

УДК 539.3

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.120547

Тонкостінні конструкції: аналіз напружено-деформованого стану та обґрунтування параметрів

М. А. Ткачук, М. О. Бондаренко, А. В. Грабовський, А. Ю. Васильєв, Р. І. Шейченко, Р. В. Граборов, В. В. Посохов, Є. О. Луньов, А. В. Набоков

Розроблено підхід до обґрунтування технічних рішень для тонкостінних машинобудівних конструкцій. Задача розглядається у просторі узагальнених параметрів, які об'єднують проектні й технологічні чинники та умови експлуатації. У сформованому параметричному просторі будується апроксимована поверхня відгуку. На додаток вводяться критеріальні та обмежувальні залежності. Після цього проводиться пошук оптимуму функції якості досліджуваної конструкції

Ключові слова: тонкостінна машинобудівна конструкція, напружено-деформований стан, поверхня відгуку, інноваційний виріб

1. Введение

Потребности современной промышленности, транспорта и сферы услуг в инновационных изделиях в последнее время резко возрастают. Это вынуждает машиностроительные предприятия переориентироваться на проектирование, технологическую подготовку и выпуск именно таких изделий. При этом большую долю среди такой продукции занимают тонкостенные машиностроительные конструкции (ТСМСК). Это обусловлено тем, что в этих конструкциях рационально сочетаются массовые и прочностные характеристики.

В то же время на многие изделия распространяются достаточно строгие официальные правила и нормы. Это, в частности, самолеты, суда, подвижной состав железных дорог, краны, перегружатели, сосуды высокого давления, химические аппараты, оборудование аграрно-промышленного комплекса. Данные требования направлены, в первую очередь, на обеспечение безопасности эксплуатации.

Регламентируемыми являются действующие в силовых элементах конструкций напряжения, предельные величины перемещений (прогибов), долговечность (количество рабочих циклов до потери несущей способности) и т. п. Соответственно, при проектных исследованиях используются устоявшиеся методики расчета, а также традиционные технические решения. В результате изделия разных фирм, созданные в разное время, для различных потребителей, несут на себе бремя устоявшихся консервативных конструктивно-технологических решений. Отступление от этих «шаблонных» решений встречает сопротивление и нормативных органов, и потребителей, и производителей, и проектантов.

Несмотря на давление сложившейся практики, склоняющей к созданию изделий в виде «клонов» существующих аналогов, действует также противопо-

ложная тенденция, которая порождается общим стремлением к прогрессу, даже в консервативных областях деятельности, а также экономическими соображениями. Например, это четко прослеживается на грузовых железнодорожных вагонах. Для них характерно наличие ограничения на осевую нагрузку (23,5 т, 25 т, 27 т в зависимости от страны или региона) в груженном состоянии. Соответственно, чем меньше масса тары, тем больше масса перевозимого груза. С другой стороны, снижение массы, как правило, приводит к росту уровня действующих напряжений, а это в определенный момент противоречит нормативным требованиям. Таким образом, объективно складывается противоречие между возможностями существующих методик обоснования технических решений по прочностным и другим критериям, с одной стороны, и потребностями машиностроения в инновационных изделиях, – с другой. Особенно это относится именно к тонкостенным машиностроительным конструкциям.

Более того, многие потребители инновационных изделий устанавливают свои дополнительные требования к приобретаемой продукции, которые касаются продления срока службы, повышения производительности, интенсивности режимов эксплуатации или нагрузочной способности. Таким образом, возникает потребность в новых подходах, учитывающих при проектных исследованиях эти дополнительные факторы.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В современной технической литературе уделяется много внимания вопросам структурной и параметрической оптимизации. Для решения данной задачи применяют программные комплексы для конечно-элементного анализа и различные методы оптимизации [1, 2]. В частности, широко применяется стратегия эволюционного моделирования [3]. Главная трудность, в данном случае, связана с тем, что получаемые в результате конструкции могут оказаться сложными для реализации на производстве. Таким образом, еще одной группой литературных источников, которые, очевидно, не менее актуальны, являются работы, посвященные адаптации оптимизационного инструментария к условиям производства [4].

При обосновании технических решений для машиностроительных конструкций, в том числе – тонкостенных, зачастую применяют различные оптимизационные процедуры. При этом в рассмотрение вводятся: целевая функция f , проектная переменная p , оператор u , переменные состояния u и ограничения $H(u, p, f)$ [5, 6]. Тогда можно поставить задачу оптимизации:

$$p^* : f(p) \rightarrow \min, y(p, u) = 0, H(u, p, f) \geq 0. \quad (1)$$

Математической моделью при оптимизации служит функция отклика (в графическом виде – поверхность отклика).

В некоторых случаях природа взаимосвязи переменной отклика y и управляющей переменной p может быть точно известна, например, базироваться на инженерных, химических или физических принципах. Тогда можно записать модель формы $f = g(p_1, p_2, \dots, p_k) + \varepsilon$, где ε представляет “погрешность” в си-

стеме. Этот тип взаимосвязи часто называется механистической моделью. Но в случае оптимизации машиностроительных конструкций этот принцип напрямую неприменим, т. к. изначально отсутствуют соотношения для определения ε .

Когда математическая модель, т. е. функция отклика, построена, возникает проблема выбора метода оптимизации [7, 8]. Что касается нелинейных функций, то для нахождения их оптимумов ввиду сложности поиска существует большое разнообразие методов [7]. Но, в большинстве, эти методы могут быть охарактеризованы как методы последовательного улучшения начального решения. Суть большинства методов нелинейного программирования заключается в движении в пространстве к оптимуму сначала из исходного, а далее – из промежуточного состояния переменной задачи оптимизации в последующее с некоторым шагом.

Таким образом, по самой своей природе прикладные задачи обоснования решений именно для инновационных изделий оказываются погруженными в различного вида «изменчивости». Что важно отметить: эта изменчивость является естественным свойством прикладных задач синтеза структуры и параметров инновационных ТСМСК. Традиционные же подходы, как правило, нацелены на решение классических задач нелинейного программирования с четким заданием целевой функции, ограничений и модели процесса или состояния. Таким образом, сама традиционная постановка противоречит характеру возникающих прикладных задач. Это приводит к тому, что если на такую постановку наложить реальные условия разработки инновационной ТСМСК (дефицит времени, средств, организационные трудности с поставками и комплектующими и т. п.), то ценность строгого решения формальной оптимизационной задачи (1) теряет смысл.

Таким образом, перед разработчиками инновационных изделий стоит задача разработать не оптимальную конструкцию, а «устойчивую» конструкцию, способную сохранять требуемые высокие технико-экономические характеристики при изменении влияющих факторов (проектных параметров) в некотором диапазоне варьирования p, f, H . Отталкиваясь от этого обстоятельства, задачу (1) можно заменить на ее аппроксимированный вариант:

$$p^{**}: f^{\wedge}(p^{\wedge}) \rightarrow \min, \quad y^{\wedge}(p^{\wedge}, u) = 0, \quad H^{\wedge}(u, p^{\wedge}, f^{\wedge}) \geq 0. \quad (2)$$

Здесь в (2) индекс « \wedge » относится к некоторым аппроксимациям соответствующих величин и функций в (1).

Естественно, что понятие «некоторая аппроксимация» привносит элемент произвола, поскольку предполагает выбор того или иного способа приближенного описания p, f, H, u, u . Однако тут же можно возразить, что такие аппроксимации явно или неявно неизбежно присутствуют в задачах при их численных решениях [9]. Кроме того, любая техническая задача на практике, как правило, имеет не единственное, а множество решений, получаемых, например, различными разработчиками при одинаковых стартовых постановках. И главная про-

блема – не в том, что решений p^{**} – не одно, а целое множество. Ключевым является выбор аппроксимаций, которые дают возможность однозначно и оперативно найти именно устойчивое решение. Также следует учесть, что во многих случаях для инновационных изделий имеются хорошие стартовые приближения – технические решения традиционных изделий, разработанных ранее и уже эксплуатируемых длительное время. Данное обстоятельство выступает дополнительным аргументом в пользу предлагаемого подхода.

