vehicle as a case study. Firstly, this approach provides a rational frame topology based on pre-study results of body structure response under extreme operating conditions. Subsequently, topological optimization is carried out, entailing the removal of elements with minimal impact, and parametric optimization, encompassing the redistribution of the mass among frame elements. This process employs the TOPSIS method, facilitating the determination of the optimal topology and parameters for the frame and panels. The underbody weight was reduced by 44.7%. In comparison with the outcomes obtained through topology optimization in a widely-used software program like Hypermesh, the reduction in the number of connection points stands at 42%. Additionally, the overall strength of the underbody has increased by 4.3%, while the middle and rear sections exhibit an even more impressive improvement, with strength enhancements 6.9%. The presented methodology enables topological optimization of frame elements with considering of connection technologies to enhance overall performance. Additionally, the proposed technique exhibits reduced dependence on subjective researcher factors, as compared to conventional topological optimization methods found in universal software, thereby minimizing the need for interpretation.*

**Keywords:** *framework topology, topological optimization, amphibious vehicle body, TOPSIS method, weight reduction, strength, stiffness*

### REFERENCE

- [1] Stepanov A.P. *Proektirovanie amfibiynykh mashin* [Design of amphibious vehicles]. Moscow, Megalion Publ., 2007, 420 p.
- [2] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Topological optimization of the design of a car bumper under impact from the standpoint of passive safety. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2018, vol. 12, no. 2, pp. 2–9. <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66811>
- [3] Kozlov M.Yu., Arkatov V.Yu., Grol M.S. Development of the approach of inner casing for combustion chamber design with the aim of weight reduction with preservation of reliability based on topology optimization. *Vestnik UGATU*, 2019, vol. 23, no. 2 (84), pp. 98–105.
- [4] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Special features of search of the optimum parameters of the amplifiers of a truck cabin rear part, based on parametric and topological optimization in order to ensure the requirements for passive safety according to international rules and to obtain its minimum mass. *Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev*, 2019, vol. 125, no. 2, pp. 163–170. DOI: 10.46960/1816-210X\_2019\_2\_163

- [5] Wang D., Abdalla M.M, Wang Z., Su Z. Streamline stiffener path optimization (SSPO) for embedded stiffener layout design of non-uniform curved grid-stiffened composite (NCGC) structures. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, vol. 344, pp. 1021–1050. DOI: 10.1016/j.cma.2018.09.013
- [6] Ciampaglia A., Santini A., Belingardi G. Design and analysis of automotive lightweight materials suspension based on finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, vol. 235 (9), pp. 1501–1511. DOI: 10.1177/0954406220947457
- [7] Enikeev R.D., Mesropyan A.V., Platonov E.A., Rahmatullin R.R. To the question of creating perspective technical means for overcoming water obstacles. *Vestnik UGATU*, 2019, vol. 23, no. 4 (86), pp. 74–83.
- [8] Sheppard D. Amphibious Innovation: Engineering the Aquada. *Enz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise*, 2005, vol. 6 (4), pp. 23–25. DOI: 10.3316/informat.007323739318493
- [9] Lee J.M., Min B.J., Park J.H., Kim D.H., Kim B.M., Ko D.C. Design of lightweight cfrp automotive part as an alternative for steel part by thickness and lay-up optimization. *Materials*, 2019, vol. 14 (12), p. 2309. DOI: 10.3390/ma12142309
- [10] *Divinycell H — Excellent mechanical properties to low weight*. Available at: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/> (accessed October 5, 2023).
- [11] Goncharov R.B., Zuzov V.N., Chaiko D.N. Modeling the behavior of thin-walled tubes with different fillers at the maximum load in solving the problems of crashworthiness. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 3 (87). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-3-1856
- [12] Liu Yi, Zuzov V.N. Study of the effect of finite element dimensions on the simulation accuracy of adhesive bonding in automotive structures. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2021, vol. 15, no. 3, pp. 31–41. <https://doi.org/10.31992/2074-0530-2021-49-3-31-41>
- [13] Zuzov V.N. *Development of methods for creating load-bearing systems of wheeled vehicles with optimal parameters: Dr. Sc. (Engineering) dissertation*. Moscow, 2002, 347 p.
- [14] Afanasyev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F., etc. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin* [Design of all-wheel drive wheeled vehicles]. In 3 vols. Polungyan A.A., editor. Moscow, BMSTU Publ., 2008, 432 p.
- [15] Qian X., Zhou Y., Wang M., Cai L., Pei F. Structural design of composite stiffened panel for a flat wing micro-aircraft. *SN Applied Sciences*, 2020, vol. 2, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s42452-020-2559-9
- [16] Bhole G.P., Deshmukh T. Multi-criteria decision making (MCDM) methods and its applications. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 2018, vol. 6, pp. 899–915. DOI: 10.22214/ijraset.2018.5145
- [17] Polavarapu S., Thompson L.L., Grujicic M. Topology and free size optimization with manufacturing constraints for light weight die cast automotive backrest frame. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2009, vol. 13, pp. 641–655. DOI: 10.1115/IMECE2009-10823

**Wang Yizhou**, Postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: scott\_bah@hotmail.com

**Zuzov V.N.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University; author of more than 70 scientific papers in the field of research of load-bearing systems of wheeled vehicles. e-mail: valeryzuz@yandex.ru