

## Метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям

© И. Ван, В.Н. Зузов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

*Изложен метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS, позволяющий уменьшить влияние ограничений в многокритериальной параметрической оптимизации по сравнению с такими универсальными методами, как прямой метод, метод поверхности отклика и взвешенный метод TOPSIS, а также сократить машинное время на решение задачи снижения массы каркасно-оболочечных несущих конструкций при обеспечении их прочности и жесткости. Оценка эффективности разработанного метода осуществлена путем сравнения результатов оптимизации по предлагаемому методу и на базе универсальных методов применительно к кузову амфибийной машины Humdinga. С целью сокращения машинного времени в предлагаемом методе реализована модификация взвешенного метода TOPSIS на базе генетического алгоритма. Для устранения влияния количества критериев и весовых коэффициентов целевых функций на результат оптимизации для функции приспособленности генетического алгоритма используются численные результаты взвешенного метода TOPSIS. Повторного расчета можно избежать благодаря применению базы данных вычисленных особей. Для того чтобы ослабить влияние различий популяции на результат оптимизации, с целью обеспечения сходимости вводятся глобальные экстремальные особи. Из анализа результатов расчетов следует, что предлагаемый метод обеспечивает существенное снижение массы кузова (масса панели днища кузова стала на 51 % меньше, чем у исходной конструкции). По сравнению с такими универсальными методами многокритериальной параметрической оптимизации, как прямой метод и метод поверхности отклика, предложенный метод снижает массу кузова в большей степени, а по сравнению с взвешенным методом TOPSIS — позволяет на 75 % сократить машинное время на решение задачи.*

**Ключевые слова:** многокритериальная параметрическая оптимизация, кузов амфибийной машины, усовершенствованный взвешенный метод TOPSIS, снижение массы, прочность, жесткость

**Введение.** Одна из главных задач при проектировании скоростных амфибийных машин — оптимизация структурного устройства кузова с целью снижения его массы, что осуществляется путем топологической и параметрической оптимизации на базе метода конечных элементов (МКЭ) [2] с обеспечением прочности и жесткости [1]. При оптимальном проектировании кузова скоростных амфибийных машин следует учитывать, что при эксплуатации на кузов воздействует множество режимов нагружения, в том числе экстремальных. С точки зрения количества используемых критериев как топологическую, так и

параметрическую оптимизацию кузовов скоростных амфибийных машин считают многокритериальной параметрической [3], при реализации которой всегда возникают проблемы. Во-первых, чем большее количество критериев будет задано, тем сложнее повысить сходимость решений оптимизации и тем значительнее будут затраты машинного времени на решение [4]. Во-вторых, весовые коэффициенты целевых функций являются константами, обоснование которых зависит от опыта исследователя, например, в случае скоростных амфибийных машин — от опыта проектирования внедорожников и катеров, которого бывает недостаточно, и этот фактор может оказать негативное влияние на процент снижения массы [5].

В настоящее время многокритериальная параметрическая оптимизация реализуется с помощью разных методов, среди которых можно выделить прямой метод и метод поверхности отклика [6]. Для оптимизации систем с ограниченным числом параметров и узким диапазоном их варьирования широко применяется метод многокритериального принятия решений (МКПР) [7]. При решении задачи оптимизации сложных объектов целесообразно использовать многокритериальный взвешенный метод анализа решений TOPSIS [8]. Он более универсален при решении сложных задач многокритериального принятия решений, чем прямой метод и метод поверхности отклика, и результаты его ранжирования легко реализовать на практике. Однако приведенные методы имеют затрудняющие их применение ограничения, а именно слабая сходимость результатов оптимизации, большие затраты машинного времени на решение и необходимость введения и обоснования весовых коэффициентов целевых функций. Следует отметить, что эти ограничения могут привести к ухудшению результатов при оптимизации кузовов скоростных амфибийных машин [9], поэтому весьма актуальна разработка нового метода многокритериальной параметрической оптимизации, лишенного таких недостатков.

Цель работы — представить разработанный метод многокритериальной параметрической оптимизации кузовов амфибийных машин на основе генетического алгоритма и взвешенного метода TOPSIS, предлагаемый для снижения массы при обеспечении прочности и жесткости кузова, а также показать его апробацию и дать оценку его эффективности по сравнению с оптимизацией с помощью универсальных методов 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, имеющая кузов длиной 7,012 м, шириной 2,304 м и массой 3200 кг [10] (рис. 1).

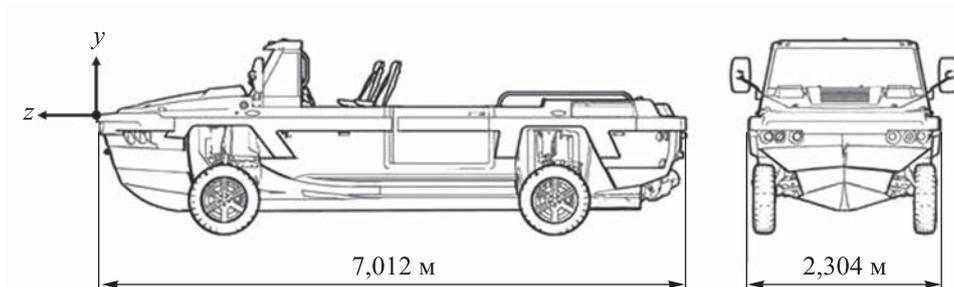


Рис. 1. Общий вид скоростной амфибийной машины Humdinga

Для кузова Humdinga по результатам предварительных исследований предлагается использовать при моделировании сэндвич-панели, обшивка которых состоит из четырех слоев препрега из углеродного волокна (Ероху Carbon UD). Толщина каждого слоя препрега 0,55 мм, углы ориентации углеродного волокна в каждом слое  $90^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}$ . Материал сердцевины — пена ПВХ (Divinycell H100 [11]) толщиной 19 мм. Структура каркаса, полученная после топологической оптимизации каркаса кузова, показана на рис. 2. Каркасные элементы передней части кузова, имеющие Z-образное сечение, изготовлены из алюминиевого сплава 5052. Каркасные элементы днища и боковой части кузова, имеющие омегаобразное сечение, выполнены из комбинированного материала [12].