Некоторые из аргументов, рассмотренных выше, отмечались ранее в ряде предшествующих работ [5, 6], в первую очередь – подход к построению вариативных математических и численных моделей исследуемых процессов и состояний. Таким образом, представляется целесообразным развитие такого рода подходов к решению прикладных задач обоснования технических решений при создании инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций. Они призваны устранить проблемные вопросы при обосновании параметров инновационных ТСМСК, в частности, изменчивость условий оптимизационных задач и сложность построения вариативных моделей исследуемых процессов и состояний.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие методов обоснования проектных параметров инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций. Разработанный подход, в отличие от устоявшихся методов, должен позволять учитывать вариативность условий нагружения вновь проектируемых изделий совместно с множеством критериев (как технических, так и экономических) и нормативных ограничений. Это дает возможность абстрагироваться от некоторых шаблонных решений и преодолеть планку, определяющую изделие как инновационное.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Адаптация методологии обобщенного параметрического моделирования на задачи обоснования технических решений инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций. При этом обеспечивается вариативность и моделей анализа процессов и состояний в исследуемой ТСМСК, и критериальных характеристик, и ограничений.

2. Разработка метода аппроксимации настоящей поверхности отклика некоторой аппроксимационной. Предлагается применить к решению поставленной задачи, в отличие от технологии «черного» или «белого» (прозрачного) ящика», альтернативную технологию «серого» ящика. Она предполагает постепенное поэтапное уточнение аппроксимационной поверхности отклика по отношению к действительной по мере смещения текущего приближения решения, что резко снижает вычислительные затраты, но сохраняет необходимую точность.

3. Применение альтернативного по отношению к традиционным метода оценки чувствительности характеристик тонкостенных машиностроительных конструкций к варьированию их параметров путем вычисления этих

чувствительностей по конечно-разностным соотношениям. В данном случае предлагается не стремиться к более точному описанию поверхности отклика в локальной окрестности той или иной точки параметрического пространства, а, наоборот, вычислять «глобальные» тенденции поведения этой поверхности. Далее в выделенной области параметров вместо настоящей поверхности отклика используется «аппроксимационный двойник». Это дает возможность отвлечься от локальных особенностей поведения настоящей функции отклика, Таким образом, предполагается достичь двойной эффект:

1) «численный» – состоит в избавлении от потенциальной множественности локальных экстремумов;

2) «прикладной» – отсекается излишний процесс поиска «настоящего» оптимального решения, которое вследствие «размытости» настоящей действительной поверхности отклика может оказаться далеким от такового.

4. Решение ряда прикладных задач проектного обоснования технических решений для инновационных ТСМСК по критериям прочности и долговечности.

4. Методы анализа и синтеза параметров тонкостенных машиностроительных конструкций

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций применяются соотношения теории упругости, теории пластин, оболочек и стержней, а также численный метод конечных элементов (МКЭ) [9]. Формирование геометрической формы исследуемых ТСМСК производилось методами твердотельного и поверхностного моделирования. Для вариативного изменения структуры и размеров исследуемых объектов адаптирован и развит метод обобщенного параметрического моделирования применительно к инновационным ТСМСК.

Численные исследования производились в среде лицензионного программного обеспечения ANSYS (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» и Научно-инженерный центр управляющей компании «Рейстрансхолдинг», г. Мариуполь, Украина).

4. 1. Построение параметрических моделей напряженно-деформированного состояния тонкостенных машиностроительных конструкций

Обеспечение прочностных характеристик инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций, как отмечалось выше, сопряжено со множеством вариантов расчетных исследований их напряженно-деформированного состояния. При этом следует принять во внимание логику, отмеченную выше относительно многовариантности нагрузок, изменчивости требований, вариативности применяемых методов и моделей, дополняемую неопределенностью структурных и параметрических решений. Таким образом, традиционные подходы могут оказаться неприменимы при обосновании проектных решений для инновационных изделий, потому что, опираясь на стандартные критерии, нормативные нагрузки и четкие методики, они ограничивают набор рассматриваемых вариантов конструкции. В связи с этим требуется разработка таких подхо-

дов, которые обеспечивают вариативность физических, математических и численных моделей на этапе проектных исследований НДС тонкостенных машиностроительных конструкций. Указанным требованиям отвечает подход расширенного параметрического моделирования, описанный ниже.

В настоящее время проектируется и изготавливается большое количество инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций, находящихся в условиях эксплуатации, которые сильно изменяются в зависимости от различных факторов. При этом важно, что различные факторы влияют на интенсивность нагрузок, на нагрузочную способность и долговечность различным образом. Так, при действии усилий от ветровой нагрузки получается стохастическое распределение аэродинамических усилий. Такой же характер носят и распределения нагрузок, возникающих при движении транспортных средств по автомобильным дорогам и железнодорожным путям, хотя их характеристики и природа возникновения отличны от вышеупомянутых. Те же аргументы можно отнести и к таким нагрузкам, как технологические, контактные, сейсмические и т. п.

Устоявшаяся практика расчета машиностроительных конструкций в этом случае состоит в определении нескольких типов характерных нагрузок: экстремальных, номинальных, изменяемых в определенном диапазоне по некоторому закону распределения и т. п. Далее расчет производится по каждому типу режимов нагружения с установлением того или иного критерия и ограничения (по прочности, жесткости, массе и т. п.).

Основным недостатком перечисленных подходов является привязка к определенному набору конкретных значений параметров. Это является наиболее значимым препятствием для процедуры синтеза рациональных параметров проектируемых тонкостенных машиностроительных конструкций. Следует заметить, что варьирование одних и тех же параметров по-разному сказывается на изменении их оптимальных значений по различным критериям и ограничениям (в зависимости от типа расчета, режима, процесса и т. п.). Если учесть, в дополнение, что результирующие поверхности отклика (т.е. значения некоторых характеристик, получаемых в результате расчетов и важных с точки зрения функционирования проектируемой конструкции) в общем случае описываются нелинейными функциями параметров, получаем в итоге очень сложную многослойную задачу синтеза. В свою очередь, это резко снижает эффективность решения задач обоснования рациональных параметров тонкостенных машиностроительных конструкций. Этот недостаток еще более усугубляется тем обстоятельством, что, как уже отмечалось, сами критерии, ограничения, структура исследуемой конструкции являются изменяемыми уже в ходе выполнения проектных разработок. В результате получаемые решения задач синтеза теряют свое значение с практической точки зрения, а, значит, безрезультатно затрачиваются вычислительные, финансовые и временные ресурсы.

Для устранения указанного противоречия предлагается несколько путей. Самый простой, но затратный, состоит в предварительном исследовании как можно большего количества возможных вариантов проектных решений и конструктивных параметров. Эта задача в силу лавинообразного роста массива ин-

формации зачастую не под силу даже при наличии больших вычислительных ресурсов. Оправданным такой путь является либо на первых этапах проектирования для выбора концептуальных решений, либо для конструкций с минимальным количеством варьируемых параметров. Второй из возможных путей предусматривает применение для решения поставленной задачи известных или новых и усовершенствованных методов оптимизации [8, 10, 11]. Алгоритмы оптимизации, их реализующие, в настоящее время встраиваются в современные пакеты конечно-элементного анализа и для некоторых типов конструкций дают удовлетворительные результаты. Однако, как отмечалось выше, при многократном изменении критериальных функций получаемые результаты могут резко изменяться, например, скачкообразно при непрерывном варьировании тех или иных параметров. Это может быть вызвано как видом целевой функции, так и ограничений, а также особенностями реализуемого физико-механического процесса или состояния. Кроме того, дополнительной проблемой в этом случае является имплементация критериальных функций, отличающихся от традиционно присутствующих в инженерных расчетах (к примеру, экономических, технологических и т. п.).

