

УДК 539.3

А. Д. ЧЕПУРНОЙ, доктор технических наук, УК «РэйлТрансХолдинг», г. Москва; В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, С. В. МАКЕЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; А. В. ЛИТВИНЕНКО, доктор технических наук, Р. И. ШЕЙЧЕНКО, Р. В. ГРАБОРОВ, УК «РэйлТрансХолдинг», г. Москва; Н. А. ТКАЧУК, доктор технических наук, М. А. БОНДАРЕНКО, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Предложен новый подход для решения задач анализа и синтеза сложных пространственных тонкостенных конструкций, который базируется на обобщенном параметрическом моделировании сложных механических систем. В качестве обобщенных параметров выступают структура, проектно-технологические решения этих конструкций, конструктивные параметры и эксплуатационные режимы. При этом обеспечивается и решение задач единичного анализа, и многовариантных исследований, и обоснования рациональных проектно-технологических решений. Кроме того, обоснованы параметры конечно-элементных моделей для обеспечения точности расчета напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Также возможно моделирование граничных условий и усилий нагружения не только для одной, но и для ряда однотипных конструкций. В результате создается инструмент для оперативного и точного решения всей совокупности задач обоснования проектных решений для сложных пространственных тонкостенных конструкций по критериям прочности и жесткости.

Введение. При проектных разработках новых изделий зачастую действуют нормы и требования, предписывающие объем и номенклатуру расчетных исследований и натурных испытаний, которым они подвергаются для удовлетворения комплекса установленных требований. Так, при создании подвижного состава железнодорожного транспорта, например грузовых вагонов, действует целый ряд нормативов [1, 2], ограничивающих ходовые, динамические, прочностные, жесткостные и другие характеристики. Соответственно, при проектировании каждого типа конструкции для подвижного состава разрабатываются программы и методики испытаний, через которые «пропускаются» либо проектные модели, либо опытные экземпляры. Эти документы, в свою очередь, основываются на соответствующих нормах и адаптируются к той или иной конкретной конструкции. Таким образом, из однотипных общих требований к группе конструкций порождаются множественные конкретные методики испытаний.

С одной стороны, естественным следствием из анализа результатов испытаний близких по конструкции подвижных составов (например, модификаций вагонов с близкими конструктивными решениями) следует и схожесть характеристик, которые обосновываются в ходе этих испытаний. С другой стороны, ряд нормативных требований «привязаны» к ограничениям и, соответственно, неизменны от объекта к объекту (например, скоростной режим); другие требования определяются либо конструкцией изделия (масса, размеры), либо техническими требованиями (грузоподъемность), а значит, пропорциональных (каждый в той или иной мере) некоторым характеристикам изделия, условно принимаемого в качестве номинального из определенной группы или класса.

Кроме того, подвижной состав представляет собой пространственные тонкостенные конструкции, для которых в ряде работ [3–5] установлена справедливость близкого к линейному закону изменения прочностных и жесткостных характеристик от варьируемых параметров. В дополнение, в ряде публикаций [6–8] изложен

общий подход к идентификации параметров широкого множества моделей исследуемых объектов. Из этого следует, что сегодня существует множество разработок, которые направлены на решение тех или иных частных проектно-исследовательских задач. Но в то же время отсутствует общий подход к решению проблемы обоснования проектно-технологических решений тонкостенных машиностроительных конструкций при наличии нормативно устанавливаемых требований и объема испытаний. Решению этой проблемы и посвящена данная работа.

Общая постановка проблемы. Формирование общей постановки проблемы основано на теоретических разработках, которые дают возможность оперировать с различными видами информации. В частности, для этих целей наиболее целесообразно использовать метод обобщенного параметрического моделирования [6], в соответствии с которым все виды факторов, функций, зависимостей, распределений, структур и т. п. трактуются как обобщенные параметры. Это очень важное свойство, предоставляющее инструмент варьирования, изменения, определения, оптимизации одной части обобщенных параметров при фиксированной или ограниченной части – других. Соответственно, этот универсальный метод необходимо адаптировать к решению проблемы обоснования проектно-технологических решений тонкостенных машиностроительных конструкций при наличии нормативно-установленных требований к характеристикам и объему испытаний. В качестве примера в статье анализируются грузовые вагоны, а также другие виды подвижного состава.

В операторном виде процессы и состояния проектируемых конструкций записываются в виде

$$L P, U, F, t = 0, \quad (1)$$

где L – оператор, соответствующий исследуемым процессам или состояниям; $P = p_1, p_2, \dots, p_{N_p}$ – массив обобщенных параметров, идентифицирующих исследуемый

объект; $U = u_1, u_2, \dots, u_{N_U}$ – массив переменных, описывающих временные и пространственные распределения физических величин, отражающих реализуемые в исследуемых объектах процессы и состояния в ходе изготовления и эксплуатации; $F = f_1, f_2, \dots, f_{N_F}$ – массив нагрузок (внешних и внутренних), действующих на исследуемый объект; t – время или иной параметр, описывающий эволюцию состояния исследуемого объекта.

В дальнейшем в качестве оператора L рассматриваются соотношения теории упругости, пластин, стержней и оболочек [9–11].

В качестве переменных состояния выступают, например, перемещения, напряжения, деформации. Так, если конструкция содержит ряд пространственных компонент с существенно неоднородным напряженно-деформированным состоянием (НДС), то в пределах каждого объема $\Omega_i, i=1,2,\dots, N_\Omega$ справедливы соотношения [9]

$$\begin{aligned} 2\varepsilon_{ij} &= \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}; \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl}\varepsilon_{kl}; \\ \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + Q_i &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где u, ε, σ – векторы перемещений, тензоры деформаций и напряжений как функции радиус-векторов \vec{r} точек этих областей Ω_i ; C_{ijkl} – тензор модулей упругости материалов конструкции; Q_i – объемные нагрузки.

Соотношения (2) для случая тонкостенных конструкций редуцируются к системе уравнений для описанных НДС стержней, пластин и оболочек или конструктивов, из этих элементов составленных. Это сводится к последовательности этапов:

– отдельные объемы Ω_k представляются в виде дву- или одномерного многообразия, которому приданы соответствующие распределенные характеристики,

$$\Omega_k = S_k H_k, \quad (3)$$

где S_k – соответствующее многообразие; H_k – набор характеристик, $H_k = H_k \in \vec{r} \in S_k$;

– переменные состояния представляются в виде

$$u|_{r \in \Omega_k} = u|_{r_0 \in S_k} + \sum \lambda_i^{(k)} \rho_i^{(k)}, \quad (4)$$

где ρ_i – координаты в направлениях, нормальных к S_k ; λ_i – некоторые коэффициенты, определяемые типом используемой для описания НДС модели;

– уравнения (2) преобразуются к соотношениям, действующим на соответствующих многообразиях:

$$L_S P, U_S, F, t = 0. \quad (5)$$

Так, если рассмотреть НДС пластины, то в качестве многообразия S имеем плоскую фигуру в пространстве, совпадающую со срединной плоскостью для объема Ω , а в качестве характеристики – распределение толщины $h = h(x, y)$, где x, y – координаты в срединной плоскости. В качестве единственной координаты ρ выступает координата z , направленная по нормали к срединной плоскости. Уравнения (5) принимают вид:

– для геометрически линейных задач –

$$\begin{cases} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D}; \\ \nabla^2 \nabla^2 \psi = 0; \end{cases} \quad (6)$$

– для геометрически нелинейных задач –

$$\begin{cases} D \nabla^2 \nabla^2 w = q + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \\ \frac{1}{Eh} \cdot \nabla^2 \nabla^2 \psi = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \end{cases} \quad (7)$$

где w – прогибы пластины; E – модуль упругости материала; h – толщина пластины; q – поперечная нагрузка; ∇^2 – оператор Лапласа; ψ – функция Эри; x, y – координаты в срединной плоскости пластины; z – координата по нормали к x, y [12].