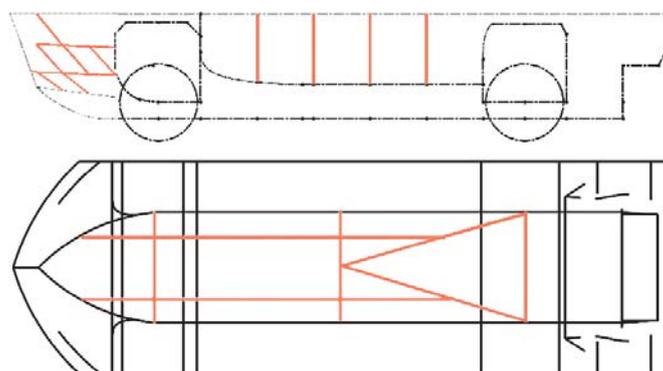


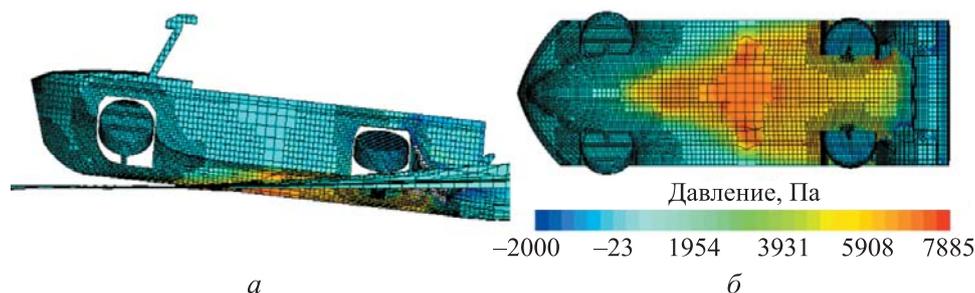
Рис. 2. Структура каркаса амфибийной машины Humdinga после топологической оптимизации (без главных каркасных элементов)

Разработанная в программном пакете ANSYS конечно-элементная модель (КЭМ) панели кузова представляет собой ансамбль двумерных конечных элементов Shell181 с размерами сторон 20 мм [13]. Остальные каркасные элементы моделируются одномерными конечными элементами Beam188 длиной 10 мм. Тип контакта 1D и 2D конечных элементов в модели является связанным (Bonded).

**Нагрузочные режимы для расчетов.** При движении скоростной амфибийной машины на ее кузов могут действовать сосредоточенные силы (в системе подрессоривания при движении по суше) и неравномерно распределенное давление (при движении по воде) [14]. Среди различных компонентов конструкции кузова днище воспринимает максимальное давление [1], поэтому в качестве объекта исследования для проверки эффективности разработанного метода выбрано именно днище кузова.

Проведен расчет напряженно-деформированных состояний (НДС) кузова амфибийной машины Humdinga для эксплуатационных режимов, в том числе при движении на воде и на суше. Эксплуатационные режимы на воде включают прямолинейное движение и поворот по спокойной воде с низкой и высокой скоростями, движение против волны и поперек волны. Эксплуатационные режимы на суше включают в себя вывешивание колеса (колес), движение по дороге со случайным профилем и движение по синусоидальной дороге. По результатам предварительного исследования экстремальные режимы днища кузова представляют собой движение по спокойной воде со скоростью 50 км/ч и вывешивание колес (диагонально) [14].

**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+ при скорости 50 км/ч угол дифферента кузова составляет около  $5,5^\circ$ . Внешние нагрузки в основном действуют на среднюю и заднюю части днища кузова, а также 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 спокойной воде со скоростью 50 км/ч

**Вывешивание колес (диагонально).** При движении по суше в общем случае на амфибийную машину могут действовать квазистатические, периодические и случайные нагрузки [15]. Однако самым опасным является вывешивание колеса (колес). Центр масс амфибийной

машины находится на середине, поэтому может быть диагональное вывешивание (например, вывешены левое переднее и правое заднее колеса). При таком диагональном вывешивании расчетная внешняя нагрузка на правое переднее и левое заднее колеса составляет  $F_x = 0$ ,  $F_y = 15696$  Н, а нагрузка на два других колеса соответственно равна 0.

**Основные положения разработанного метода многокритериальной параметрической оптимизации на основе генетического алгоритма и взвешенного метода TOPSIS.** В настоящее время многокритериальная параметрическая оптимизация реализована в ряде методов, среди которых ведущие места занимают прямой метод (ANSYS), метод поверхности отклика (ANSYS) и взвешенный метод TOPSIS (MATLAB). Однако их применение, в том числе и для кузова из композиционных материалов, затруднено из-за имеющихся ограничений.

Во-первых, прямой метод выполняет многокритериальную параметрическую оптимизацию путем проведения глобального поиска лучшего решения в диапазонах независимых переменных с помощью специальных алгоритмов (алгоритм MOGA, алгоритм MISQP, алгоритм NSGA-II и др.). Одним из главных преимуществ этого метода является то, что не будет погрешности результатов многокритериальной оптимизации. Однако на сходимость результатов и машинное время сильно влияет количество критериев — чем больше критериев, тем сложнее сходимость результата и больше машинное время.