Рассмотренные здесь технологии можно условно назвать процедурами «белого» (прозрачного) и «черного ящиков». В первом случае путем больших затрат получается информация о поведении критериальных функций в большом диапазоне варьирования параметров. Во втором случае знание о функции ограничивается вычислением неких характеристик после решения тех или иных задач анализа реализуемого процесса или состояния. Как, зачастую, и в других случаях, эти крайние в определенном смысле подходы имеют множество «врожденных» недостатков, естественным образом следующих из их природы. Для преодоления отрицательных сторон, присущих упомянутым подходам «черного» и «белого (прозрачного) ящиков», требуется разработка альтернативно-компромиссных методов.

Как вариант, предложен метод обоснования рациональных параметров и конструктивных решений тонкостенных машиностроительных конструкций по некоторым критериям (например, уменьшения массы, снижения напряжений, уменьшения вибраций и т. п.) с учетом постепенно локализуемых линейных аппроксимаций критериальных величин от изменяемых параметров. Под линейаризуемыми аппроксимациями понимается приближение в некоторой зоне области варьирования параметров точной поверхности отклика. Под локализацией понимается та особенность процедуры линейаризации, что размеры и расположение области, в пределах которой осуществляется аппроксимация, могут изменяться в ходе решения.

В данном случае линейаризация является компромиссным вариантом аппроксимации (по сравнению с алгоритмом «белого (прозрачного) ящика»), «затемняющим» действительное поведение описываемой функции. Процедура же локализации, тоже компромиссная, производит противоположный эффект.

Получаемая в итоге последовательность аппроксимационных функций отображает переход от «почти черного ящика» до «почти белого (прозрачного) ящика». Если назвать этот подход методом «серого ящика» [12], то для такого

компромиссного алгоритма возникает проблема разработки альтернативного традиционным способом линейзации критериальных функций. При этом требуется относительная простота, точность и универсальность такого метода.

Рассмотрим задачу оптимизации (1) в несколько измененном виде:

$$I(H, u, p) \rightarrow \min;$$

$$H(u, p) \geq H^*;$$

$$L(u, f, p, H) = 0, \tag{3}$$

где I – функция качества (масса, напряжения и т. п.); u – переменная, описывающая то или иное состояние или процесс в исследуемом объекте; H^* – ограничения на технические характеристики H ; L – оператор задачи анализа физико-механического процесса или состояния, реализующегося в ходе эксплуатации конструкции; f – внешние нагрузки; P – множество обобщенных параметров p .

Под обобщенными параметрами подразумевается набор величин, структур, форм, распределений, которые характеризуются следующим:

- полностью определяют математическую модель исследуемого процесса;
- не изменяются при решении задачи анализа;
- являются варьируемыми в ходе решения задачи синтеза.

Такой подход соответствует заявленному в работе [12] и дает возможность распространить технологию традиционного оперирования с параметрами на множество обобщенных параметров.

Если рассматривать тонкостенные конструкции, то оператор L определяется на многообразии R в трехмерном пространстве. Это многообразие является объединением срединных поверхностей оболочек, пластин и линий стержней, составляющих 3D область Ω , занимаемую исследуемым объектом:

$$\Omega = R \times t, \tag{4}$$

где t – толщина пластины, оболочки (либо поперечное сечение), являющиеся распределенным по точкам Z многообразия R обобщенным параметром $t(Z)$.

Таким образом, на начальных этапах проектных исследований ставятся и решаются две основные задачи:

- 1) определение структуры («скелета») тонкостенной конструкции R ;
- 2) обоснование рационального распределения толщины, а также формы и размеров поперечного сечения $t(Z)$.

В этом контексте задача 1) является задачей структурной, а 2) – параметрической оптимизации, причем $t(Z)$ – распределенный обобщенный параметр.

Следуя работам [6, 12], можно трансформировать исходную континуальную постановку задачи (3), (4) в дискретную. Для этого следует ввести в рассмотрение, кроме дискретизации u, f, L , еще и дискретизацию множества обобщенных параметров P . Принимая во внимание, что в дальнейшем рассматрива-

ется задача параметрической оптимизации $t(Z)$, следует ограничиться именно дискретизацией этого распределенного параметра. Возникающую задачу дискретизации распределенного параметра t можно увязать с дискретизацией задачи анализа (последнее соотношение в (3)). Если применить для этого МКЭ [9], то задачи «физической» и «параметрической» дискретизации окажутся естественным образом связанными. При этом в формируемых соотношениях МКЭ параметр $t(Z)$ автоматически будет присутствовать в виде распределения толщин конечных элементов (КЭ), площадей и моментов инерции поперечного сечения либо по конечным элементам, либо по узлам конечно-элементной сетки.

В частности, если представить R в виде объединения (ансамбля) конечных элементов R_e :

$$R = \bigcup_e R_e, \quad e = 1, \dots, N_e, \quad (5)$$

то в простейшем случае можно аппроксимировать t кусочно-постоянными функциями:

$$t|_{R_e} = t_e = \text{const}. \quad (6)$$

Тогда, не нарушая стандартных процедур конечно-элементного моделирования, можно получить явные или неявные зависимости величин, определяющих физико-механические свойства исследуемого объекта, от набора параметров (6). Так, если рассматривать статическое и динамическое напряженно-деформированное состояние тонкостенной конструкции, спектр ее собственных частот ω_i и критических усилий λ_i (из условий потери устойчивости), то приходим к соответствующим системам уравнений:

$$K \cdot u = f, \quad (7)$$

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t), \quad (8)$$

$$\text{Det}(K - \omega^2 M) = 0, \quad (9)$$

$$(K + \lambda_i S)\psi_i = 0, \quad (10)$$

где K , M , C – матрицы жесткости, масс и демпфирования конечно-элементного ансамбля, моделирующего исходную тонкостенную конструкцию; u , f – векторы узловых нагрузок и внешних сил; S – матрица начальных напряжений; ψ_i – i -е формы потери устойчивости.

В работе [12] показано, что зависимости

$$K = K(t_e), \quad M = M(t_e), \quad C = C(t_e), \quad f = f(t_e), \quad S = S(t_e) \quad (11)$$

можно представить в окрестности некоторой базовой точки $t^{(0)}$ с достаточной степенью точности в линейном виде:

$$\left. \begin{aligned} K(t) &\approx K(t^{(0)}) + K'(t^{(0)}) \cdot \alpha; \quad M(t) \approx M(t^{(0)}) + M'(t^{(0)}) \cdot \alpha; \\ C(t) &\approx C(t^{(0)}) + C'(t^{(0)}) \cdot \alpha; \quad f(t) \approx f(t^{(0)}) + f'(t^{(0)}) \cdot \alpha; \\ S(t) &\approx S(t^{(0)}) + S'(t^{(0)}) \cdot \alpha; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$\alpha = \left\{ (t_1 - t_1^{(0)}) / t_1^{(0)}, (t_2 - t_2^{(0)}) / t_2^{(0)}, \dots, (t_{N_e} - t_{N_e}^{(0)}) / t_{N_e}^{(0)} \right\}^T,$$

$$t^{(0)} = \left\{ t_1^{(0)}, t_2^{(0)}, \dots, t_{N_e}^{(0)} \right\}^T,$$

$$t = \left\{ t_1, t_2, \dots, t_{N_e} \right\}^T,$$

а матрицы $K, M, C, S, K', M', C', S'$ и векторы f, f' не зависят от t .

В данном случае декларируется справедливость линеаризации свойств конечно-элементной модели (КЭМ) исследуемого объекта вблизи некоторой точки $t^{(0)}$ многомерного параметрического подпространства, дискретизирующего непрерывно распределенный параметр $t(Z)$. Здесь α – массив относительных (безразмерных) величин, характеризующих степень изменения толщин отдельных конечных элементов.