Для оболочек и стержней процедура является аналогичной, за исключением описания формы срединной поверхности (в первом случае) или набора характеристик (во втором случае).

В зависимости от вида составных конструктивов можно принять в качестве базового описание (1), что позволяет обеспечить привязку к тому или иному «скелету» конструкции (т. е. набору многообразий, составляющих ее структуру). Тогда, принимая во внимание линеаризацию переменных состояния и характеристик НДС при варьировании отдельных параметров, можно поставить задачу синтеза проектно-технологических решений исследуемых тонкостенных машиностроительных конструкций в виде набора критериев и ограничений:

$$h_q \geq h_q^*, H = \{h_1, h_2, \dots, h_{N_H}\}; \quad (8)$$

$$I \in P, U \rightarrow \min. \quad (9)$$

Здесь H – набор характеристик, которым предписаны ряд ограничений (масса, напряжения, деформации и т. п.); I – целевая функция, зависящая от обобщенных параметров P , характеристик H , переменных состояния U , которую следует минимизировать в обобщенном параметрическом пространстве, удовлетворяя одновременно системе ограничений.

Типы возникающих задач и способы их решения.

В развитие подхода, предложенного в работе [5], можно обобщить задачи (1), (8), (9) (таблица 1).

Таблица 1 – Обобщение типов задач анализа и синтеза сложных пространственных тонкостенных конструкций

Решаемые задачи	Зависимости	Примечание
1 На основе индексирования соотношений (1)–(9) на множестве $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{N_Z}\}$		
1.1 Унификация	$P_q^{z_i} = P_q^{z_j}; q = 1, 2, \dots, N_{q_i}; \{i, z_j\} \in Z. \quad (10)$	При двух (или более) объектах z_i и z_j требуется обеспечить идентичность некоторого проектно-технологического решения [решение P_q систем соотношений (1), (8), (9) являются ограничениями типа (10), и вместо оптимального решения P^* получается решение P^{**}]
1.2 Оптимизация (унификация)	$J = J_1 - J_2, \quad (11)$ где J_1 – экономия от введения унификации; J_2 – порождаемые введенной унификацией дополнительные расходы	Получение новых оптимальных решений P^{**} для объектов $\{i, z_j, z_k, \dots\}$ (на которые распространяется унификация ряда изделий Z) на множестве решений $\{q_1, q_2, q_3, \dots\}$, удаляющихся все дальше от решения P^* . Это приводит к ухудшению оценок по критериям (9) и др. (например, по стоимости изготовления)
	$J(\vec{P}) \rightarrow \max; J(\vec{P}) \geq 0, \quad (12)$ где первая составляющая обеспечивает максимизацию выгоды, а вторая – зону безубыточности	
1.3 Эффективность	$J(\vec{P}) = \gamma_1 J_1(\vec{P}) - \gamma_2 J_2(\vec{P}), \quad (13)$ где γ_1, γ_2 – удельные веса экономии и убытков, определяемые программами выпуска изделий	Взвешенная «оценка эффективности» с учетом реальных потребностей в различных изделиях
2 На основе результатов проектных (индекс «k») и экспериментальных (индекс «E») исследований		
2.1 Идентификация нагрузок	$\ F^{(k)} - F^{(E)}\ \rightarrow \min, \quad (14)$ где $\ F^{(k)} - F^{(E)}\ $ – некоторая оценка несоответствия результатов исследований, учитывающая множественность объектов и объем экспериментальной и проектно-исследовательской информации	Идентификация части нагрузок, которая неизменна при изменении исследуемого объекта. Часть, которая зависит от характеристик объекта, идентифицируется при помощи дополнительных соотношений, которые эти зависимости описывают
2.2 Верификация параметров	$\tilde{P} = O_z(\vec{P}^*) \quad (15)$	Определение такого набора параметров \tilde{P} , который дает возможность заведомо удовлетворить всем требованиям (8), (9) с превалированием ограничений (8)
3 На основе данных о спроектированных, испытанных и сертифицированных объектах Z		
3.1 Прогнозирование	$P^\Pi = \Pi(H, I, F) \quad (16)$	Построение аппроксимационной функции Π , связывающей параметры P , характеристики H и функцию качества I , на основе которой можно спрогнозировать рациональные параметры для нового объекта, не входящего в набор Z
3.2 Отстройка и локализация	$\omega \Phi_0 + \Delta p \approx \omega \Phi_0 + \nabla_\omega \cdot \Delta p \Rightarrow \Delta p = \nabla_\omega^{-1} (\omega^+ - \omega \Phi_0) \quad (17)$ $\sigma \Phi_0 + \Delta p \approx \sigma \Phi_0 + \nabla_\sigma \cdot \Delta p \Rightarrow \Delta p = \nabla_\sigma^{-1} (\sigma^+ - \sigma \Phi_0) \quad (18)$ где $\nabla_{\omega, \sigma}$ – соответственно матрицы чувствительности собственной частоты колебаний ω и напряжений σ к варьированию параметров Δp , а ω^+, σ^+ – характеристики, которых желательно достигнуть	Отстройка от резонансных частот или удаления зон с высокими напряжениями из нежелательных областей (сварные швы, крепления ответственных элементов и т. п.) на основе имеющихся результатов исследований для набора объектов Z , а также свойствах решений задач анализа напряженно-деформированного состояния и спектра собственных частот колебаний

Алгоритмизация предложенных методов расчета тонкостенных конструкций. Сформулировав общий подход, а также различные постановки и наметив методы решения возникающих частных задач, необходимо разработать структуру исследований, учитывающих предложенные наработки. Поскольку данная задача не имеет универсального решения, предлагается иной путь. Он состоит в том, что для определенного класса конструкций создается обобщенное параметрическое описание [6]. Оно может быть построено на любой основе, однако должно удовлетворять следующему требованию: по заданному набору обобщенных параметров строить, и притом однозначно, модель исследуемого объекта в заранее согласованном формате. С другой стороны, должен быть создан механизм варьирования обобщенных пара-

метров, к которому предъявляется следующее требование: при изменении одного или нескольких обобщенных параметров в некоторых пределах не должна нарушаться целостность и согласованность модели всей исследуемой конструкции.

