

МЕТОД ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНЫХ КАБИН СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ И СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

К.Т.Н. Вдовин Д.С.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
vdovin@bmstu.ru

При проектировании кабин операторов сельскохозяйственной и строительной техники (лесных машин, экскаваторов, тракторов и др.) конструкторы должны руководствоваться требованиями безопасности и встроить в каркас кабины устройства защиты оператора при опрокидывании машины (ROPS – roll over protective structures), а также устройство защиты от тяжелых падающих предметов (FOPS – falling object protective structures). Как правило, такие устройства защиты представляют собой силовой каркас, воспринимающий все основные нагрузки при опрокидывании и ударе. В основном трудности построения такого каркаса заключаются в компоновочных решениях: каркас не должен препятствовать удобной работе оператора: перекрывать дверные проемы рабочего и аварийного выхода из кабины, закрывать обзор и т.д. Данная работа направлена на снижение трудоемкости разработки и создание надежного каркаса защитного устройства кабин при опрокидывании для специальной и строительной техники путем последовательного применения метода топологической и параметрической оптимизации на ранней стадии проектирования кабины. Метод топологической оптимизации использован для определения наиболее выгодных путей передачи нагрузок при опрокидывании на примере кабины лесной машины. По результатам топологической оптимизации построена упрощенная оболочечно-стержневая модель кабины, для которой проведена процедура параметрической оптимизации размеров сечений силовых элементов защитного каркаса. На заключительном этапе проведены поверочные расчеты методом конечных элементов в явной постановке, подтверждающие несущую способность кабины при опрокидывании машины. Результаты применения топологической оптимизации, а затем параметрической оптимизации подбора сечений основных элементов силового каркаса позволили снизить количество рассматриваемых вариантов конструкции кабины. Полученный защитный каркас был вписан в исходное стилизовое решение дизайн-проекта без изменений внешнего вида кабины. Поверочный расчет методом конечных элементов в явной постановке подтвердил правильность размещения силовых элементов каркаса и является основанием к допуску конструкции для проведения натурных испытаний.

Ключевые слова: колесная машина, гусеничная машина, кабина оператора, безопасность, ROPS, топологическая оптимизация, метод конечных элементов.

Введение

Существующие стандарты безопасности кабин операторов специальной и строительной техники (лесных машин, сельскохозяйственных тракторов, экскаваторов и др.) регламентируют типовые испытания, направленные на обеспечение выживаемости и здоровья оператора в случае аварий: опрокидывании машины, падении тяжелых предметов на крышу, проникновении посторонних предметов (осколков, веток) в кабину оператора. Данные требования описаны в стандартах под общим названием ROPS (roll-over protective structures), FOPS (falling object protective structures) [1, 2]. Суть этих стандартов – обеспечить зону выживания для оператора в

случае аварии: опрокидывания машины или падения на кабину тяжелых предметов. Процедура испытаний на подтверждение соответствия конструкции кабины, описанная в указанных стандартах, заключается в последовательном нагружении верхней части кабины усилием вбок, вниз, затем вперед или назад (в зависимости от того, что опаснее). Стандарт ROPS описывает, какие усилия и в каком месте прикладываются к кабине, а также дает формулу расчета этих усилий в зависимости от полной массы машины. Подтверждение соответствия конструкции кабины требованиям FOPS проводится испытанием, при котором груз определенной массы и формы сбрасывается с высоты на

крышу кабину. При обоих испытаниях деформация кабины не должна затронуть зоны выживаемости оператора, размеры которой также описаны в этих стандартах [3] (рис. 1).



Рис. 1. Зона выживания оператора (фигура белого цвета в центре кабины) после полного переворота экскаватора не повреждена

Решением задачи защиты оператора при опрокидывании машины является силовой каркас, воспринимающий все возникающие нагрузки при перевороте кабины (ROPS). Классифицировать ROPS-системы можно так:

Интегрированные в конструкцию кабины (рис. 2).

Внешние каркасы безопасности (рис. 3).

Складные выдвигающиеся каркасы с системой датчиков срабатывания (рис. 4).