Подставив представления (12) в соотношения (7)–(9) (следуя работам [12]), можно, утверждать, что решения задач (7)–(9) при варьировании массива параметров t (а, значит, и α), с достаточной степенью точности представимы в виде линейной зависимости от степени их варьирования. Иными словами,

$$u(\alpha) \approx u(0) + \nabla_1(0) \cdot \alpha; \quad (13)$$

$$u(\alpha) \approx u(0) + \nabla_2(0) \cdot \alpha; \quad (14)$$

$$\omega_i(\alpha) \approx \omega_i(0) + \nabla_3^i(0) \cdot \alpha; \quad i = 1, 2, \dots; \quad (15)$$

$$\lambda(\alpha) \approx \lambda(0) + \nabla_4^j(0) \cdot \alpha; \quad j = 1, 2, \dots \quad (16)$$

Здесь ∇_q ($q=1 \div 4$) – некоторые матрицы, соответствующие обратным оператором задач (7)–(10).

Подведя промежуточный итог после данного этапа, можно утверждать, что соотношения (13)–(16) задают потенциальную возможность определения отклика исследуемого процесса или состояния на изменение параметров. В то же время открытым остается вопрос вычисления самих матриц чувствительности ∇_q ($q=1 \div 4$).

Вычисление матриц чувствительности ∇_q поставляет информацию, необходимую для аппроксимации зависимости характеристик контролируемого физико-механического процесса или состояния от параметров, которые определяет объект исследований. Учитывая линейность задачи по внешним воздействиям («физическую» и примерную линейность по изменению параметров в окрестности некоторой базовой точки), можно заключить, что и критериальные величины в (3) или линейные по своей структуре, или линеаризуемые по параметрам p (в т. ч. и по $t(Z)$). При этом задача (3) превращается из задачи в общем случае нелинейного программирования в задачу линейного программирования, что существенно ускоряет процесс решения. Таким образом, основным препятствием на пути ускорения решения задач синтеза является определение компонент матриц чувствительности ∇_q .

Рассмотрим решение этой задачи без снижения общности на примере параметров t . Для решения получаемой задачи можно обратиться к методам теории возмущений. При этом можно получить точные выражения компонент матриц чувствительности ∇_q в аналитическом виде. Однако точность аппроксимационных представлений (13)–(16), справедливых для бесконечно малых α_e , может резко ухудшиться при малых, но конечных α_e . Таким образом, ценность представлений (13)–(16) снижается в силу того, что их точность и применимость ограничивается бесконечно малой окрестностью базовой точки $t^{(0)}$ параметрического подпространства. Это, в свою очередь, сводит на нет предполагаемые преимущества линеаризации в русле предлагаемого в работе подхода. В связи с этим, необходим альтернативный способ вычисления компонент матриц чувствительности. Его можно построить, следуя подходам, изложенным в работах [6, 12].

Так, вводя в рассмотрение некоторую характерную величину интенсивности α_e^* (разную в общем случае для различных конечных элементов), можно задать множество так называемых «реперных» точек:

$$\alpha_{\tau}^{\wedge} = \{0, 0, \dots, 0, \alpha_{\tau}^*, 0, \dots, 0\}^T, \quad (17)$$

где ненулевым компонентом массива α_{τ}^{\wedge} является только компоненты с номером τ . Тогда для вычисления компонент матриц чувствительности $\nabla_q^{(\phi, \psi)}$ можно использовать их конечно-разностную аппроксимацию:

$$\nabla_q^{(\phi, \psi)} \approx [u_{\phi}(\alpha_{\psi}^{\wedge}) - u_{\phi}(0)] / \alpha_{\psi}^*, \quad (q = 1 \div 4), \quad (\phi, \psi) = 1 \div N_e. \quad (18)$$

Здесь $u_{\phi}(\alpha_{\psi}^{\wedge})$ – «реперные» решения, т.е. численные решения (7)–(10) при $\alpha = \alpha_{\psi}^{\wedge}$. Соотношение (18) локально (в предельном случае бесконечно малых приращений α_e^*) эквивалентно коэффициентам чувствительности, вычисляемым по теории возмущений. В то же время, ухудшая локальное представление ∇_q в среднем по объему, отсекаемому «реперными» точками, получаем более точное соответствие выражений (13)–(16) настоящим поверхностям отклика в некото-

рой конечной окрестности. В этой окрестности, а не в бесконечно малой, и отыскивается рациональное сочетание искомых параметров.

Таким образом, можно сделать вывод, что получен инструмент приближенного вычисления компонентов матриц чувствительности, базирующийся только на использовании свойств линейности (или возможности линеаризации) аппроксимируемых функций.

Выражение (18) в силу сделанных выше примечаний относительно линейности (или линеаризации) можно применить и к функциям I, H :

$$I \approx I(0) + \nabla_I \cdot \alpha^T;$$

$$\nabla_I = \{\nabla_I^{(1)}, \nabla_I^{(2)}, \dots, \nabla_I^{(N_e)}\}^T; \nabla_I^{(\psi)} = [I(\alpha_\psi^*) - I(0)] / \alpha_\psi^*; \quad (19)$$

$$H \approx H(0) + \nabla_H \cdot \alpha^T;$$

$$\nabla_H = \{\nabla_H^{(1)}, \nabla_H^{(2)}, \dots, \nabla_H^{(N_e)}\}^T; \nabla_H^{(\psi)} = [H(\alpha_\psi^*) - H(0)] / \alpha_\psi^*. \quad (20)$$

В итоге исходная задача нелинейного программирования (3) приводится к задаче линейного программирования

$$\nabla_I \cdot \alpha^T \rightarrow \min, \quad \nabla_H \cdot \alpha^T \geq H^* - H(0). \quad (21)$$

При этом массивы коэффициентов чувствительности ∇_I, ∇_H вычисляются по схеме (19), (20), которая альтернативна традиционному. Степень «прозрачности» условного «серого ящика» изменяется вместе с изменением степени локализации, определяемой значениями α^* .

Для решения получаемой задачи можно применить один из множества известных методов [13].

Проведя описанную выше цепь линеаризаций, в итоге получаем последовательность задач линейного программирования (21) с изменяемым положением базовой точки $t^{(0)}$ и сужающимся диапазоном изменения α^* . Это означает, что, пошагово приближаясь к описываемому решению (21), можно попутно уточнять также характер поведения и решения задач анализа (13)–(16), и значения чувствительностей (18)–(20).

Естественно, что на каждом из шагов и этапов решения поставленной задачи допускается определенная погрешность, порождаемая характером поведения аппроксимационных функций, видом получаемых зависимостей, а также шагом конечно-разностных приближений. Вместо оценки погрешности, приносимой на каждом из этапов, предлагается проводить решение серии тестовых задач для отдельных машиностроительных конструкций и оценивать допускаяемую итоговую погрешность в каждом случае и в целом.

4. 2. Алгоритмизация предложенных методов расчета тонкостенных конструкций

Определив различные постановки и методы решения возникающих частных задач, далее необходимо разработать структуру исследований, направленных на их реализацию. Привлекаемые для исследований инструменты экспериментальных и численных исследований должны быть объединены, во-первых, единым форматом хранения основного массива информации, а во-вторых, располагать возможностями изменять модели исследуемых объектов.

Таким образом, для отдельного класса конструкций создается его обобщенное параметрическое описание [12], которое должно удовлетворять требованию: по заданному набору обобщенных параметров строить, и при том однозначно, модель исследуемого объекта в заранее согласованном формате. С другой стороны, должен быть создан механизм варьирования обобщенных параметров, позволяющий при этом сохранять целостность и согласованность модели. Применение всего арсенала существующих систем CAD/CAM/CAE (Creo, Catia, ANSYS, Abaqus и т.п.) не покрывает всех требований в инструментах и возможностях исследований. Однако игнорирование возможностями данных специализированных программных комплексов нецелесообразно, особенно в части автоматизированного создания КЭМ, расчета и постпроцессинга.

Исходя из всех обозначенных аргументов, была предложена следующая структура исследований (рис. 1).