Применение основных систем CAD/CAM/CAE (Creo, Catia, ANSYS, Abaqus и т. п.) не удовлетворяет всем требованиям в инструментах и возможностях исследований. Однако игнорирование их возможностями нецелесообразно, особенно в части автоматизированного создания конечно-элементных моделей (КЭМ), расчета и постпроцессинга.

Исходя из всех обозначенных аргументов, была предложена следующая структура исследований (рисунок 1):

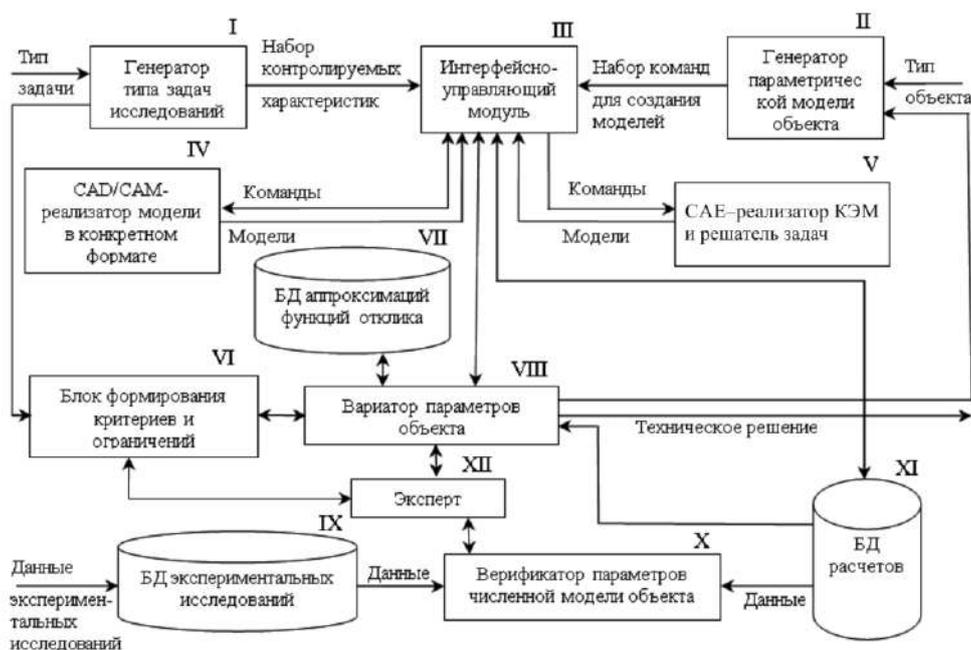


Рисунок 1 – Предлагаемая структура исследований тонкостенных машиностроительных конструкций

На вход блока I подается требование решения той или иной задачи (из перечисленных выше 1.1–3.2 или другой, которая актуальна в данный момент). На вход блока II подается тип объекта. Блок III управляет работой всех модулей. Он передает на блоки геометрического IV и конечно-элементного V моделирования команды для построения соответствующих моделей и проведения численных исследований. БД расчетов XI и БД экспериментальных исследований IX содержат постоянно накапливаемый объем информации об объекте. В блоке VII содержатся постоянно уточняемые (по мере роста объема информации об объекте) аппроксимированные поверхности отклика, описывающие зависимости характеристик объекта от его параметров.

Модуль VIII совершает целенаправленное варьирование параметров модели исследуемого объекта. Модуль X проводит верификацию параметров численной модели объекта на основе сравнения с данными экспериментальных исследований. Блок VI во взаимодействии с экспертом XII может корректировать действующие критерии и ограничения. Соответственно на выходе блока VIII получается рекомендуемое техническое решение, удовлетворяющее предъявляемому комплексу требований.

В предложенной структуре исследований имеются три основных элемента:

- модели, создаваемые и адаптированные под конкретный тип конструкции;
- программные модули, оперирующие с различного рода информацией и варьирующие текущую модель объекта;
- эксперт, который обеспечивает согласование всех этапов работ (форматов хранения информации, критериев, ограничений, алгоритмов и т. п.)

Таким образом, создается экспертно-программно-модельный комплекс, который является открытой средой, позволяющей решать поставленные задачи, среди которых:

- выбор типа подвижного состава и объема исследований;
- перенастраиваемость за счет незначительной модификации отдельных модулей;
- постоянное повышение качества генерируемых моделей (за счет постоянно пополняемого объема данных в БД IX, XI, VII) и, соответственно, принимаемых технических решений;
- моделирование и исследования, обеспечиваемые применением наиболее мощных средств компьютерных CAD/CAM/CAE систем «тяжелого» класса.

Предложенная структура исследований сочетает многие преимущества универсальных и специальных, открытых и закрытых, автоматических и неавтоматизированных систем, будучи во многом лишённой их недостатков. Далее на конкретных примерах продемонстрированы возможности этой системы для отдельных объектов и типов задач.

Синтез конструктивных решений для кузова пассажирского автобуса по критериям прочности и жесткости. В рамках данной задачи моделируется нагрузка, действующая на крышу транспортного средства при испытаниях на специальном стенде [13]. Для этого на крышу воздействовала плоская плита с силой, равной полтора его снаряженного веса, посредством задания перемещения плиты вертикально вниз. Закрепление от смещения достигнуто жестким защемлением нижней части рамы (рисунок 2).

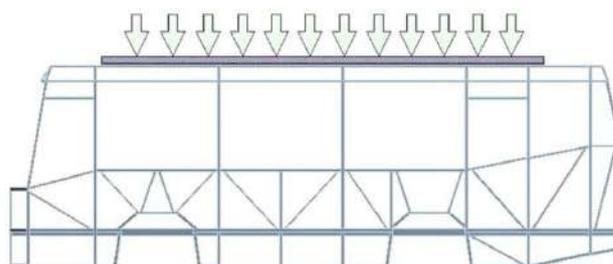


Рисунок 2 – Граничные условия и нагрузка

Данная постановка реализует «виртуальный» испытательный стенд [14], который, в отличие от реальных стендов, обладает высокой оперативностью, вариативностью и экономичностью.

С целью получения значений оцениваемых показателей при разных сочетаниях некоторых параметров исследуемого объекта и построения соответствующих зависимостей (поверхностей отклика) была применена технология параметрического моделирования [6] и предложенный в данной статье подход.

Расчеты проводились на стержневой модели с применением геометрически и физически нелинейной постановки [9].

Варьируемыми переменными были выбраны толщины стоек p_1 и перекладин крыши p_2 , а критериальной величиной выступили напряжения. Интервалы варьирования указанных параметров были разбиты на 5 и 6 подинтервалов соответственно. Таким образом, было получено 42 решения задачи анализа напряженно-деформированного состояния. Поверхность отклика была построена по этим точкам и представлена на рисунке 3.