Рис. 2. Каркас безопасности интегрирован в кабину лесной машины

Подавляющее число защитных конструкций кабин выполнено по интегрированной схеме ввиду их преимущества по габаритам, хорошей обзорности. Однако недостатками интегрированной конструкции является ее неремонтопригодность после аварии, а также необходимость проектировать защитный каркас под каждую конкретную кабину (отсутствует унификация).

Процесс проектирования кабины – сложная инженерная задача, в ходе которой конструктор должен обеспечить соответствие кабины многочисленным требованиям, касающимся не только безопасности. Кроме обязательных требований регламента (безопасность, эргономика, функциональные требования), конструктор также обязан удовлетворить требования стилевого решения дизайн-проекта (внешнего вида), который накладывает сильные ограничения на размещение защитного каркаса. Таким образом, размещение силовых элементов защиты кабины при опрокидывании и выбор их размеров и свойств материала является нетривиальной задачей, затрагивающей всю совокупность требований как к кабине, так и к машине в целом. Исторически сложившимся способом решения этой задачи является проектирование «по прототипам», а также использование интуитивных решений «из конструкторского



Рис. 3. Внешний каркас безопасности для кабины экскаватора



Рис. 4. Автоматически раскладывающийся защитный каркас с датчиком переворота

опыта» [4, 5]. В результате применения этого решения приходится рассматривать десятки или даже сотни вариантов конструкции, а также искать компромиссы с дизайн-проектом, изменять дверные проемы и окна так, чтобы удовлетворить всем требованиям прочности и эргономики. Внешний вид кабины при этом, как правило, изменяется, отдаляясь от начального стиливого решения, что ухудшает маркетинговые свойства конечного продукта. Дополнительным недостатком метода является «слепое наследование» ошибок предыдущего конструкторского решения, необходимость их устранения ведет к многочисленным доработкам, что в результате может привести к громоздкой, нетехнологичной и некрасивой конструкции. В последнее время трудоемкость данной работы значительно снижена путем применения виртуального моделирования поведения кабины при испытаниях FOPS/ROPS с использованием метода конечных элементов [6, 7, 8, 9]. Моделирование позволяет оценить десятки или даже сотни вариантов конструкций, без изготовления натурного прототипа. Однако и эта задача также может занимать значительное время, т.к. у конструктора изначально нет готового решения по размещению силовых элементов каркаса.

Таким образом, данная работа направлена на снижение трудоемкости разработки и создание надежного каркаса защитного устройства кабин при опрокидывании для специальной и строительной техники путем последовательного применения метода топологической и параметрической оптимизации на ранней стадии проектирования кабины.

Метод топологической оптимизации

Топологическая оптимизация, основанная на методе конечных элементов, – относительно новый метод проекторочного расчета, заключающийся в следующем [10, 11]. В компоновочное пространство проектируемой силовой конструкции вписывается фигура, занимающая все доступное пространство для размещения материала будущей конструкции. Такая трехмерная сложная фигура называется пространством проектирования (design space). Для данного пространства проектирования формулируются нагрузки и граничные условия такие же, как действуют на будущую конструкцию. В пространстве проектирования строит-

ся конечно-элементная модель, каждому элементу которой присваивается варьируемый в диапазоне $\{0;1\}$ параметр ρ , такой что:

$$\bar{E} = \rho^p E,$$

где \bar{E} – уменьшенный модуль упругости материала в конечном элементе; E – исходный модуль упругости материала; ρ – варьируемый параметр от 0 до 1, также часто называемый плотностью материала; p – степенной показатель, улучшающий дискретность распределения плотности материала в решении.