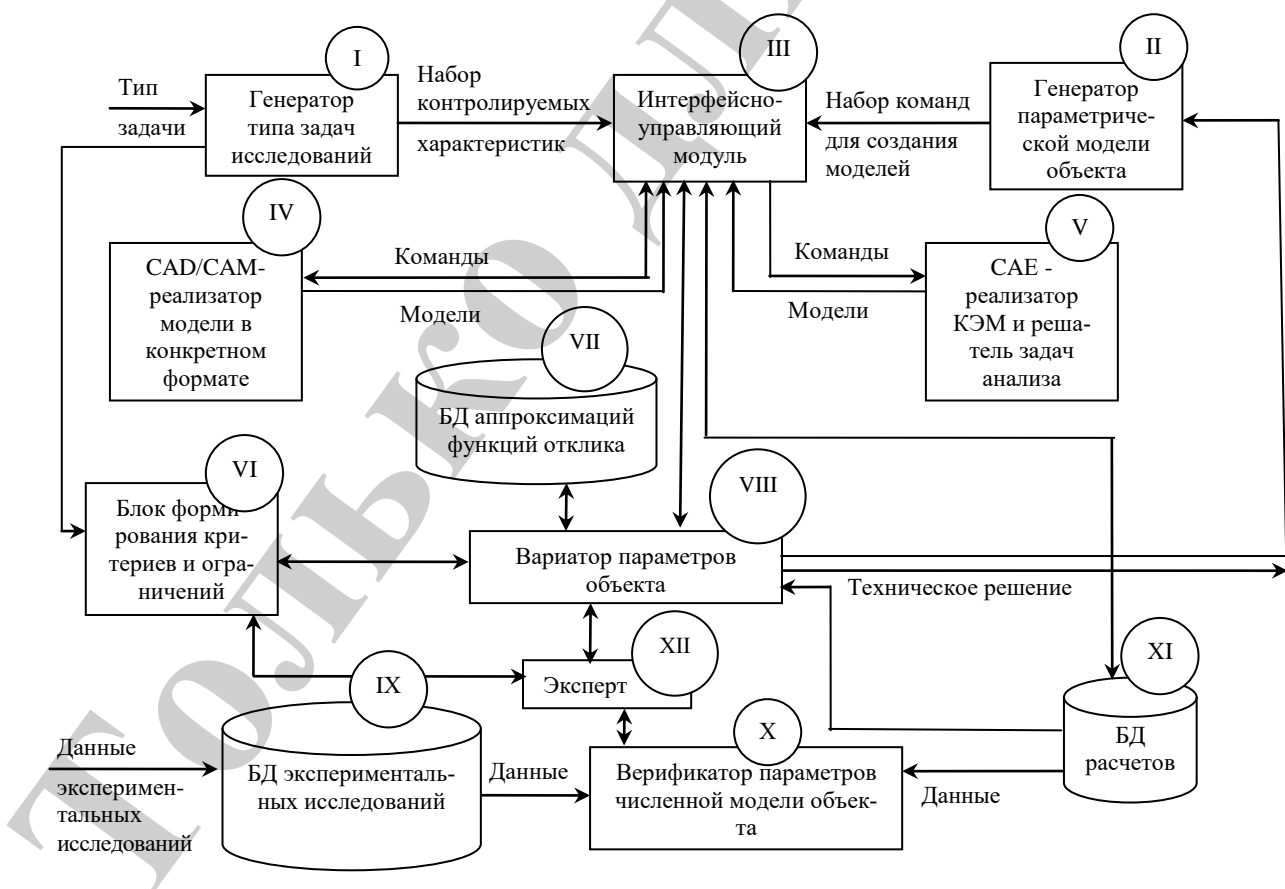


Рис. 1. Предлагаемая структура исследований тонкостенных машиностроительных конструкций

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.

5. Применение предложенного подхода для решения тестовых задач

Демонстрация возможностей предложенных подходов проиллюстрирована на примере ряда инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций.

Задача № 1. Определение параметров конструктивных элементов кузова автобуса, обеспечивающих требуемую прочность и жесткость.

Постановка задачи моделирует испытание силовой структуры пассажирского автобуса на специальном испытательном стенде, которое является требованием стандартов о безопасности FMVSS, действующих на транспортные средства данного типа. Расчетная схема приложения нагрузок учитывает действие на крышу транспортного средства плоской плиты, рис. 2. Исследования проводились на стержневой модели с учетом геометрической, физической и структурной нелинейностей [14].

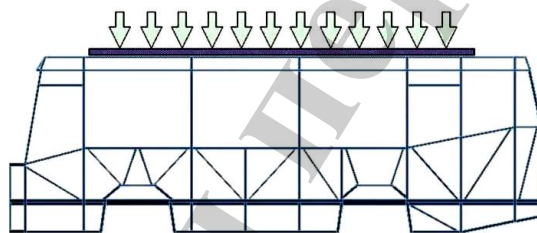


Рис. 2. Схема нагружения конструкции

Методика проведения исследований предполагала варьирование толщин стоек p_1 и перекладин крыши p_2 . Выбор оптимальных значений данных параметров осуществлялся на основе оценки возникающих в конструкции эквивалентных напряжений (рис. 3, а) и массы конструкции ($m(p) \rightarrow \min$ при ограничениях $\sigma \leq [\sigma]$) с учетом «стоимости» проектно-технологических изменений

$$I = \sum \gamma_i (p_i - p_{i0})^2.$$

Здесь γ_i – некоторые весовые коэффициенты, «оценивающие» стоимость изменения отдельного проектно-технологического параметра. На рис. 3, б приведена функция $\hat{I}(p) = I(p)/I(p_0)$ для данной конструкции при $\gamma_1 = \gamma_2 = 1/2$ при ограничениях по напряжениям и по критическим усилиям $P_{кр} \leq [P]$ (функция ϕ_1). В дополнение исследовались зависимости возникающей реакции в опоре f от перемещений плиты d при поочередном варьировании параметров p_1 и p_2 , рис. 4, а, б (здесь названы «поверхностями эволюции»).

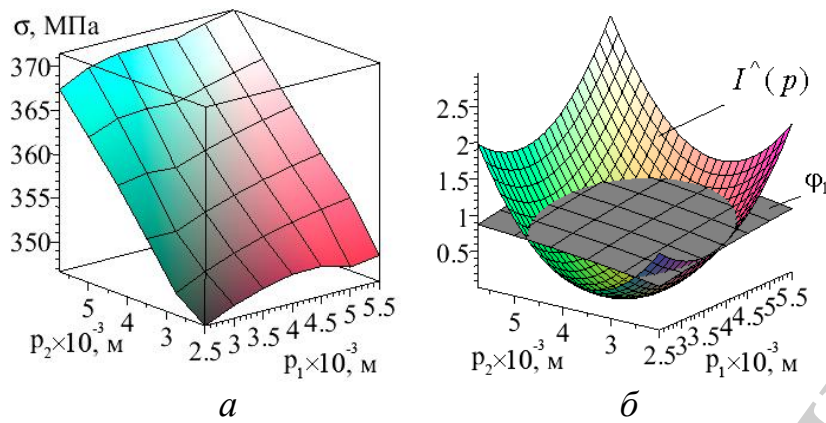


Рис. 3. Постановка задачи: *a* – поверхность отклика максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу; *б* – вид функций $\hat{I}(p)$ и φ_1

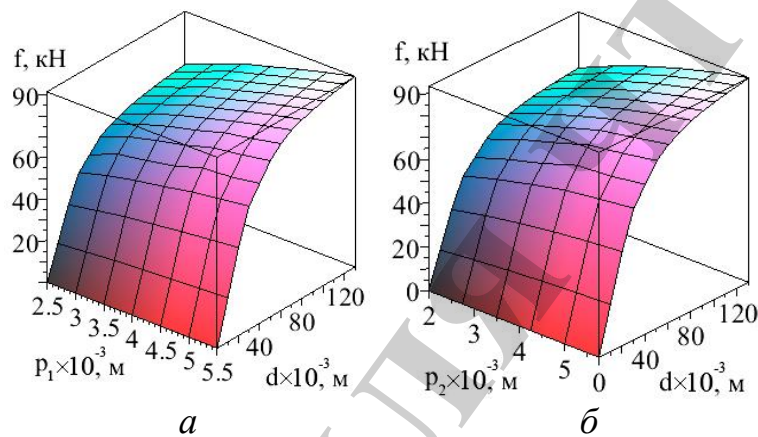


Рис. 4. Зависимости контролируемых характеристик от параметров: *a* – варьирование параметра p_1 ; *б* – варьирование параметра p_2

Из представленных результатов видно, что, несмотря на существенную нелинейность, заложенную в модель анализа НДС, и поверхности отклика (рис. 3, *a*), и «поверхности эволюции» (рис. 4, *a*, *б*) имеют достаточно гладкий характер. В силу этого в окрестности любой точки определенных построенных функций эти функции могут быть линеаризованы как по проектным, так и по нагрузочным (эксплуатационным) параметрам. На этой основе разработаны рекомендации по определению технических решений каркаса автобуса. Анализ НДС конструкции с рекомендованными параметрами продемонстрировал, что она удовлетворяет всем требованиям по прочности и жесткости.