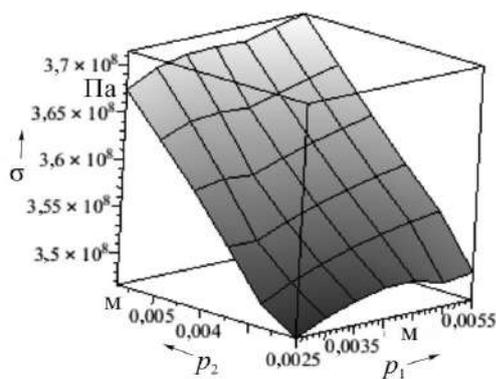


Рисунок 3 – Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в зависимости от параметров p_1 и p_2

Также была получена зависимость выдерживаемой каркасом кузова автобуса нагрузки от изменения толщин его конструктивных элементов (рисунок 4).

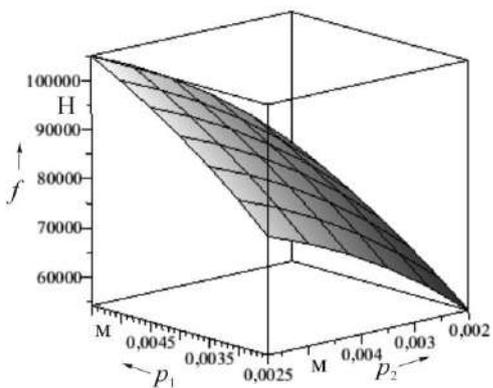


Рисунок 4 – Предельное усилие давления на крышу при изменении структурных параметров каркаса кузова

На рисунках 5, 6 приведены распределения перемещений и напряжений в каркасе кузова автобуса с базовым сочетанием конструктивных параметров $p_1 = 3,5$ мм и $p_2 = 3$ мм в момент достижения максимально допустимого нормами вертикального смещения плиты.

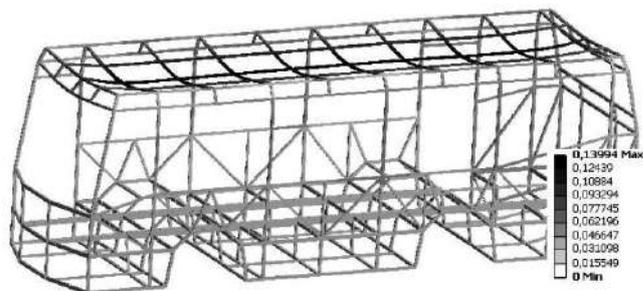


Рисунок 5 – Распределение перемещений в каркасе кузова автобуса с базовым сочетанием параметров от действия тестовой нагрузки

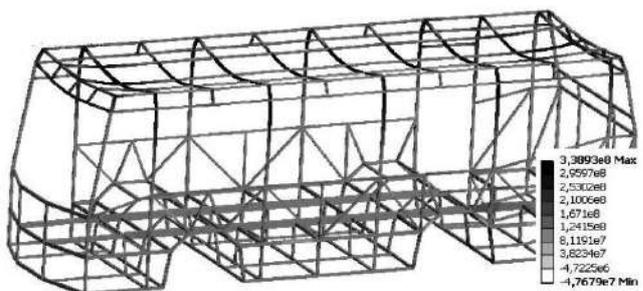


Рисунок 6 – Распределение напряжений в каркасе кузова автобуса с базовым сочетанием параметров от действия тестовой нагрузки

В дополнение исследовались зависимости («поверхности эволюции») возникающей реакции в опоре от перемещений плиты при поочередном варьировании параметров p_1 и p_2 . В качестве примера на рисунке 7 показана «поверхность эволюции» при варьировании параметра p_2 .

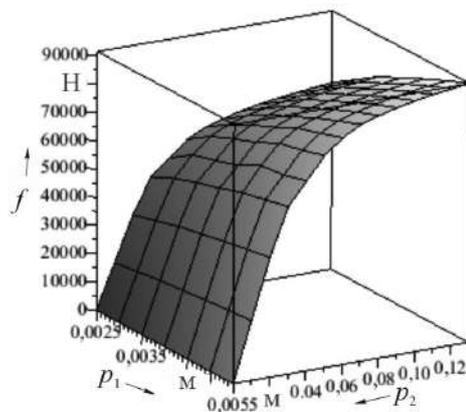


Рисунок 7 – Зависимость возникающей реакции в опоре от перемещений плиты при варьировании параметра p_2

Как видно из представленных результатов, несмотря на существенную нелинейность, заложенную в модель анализа напряженно-деформированного состояния, и поверхности отклика (см. рисунки 3, 4), и «поверхности эволюции» (рисунок 7) имеют достаточно плавный характер. В силу этого в окрестности любой точки определения построенных функций эти функции могут быть линеаризованы как по проектным, так и по нагрузочным (эксплуатационным) параметрам. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для решения ряда оптимизационных задач. Например, можно поставить задачу минимизации массы $m(p) \rightarrow \min$ при ограничениях $\sigma \leq \bar{\sigma}$. На рисунках 8, 9 представлены некоторые модельные

функции $\hat{m}(p) = m(p)/m(p_0)$, $\hat{\sigma}(p) = \sigma(p)/\sigma_{\text{доп}}$, иллюстрирующие данную постановку. Кроме того, можно поставить задачу минимизации проектно-технологических изменений $I = \sum \gamma_i \hat{\sigma}_i - p_{i_0}$, где γ_i – некоторые весовые коэффициенты, «оценивающие» стоимость изменения того или иного проектно-технологического параметра. Также можно поставить задачу модернизации при наличии ограничений по критическим усилиям $P_{\text{кр}} \leq \hat{P}$. На рисунке 10 – иллюстрация, представленная в виде $\hat{I}(p) \rightarrow \min$ на фоне ограничений $\hat{P} = \hat{P}/P_{\text{кр}} \geq 1$ (функция $\varphi_1 = \hat{P}$).

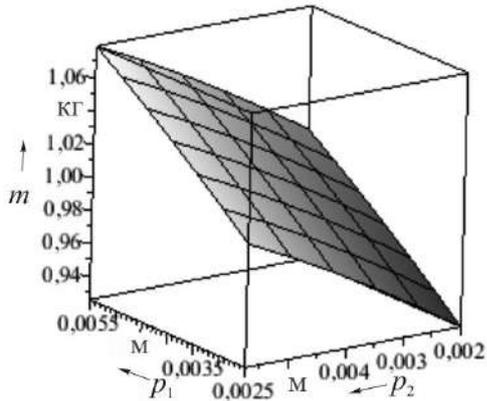


Рисунок 8 – Масса конструкции при разных сочетаниях варьируемых параметров, приведенная к массе конструкции при их номинальных значениях

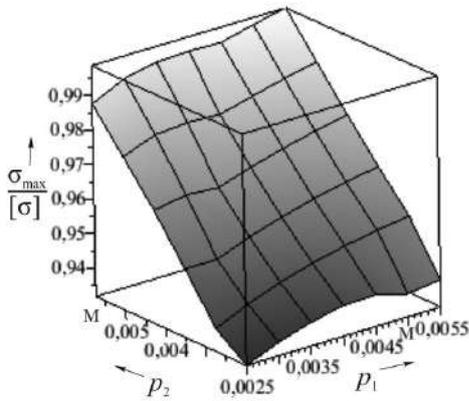


Рисунок 9 – Максимальные эквивалентные напряжения в конструкции, приведенные к допуску