Таким образом, значения варьируемого параметра ρ близкие к 0 означают отсутствие материала конструкции в данном объеме конечного элемента, т.к. жесткость конструкции и ее способность сопротивляться внешним нагрузкам малы, а значения варьируемого параметра ρ близкие к 1 означают присутствие материала в данном конечном элементе, т.к. он обладает полной жесткостью исходного материала и полностью включен в передачу нагрузок. Целевой функцией задачи оптимизации могут являться: минимум потенциальной энергии конструкции, минимум массы, целевые значения собственных частот конструкции. Ограничениями к целевой функции могут являться допускаемые перемещения, напряжения, значения собственных частот, целевая масса. Одной из наиболее популярных постановок является SIMP-метод [12, 13], в котором целевой функцией назначают минимум потенциальной энергии конструкции при заранее заданной массе материала детали. В этом случае алгоритм распределяет заданное количество материала по пространству проектирования так, чтобы получить наиболее жесткую конструкцию при действии на нее указанных пользователем нагрузок. Задача легко обобщается на несколько расчетных случаев. В результате решения оптимизационной задачи в исходной фигуре пространства проектирования могут быть получены пути наиболее выгодной передачи усилий между точками, в которых сформулированы граничные условия и нагрузки.

Особенности применения топологической оптимизации для проектирования кабин, соответствующих требованиям ROPS

Кабины операторов специальной и строительной техники, как правило, построены по принципу капсулы, цель которой – создать

защитную среду и микроклимат вокруг оператора для его комфортной работы. Методы построения пространства проектирования и последующая технология применения топологической оптимизации описана в работах [14, 15, 16]. В описанной выше задаче наиболее простое пространство проектирования для силовой схемы защитного устройства – это оболочка, построенная по периметру дизайн-проекта кабины. Конечно-элементную модель такой оболочки удобно построить из плоских оболочечных конечных элементов, с учетом желаемых проемов для окон и дверей. При этом сами окна и двери по условиям проведения тестов ROPS в силовую схему можно не включать. Пример такого пространства проектирования в виде оболочечной капсулы, вписанной в исходный дизайн-проект, показан на рис. 5.

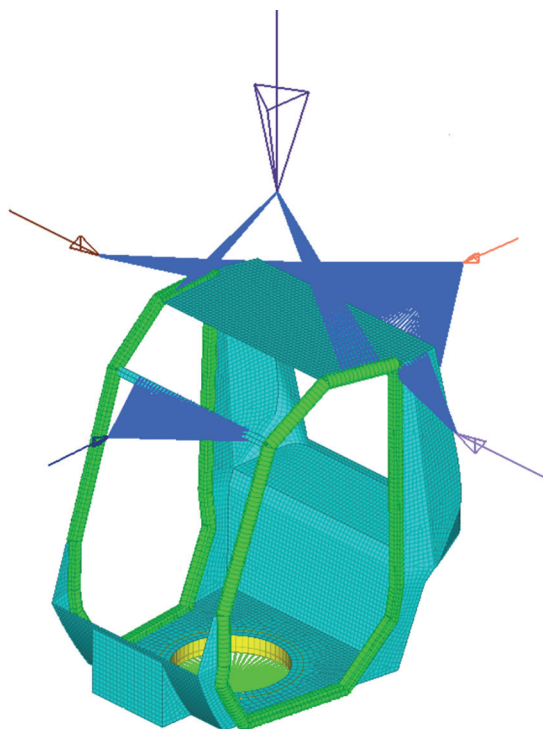


Рис. 5. Балочно-оболочечная конечно-элементная модель пространства проектирования кабины и нагрузки ROPS

Дверные и оконные проемы кабины по конструктивным соображениям (для организации уплотнений) окантовываются профилем сложной формы, показанным на рис. 5. Их расположение диктует дизайн и имеет смысл использовать их несущую способность в сопротивлении нагрузкам ROPS. Поэтому в модели пространства проектирования они заданы заранее в виде балочных конечных элементов, и не включены в

процедуру варьирования плотности их материала при оптимизации (non-design space).

В качестве варьируемых параметров в топологической оптимизации плоских оболочечных моделей возможно использовать вместо плотности элемента его условную толщину. В этом случае, ограничив диапазон толщин от 1 мм до 100 мм, можно учесть несущую способность капсулы как оболочки, а получившиеся большие значения толщины как будущие силовые элементы подкрепляющего каркаса, интегрированного в капсулу.