Задача № 2. Обоснование параметров конструктивных элементов вагона-платформы и испытательных нагрузок.

Ставится задача оценки напряженного состояния конструкции вагона-платформы при действии вертикальных сил от расположенных на платформе грузов в соответствии с методами испытаний грузовых и пассажирских вагонов на прочность и ходовые качества РД 24.050.37.95. Также решается задача обоснования схемы расположения испытательных грузов при ходовых испытаниях вагона-платформы. Постановка задачи в таком разрезе требует выявления ре-

жимов нагружения, которые, во-первых, реализуемы на практике, а во-вторых, создают в силовых элементах вагона-платформы наиболее неблагоприятное напряженно-деформированное состояние. 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-ти футовыми имитаторами контейнеров массой 72 т. 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, рис. 5. Расчетная модель представлена на рис. 6.

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 мм и 9,5–24,5 мм соответственно, рис. 7. Построенные на базе расчетов поверхности отклика перемещений и напряжений представлены на рис. 7, а–в.

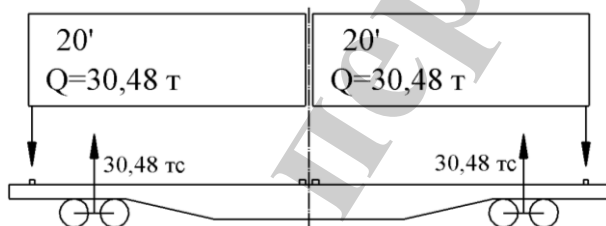


Рис. 5. Схема приложения нагрузок и ограничений

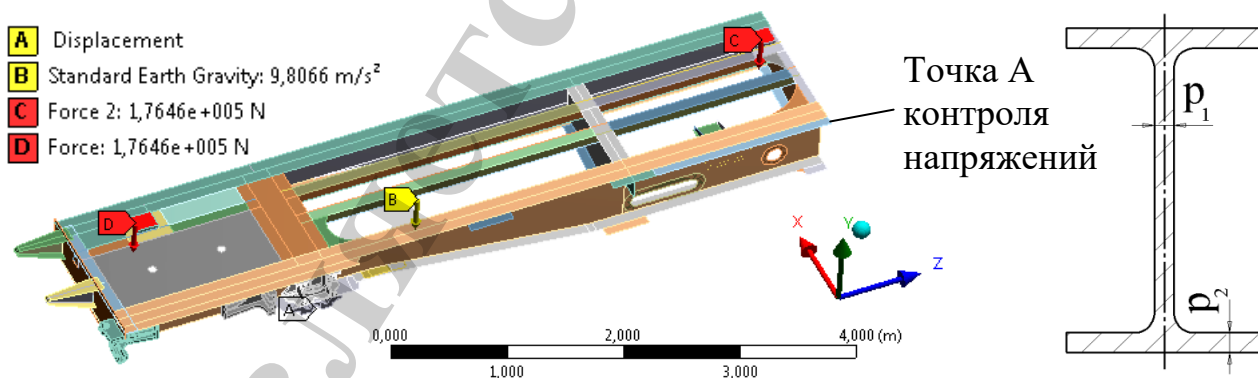


Рис. 6. Расчетная модель (1/4 вагона) и изменяемые параметры элемента хребтовой балки вагона-платформы

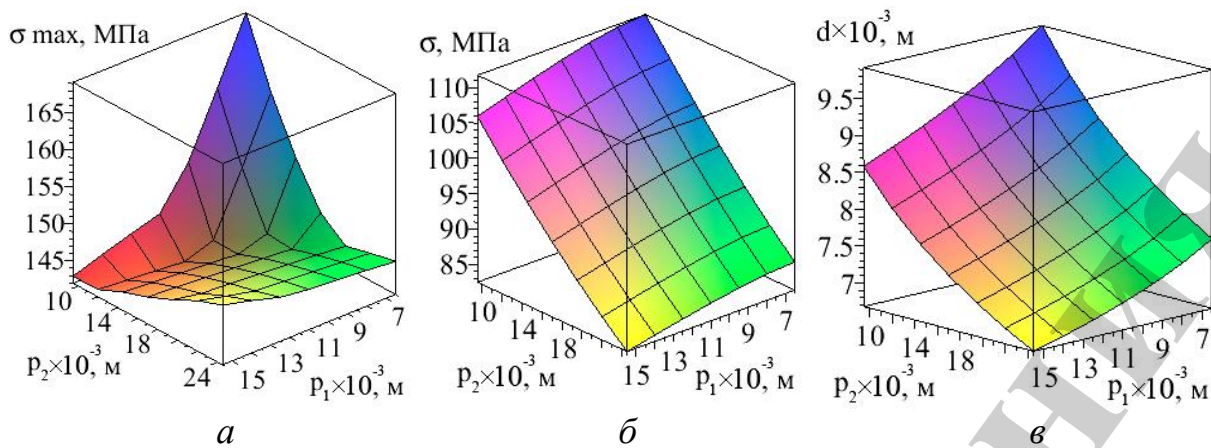


Рис. 7. Величины оцениваемых характеристик при варьировании параметров хребтовой балки вагона-платформы: *а* – максимальные напряжения; *б* – напряжения в точке т. А расчетной модели; *в* – максимальные перемещения

Второй вариант нагружения – нагружение при размещении 40-футового контейнера, рис. 8, *а*. 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, рис. 8, *б*.

С точки зрения поиска неблагоприятных сочетаний нагрузок в общем случае варьирования проектных параметров p_1, p_2 построены целевые функции $\sigma_{\varepsilon, \max}(p_1, p_2, n_v)$. Здесь n_v – номер варианта нагружения. На рис. 9 – график распределения функций $\sigma_{\varepsilon, \max}(p_1, p_2, n_v)$. Видно, что наиболее неблагоприятным в интересующем диапазоне варьирования 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.

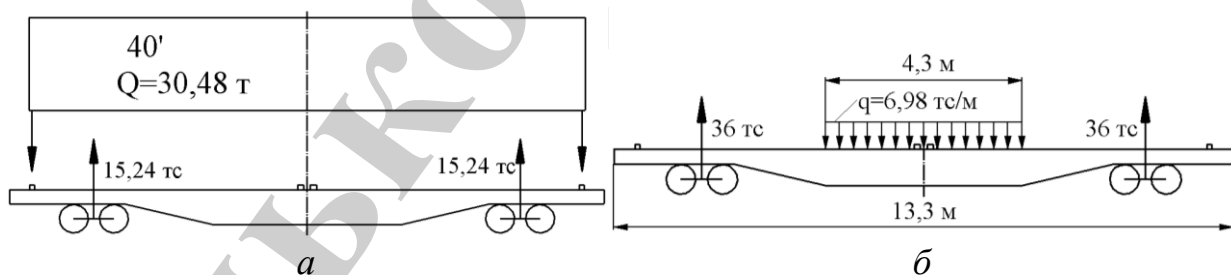


Рис. 8. Варианты нагружения: *а* – № 2; *б* – № 3

В дальнейшем рассмотрен третий вариант нагружения как неблагоприятный. При этом можно заметить, что на вид $\sigma_{\varepsilon, \max}(p_1, p_2)$ распределения σ^N в общем случае сильно влияет вариант нагружения. Для всех исследованных сочетаний параметров p_1, p_2 можно определить наиболее неблагоприятный вариант нагружения. Функцию отклика можно построить из верхних лепестков отдельных поверхностей, представленных на рис. 9. Таким образом, именно такой ва-

риант нагружения необходимо реализовать при численных исследованиях и экспериментальных испытаниях вагона-платформы.