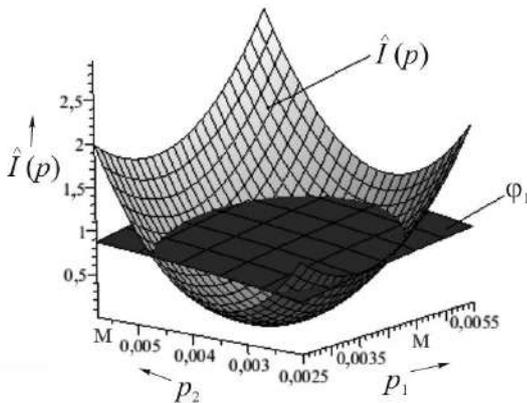


Рисунок 10 – Вид функций $\hat{I}(p)$ и φ_1

Естественно, что представленные примеры не исчерпывают всего разнообразия возможных постановок. Важно, что проиллюстрирована сама возможность таких постановок, причем в окрестности некоторой точки обобщенного параметрического пространства возможно использование аппроксимаций различной степени точности. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность сведения различного типа задач к стандартным наборам задач математического программирования.

Многовариантные исследования для обоснования параметров конструктивных элементов вагона-платформы и режимов их нагружения при ходовых испытаниях. На основании оценки напряженного состояния конструкции вагона-платформы при действии вертикальных сил от расположенных на платформе грузов обоснована схема расположения испытательных грузов при ее ходовых испытаниях. Постановка задачи в таком разрезе требует выявления таких режимов нагружения, которые, во-первых, реализуемы на практике, а во-вторых, создают в силовых элементах вагона-платформы наиболее неблагоприятное напряженно-деформированное состояние по сравнению с другими вариантами нагружения. В случае удовлетворения требований по прочности в этом, наиболее неблагоприятном случае, требования по прочности, заложенные в нормативных документах, будут заведомо удовлетворены.

В первом варианте создание вертикальной нагрузки на вагон при испытаниях на статическую прочность осуществляется двумя грузами 20-футовыми имитаторами контейнеров массой 72 т [15]. В расчетной схеме данная нагрузка учитывалась приложением соответствующих усилий на поверхности фитинговых опор. Заданные кинематические граничные условия – закрепления от перемещений вдоль осей Ox , Oy и поворотов вокруг осей Ox и Oz в области расчетной модели, соответствующей опиранию на пятник (рисунок 11). Расчетная модель представлена на рисунке 12.

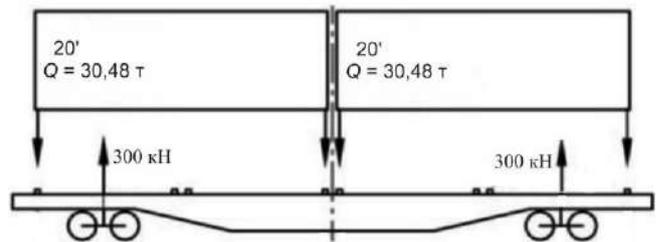


Рисунок 11 – Схема приложения нагрузок и ограничений



Рисунок 12 – Расчетная модель (1/4 вагона)

Для варьирования были выбраны толщины элементов хребтовой балки – наиболее ответственного элемента силовой структуры. Параметры p_1 и p_2 изменялись в диапазонах 6,5–15,5 и 9,5–24,5 мм соответственно. Построенные на базе расчетов поверхности отклика перемещений и напряжений представлены на рисунках 13, 14.

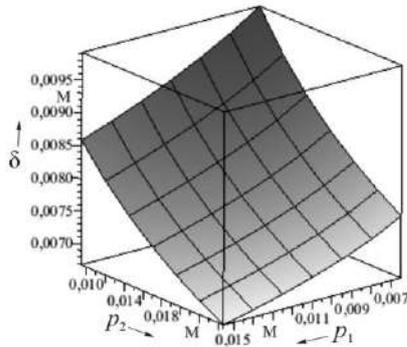


Рисунок 13 – Величины максимальных перемещений при варьировании параметров хребтовой балки вагона-платформы

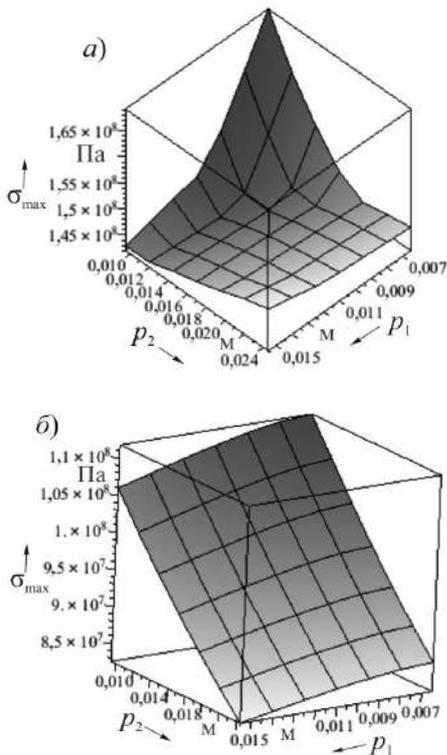


Рисунок 14 – Величины напряжений при варьировании параметров хребтовой балки вагона-платформы: а – максимальные напряжения; б – напряжения в точке А расчетной модели

В качестве примера оценки выведены картины распределения перемещений и напряжений в конструкции при некоторых сочетаниях изменяемых параметров (рисунок 15).

Второй вариант – размещение 40-футового контейнера (рисунок 16). Третий вариант напряженно-деформированного состояния – нагружение равномерной нагрузкой 60 т для среднего сечения продольных балок, распределенной на длине 4,3 м, соответствующей длине опорной поверхности тяжелой гусеничной техники (рисунок 17).

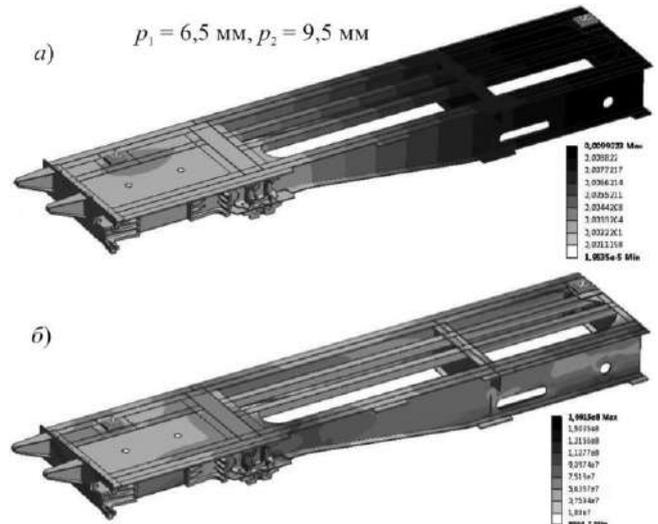


Рисунок 15 – Распределения перемещений (а) и напряжений (б) в конструкции при заданных значениях параметров в контролируемых точках поверхности отклика