Во-вторых, метод поверхности отклика обеспечивает многокритериальную оптимизацию параметров в два этапа: составление поверхности отклика и оптимизация на основе поверхности отклика. Поверхности отклика различных типов (генетическая агрегация, Kriging, полные полиномы 2-го порядка и др.) составляются на основе данных точек отбора проб с помощью определенных стратегий (CCD, OSFD, BBD и др.). Для метода поверхности отклика по сравнению с прямым методом требуется меньше машинного времени. Однако его основной недостаток заключается в том, что сильная нелинейность целевой функции приводит к большим погрешностям поверхности отклика (за исключением точек отбора проб, используемых для составления поверхностей отклика), что напрямую влияет на достоверность результатов оптимизации.

В-третьих, взвешенный метод TOPSIS выполняет многокритериальную оптимизацию на основе близости объекта к наилучшему результату и его удаленности от наихудшего и позволяет отражать относительные достоинства объектов в виде числовых результатов. Однако многокритериальная оптимизация по взвешенному методу TOPSIS предполагает вычисление целевых функций для всех объектов, что приводит к неприемлемо большим затратам машинного времени.

Кроме того, для прямого метода (ANSYS) и метода поверхности отклика (ANSYS) весовые коэффициенты целевых функций задает

исследователь, что может привести к ухудшению результатов при их некорректном назначении. Для кузова амфибийной машины следует учитывать влияние этого фактора на процент снижения массы.

С целью уменьшения влияния ограничений многокритериальной параметрической оптимизации по универсальным методам (прямой метод, метод поверхности отклика, взвешенный метод TOPSIS) и сокращения машинного времени предлагается метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе генетического алгоритма и взвешенного метода TOPSIS. Его отличительная особенность заключается в том, что он позволяет уменьшить время решения и повысить сходимость решений при оптимизации за счет устранения влияния количества критериев и весовых коэффициентов целевых функций на машинное время и сходимость результатов при многокритериальной



**Рис. 4.** Блок-схема метода многокритериальной параметрической оптимизации на основе генетического алгоритма и взвешенного метода TOPSIS

оптимизации. Для скоростных амфибийных машин этот метод дает возможность в большей степени снизить массу кузова.

Блок-схема предлагаемого метода представлена на рис. 4. Подобно традиционному генетическому алгоритму, типом кодирования предлагаемого метода является двоичное кодирование, оператор выбора использует метод рулетки, а оператор размножения и оператор мутации — одноточечный тип. По сравнению с многокритериальной параметрической оптимизацией по универсальным методам особенность предлагаемого метода заключается в следующем.

***Итерация множества взвешенных методов TOPSIS реализуется путем генетического алгоритма для сокращения машинного времени при обеспечении точности результатов.*** Взвешенный метод TOPSIS позволяет найти лучшую особь в текущей популяции независимо от количества целевых функций. Предпосылкой оптимизации является то, что приспособленности всех особей известны. Для популяций с большим количеством особей на расчеты будет потрачено много времени, поэтому необходимо найти способ сократить машинное время. С помощью операторов генетического алгоритма (выбор, размножение, мутация) реализуется итерация взвешенного метода TOPSIS. За счет определения количества итераций и количества особей в популяции в начальных условиях оптимизации сокращаются машинное время и количество точек выборки при оптимизации.

***Использование численных результатов взвешенного метода TOPSIS в качестве функции приспособленности генетического алгоритма.*** Функция приспособленности — одна из важных частей оператора выбора генетического алгоритма, который используется для нахождения оптимальной особи из текущей популяции. Для многокритериальной параметрической оптимизации целевые функции обычно выбирают в качестве функции приспособленности, а их весовые коэффициенты являются постоянными, определяемые на основе субъективных факторов исследователя (для скоростных амфибийных машин — на основе опытов проектирования амфибий, внедорожника и катера). Однако субъективно выбранные весовые коэффициенты могут оказать негативное влияние на результаты оптимизации, что при проектировании кузовов амфибийных машин уменьшит снижение массы. Поэтому поиск объективного способа описания функции приспособленности является актуальным.

Одно из преимуществ взвешенного метода TOPSIS заключается в том, что он позволяет численным результатам отражать относительные достоинства и недостатки между объектами. На этот метод не влияет количество целевых функций, а их весовые коэффициенты полностью зависят от данных особей в текущей популяции. Поэтому численные результаты взвешенного метода TOPSIS целесообразно выбрать в качестве функции приспособленности предлагаемого метода. Следует отметить, что численные результаты метода TOPSIS используются

только для нахождения лучшей и худшей особей в текущей популяции, но они не сохраняются и не накапливаются в следующей итерации.

**Введение глобальных экстремальных особей по принципу оценки относительных достоинств взвешенного метода TOPSIS для повышения сходимости результатов оптимизации.** Взвешенный метод TOPSIS отражает близость каждой особи к экстремальным особям, точнее — к экстремальным особям в текущей популяции (локальные экстремальные особи). По мере изменения популяции будут меняться и локальные экстремальные особи, а также это повлияет на сходимость результатов оптимизации, основанных на значениях локальных экстремальных особей. Для ослабления влияния этого фактора на результаты вводятся глобальные экстремальные особи, которые включают в себя наилучшую и наихудшую.