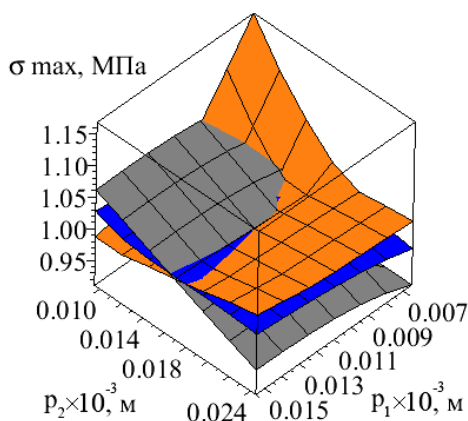


Рис. 9. Функции σ_{\max} , приведенные к максимальным эквивалентным напряжениям при базовом сочетании варьируемых параметров, в случае разных вариантов нагрузок: ■ – вариант нагружения № 1; ■ – вариант нагружения № 2; ■ – вариант нагружения № 3

На этой основе обоснованы проектные, технологические и эксплуатационные параметры вагона-платформы [6].

Задача № 3. 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 (рис. 10).

Варьировались толщины стенок полувагона (группа параметров p_1) и элементов хребтовой балки (группа параметров p_2). На рис. 11 представлены поверхности отклика, т. е. значение максимальных перемещений и напряжений, а также массы, соответственно, при разных комбинациях варьируемых параметров, отнесенные к значениям данных характеристик при базовом сочетании параметров.

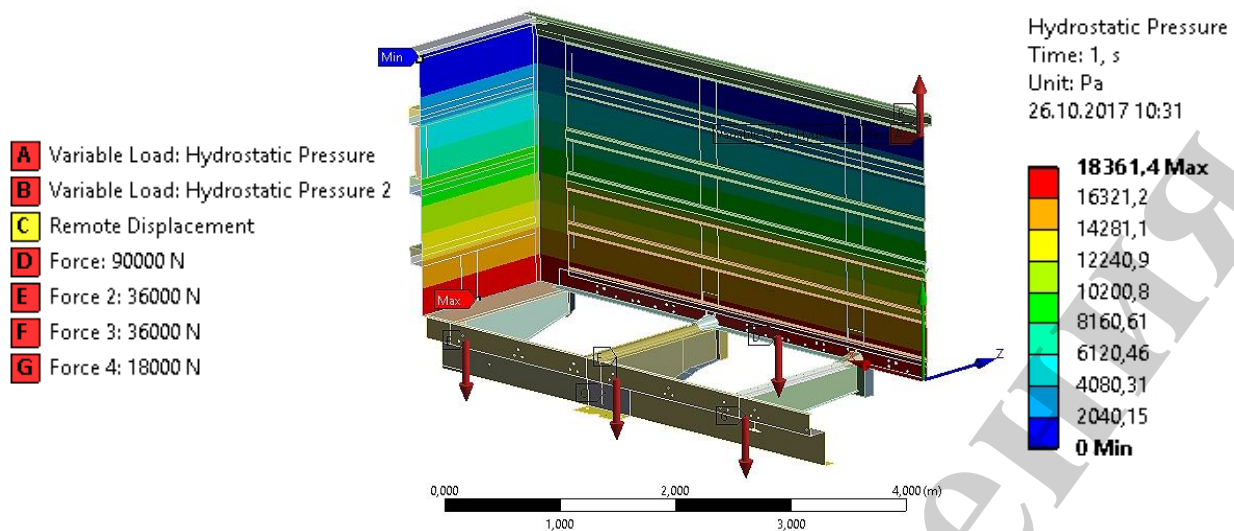


Рис. 10. Схема приложения нагрузок

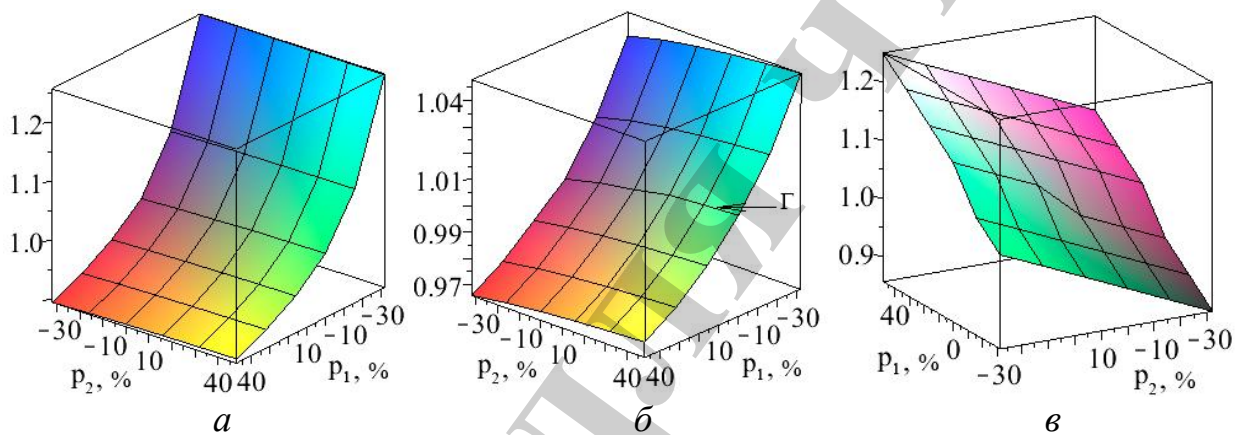


Рис. 11. Поверхности отклика на варьирование параметров силовой структуры полувагона: *а* – относительные перемещения; *б* – относительные напряжения; *в* – относительная масса

Здесь же – уровни функции

$$\hat{m}(p_1, p_2) = m(p_1, p_2) / m(p_1^0, p_2^0),$$

которая характеризует изменение массы полувагона вследствие варьирования параметров p_1, p_2 . Из представленных зависимостей видно, что 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 выигрыш по напряжениям и деформациям. При этом масса вагона изменяется незначительно. На этой базе обоснованы проектные решения для рассматриваемой конструкции.

Задача № 4. Обоснование проектно-технологических решений при проектировании каркаса кабины трактора.

Рассматривается постановка задачи оптимизации каркаса кабины трактора по обеспечению зоны безопасности тракториста при аварии, регламентированной ГОСТ 12.2.002.2-91. Воздействие на кабину осуществляется спереди жестким перемещением заданного участка каркаса на некоторое расстояние Δ , рис. 12. Заданные кинематические граничные условия – закрепления от всех перемещений и поворотов в области расчетной модели, соответствующей месту установки каркаса на тракторе. Задача решается в физически и геометрически нелинейной постановке.

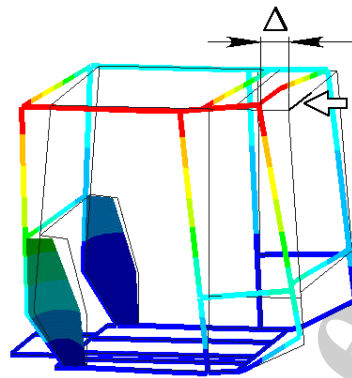


Рис. 12. Нагружение кабины трактора

Предполагается, что элементами конструкции кабины, в наибольшей степени ответственными за сохранение зоны жизненного пространства при заданном типе нагружения, являются поперечина крыши, на которую непосредственно действует нагрузка, и стойки кабины. Таким образом, варьировались их толщины – параметры p_1 и p_2 соответственно. Полученные поверхности отклика максимальных напряжений и реактивных сил представлены на рис. 13, а, б.