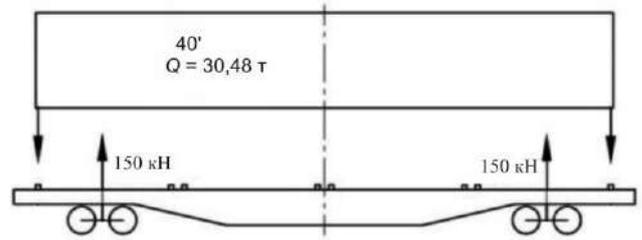


Рисунок 16 – Вариант нагружения № 2

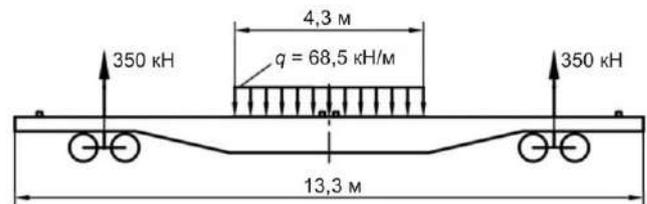


Рисунок 17 – Вариант нагружения № 3

С точки зрения поиска неблагоприятных сочетаний нагрузок в общем случае варьирования проектных параметров p_1, p_2 построены целевые функции $\sigma^N = \sigma_{\Delta \max}(p_1, p_2, n_v)$. Здесь n_v – номер варианта нагружения. На рисунке 18 – график распределения функций $\sigma^N / \sigma_{\Delta \max}^*$.

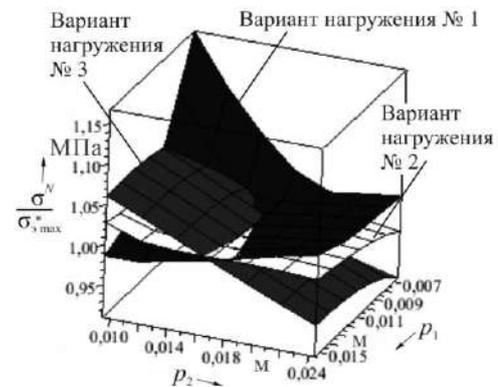


Рисунок 18 – Функции σ^N , приведенные к максимальным эквивалентным напряжениям при базовом сочетании варьлируемых параметров, в случае разных вариантов нагрузок

Видно, что наиболее неблагоприятным в интересующем диапазоне варьирования проектных параметров ($p_1 > 9 \cdot 10^{-3}$ м, $p_2 < 18 \cdot 10^{-3}$ м) является третий вариант нагружения. В остальной области варьирования параметров p_1, p_2 неблагоприятным является первый вариант нагружения. Можно заметить, что на вид функции σ^N в общем случае сильно влияет вариант нагружения. Тогда для всех исследованных сочетаний параметров p_1, p_2 можно определить наиболее неблагоприятный вариант нагружения. Итоговую функцию отклика можно построить из верхних лепестков отдельных поверхностей, представленных на рисунке 18. Таким образом, именно такой вариант нагружения необходимо реализовать при численных исследованиях и экспериментальных испытаниях вагона-платформы.

Построение поверхности отклика в ходе оптимизации силовой структуры грузового полувагона. При разработке схемы приложения нагрузок и ограничений предполагалось, что вагон загружен каменным углем «без шапки». Это моделировалось приложением сил распора к стенкам вагона и вертикальных сил от веса груза. Кинематические граничные условия заданы аналогичным образом, как и в предыдущей задаче, ограничение перемещений вдоль осей Oy, Oz и поворотов вокруг осей Ox и Oz в области опирания на пятник (рисунок 19).

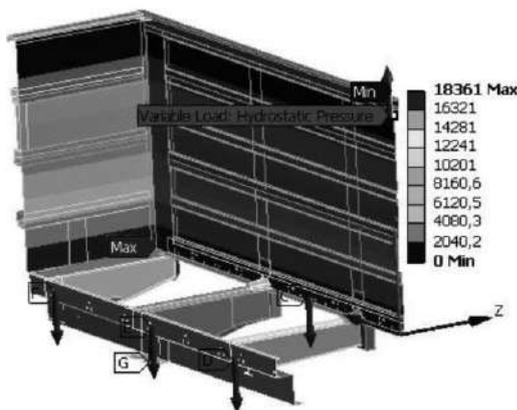


Рисунок 19 – Схема приложения нагрузок

Варьировались толщины стенок полувагона (группа параметров p_1) и элементов хребтовой балки (группа параметров p_2). На рисунках 20, 21 приведены распределения перемещений и напряжений в кузове полувагона при номинальных толщинах данных элементов конструкции.

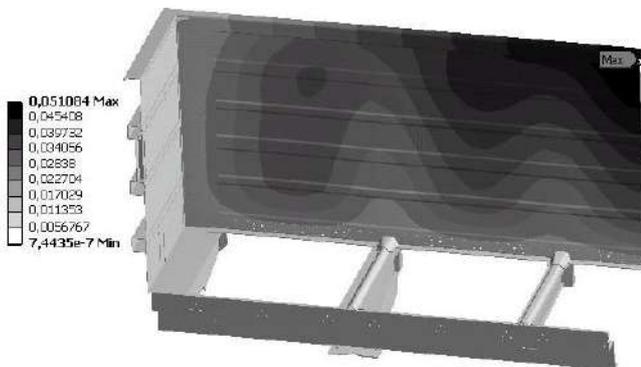


Рисунок 20 – Распределение перемещений в вагоне от заданных нагрузок при базовом сочетании параметров конструкции

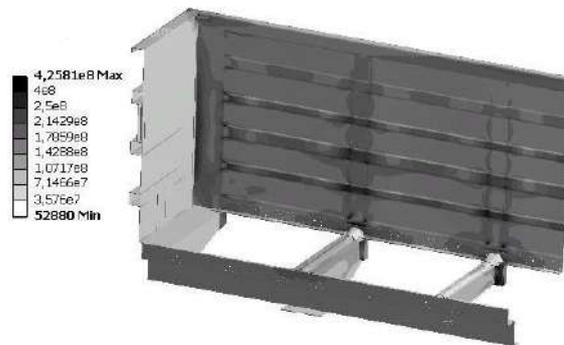


Рисунок 21 – Распределение напряжений в вагоне от заданных нагрузок при базовом сочетании параметров конструкции

На рисунках 22–24 представлены поверхности значений максимальных перемещений и напряжений, а также массы, соответственно при разных комбинациях варьируемых параметров, отнесенные к значениям данных характеристик при базовом сочетании параметров.