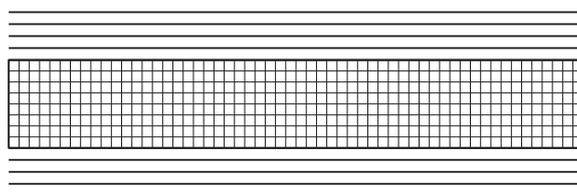
Предположим, что количество итераций равно  $N$ , а количество особей в популяции равно  $M$ . Применение глобальных экстремальных особей в итерации выглядит следующим образом: перед расчетом функции приспособленности глобальных экстремальных особей инициализируются равными 0. Когда  $N = 1$ , значения локальных экстремальных особей текущей популяции присваиваются глобальным экстремальным особям. При расчете функции приспособленности особей текущей популяции глобальные экстремальные особи в расчете не участвуют. Когда  $N \geq 2$ , значения глобальных экстремальных особей и значения локальных экстремальных особей в текущей популяции будут сравниваться перед расчетом функции приспособленности. Если взять в качестве примера глобальную наилучшую особь и в том случае, когда все значения целевой функции глобальной наилучшей особи лучше, чем у локальной наилучшей особи, то глобальная наилучшая особь остается неизменной. Если некоторые из них хуже, чем у локальной наилучшей особи, эти значения целевой функции будут заменены соответствующими значениями локальной наилучшей особи. Целью в этом случае является обеспечение того, чтобы в каждом поколении популяции глобальная экстремальная особь всегда была наилучшей или наихудшей.

При расчете функции приспособленности к популяции временно будут добавлены глобальные экстремальные особи, т. е. количество особей в популяции увеличится от  $M$  до  $M + 2$ . Очевидно, что эти две глобальные экстремальные особи станут локальными экстремальными особями в текущей популяции, а функция приспособленности остальных особей рассчитывается на основе их значений. После нахождения лучшей особи в текущей популяции будут удалены глобальные экстремальные особи и количество особей в популяции изменится с  $M + 2$  на  $M$ . Через оператора (выбор, размножение, мутация) будет получена новая популяция.

**Составление базы данных особей для дальнейшего сокращения времени оптимизации.** После тестирования алгоритма обнаружено, что дублирующиеся особи могут появиться в популяции на последних нескольких итерациях и в популяции на двух соседних итерациях. Повторный расчет проводить нецелесообразно, поэтому вводится база данных особей, чтобы в дальнейшем сократить машинное время. Рассчитанные значения особей и соответствующие им значения целевых функций в каждом поколении популяции будут записаны в базу данных. Перед расчетом значения целевой функции новых особей сравнивают со значениями в базе данных. При наличии дублирующих особей значение целевой функции особи не нужно пересчитывать, а следует просто извлечь ее (особь) из базы данных. С помощью базы данных особей время расчета может быть дополнительно сокращено в зависимости от количества итераций и количества особей в популяции.

В целом предлагаемый метод позволяет преодолеть влияние количества критериев на результаты многокритериальной параметрической оптимизации, а также получить удовлетворительные результаты в течение ограниченного машинного времени, что означает возможность достижения максимального снижения массы для кузовов скоростных амфибийных машин.

Покажем эффективность данного метода на примере оптимизации панели днища кузова. Для кузова скоростной амфибийной машины Humdinga по результатам предварительных исследований предлагаем использовать при моделировании сэндвич-панели. Главным способом снижения массы панелей кузова из сэндвич-композита является уменьшение толщины, в том числе толщины обшивки и сердцевины (рис. 5).

