

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630455>

Оригинальное исследование



# Топологическая оптимизация рабочего оборудования фронтального погрузчика

Ю.Г. Попов

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Топологическая оптимизация широко применяется в авиастроении и архитектуре, но все ещё ограничено используется в тяжёлом машиностроении. Вместе с тем, раскрой металла для производства рабочих органов, рам и других конструкций повсеместно осуществляется методом плазменной резки на станках с числовым программным управлением. Указанное обстоятельство позволяет получать плоские детали практически любой сложности. В свою очередь, это делает возможным использование методов топологической оптимизации без необходимости применять аддитивные технологии для создания трёхмерных конструкций.

**Цель работы** — снижение массы силовых деталей рабочего оборудования фронтального погрузчика без потери жёсткости и прочности, по сравнению с традиционными конструкциями и изучение возможностей топологической оптимизации для выполнения поставленной задачи.

**Методы.** В качестве базовой машины использовался погрузчик DM-30. Рабочее оборудование машины преобразовывалось в набор проектных объёмов плоской формы, к которым применялись методы топологической оптимизации пакета Autodesk Inventor Professional (AIP). Поскольку металлоконструкция рабочего оборудования испытывает в процессе эксплуатации переменные нагрузки, действующие в разных направлениях, был использован метод последовательной генерации форм деталей для каждого расчётного положения с последующим синтезом всех форм в один объект. Силы, действующие на элементы рабочего оборудования, определялись при помощи динамического моделирования расчётных положений для базовой машины, что позволило рассмотреть большинство рабочих ситуаций.

**Результаты.** В итоге массу рабочего оборудования фронтального погрузчика удалось снизить на 36%, при сохранении прочностных характеристик.

**Заключение.** Предложенная методика формирования оптимизированной металлоконструкции позволяет использовать простые модули топологической оптимизации и получать до 40% менее металлоёмкие пространственные конструкции.

**Ключевые слова:** структурная оптимизация; динамический анализ; расчётные положения; твёрдотельная модель; конечно-элементный анализ.

## Как цитировать:

Попов Ю.Г. Топологическая оптимизация рабочего оборудования фронтального погрузчика // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 6. С. 713–722.  
DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630455>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630455>

Original Study Article

# Topology optimization of the front loader's working equipment

Yury G. Popov

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Topological optimization is widely used in aircraft construction and architecture, but is still of limited use in heavy mechanical engineering. At the same time, the metal cutting for production of working bodies, frames and other structures is often carried out by plasma cutters with computer numerical control. This makes it possible to produce flat parts of almost any complexity. Consequently, there is a field for using the topology optimization methods with no need to use additive technologies to create three-dimensional structures.

**OBJECTIVE:** Weight reduction of the structural components of the front loader's working equipment without loss of rigidity and strength, as compared with traditional designs; exploration of the capabilities of topological optimization for solving this problem.

**METHODS:** The DM-30 loader was used as the base machine. Its work equipment was converted into a set of flat-shaped design volumes, to which the topological optimization methods of the Autodesk Inventor Professional (AIP) software package were applied. As the steel structure of the working equipment is subject to load in different directions during operation, a method of sequential generation of parts' shapes for each design position and synthesis of all the shapes into a single object was used. The forces acting on the components of the working equipment were determined with dynamic simulation of the design positions for the base machine which made it possible to study the majority of operation cases.

**RESULTS:** As a result, the weight of the front loader was reduced by 36% while sustaining the same strength characteristics.

**CONCLUSIONS:** The proposed method of formation the optimized steel structure is capable of using simple topological optimization modules and obtaining up to 40% less metal-consuming spatial structures.

**Keywords:** structural optimization; dynamic analysis; design positions; rigid-body model; finite element analysis.

## To cite this article:

Popov YuG. Topology optimization of the front loader's working equipment. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(6):713–722.

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-630455>

Received: 18.04.2024

Accepted: 29.11.2024

Published online: 19.01.2025

## ОБОСНОВАНИЕ

Структурная оптимизация в общем случае — это определение наилучшей, с точки зрения целевой функции, конструкции, с учетом имеющихся ограничений и условий. Решение таких задач всегда было неотъемлемой частью инженерного проектирования и в значительной мере определяло внешний вид, параметры, технологические особенности и эксплуатационные характеристики архитектурных сооружений, машин, механизмов.

Наиболее нагляден исторический пример структурной оптимизации мостов. Мост Аркадики (рис. 1а) в Греции отлично демонстрирует способ решения задачи «в лоб». Построен из массивных валунов [1], которые занимают 90% рабочего объема сооружения. Водопропускной канал минимального размера. Колоссальный запас прочности конструкции позволил этому мосту пережить более 3000 лет эксплуатации и выдержать несколько землетрясений.

Римские арочные мосты (см. рис. 1б) за счёт своей формы позволили уменьшить требуемое для строительства количество материала в несколько раз, снизить общий вес конструкции, при этом не потеряв в надёжности. Наконец, новые материалы, технологии строительства и методы проектирования привели к появлению железобетонных мостов (см. рис. 1с). Разумеется, это далеко не полный перечень вех мостостроительства, но хороший пример развития конструкций одинакового назначения и сходного типа (арочный мост),двигающийся по пути снижения общего веса и материалоемкости, при условии сохранения общей прочности и надёжности сооружения.