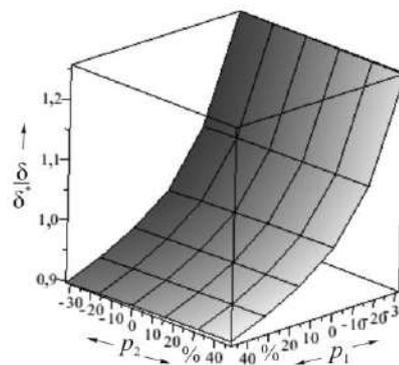


Рисунок 22 – Поверхность отклика перемещений на варьирование параметров силовой структуры полувагона

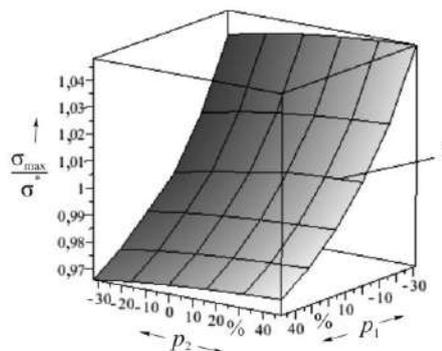


Рисунок 23 – Поверхность отклика напряжений на варьирование параметров силовой структуры полувагона

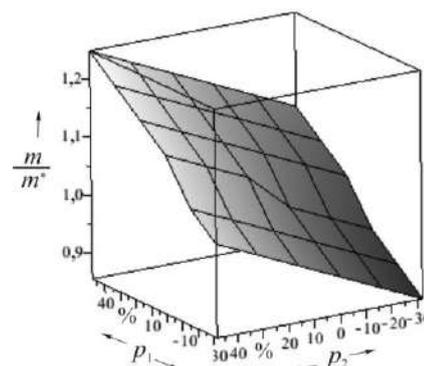


Рисунок 24 – Поверхность отклика массы

Как видно из представленных зависимостей, влияние группы параметров p_1 в окрестности базовых значений параметров (p_1^0, p_2^0) существенно выше, чем p_2 . Соответственно, варьирование p_1 дает больший отклик с точки зрения выигрыша по напряжениям и деформациям, притом что масса вагона изменяется незначительно вследствие варьирования p_1 . Таким образом, уменьшая p_2 так, что $f(p_1, p_2) = \text{const}$ (на рисунке 23 – линия γ), получаем возможность благоприятно изменять НДС полувагона.

Синтез конструктивных параметров для корпуса многоцелевого тягача МТ-Л. Одно из предъявляемых требований к конструкции плавающего тягача МТ-Л (рисунок 25) – сохранять целостность и выполнять свои

функции при погружении в воду с сохранением плавучести. Таким образом, чтобы вновь проектируемый или модернизируемый корпус отвечал данному требованию, моделирование нахождения тягача в воде целесообразно включать в перечень расчетных режимов. Разработанная схема нагружения включает действие гидростатического давления на обшивку корпуса с высотой его приложения, соответствующей уровню погружения тягача в воду от собственного веса, веса основных агрегатов и перевозимого груза. Ограничения заданы таким образом, что они отображают момент времени, когда гусеницы МТ-Л начинают отрываться от дна. Это достигнуто введением упругих элементов малой жесткости в местах крепления подвески.

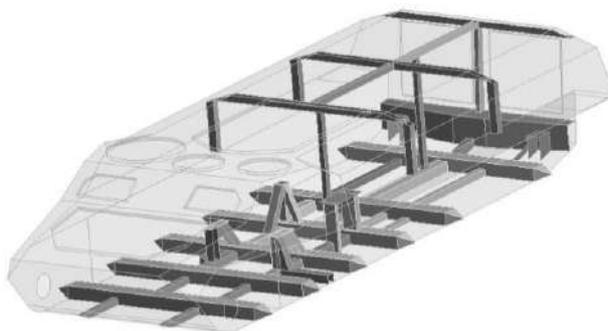
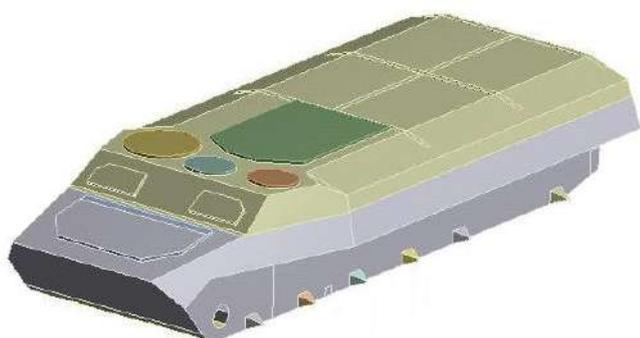


Рисунок 25 – Геометрическая модель многоцелевого тягача МТ-Л

В конечном итоге ставилась задача определения зависимости перемещений, эквивалентных напряжений по Мизесу и массы конструкции от толщин групп его конструктивных элементов. Группа параметров p_1 – толщина листов обшивки днища, которая варьировалась в пределах 2–6 мм с шагом 1, p_2 – толщина стенок поперечных швеллеров в нижней части рамы тягача, которая изменялась в диапазоне 2–10 мм с шагом 2 (рисунок 26).

На рисунке 27 представлены характерные распределения напряжений по Мизесу σ_3 в корпусе МТ-Л.

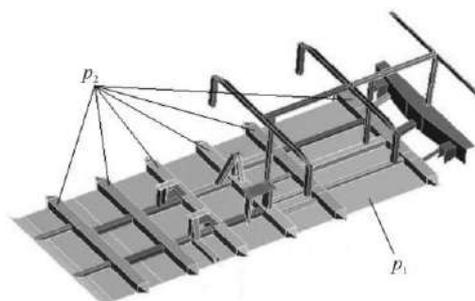


Рисунок 26 – Варьируемые параметры

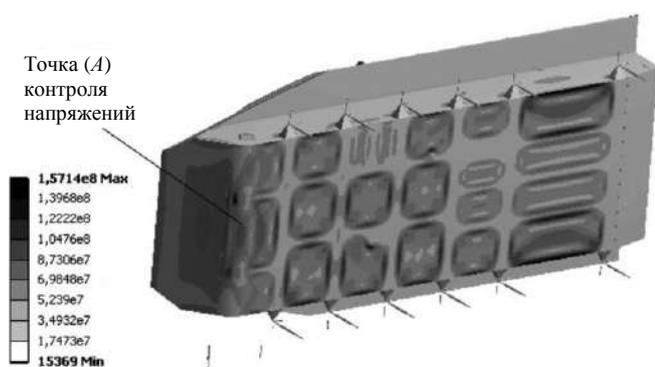


Рисунок 27 – Распределения компонент напряженно-деформированного состояния в корпусе МТ-Л при $p_1 = 2$ мм и $p_2 = 6$ мм

На рисунках 28–31 изображены соответственно поверхности отклика максимальных величин перемещений и напряжений, а также массы корпуса на варьирование параметров p_1, p_2 при действии приложенных внешних

нагрузок. Видно, что прогибы днища резко возрастают при уменьшении толщины днища. Еще более резко возрастают эквивалентные напряжения как в контролируемой точке днища, так и, особенно, максимальные по корпусу.