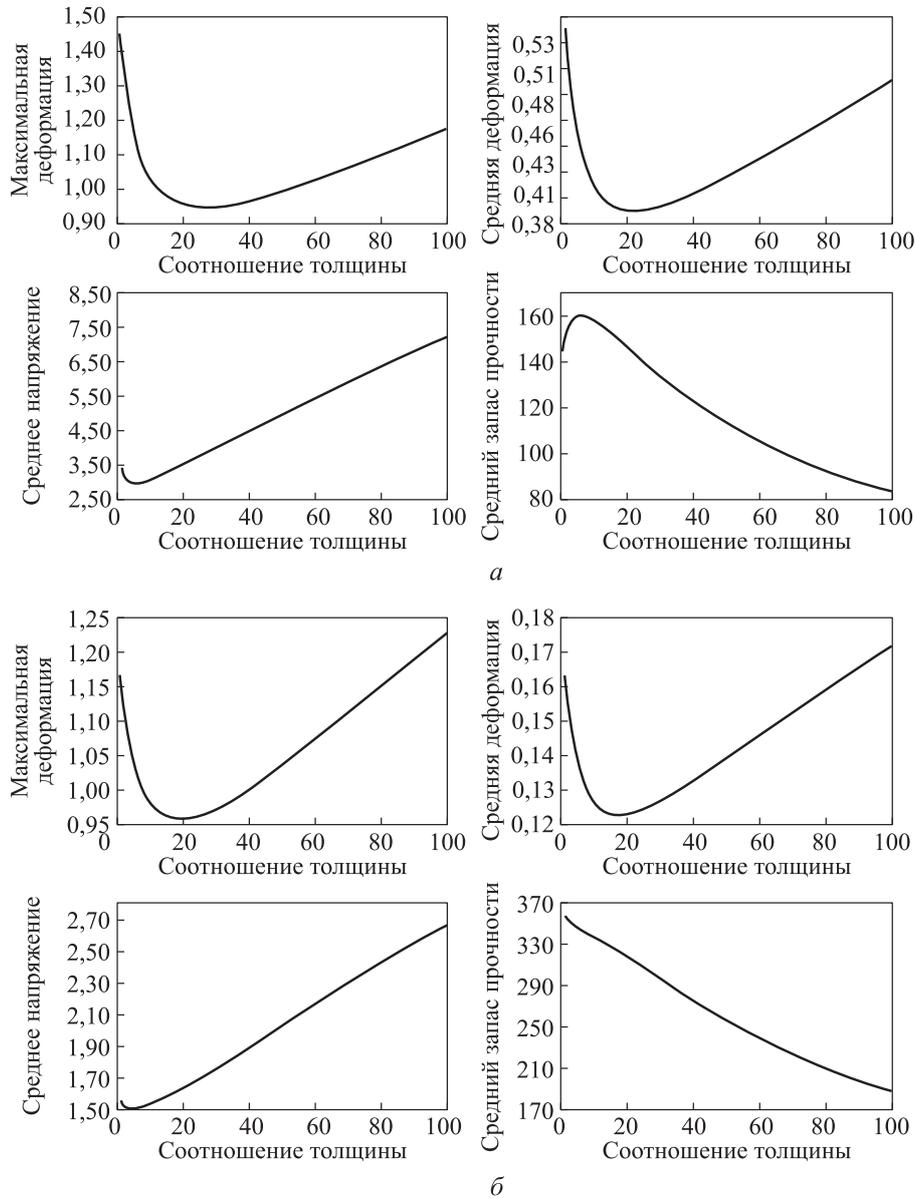


**Рис. 5.** Соотношение толщин сердцевины и обшивки  $K$ :  
— — слой препрега CFRP;  $\square$  — слой сердцевины PVC

Для того чтобы в большей степени снизить массу панелей кузова, данная работа была разделена на два шага:

*шаг 1* — многокритериальная параметрическая оптимизация для нахождения оптимального соотношения толщин  $K$  ( $K$  = толщина сердцевины / толщина обшивки);

*шаг 2* — уменьшение толщин обшивки и сердцевины на базе оптимизации с сохранением оптимальной пропорции в толщинах панелей кузова (толщина обшивки равна четырем толщинам препрега CFRP).



**Рис. 6.** Взаимосвязь между соотношением толщины и НДС днища кузова:  
 а — при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч;  
 б — при вывешивании колес

**Шаг 1:** многокритериальная параметрическая оптимизация параметров для нахождения оптимального соотношения толщин К. Принимается, что масса панелей постоянна, а целевыми функциями являются составляющие напряженно-деформированного состояния днища кузова (максимальная деформация, средняя деформация, среднее напряжение и средний запас прочности) при двух экстремальных режимах, указанных выше (рис. 6).

По результатам предварительных исследований НДС днища кузова при двух экстремальных режимах следует, что имеется нелинейная связь НДС с соотношением толщин  $K$ :

– с увеличением соотношения толщин  $K$  максимальная деформация, средняя деформация и среднее напряжение при двух экстремальных режимах сначала уменьшаются, а затем увеличиваются;

– с увеличением соотношения толщин  $K$  средний запас прочности при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч сначала повышается, а затем снижается, а средний запас прочности при вывешивании колес монотонно уменьшается.

Напряженно-деформированное состояние днища кузова при двух экстремальных режимах достигает своих экстремумов при разных соотношениях толщин  $K$ :

– при прямолинейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч максимальная деформация днища кузова достигает минимального значения при соотношении толщин  $K = 27$ , средняя деформация достигает минимального значения при соотношении толщин  $K = 22$ , среднее напряжение и средний запас прочности достигают своих экстремумов при соотношении толщин  $K = 6$  (для среднего напряжения — минимальное значение, а для среднего запаса прочности — максимальное значение);

– при вывешивании колес максимальная деформация кузова достигает минимального значения при соотношении толщин  $K = 20$ , средняя деформация кузова достигает минимального значения при соотношении толщин  $K = 17$ , среднее напряжение кузова достигает минимального значения при соотношении толщин  $K = 4$ .

Для того чтобы найти оптимальное соотношение толщин  $K$  с учетом вышеуказанных восьми основных параметров (максимальная и средняя деформации, среднее напряжение и средний запас прочности днища кузова при двух экстремальных режимах), используется метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе генетического алгоритма и взвешенного метода TOPSIS. Поскольку предлагаемый метод наследует случайность результатов генетического алгоритма, были проведены повторные тесты для анализа дискретности (дисперсия) результатов оптимизации и нахождения оптимального решения. Предположим, что количество итераций равно 5, количество особей в популяции равно 10, диапазон независимых переменных равен  $[1, 100]$  с интервалом значения 1. Вероятность размножения составляет  $p_c = 1$ , вероятность мутации составляет  $p_m = 0,15$ , а количество повторений теста — 100. Распределение результатов 100 повторных тестов показано на рис. 7. Из анализа результатов следует:

– предлагаемый метод многокритериальной параметрической оптимизации имеет удовлетворительные сходимость и дисперсию распределения результатов, причем среди 100 результатов тестов 87

находились в диапазоне от 10 до 18, 5 результатов были меньше 10, 8 — больше 18;

– после постобработки на основе среднего значения и дисперсии результатов оптимальное соотношение толщин  $K = 12$ .

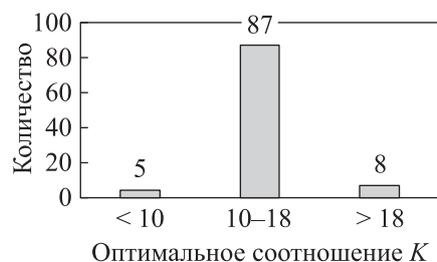


Рис. 7. Распределение результатов повторных тестов

**Шаг 2:** уменьшение толщин обшивки и сердцевины с сохранением оптимальной пропорции в толщинах панелей кузова. Цель оптимизации на данном шаге — минимальная масса панелей. При этом используются два ограничения:

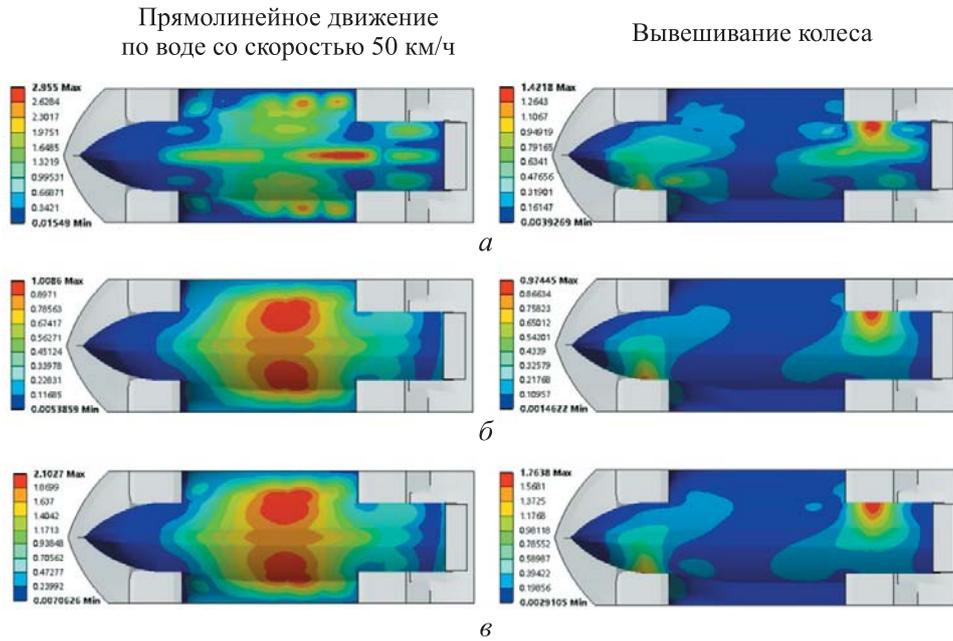
– сохранение оптимальной пропорции в толщинах панелей кузова (соотношение толщин  $K = 12$ );

– прочность и жесткость днища кузова после снижения массы не хуже, чем у исходной конструкции — панели толщиной 3,175 мм из алюминиевого сплава 5052.

По результатам предварительных исследований при соотношении толщин  $K = 12$ , когда толщина препрега составляет 0,2 мм, прочность днища кузова хуже, чем у исходной конструкции. Когда толщина препрега составляет 0,3 мм, прочность днища кузова значительно выше, чем у исходной конструкции. Можно сделать предварительный вывод, что наилучшая толщина препрега находится в диапазоне 0,2...0,3 мм. Приняв 0,01 мм в качестве интервала значений толщины препрега, применяем далее взвешенный метод TOPSIS для нахождения оптимальной толщины панелей кузова. В качестве показателей используются максимальная и средняя деформации (рис. 8) и среднее напряжение днища кузова при двух экстремальных режимах (табл. 1 и 2). Цель оптимизации состоит в том, чтобы спроектировать днище кузова, имеющее минимальную массу, у которого прочность и жесткость будут не хуже, чем у исходной конструкции.

Из анализа результатов, приведенных в табл. 1 и 2, следует:

– масса панелей днища кузова снижается примерно на 51 %, причем толщина препрега из композитного углеродного волокна 0,25 мм, толщина сердцевины 12 мм. При таких значениях прочность и жесткость днища выше, чем у исходной конструкции, особенно при прямо-



**Рис. 8.** Деформация днища кузова при двух экстремальных режимах: *а* — начальные параметры (AL); *б* — панель с оптимальным соотношением толщины *K* (до снижения массы); *в* — панель с оптимальным соотношением толщины *K* (после снижения массы)

Таблица 1

**Напряженно-деформированное состояние днища кузова после снижения толщины панелей при соотношении толщин  $K = 12$  при двух экстремальных режимах**

Толщина, мм		Прямолинейное движение по спокойной воде со скоростью 50 км/ч				Вывешивание колес			
слоев обшивки	сердцевины	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности
0,20	9,6	2,5596	1,0436	7,8083	57,57	2,0551	0,2860	3,0744	160,33
0,21	10,08	2,4543	0,9987	7,4539	60,51	1,9897	0,2755	2,9853	165,90
0,22	10,56	2,3566	0,9573	7,1311	63,49	1,9283	0,2658	2,9023	171,26
0,23	11,04	2,2660	0,9188	6,8358	66,48	1,8704	0,2568	2,8245	176,47
0,24	11,52	2,1817	0,8831	6,5644	69,50	1,8156	0,2483	2,7513	181,60
0,25	12	2,1027	0,8497	6,3143	72,55	1,7638	0,2403	2,6820	186,67
0,26	12,48	2,0286	0,8184	6,0828	75,61	1,7146	0,2327	2,6162	191,67
0,27	12,96	1,9588	0,7891	5,8679	78,69	1,6677	0,2256	2,5535	196,65
0,28	13,44	1,8929	0,7615	5,6677	81,78	1,6231	0,2188	2,4935	201,64
0,29	13,92	1,8306	0,7356	5,4807	84,90	1,5805	0,2123	2,4359	206,66
0,30	14,4	1,7716	0,7111	5,3056	88,05	1,5397	0,2062	2,3806	211,72

**Напряженно-деформированное состояние днища кузова  
при двух экстремальных режимах**

Режим	Прямолинейное движение по спокойной воде со скоростью 50 км/ч				При вывешивании колес			
	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности	Максимальная деформация, мм	Средняя деформация, мм	Среднее напряжение, МПа	Средний запас прочности
Начальный (AL)	2,9550	0,7848	6,9521	–	1,4218	0,2210	2,9466	–
После шага № 1	1,0086	0,4040	3,1768	156,67	0,9744	0,1249	1,5586	332,83
После шага № 2	2,1027	0,8497	6,3143	72,55	1,7638	0,2403	2,6820	186,67

линейном движении по спокойной воде со скоростью 50 км/ч; кроме того, снижаются максимальная деформация днища кузова на 28,8 % и среднее напряжение на 9,2 %, а средняя деформация увеличивается на 8 %;

– большой запас прочности позволяет в дальнейшем существенно снизить массу кузова.