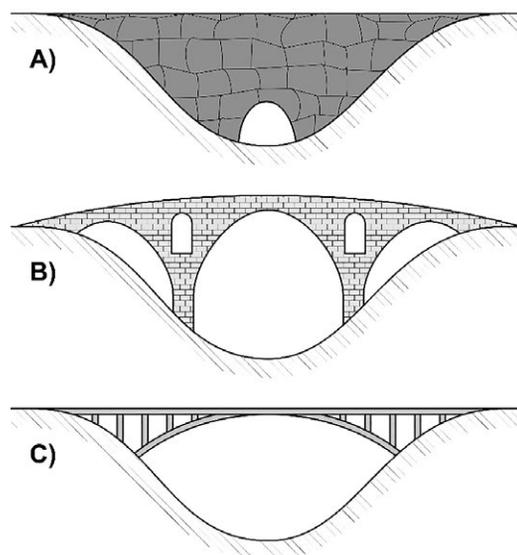
В структурной оптимизации принято выделять три типа задач [2]:

- 1) Оптимизация размеров (рис. 2а). Форма и в целом вид конструкции определён, а переменными являются определённые размеры, например, габариты, размеры поперечных сечений элементов, диаметры отверстий и т.д.
- 2) Оптимизация формы (рис. 2б). При этом определяется вид уже существующих в конструкции граничных кривых или поверхностей [3]. Переменными оптимизации являются координаты точек, определяющих эти кривые или поверхности. При этом само количество поверхностей, границ и отверстий остаётся неизменно.
- 3) Оптимизация топологии (рис. 2с) подразумевает возможность создания новых поверхностей, границ, отверстий и т.д. в пределах проектной области, т.е. полностью определить форму и структуру объекта в зависимости от выбранных граничных условий [4].

Третий тип оптимизации является наиболее комплексным решением, позволяющим получить наилучшие возможные варианты, с точки зрения массы, прочности и надёжности конструкций [5].

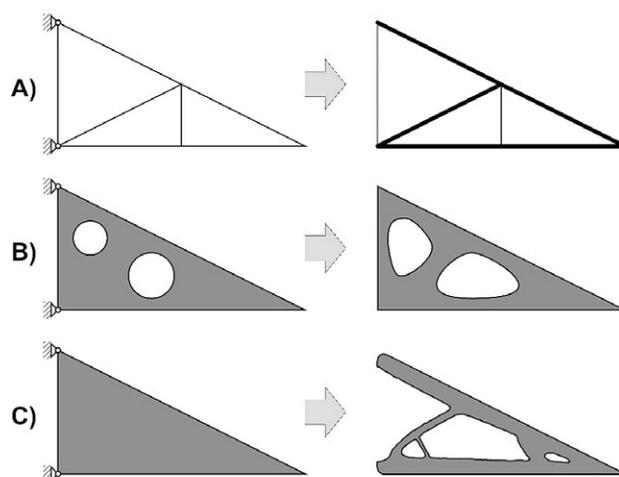
Топологическая оптимизация уже активно применяется в авиастроении и ракетостроении, используется

в архитектуре, но остаётся достаточно новой и малоиспользуемой технологией в «консервативных» отраслях промышленности [6]. Зачастую это связано с излишним усложнением задач. Исследователи и разработчики, демонстрируя возможности топологической оптимизации, приводят наиболее сложные трёхмерные модели, которые можно получить только с использованием продвинутых аддитивных технологий. Между тем в производстве строительных, дорожных и подъёмно-транспортных машин уже повсеместно применяется



**Рис. 1.** Структурная оптимизация на примере мостов: а — мост Аркадики (ок. 1300—1190 гг. до н. э.); б — римский мост; с — железобетонный арочный мост.

**Fig. 1.** Structural optimization using the example of bridges: а — Arcadiko bridge (c. 1300-1190 BC); б — Roman bridge; с — reinforced concrete arch bridge.



**Рис. 2.** Виды структурной оптимизации: а — оптимизация размеров; б — оптимизация формы; с — оптимизация топологии.

**Fig. 2.** Types of structural optimization: а — size optimization; б — shape optimization; с — topology optimization.

плазменная резка с числовым программным управлением, позволяющая создавать плоские детали практически любой сложности.

Крупные производители строительной техники, такие как Caterpillar, Volvo, XCMG начали применять двухмерную оптимизацию формы отверстий для стрел фронтальных погрузчиков. Однако это делается только для наиболее крупных моделей и с очень большим запасом прочности и надёжности. Между тем возможности данной технологии гораздо шире и для оценки этих возможностей в исследовательских (и учебных) целях была проведена оптимизация топологии стрелы и коромысла фронтального погрузчика средней грузоподъёмности.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью исследования являлось проектирование стрелы и коромысла фронтального погрузчика меньшей, по сравнению с базовой моделью, массы средствами топологической оптимизации. При этом важным условием являлось возможность создания итоговой конструкции из плоских деталей, полученных с помощью плазменной или лазерной резки. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) Определение расчётных положений и действующих на механизм сил.
- 2) Определение проектных объёмов деталей, сохраняемых областей, условий закрепления и приложения нагрузок.
- 3) Получение деталей средствами генератора форм AIP.
- 4) Формирование из оптимизированных деталей итоговой сборки и проверка её на прочность методом конечных элементов.

## МЕТОДЫ

В качестве базовой модели был выбран погрузчик DM-30 «Волжанин», грузоподъёмностью 3400 кг. Объектом оптимизации является металлоконструкция стрелы и коромысла рычажной системы. В качестве инструмента проектирования и расчётов использовался Autodesk Inventor Professional 2020 (AIP). Целью оптимизации является снижение массы рабочего оборудования при условии сохранения прочности под действием расчётных нагрузок.