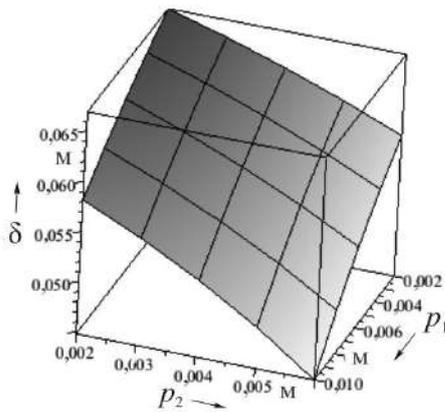


Рисунок 28 – Поверхность отклика максимальных перемещений

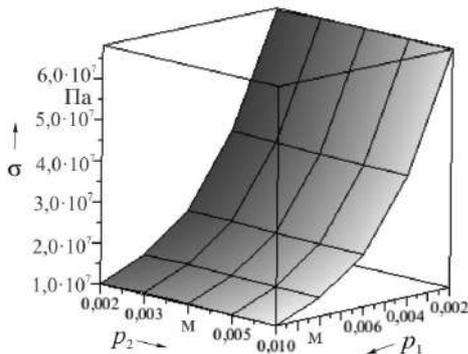


Рисунок 29 – Поверхность отклика: напряжения в некоторой точке на днище (см. рисунок 27)

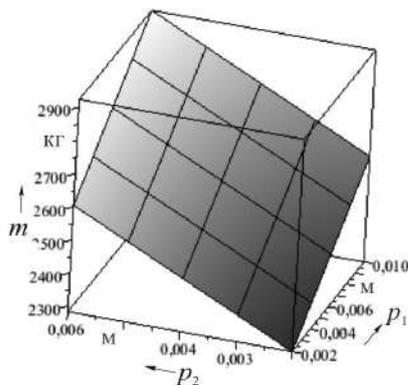


Рисунок 30 – Зависимость массы корпуса тягача от варьируемых параметров

В сочетании с линейной зависимостью массы корпуса МТ-Л от варьирования параметров получаем информацию для принятия проектных решений по обоснованию варьируемых параметров. Это в целом показывает, что данный подход распространяем на широкий класс подобных конструкций.

Заключение. Предложенная постановка задач синтеза имеет существенные отличия перед постановками, предложенными ранее [16–19]. Во-первых, это существенно более широкий массив информации, в пределах которого производится поиск рациональных решений. Во-вторых, в чисто «техническую» постановку задачи приводятся самые разнообразные компоненты из этапов производства, эксплуатации, ремонта и модернизации. Этим самым постановка задач синтеза распространяется на все этапы жизненного цикла изделий, а также на раз-

личные срезы (экономический, временной, организационный и т. п.) В-третьих, данная постановка является открытой для изменения, пополнения, уточнения. Это дает возможность в процессе изменения обстоятельств изменять все определяющие компоненты ограничений, критериев, корректировать тренды получаемых решений.

В дальнейшем планируется распространить предложенный подход на широкий класс изделий, представляющих собой сложные тонкостенные машиностроительные конструкции.

Список литературы

1 Вагоны грузовые крытые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия : ГОСТ 10935–97. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и спецификации. – 12 с. – (Межгосударственный стандарт).

2 НБ ЖТ ЦВ 01-98 «Вагоны грузовые железнодорожные. Нормы безопасности». – М. : ВНИИЖТ-ГосНИИВ, 1998. – 14 с.

3 Метод линеаризации поверхности отклика в задаче обоснования проектных параметров тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / А. В. Литвиненко [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. : Проблемы механического привода. – 2014. – № 31(1074). – С. 88–98.

4 Линеаризация функции отклика прочностных и динамических характеристик тонкостенных конструкций на изменение толщины / Н. А. Ткачук [и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. : Транспортное машиностроение. – 2014. – № 14(1057). – С. 138–154.

5 Чубань, М. А. Модели аппроксимации поверхности отклика в оптимизационных исследованиях машиностроительных конструкций / М. А. Чубань, Р. И. Шейченко, Р. В. Граборов // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. тр. Сер. : Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2015. – № 62 (1171). – С. 46–51.

6 Ткачук, Н. А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н. А. Ткачук [и др.] // Механика и машиностроение. – 2006. – № 1. – С. 57–79.

7 Методологические основы расширенных прочностных и динамических исследований при испытаниях длиннобазовых платформ / А. Д. Чепурной [и др.] // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 67–81.

8 Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных систем / Ю. В. Веретельник // Механика и машиностроение. – 2003. – № 1, т. 2. – С. 3–7.

9 Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 542 с.

10 Лурье, А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 940 с.

11 Лурье, А. И. Нелинейная теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1980. – 512 с.

12 Филин, А. П. Элементы теории оболочек / А. П. Филин. – Л. : Стройиздат. – 1975. – 258 с.

13 National Highway Traffic Safety Administration – U.S. Department of Transportation : FMVSS 220 Standard – School Bus Rollover Protection : TP-220-02 : Washington DC 20590, 1991.

14 Бондаренко, М. О. Дослідження напруженодеформованого стану каркасу кузова автобуса в умовах моделювання його тестового випробування на пасивну безпеку / М. О. Бондаренко // Вісник НТУ «ХПИ». Сер. : Машинознавство та САПР. – 2014. – № 29(1072). – С. 13–17.

15 Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества : РД 24.050.37.95. – М. : ГосНИИВ, 1995. – 102 с.

16 Myers, R. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. – 3rd ed. / R. Myers, D. Montgomery, C. Anderson-Cook. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2009. – 1247 p.

17 **Anderson, M.** RSM simplified: optimizing progress using response surface methods for experiments / M. Anderson, P. Whitcomb. – New York : Productivity Press, a division of Kraus Productivity Organization, Ltd, 2005. – 289 p.

18 **Chinneck, J.** Practical optimization: a gentle introduction / J. Chinneck [Electronic resource] – Access mode: [www.sce.](http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html)

[www.sce.](http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html) – Date of access : 15.06.2017.

19 **Haslinger, J.** Introduction to Shape Optimisation: Theory, Approximation and Computation / J. Haslinger, R. Makinen. – Philadelphia : SIAM, 2003. – 273 p.

Получено 01.12.2017

A. D. Chepurnoy, V. I. Senko, S. V. Makeev, A. V. Litvinenko, R. I. Sheychenko, R. V. Graborov, N. A. Tkachuk, M. A. Bondarenko. Solution of tasks of the analysis and synthesis of difficult spatial thin-walled designs.

The new approach to solve the problems of analysis and synthesis of complex spatial thin-walled structures is proposed. It is based on generalized parametric modeling of complex mechanical systems. Generalized parameters are structure, design and technological solutions for the structures, design parameters and operating conditions. Beside the solution of problems of a single analysis, and multivariate studies, and studies of rational design and technological solutions are provided. In addition, it is possible to justify parameters of finite element models for accurate calculation of stress-strain state by the finite element method. Also, it becomes possible to model boundary conditions and loading effort, not only for one, but for a number of similar designs. As the result a tool for quick and accurate solutions of totality of tasks justification of design solutions for complex spatial thin-walled structures by strength and stiffness criteria is created.