Нагрузки ROPS заданы в виде упрощенного распределения боковой, вертикальной, передней и задней сил, действующих в области возможного контакта кабины с нагружающим устройством. Граничным условием для всех типов нагрузок является закрепление пола кабины на основании. При этом для упрощения все расчетные случаи считаются раздельно действующими, а расчет напряженно-деформированного состояния кабины проводится в линейной упругой постановке. Целевой функцией назовем минимум потенциальной энергии при ограничении массы расходуемого материала. Такие упрощения необходимы для проведения процедуры оптимизации в приемлемое время на обычном настольном компьютере: решение задачи топологической оптимизации на описанной модели занимает не более 2 часов.

Результат решения топологической оптимизации на описанной модели показан в виде распределения толщин на рис. 6. Получившаяся картина распределения материала показывает, где наиболее выгодно расположить будущие элементы силового защитного каркаса.

Вторым этапом в описываемой методике предлагается провести параметрическую оптимизацию сечений силовых элементов защитного каркаса. Для этого в исходной модели пространства проектирования заданы балочные элементы вдоль получившихся путей передачи нагрузки, показанных на рис. 5. Остальная часть оболочки задана постоянной толщиной листа.

Варьируемыми параметрами при стандартной параметрической оптимизации сечений балочных элементов являются:

- площадь поперечного сечения балки;
- изгибные моменты инерции сечения балки относительно двух продольных плоскостей изгиба;
- момент сопротивления сечения балки кручению.

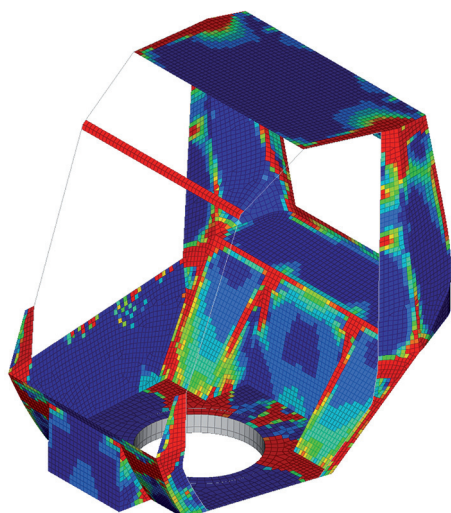


Рис. 6. Распределение толщин оболочечных элементов по пространству проектирования для четырех нагрузок ROPS: нагрузка сбоку, сверху, спереди, сзади

Все эти параметры балок зависят от формы, размеров и толщины стенок сечения. Для упрощения изготовления кабины форму сечения всех балочных элементов каркаса заранее выбрали прямоугольной, замкнутого типа. В качестве технологии изготовления силовых балок каркаса определили лазерную резку листа, гибку и последующую сварку балок с оболочкой кабины. В этом случае варьировать удобно следующими параметрами сечения:

- толщина стенок балки (одинаковая для всего сечения);
- высота прямоугольного сечения;
- ширина прямоугольного сечения.

В качестве целевой функции выбран минимум массы балочного каркаса, ограничение к целевой функции – максимальные допускаемые напряжения в металле. Граничные условия и нагрузки использованы те же, что и при первом шаге топологической оптимизации.

Результатом решения второго этапа параметрической оптимизации являются желаемые размеры сечения балочных элементов (рис. 7). Данные результаты с учетом упрощений, диктуемых технологичностью производства, приняты в виде исходных данных при проектировании силового интегрированного каркаса лесной машины.

Окончательным этапом при проектировании кабины, защищенной по стандарту ROPS, является расчетная оценка прочности конструкции с использованием явного метода интегрирования и подробной конечно-элемент-

ной модели на основе оболочечных элементов [17]. Такая модель была разработана на этапе окончательной проработки кабины (рис. 8).