При составлении плана модернизации были определены следующие условия:

- 1) Расположение и форма всех шарниров стрелы и коромысла остаются неизменными.
- 2) Оптимизация проводится только для плоских деталей, пригодных для изготовления методом плазменной резки. Проектный объём при этом должен обеспечивать такие же рабочие движения рычажной системы, как и у базовой модели погрузчика.

- 3) В связи с этим также делается допущение, что каждая оптимизируемая деталь воспринимает только силы, приведённые в её плоскость. Изгибающие моменты в поперечной плоскости воспринимаются деталями, соединяемыми с рассматриваемой.
- 4) Итоговая конструкция должна строиться с учетом многообразия нагрузок, возникающих при эксплуатации погрузчика. Значительную сложность при решении задачи оптимизации представляет как раз расчёт всех действующих на рабочее оборудование сил. В разных рабочих ситуациях их величина и направления меняется в широких пределах, при этом полнота учёта силовых факторов будет напрямую влиять на результат оптимизации.

В AIP для топологической оптимизации используется инструмент «Генератор форм», использующий алгоритм, основанный на методе Solid Isotropic Material Penalization (SIMP). Одним из серьёзных ограничений решателя в AIP является невозможность проведения топологической оптимизации, учитывающей переменные силы. Расчёт выполняется только для одной конкретной ситуации с заданными нагрузками и закреплениями. Но в реальных машинах силы, действующие на элементы рабочего оборудования, в зависимости от расчётного положения изменяются как по направлению, так и по величине.

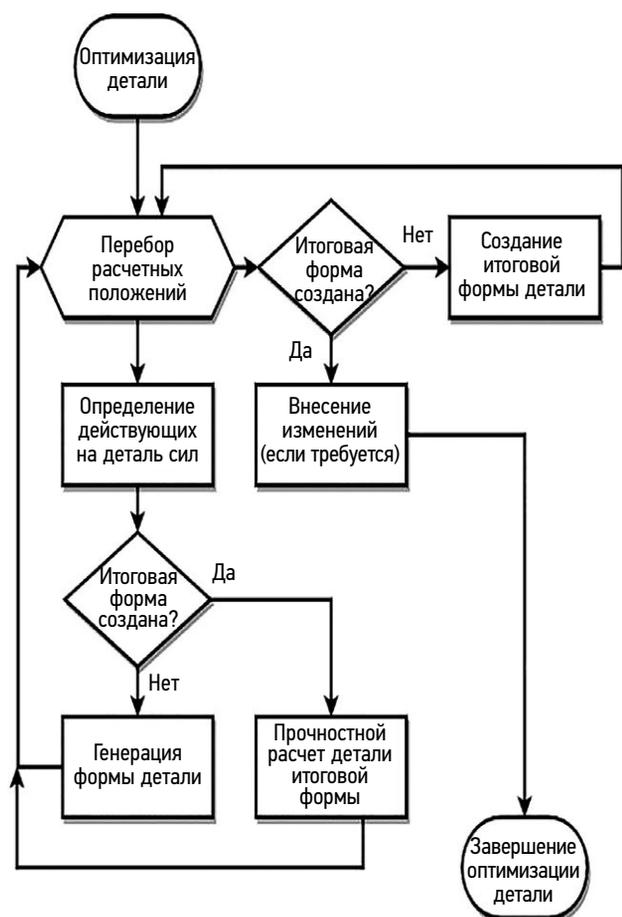
В качестве решения предлагается последовательное создание форм деталей для каждой расчётной ситуации и синтез итоговой формы, как комбинации всех вариантов. После этого деталь проверяется на прочность во всех расчётных положениях (рис. 3).

Для определения всех действующих на элементы конструкции сил использовался модуль динамического моделирования. Так как все шарниры сочленения остаются на месте, то форма стрелы и коромысла не имеет значения и расчёт сил можно проводить для исходного вида рабочего оборудования. При этом учитывалась жёсткость соединений, ударные и инерционные нагрузки. Были рассмотрены следующие расчётные положения:

Столкновение с жёстким препятствием краем ковша (рис. 4). Расчётная сила определялась по напорному и динамическому усилию [7] и составила 101,63 кН в горизонтальной проекции, с приложением к краю опущенного на уровень опорной поверхности ковша.

Отрыв от поверхности земли максимального (при условии невывешивания погрузчика на передних колёсах) груза (рис. 5a). Сила, величиной 33,32 кН прикладывается к краю ковша. Положение рычажной системы выбрано таким образом, чтобы реакция в шарнире сочленения коромысла и тяги была максимальной.

Столкновение с абсолютно жёстким препятствием при транспортировке номинального груза (рис. 5b). Сила рассчитывалась также по напорному и динамическому усилию для гружёного погрузчика и составила 121 кН в точке приложения.