**Сравнение результатов, полученных по предлагаемому методу, с результатами многокритериальной параметрической оптимизации, проведенной по универсальным методам.** Для оценки эффективности предлагаемого метода были проведены многокритериальные параметрические оптимизации по универсальным методам (прямой метод, метод поверхности отклика, взвешенный метод TOPSIS) при тех же граничных условиях и нагрузочных режимах. Оптимальное соотношение толщины, полученное прямым методом, составило 18, методом поверхности отклика — 20, взвешенным методом TOPSIS — 12. При сохранении оптимального соотношения толщин, определенного с помощью этих трех универсальных методов многокритериальной параметрической оптимизации, толщина панелей в расчетах уменьшается до тех пор, пока прочность кузова после оптимизации не приблизится к прочности исходной конструкции. Анализ полученных результатов приводит к следующему:

– благодаря использованию прямого метода (ANSYS) масса панелей днища кузова уменьшается примерно на 44 %; при толщине препрега 0,24 мм и толщине сердцевины 19,2 мм прочность днища кузова близка к прочности исходной конструкции;

– в случае применения метода поверхности отклика (ANSYS) масса панелей днища кузова становится меньше примерно на 42 %;

при толщине препрега 0,25 мм и толщине сердцевины 18 мм прочность днища кузова близка к прочности исходной конструкции;

– с помощью взвешенного метода TOPSIS (MATLAB) массу панелей днища кузова можно снизить примерно на 51 %; по сравнению с предлагаемым методом машинное время при этом будет на 400 % больше;

– предлагаемый метод позволяет получить массу на 51 % меньше, оптимальное соотношение толщин  $K = 12$ , а машинное время сократить на 75 %, что предоставляет возможность далее применять более высокоточные КЭМ для оптимизации с целью повышения точности.

**Заключение.** На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– по сравнению с универсальными методами многокритериальной параметрической оптимизации (прямой метод, метод поверхности отклика) предлагаемый метод в большей степени позволяет снизить массу кузова (при предлагаемом методе — на 51 %, при прямом методе — на 44 %, при методе поверхности отклика — на 42 %);

– по сравнению с взвешенным методом TOPSIS представленный метод многокритериальной параметрической оптимизации существенно сокращает машинное время на задачу (на 75%), что при достаточной производительности компьютера позволяет применять более высокоточную КЭМ при оптимизации для повышения точности результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Степанов А.П. *Проектирование амфибийных машин*. Москва, Изд-во Мегалион, 2007, 420 с.
- [2] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Определение критериев выбора параметров материала-наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>
- [3] 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. Р.Е. Алексеева*, 2019, № 2, с. 163–170. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2019\\_2\\_163](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2019_2_163)
- [4] Gunantara N. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 2018, vol. 5. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>
- [5] Marler R.T., Arora J.S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2010, vol. 41, pp. 853–862. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7>

- [6] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 2016, 856 p.
- [7] Воробьева М.В. Анализ методов многокритериального принятия решений. *Региональная и отраслевая экономика*, 2022, № 1, с. 24–28. [https://doi.org/10.47576/2782-4578\\_2022\\_1\\_24](https://doi.org/10.47576/2782-4578_2022_1_24)
- [8] Hwang C.L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 1981, vol. 186, pp. 58–191. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3)
- [9] Cho J.G., Koo J.S., Jung H.S. A lightweight design approach for an EMU carbody using a material selection method and size optimization. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30, pp. 673–681. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0123-8>
- [10] Sheppard D. Amphibious innovation: engineering the Aquada. *Enz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise*, 2005, vol. 6, pp. 23–25. <https://doi.org/10.3316/informit.007323739318493>
- [11] Divinycell H. *Excellent mechanical properties to low weight*. URL: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/> (дата обращения: 01.12.2023).
- [12] Huang Z., Li Y., Zhang X., Chen W., Fang D. A comparative study on the energy absorption mechanism of aluminum/CFRP hybrid beams under quasi-static and dynamic bending. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 163, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107772>
- [13] 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. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1856>
- [14] Ван И. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде. *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*, 2023, № 4, с. 82–96. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2023\\_4\\_82](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_82)
- [15] Афанасьев Б.А., Белоусов Б.Н., Жеглов Л.Ф. *Проектирование полноприводных колесных машин: в 3 т.* Полунгян А.А., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 432 с.

Статья поступила в редакцию 13.12.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ван И., Зузов В.Н. Метод многокритериальной параметрической оптимизации на основе усовершенствованного взвешенного метода TOPSIS применительно к каркасно-оболочечным несущим конструкциям. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2024-1-2329>

**Ван Ичжоу** — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
e-mail: scott\_bah@hotmail.com ORCID: 0009-0006-6659-5993

**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: valeryuzov@yandex.ru  
ORCID: 0000-0003-1512-9299

## **Multicriteria parametric optimization method for skinned-frame structures based on enhanced weighted TOPSIS method**