Расчет несущей способности кабины при нагружении сбоку, сверху, спереди и сзади проведен для этих случаев отдельно, с учетом контактного взаимодействия нагружающих балок и кабины. Нагружение через балки задано кинематически (принудительное перемещение балок), при этом контролировалось усилие в контакте и работа внешних сил на перемеще-

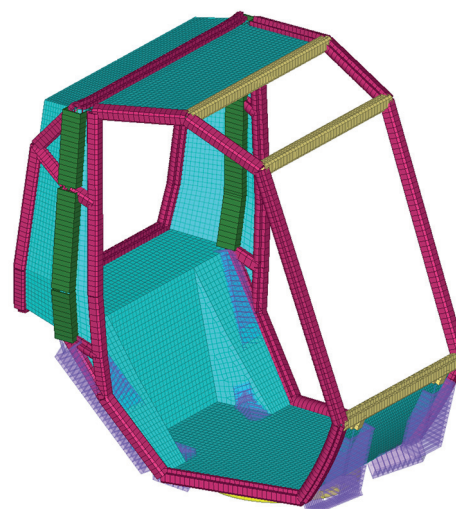


Рис. 7. Размеры сечений балочных элементов, подобранные на втором этапе параметрической оптимизации

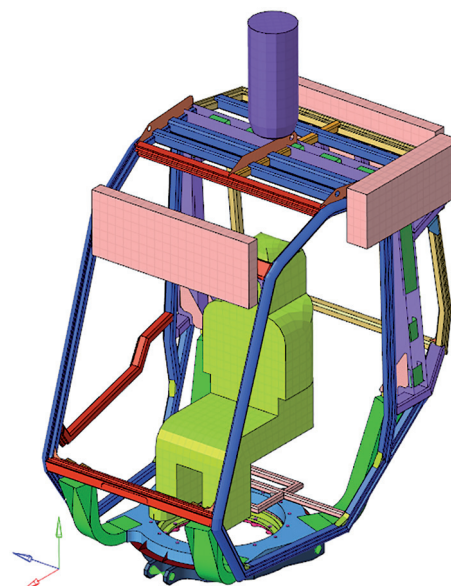


Рис. 8. Подробная оболочечная конечно-элементная модель кабины лесной машины со встроенным силовым каркасом. Показаны нагружающие балки и ударник FOPS, в центре кабины показано жизненное пространство оператора

нии нагружающей балки. Это усилие и работа сравнивались с требованиями стандарта ROPS. Для оценки проникновения элементов кабины в зону выживания, задана 3д-фигура этой зоны в конечно-элементной модели кабины (рис. 8). В расчете применена упруго-пластическая модель материала с таблично заданной диаграммой растяжения. Расчет проведен с использованием явной процедуры интегрирования по времени, на обычном персональном компьютере в течение 8–10 часов (за ночь) на

каждый расчетный случай. Результаты расчета в виде картины деформированного состояния кабины с распределением эквивалентных напряжений и графиков усилия и работы внешних сил показаны на рис. 9.

По результатам расчета можно видеть, что конструкция кабины удовлетворяет всем требованиям ROPS: энергия деформации кабины и усилие не ниже требуемых в каждом расчетном случае, а зона выживания при деформациях кабины не повреждена.