**Рис. 3.** Блок-схема последовательности оптимизации топологии детали.

**Fig. 3.** Block diagram of a sequence of topology optimization of a part.

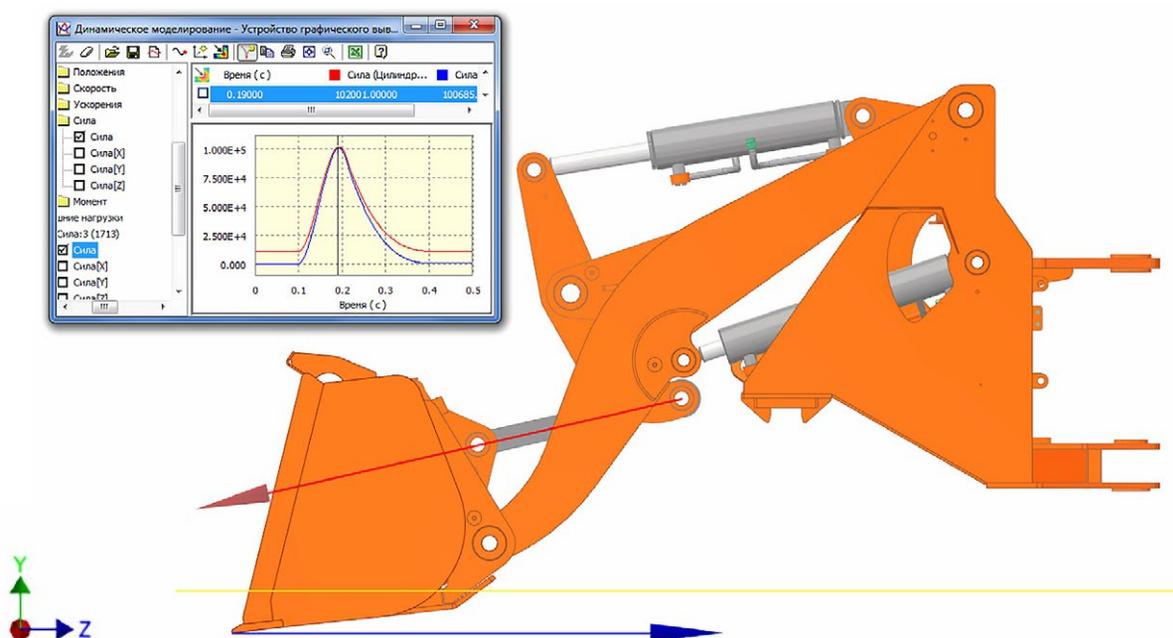
Сброс номинального груза с опрокидыванием ковша (рис. 5с). В данном случае проводилось динамическое моделирование опрокидывания ковша и определения возникающих при этом динамических нагрузок на шарниры сочленения рабочего оборудования.

Столкновение с абсолютно жёстким препятствием краем поднятого ковша (рис. 5d). Сила, величиной 101,63 кН в горизонтальной проекции прикладывается к верхнему краю ковша поднятого рабочего оборудования.

Коромысло погрузчика симметрично относительно продольной плоскости и в этой же плоскости воспринимает все силы. Следовательно, нагрузку можно считать равномерно распределяющейся между двумя плоскими боковинами. Тогда оптимизацию можно проводить для одной детали, прикладывая к ней половину приходящихся на всё коромысло сил (рис. 6).

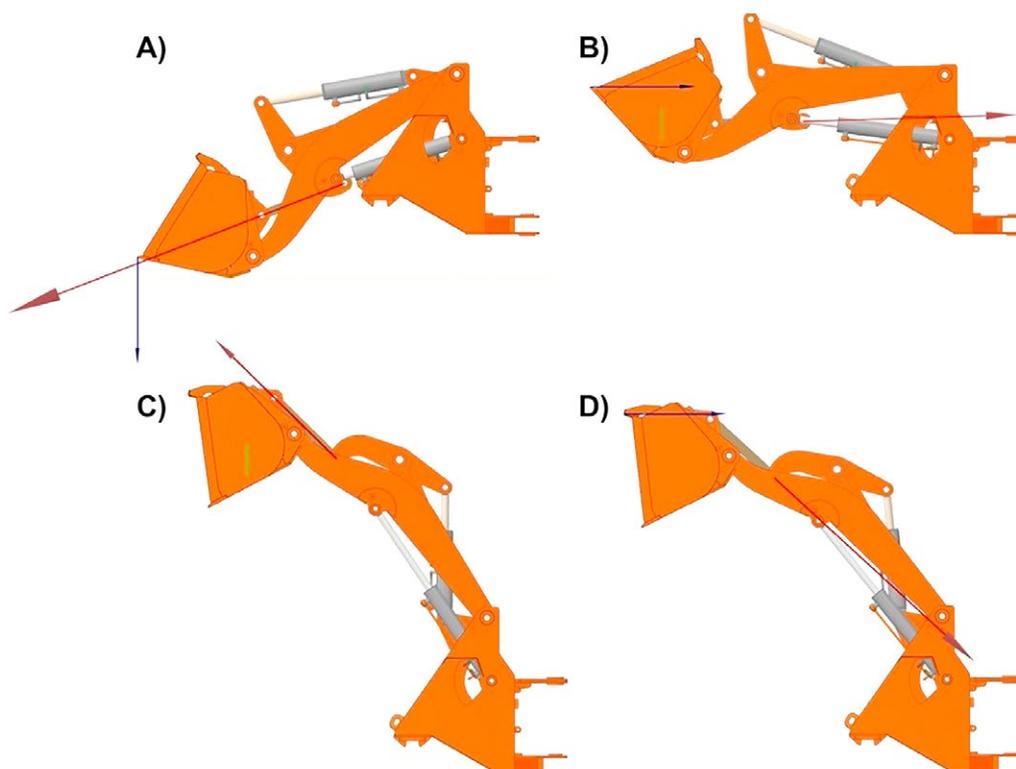
Сохраняемые в проектном объёме области, не изменяемые при оптимизации формы, назначены местам крепления коромысла к стреле, гидроцилиндру опрокидывания ковша и к тяге ковша.