© Y. Wang, V.N. Zuzov

Bauman Moscow State Technical University,  
Moscow, 105005, Russian Federation

*This paper presented a multicriteria parametric optimization method based on enhanced weighted TOPSIS method. The approach aimed to mitigate the impact of constraints in multicriteria parametric optimization, distinguishing itself from universal methods such as the direct method, response surface method, and traditional weighted TOPSIS method. This work focused on minimizing the computer time required for solving the complex problem of reducing the weight of frame-shell load-bearing structures while concurrently ensuring structural strength and rigidity. To enhance computational efficiency, the devised method incorporates an iterative process of the traditional weighted TOPSIS method integrated with a genetic algorithm. This integration seeks to mitigate the influence of criteria numbers and objective function weighting coefficients on the optimization outcome by utilizing numerical results from the weighted TOPSIS method. The need for recalculations is obviated through the utilization of a pre-established database containing computed individuals. Moreover, to mitigate the influence of population disparities on the optimization outcome, global extreme individuals are introduced to foster convergence. This systematic approach ensures both computational expediency and robust optimization results in the context of the genetic algorithm framework. The efficacy of the proposed methodology was evaluated through a comparative analysis of optimization outcomes achieved using the proposed approach and those derived from conventional methods applied to the Humdinga amphibious vehicle chassis. Upon analysis of the calculation results, it can be inferred that the proposed method facilitated a substantial reduction in structural weight, exemplified by the underbody panel exhibiting a mass 51% lower than that of the original design. In comparison with widely adopted methods for multicriteria parametric optimization, such as the direct method and the response surface method, a more pronounced reduction in body weight was achieved by the proposed method (44% for the direct method, and 42% for the response surface method). In contrast to the traditional weighted TOPSIS method, the proposed multicriteria parametric optimization method exhibited substantial decrease in computational time for solution attainment (75% reduction in computer time).*

**Keywords:** *parametric optimization, multi-objective, amphibious vehicle body, enhanced weighted TOPSIS method, weight reduction, strength, rigidity*

### REFERENCES

- [1] Stepanov A.P. *Proektirovanie amfibiynykh mashin* [Design of amphibious vehicles]. Moscow, Megalion Publ., 2007, 420 p.
- [2] Goncharov R.B., Zuzov V.N. *Opredelenie kriteriev vybora parametrov materiala-napolnitelya v nesuschikh tonkostennykh konstruktsiyakh primenitelno k zadachyam passivnoy bezopasnosti avtomobiley* [On criteria of selecting filler material in supporting thin-walled frame-type structures in relation to the tasks of cars and tractors passive safety]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 4.  
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>

- [3] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Osobennosti poiska optimalnykh parametrov usiliteley zadney chasti kabiny gruzovogo avtomobilya na baze parametricheskoy i topologicheskoy optimizatsii s tselyu obespecheniya trebovaniya po passivnoy bezopasnosti po mezhdunarodnym pravilam i polucheniya ee minimalnoy massy [Special features of search of the optimal 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]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2019, no. 2, pp. 163–170. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2019\\_2\\_163](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2019_2_163)
- [4] Gunantara N. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Cogent Engineering*, 2018, vol. 5. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1502242>
- [5] Marler R.T., Arora J.S. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization*, 2010, vol. 41, pp. 853–862. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7>
- [6] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons, 2016, 856 p.
- [7] Vorobieva M.V. Analiz metodov mnogokriterialnogo prinyatiya resheniy [Analysis of methods of multi-criteria decision-making]. *Regionalnaya i otraslevaya ekonomika — Regional and sectoral Economy*, 2022, no. 1, pp. 24–28. [https://doi.org/10.47576/2782-4578\\_2022\\_1\\_24](https://doi.org/10.47576/2782-4578_2022_1_24)
- [8] Hwang C.L., Yoon K. Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 1981, vol. 186, pp. 58–191. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3)
- [9] Cho J.G., Koo J.S., Jung H.S. A lightweight design approach for an EMU car body using a material selection method and size optimization. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, vol. 30, pp. 673–681. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0123-8>
- [10] Sheppard D. Amphibious Innovation: Engineering the Aquada. *E.nz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise*, 2005, vol. 6, pp. 23–25. <https://doi.org/10.3316/informit.007323739318493>
- [11] Divinycell H. *Excellent mechanical properties to low weight*. Available at: <https://www.diabgroup.com/products-services/divinycell-pvc/divinycell-h/> (accessed December 1, 2023).
- [12] Huang Z., Li Y., Zhang X., Chen W., Fang D. A comparative study on the energy absorption mechanism of aluminum/CFRP hybrid beams under quasi-static and dynamic bending. *Thin-Walled Structures*, 2021, vol. 163, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107772>
- [13] Goncharov R.B., Zuzov V.N., Chayko D.N. Modelirovanie povedeniya tonkostennykh trub s raznymi napolnitelyami pri predelnom nagruzhenii primenitelno k resheniyu problem passivnoy bezopasnosti avtomobiley [Modeling the behavior of thin-walled pipes with different fillers under maximum load in solving the problems of crashworthiness]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 3. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-3-1856>
- [14] Wang Y. K voprosu o nakhozhdenii ekstremalnykh rezhimov nagruzheniy amfibiynykh mashin pri ekspluatatsii v vodnoy srede [Research on extreme load mode of amphibious vehicle during operation on water]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva — Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2023, no. 4, pp. 82–96. [https://doi.org/10.46960/1816-210X\\_2023\\_4\\_82](https://doi.org/10.46960/1816-210X_2023_4_82)

- [15] Afanasyev B.A., Belousov B.N., Zheglov L.F. *Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin*. [Design of all-wheel-drive wheeled vehicles]. In 3 vols. Polungyan A.A., ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008, 432 p.

**Wang Yizhou**, Postgraduate, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: scott\_bah@hotmail.com  
ORCID: 0009-0006-6659-5993

**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 load-bearing systems of the wheeled vehicles. e-mail: valeryuz@yandex.ru  
ORCID: 0000-0003-1512-9299