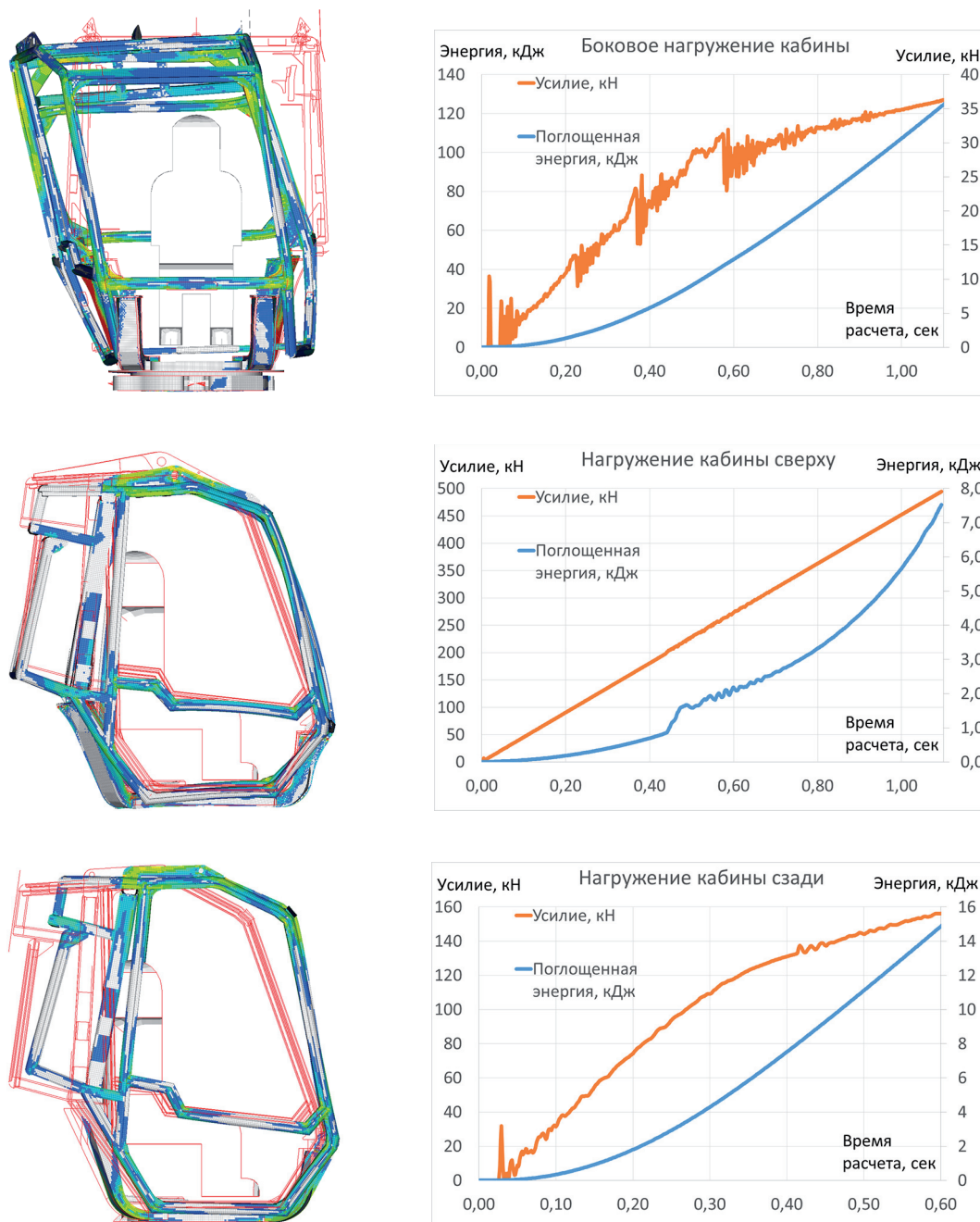


Рис. 9. Результаты поверочного расчета кабины на ROPS-нагрузки: показано деформированное состояние кабины под нагрузкой, цветом показано распределение эквивалентных напряжений по Мизесу, на графиках показаны значения нагружающего усилия и поглощенной энергии

Выводы

Окончательное подтверждение соответствия конструкции кабины требованиям ROPS при перевороте машины может быть получено только после сертификационных испытаний на натурном макете кабины по правилам методики испытаний, описанной в стандарте. Проведенные поверочные расчеты кабины, представленные в конце данной статьи, дают основание к допуску кабины к испытаниям с высокой вероятностью успешных испытаний.

Основным достоинством описанной методики двухстадийной оптимизации является возможность проведения такого проекторочного расчета, который дает весьма подробные и достаточно четкие указания конструктору о геометрических параметрах силовых элементов конструкции кабины и требуемых марок материалов. При этом показано, что применение данного метода помогает сохранить исходный дизайн, не вмешиваясь в изначальный замысел дизайнера, а также значительно сократить количество рассматриваемых вариантов конструкции, заранее отсеяв нежизнеспособные решения. Это особенно актуально, т.к. поверочные расчеты с использованием подробных конечно-элементных моделей требуют значительных вычислительных ресурсов компьютера, высокой трудоемкости переделки подробных конечно-элементных моделей в случае недостаточной прочности рассматриваемого варианта конструкции.