Стрела воспринимает нагрузки в разных плоскостях, поэтому вся металлоконструкция была составлена из трёх взаимно-перпендикулярных частей (рис. 7). Две боковины стрелы симметричны и воспринимают продольные нагрузки. Горизонтальная пластина препятствует складыванию стрелы в боковой плоскости, а также служит опорой для крепления коромысла. Вертикальная пластина обеспечивает жёсткость всей конструкции и препятствует перекосу боковин.



**Рис. 4.** Модуль динамического моделирования AIP. Синей стрелкой показана внешняя сила, красной — реакция в выбранном соединении.

**Fig. 4.** The AIP dynamic simulation module. The blue arrow marks the external force, the red arrow marks the reaction in the selected joint.



**Рис. 5.** Расчётные положения в модуле динамического моделирования AIP.

**Fig. 5.** Design positions in the AIP dynamic simulation module.



**Рис. 6.** Коромысло в сборе и подготовленная для расчёта боковина.

**Fig. 6.** The rocker arm assembly and the sidewall prepared for calculation.

Проектные объёмы построены таким образом, чтобы обеспечивать такие же рабочие движения всей рычажной системы, что и у базовой конструкции.

Соединения между деталями считаются абсолютно жёсткими, нагрузки для генератора форм AIP прикладываются в соответствии с полученными при динамическом моделировании силами в соединениях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью инструмента «генератор форм» в AIP была проведена оптимизация каждой детали во всех расчётных положениях поочередно. После этого создавалась итоговая деталь, как комбинация всех вариантов (рис. 8). Помимо сохраняемых областей размещения шарниров в итоговой форме боковин коромысла также были учтены места их соединения между собой поперечными рёбрами.

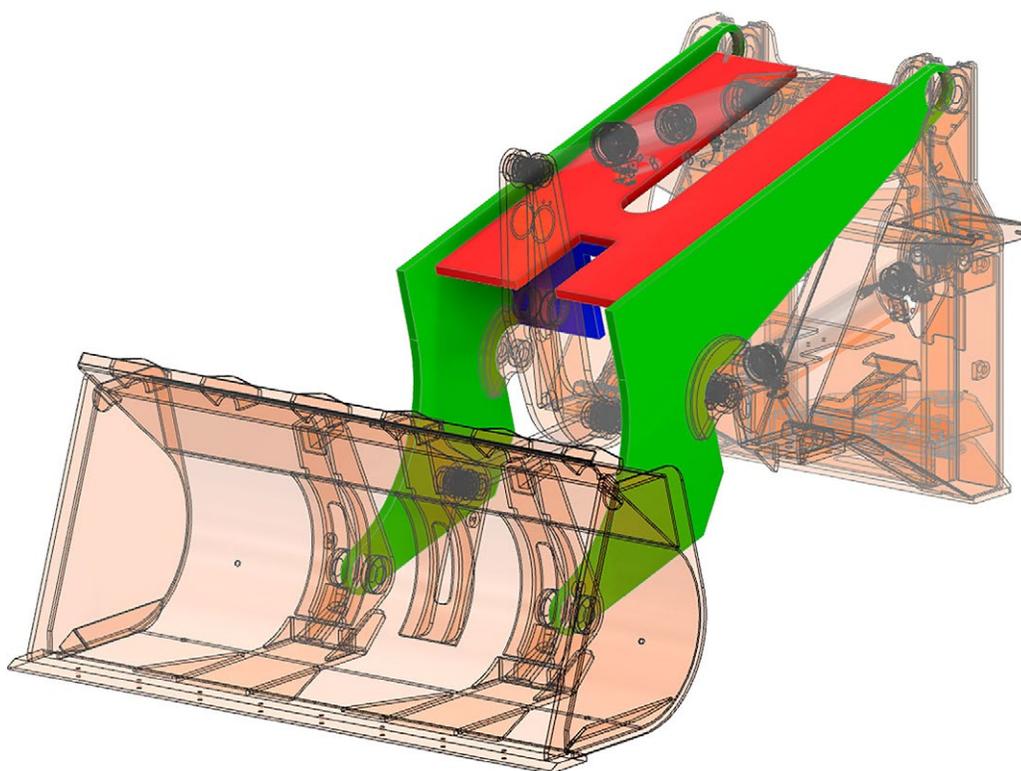
Полученные итоговые формы были проверены на прочность во всех расчётных положениях (рис. 9).

После генерации форм и проверки всех деталей по отдельности они были соединены в соответствующие сборки, из которых был сформирован итоговый вид рабочего оборудования погрузчика (см. рис. 10).

В результате оптимизации масса рабочего оборудования снизилась на 36% (без учёта веса ковша и гидроцилиндров). При этом благодаря итоговой форме конструкции, высвобождаемый объём металла может использоваться для изготовления других элементов машины.

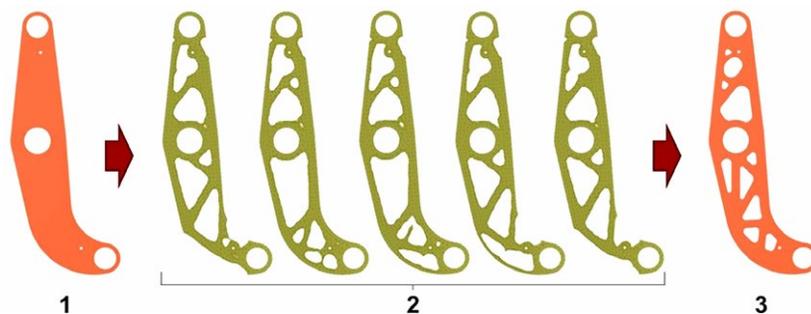
Для оценки влияния оптимизации на прочностные характеристики также проводилась проверка рабочего оборудования в сборе для каждого расчётного положения (рис. 11).

Несмотря на существенное сокращение массы рабочего оборудования, проверочный расчет в сборе показал в ряде положений недостаточный запас прочности. Минимальное значение составило 1,12. Это говорит



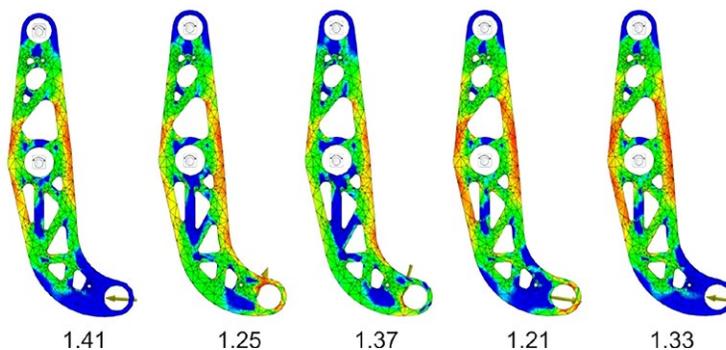
**Рис. 7.** Проектные объёмы деталей, образующих металлоконструкцию стрелы. Остальные части рабочего оборудования показаны прозрачными.

**Fig. 7.** Design volumes of the parts forming the steel structure of the boom. The other parts of the working equipment are shown transparent.



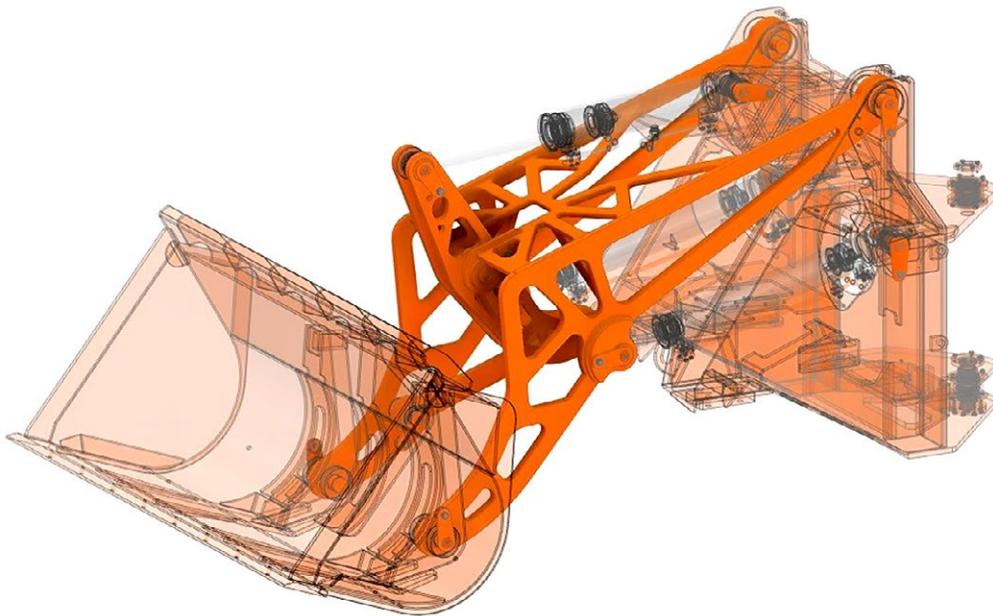
**Рис. 8.** Оптимизация формы коромысла: 1 — исходная форма; 2 — формы для каждого расчётного положения; 3 — итоговая форма.

**Fig. 8.** Optimization of the rocker arm shape: 1 — the initial shape; 2 — shapes for each design position; 3 — the final shape.