Литература

- ГОСТ ISO 8082-22014. Машины для леса самоходные. Лабораторные испытания устройств защиты при опрокидывании и эксплуатационные требования к ним.
- ГОСТ ISO 8083-2011. Машины для леса. Устройства защиты от падающих предметов.
- ГОСТ ISO 3164-2016. Машины землеройные. Лабораторные испытания по оценке устройств защиты. Требования к пространству, ограничивающему деформацию.
- Operator Protective Structures. Practice Notes. [Электронный ресурс] / IPENZ Engineers New Zealand. 2014 URL: https://www.engineeringnz.org/documents/91/Practice_Note_12_Operator_Protective_Structures.pdf
- Скобцов И.Г. Оценка несущей способности устройства защиты оператора лесопромышленного трактора с позиций механики разрушения. / Инженерный вестник Дона, 2015, № 2.
- P. Gore, R.B. Barjibhe. Design of protective structure of operator cabin against falling object (FOPS) / International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET) Vol. 3 Issue 4 March 2014, p. 228–236. ISSN: 2278-621X.
- J. Karliński, E. Rusiński, T. Smolnicki. Protective structures for construction and mining machine operators / Automation in Construction 17 (2008) p. 232–244.
- B. Clark. The behavior of rollover protective structures subjected to static and dynamic loading conditions. PhD dissertation. School of Civil Engineering Queensland University of Technology. 2005.
- Bendsoe M.P. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method / M.P. Bendsoe, N. Kikuchi // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. V. 7. P. 197–224.
- Комаров В.А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы // Онтология проектирования. 2017. Т. 7, № 2 (24). С. 191–206. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
- Rozvany G.I.N. A critical review of established methods of structural topology optimization // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2009. V. 37, no. 3. P. 217–237. DOI: 10.1007/s00158-007-0217-0
- Сысоева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций // Ученые записки ЦАГИ. 2011. Т. 42, № 2. С. 91–102.
- Вдовин Д.С., Котиев Г.О. Технология проектирования силовых деталей на примере вилки блокировки межосевого дифференциала многоосной колесной машины // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2014. № 8. С. 28–31.
- Вдовин Д.С., Прокопов В.С. Проектирование направляющего аппарата независимой подвески автомобиля с использованием метода топологической оптимизации. / Известия МГТУ «МАМИ», 2017, № 3 (33).
- Шабалин М.Л., Вдовин Д.С. Снижение требований к прочности материала подрамника грузового автомобиля с независимой подвеской путем топологической оптимизации конструктивно-силовой схемы. / Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 4 (30). С. 90–96.
- J.S. Sun, K.H. Lee, H.P. Lee. Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems. / Journal of Materials Processing Technology 105 (2000), pp. 110–118