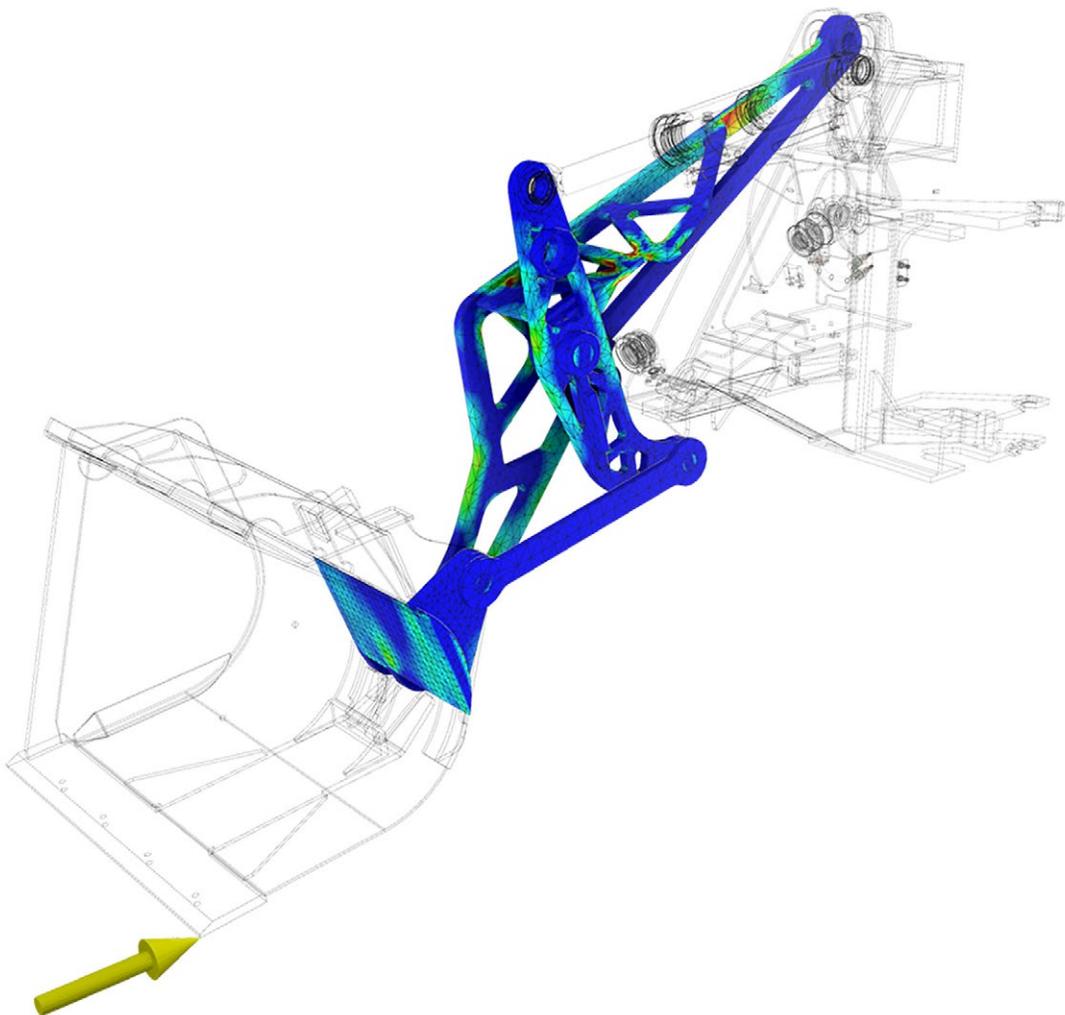
**Рис. 9.** Проверочный расчёт. Цифрами обозначено минимальное значение коэффициента запаса прочности.

**Fig. 9.** The revising calculation. The numbers indicate the minimum safety factor value.



**Рис. 10.** Рабочее оборудование погрузчика после оптимизации.

**Fig. 10.** The working equipment of the loader after optimization.



**Рис. 11.** Проверочный расчёт рабочего оборудования в сборе. Модель рассечена вдоль плоскости симметрии.

**Fig. 11.** The revising calculation of the assembly of the working equipment. The model is splitted along the symmetry plane.

о том, что, во-первых, требуется, как минимум, ещё одна итерация проектирования для усиления проблемных областей. Во-вторых, сама конструкция, возможно, не оптимально воспринимает нагрузки. При формировании проектных объёмов деталей, составляющих стрелу погрузчика, они были сделаны взаимно перпендикулярными (см. рис. 7), в то время как размещение вертикальной пластины под острым углом к горизонтальной могло бы способствовать усилению конструкции.

Возможно, оптимальным методом определения геометрии стрелы и взаиморасположения её деталей было бы объявление проектным объёмом большой трёхмерной области. При этом в результате оптимизации будет получена конечно-элементная сетка, опираясь на которую можно разделить полученный объект на плоские детали и далее проводить расчёт форм уже для них, по предложенной методике (см. рис. 3).

## ОБСУЖДЕНИЕ

В известной литературе имеется весьма ограниченная информация, связанная с топологической оптимизацией формы рабочего оборудования погрузчика, поэтому к дискуссии предлагаются общие подходы, применимые к различным задачам:

Разделение конструкции на локальные части с последующим приведением к ним опор и нагрузок позволяет не только рассмотреть множество различных вариаций форм элементов, как это продемонстрировано в работе [8], но и существенно уменьшить конечно-элементную сетку и сократить общее время расчёта. Это, в свою очередь, делает выполнимым перебор большого числа вариантов конструкций, особенно при расчёте в автоматизированном режиме.

Определение проектного объёма для оптимизации пока не имеет однозначных рекомендаций. С одной стороны, использование максимально возможного, в рамках граничных условий, пространства позволяет получить лучшие с точки зрения целевой функции решения [9, 10]. Однако при этом кратно увеличивается сложность расчёта. Кроме того, при наличии ограничений по форме детали, пространственную модель придётся дополнительно преобразовывать, вновь определять действующие нагрузки и повторять расчёт [11].

Применённый в данной работе способ получения оптимизированной детали, воспринимающей переменные нагрузки достаточно субъективен. Конструктор самостоятельно создаёт итоговую деталь, опираясь на формы, полученные с помощью топологической оптимизации. Такой подход достаточно легко реализуем для двумерных структур и одновременно решает проблему сглаживания итоговой формы, сформулированную в работе [12]. Одновременно с этим усиливается «человеческий фактор» в процессе проектирования и оптимизации.

Использование весовых коэффициентов [13] при топологической оптимизации конструкций, испытывающих переменные нагрузки, может снизить влияние «человеческого фактора» и улучшить результаты. Вместе с тем, чем больше будет выигрыш в весе конструкции, тем сильнее это скажется на усталостной долговечности [14].

Применение топологической оптимизации только к плоским деталям позволяет избежать проблем с технологичностью и применения аддитивных технологий при производстве, описанных в работах [15, 16]. В свою очередь это позволяет существенно расширить область применения топологической оптимизации в машиностроении. Кроме того, результат оптимизации будет несколько более скромным, чем при использовании объёмных литых или «выращенных» объёмных деталей [17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет получать оптимизированные металлоконструкции рабочего оборудования, для изготовления которых потом не потребуется использования сложных аддитивных технологий. При этом экономия металла достигает 40% от массы базового оборудования при сохранении жёсткости и прочности конструкции. Сам процесс проектирования может осуществляться с помощью достаточно простых модулей топологической оптимизации без привлечения систем полноценного генеративного дизайна. Большая часть операций может быть автоматизирована, включая выбор проектных объёмов и определение действующих на детали сил, что делает возможным создание отдельного расчётного модуля, преобразующего пространственную конструкцию в набор плоских деталей оптимальной формы. Для более эффективного использования материала при проектировании также осуществляется подбор усиления, вспомогательных деталей и других элементов металлоконструкции машины таким образом, чтобы можно было использовать высвобождаемый материал.

Отдельно стоит изучить вопрос создания оптимизированных деталей, работающих при переменных нагрузках, с учётом весовых коэффициентов. Это может существенно повысить надёжность конструкции. Также немаловажным является изучение усталостной прочности оптимизированного рабочего оборудования. Фронтальный погрузчик — это машина циклического действия, работающая при значительных нагрузках, поэтому одного расчёта на прочность по напряжениям недостаточно для утверждения работоспособности конструкции.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных

с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Competing interests.** The author declares that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Mee C. Mycenaean Fortifications, Highways, Dams and Canals. By R. Hope Simpson and D. K. Hagel. *Am. J. Archaeol.* 2007;111(2):374–375. doi: 10.1086/AJS40037280
2. Ghabraie K. Applications of Topology Optimization Techniques in Seismic Design of Structure. In: *Structural Seismic Design Optimization and Earthquake Engineering*. IGI Global; 2012:232–268. doi: 10.4018/978-1-4666-1640-0.ch010
3. Yuksel O. An overview on topology optimization methods employed in structural engineering. *Kirklareli Univ. J. Eng. Sci.* 2019;159-175. doi: 10.34186/klujes.606666
4. Bendsoe MP, Sigmund O. *Topology Optimization*. Springer Berlin Heidelberg; 2004. doi: 10.1007/978-3-662-05086-6
5. Meng L., Zhang W., Quan D., et al. From Topology Optimization Design to Additive Manufacturing: Today's Success and Tomorrow's Roadmap. *Arch Comput Methods Eng.* 2020;27(3):805–830. doi: 10.1007/s11831-019-09331-1
6. Turner C, Gordon B, Mansfield N, Sayah A. Computer-Aided Design (CAD) Trends in Manufacturing for 2022. Technical report, 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.11813.78566
7. Boyarkina I.V. *Technological mechanics of single-bucket front-end loaders*. Omsk: SibADI; 2011. (In Russ.)
8. Tsavdaridis KD, Kingman JJ, Toropov V V. Application of structural topology optimisation to perforated steel beams. *Comput Struct.* 2015;158:108–123. doi: 10.1016/j.compstruc.2015.05.004
9. Tyflopoulos E, Steinert M. Messing with boundaries — quantifying the potential loss by pre-set parameters in topology optimization. *Procedia CIRP.* 2019;84:979–985. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.307
10. Tyflopoulos E, Tollnes FD, Steinert M, et al. State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs. In: *DS 91 Proc Nord 2018, Linköping, Sweden, 14th–17th August 2018*. Linköping, 2018.
11. Barroqueiro B, Andrade-Campos A, Valente RAF. Designing Self Supported SLM Structures via Topology Optimization. *J Manuf Mater Process.* 2019;3(3):68. doi: 10.3390/jmmp3030068
12. Fiebig S., Sellschopp J., Manz H., et al. Future challenges for topology optimization for the us-age in automotive lightweight design technologies. In: *Proc. of 11th world congress on structural and multidisciplinary optimization, Sydney, Australia*. Sydney; 2015;142.
13. Li Y, Yang Q, Chang T, Qin T, et al. Multi-load cases topological optimization by weighted sum method based on load case severity degree and ideality. *Adv Mech Eng.* 2020;12(8). doi: 10.1177/1687814020947510
14. Oest J, Lund E. Topology optimization with finite-life fatigue constraints. *Struct Multidiscip Optim.* 2017;56(5):1045–1059. doi: 10.1007/s00158-017-1701-9
15. Ribeiro TP, Bernardo LFA, Andrade JMA. Topology Optimisation in Structural Steel Design for Additive Manufacturing. *Appl Sci.* 2021;11(5):2112. doi: 10.3390/app11052112
16. ZHU J, ZHOU H, WANG C, et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese J Aeronaut.* 2021;34(1):91–110. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020
17. Frantsuzov AA, Shapovalov YI, Vdovin DS. Topology optimization for lifting appliances design. *Univ proceedings Volga Reg Tech Sci.* 2017;42(2):99–108. (In Russ.) doi: 10.21685/2072-3059-2017-2-9

## ОБ АВТОРЕ

**Попов Юрий Германович,**

канд. техн. наук,

доцент кафедры «Строительные и дорожные машины»;

адрес: Россия, 150999, Ярославль, Московский пр-кт, д. 88;

ORCID: 0000-0002-7594-6234;

eLibrary SPIN: 7378-0410;

e-mail: popovyug@ystu.ru

## AUTHOR'S INFO

**Yury G. Popov,**

Cand. Sci. (Engineering),

Associate Professor of the Construction and Road Machinery Department;

address: 88 Moskovsky ave, Yaroslavl, Russia, 150999;

ORCID: 0000-0002-7594-6234;

eLibrary SPIN: 7378-0410;

e-mail: popovyug@ystu.ru