References

1. GOST ISO 8082-2014. *Mashiny dlya lesa samohodnye. Laboratornye ispytaniya ustroystv zashchity pri oprokidyvanii i ehkspluatatsionnye trebovaniya k nim* [Self-propelled vehicles for forest. Laboratory tests of rollover protection devices and their operational requirements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2014. 9 p.
2. GOST ISO 8083-2011. *Mashiny dlya lesa. Ustroystva zashchity ot padayushchih predmetov* [Forest machines. Fall protection devices]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2014. 9 p.
3. GOST ISO 3164-2016. *Mashiny zemlerojnye. Laboratornye ispytaniya po ocenke ustroystv zashchity. Trebovaniya k prostranstvu, ograni-chivayushchemu deformatsiyu* [Earth-moving machines. Laboratory tests for the evaluation of protection devices. Space constraint requirements]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2016. 9 p.
4. Operator Protective Structures. Practice Notes. [EHlektronnyj resurs] / IPENZ Engineers New Zealand. 2014 URL: https://www.engineeringnz.org/documents/91/Practice_Note_12_Operator_Protective_Structures.pdf
5. Skobcov I.G. Estimation of the carrying capacity of the protection device of the operator of a timber industry tractor from the standpoint of fracture mechanics. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2015, No 2 (in Russ.).
6. P. Gore, R.B. Barjibhe. Design of protective structure of operator cabin against falling object (FOPS) / *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)* Vol. 3 Issue 4 March 2014, p. 228–236. ISSN: 2278-621X.
7. J. Karliński, E. Rusiński, T. Smolnicki. Protective structures for construction and mining machine operators / *Automation in Construction* 17 (2008) p. 232–244.
8. B. Clark. The behavior of rollover protective structures subjected to static and dynamic loading conditions. PhD dissertation. School of Civil Engineering Queensland University of Technology. 2005.
9. Bendsoe M.P. Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method / M.P. Bendsoe, N. Kikuchi // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1988. V. 7. P. 197–224.
10. Komarov V.A. Design of power additive structures: theoretical foundations. *Ontologiya proektirovaniya*. 2017. Vol. 7. No 2 (24), pp. 191–206 (in Russ.). DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.
11. Rozvany G.I.N. A critical review of established methods of structural topology optimization // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2009. V. 37, no. 3. P. 217–237. doi: 10.1007/s00158-007-0217-0.
12. Sysoeva V.V., Chedrik V. V. Algorithms for optimizing the topology of power structures. *Uchyonye zapiski CAGI*. 2011. Vol. 42. No 2, pp. 91–102 (in Russ.).
13. Vdovin D.S., Kotiev G.O. Technology of design of power parts on the example of a fork locking differential of a multi-axle wheeled vehicle. *Traktory i sel'skohozyajstvennyye mashiny*. 2014. No 8, pp. 28–31 (in Russ.).
14. Vdovin D.S., Prokopov V.S. Designing an independent vehicle suspension guide elements using a topological optimization method. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2017. No 3 (33) (in Russ.).
15. SHabolin M.L., Vdovin D.S. Reducing the requirements for the strength of the material of a sub-frame of a truck with independent suspension by means of topological optimization of the structural-power circuit. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2016. No 4 (30), pp. 90–96 (in Russ.).
16. J.S. Sun, K.H. Lee, H.P. Lee. Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems. / *Journal of Materials Processing Technology* 105 (2000) p. 110–118.

TOPOLOGY OPTIMIZATION IN ROPS-SAFE DESIGN PROCESS OF OPERATOR CABIN FOR FORESTRY, AGRICULTURAL AND CONSTRUCTION MACHINERY

Ph.D **D.C. Vdovin**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

vdovin@bmstu.ru

ROPS (roll over protective structure) and FOPS (falling objects protective structure) today are mandatory elements of every modern operator cabin for forestry, agricultural, construction and other machinery. This passive safety structures, integrated into cabin, can save life of the operator during rollover and heavy objects falling accident. Usually this structures consists of a supporting frame, capable of withstanding all the loads, which are occurring in machine accident. These elements, besides their main purpose, should satisfy additional requirements: not to cut operator visibility range, allow wide doorway for working and emergency doors and so on. Also initial design style solution restricts possible arrangement for load-bearing elements of the ROPS.

Last decades in ROPS design process engineers extensively use explicit finite element technique to predict behavior and fitness of the ROPS structure by numerical simulation of rollover loads. This greatly reduce the costs of experiments, allowing to exclude dozens and hundreds of poor solutions at early stage of design without building expensive prototypes. However, uneven search of construction solution, even with support of numerical simulations, can be very time consuming. This work describes two-stage optimization technique, including topology and parametric optimization, which significantly reduce amount of structure variants, analyzed in ROPS design process. Therefore, optimization is an alternative to convenient way of inheritable and intuitive way of design.

Topology optimization method with specially built finite element model of the forestry machine cabin used to find the most beneficial loadpaths for ROPS load bearing. Then, simplified shell-beam finite element model built, using results of topology optimization, and a parametric optimization technique used to find optimal cross-sections dimensions for main load-bearing elements of the protection structure. Finally, detailed shell model of the whole cabin elaborated and verified using standard explicit finite element simulations of all ROPS loadcases. Final simulations proved the strength of the designed ROPS structure and give confidence in successful experiment tests.

The main advantages of the described two-stage optimization technique are significant reduction of considered variants due to exclude of inappropriate solution in advance, initial design style solution is not changed.

Keywords: vehicle operator cabin, safety, ROPS, topology optimization, finite element analysis.