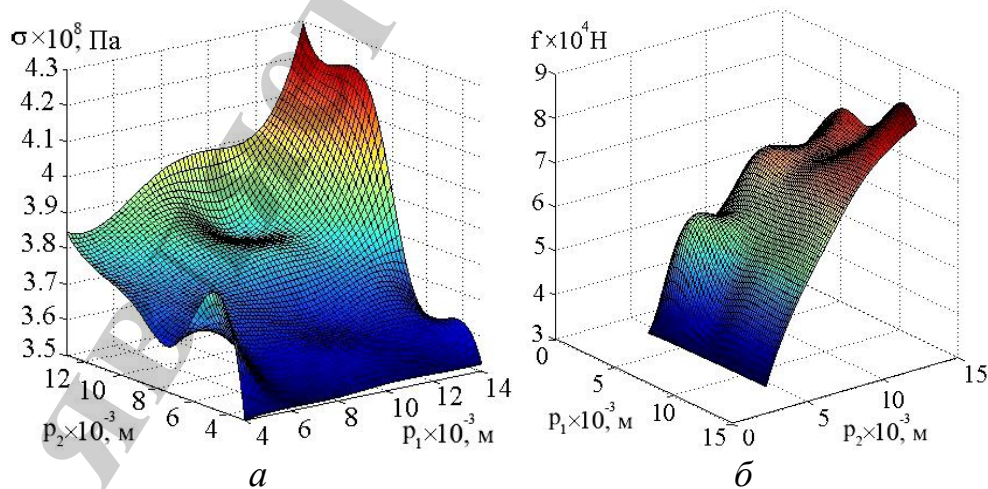


Рис. 13. Поверхности отклика на варьирование параметров p_1 и p_2 :
а – максимальные напряжения; б – реакции в опоре

Как и в задаче № 1, также исследовались зависимости возникающей реакции в опоре при кинематическом нагружении с поочередным изменением параметров p_1 и p_2 , рис. 14, а, б, послужившие основой для разработки рекомендаций относительно конструктивных решений каркаса кабины трактора [6].

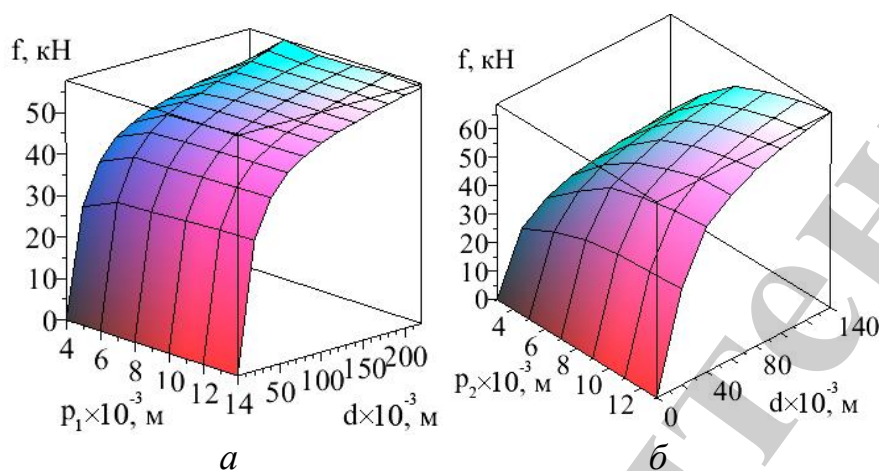


Рис. 14. Зависимость возникающей реакции в опоре от перемещений плиты при варьировании параметров: а – варьирование параметра p_1 ; б – варьирование параметра p_2

Задача № 5. Синтез конструктивных параметров корпуса многоцелевого тягача МТ-Л.

МТ-Л – плавающий тягач, рис. 15. Одно из предъявляемых требований к его конструкции – 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.

Ставилась задача определения зависимости перемещений, эквивалентных напряжений по Мизесу и массы конструкции от толщин его конструктивных элементов. Параметр p_1 управляет толщинами листов обшивки днища. Он варьировался в пределах 2–6 мм с шагом 1. Параметр p_2 отвечает за значение толщин стенок поперечных швеллеров в нижней части рамы тягача и изменялся в диапазоне 2–10 мм с шагом 2, рис. 15.

На рис. 16, а–в – 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 его толщины. Еще более резко возрастают эквивалентные напряжения как в контролируемой точке днища, так и, особенно, максимальные по корпусу. В сочетании с линейной зависимостью массы корпуса МТ-Л от варьирования параметров получаем информацию для принятия проектных решений по обоснованию варьируемых параметров [6]. Что важно – данный подход распространим на широкий класс подобных конструкций.

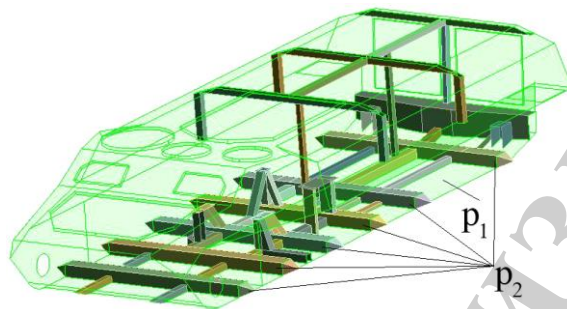


Рис. 15. Варьируемые параметры корпуса МТ-Л

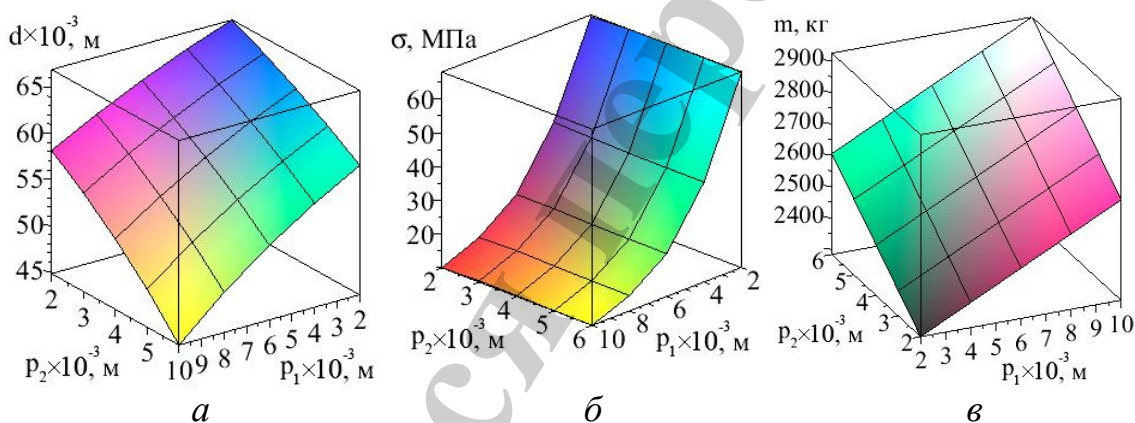


Рис. 16. Поверхности отклика: *a* – максимальные перемещения; *б* – напряжения; *в* – масса

Рассмотренные примеры не исчерпывают всего многообразия решаемых задач и объектов разработки. В то же время получено подтверждение применимости и эффективности предложенных подходов к решению прикладных задач для инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций.

6. Обсуждение результатов исследований применения параметрического подхода к решению прикладных задач

На основе параметрического подхода поставлена и получила завершённую формулировку проблема обоснования проектно-технологических решений инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций. Поиск решения данной задачи проходит 2 стадии. На первой стадии на основе эвристических подходов определяются основные структурные и общекомпоновочные решения инновационных изделий. Далее обосновываются

отдельные параметры по критериям обеспечения прочности и других характеристик. Отличительной особенностью используемых при этом моделей является их вариативность, т. е. приспособленность к изменению варьируемых параметров, нагрузок, критериев и ограничений. Это свойство, с одной стороны, отличает их от используемых в традиционных постановках оптимизационных задач, а с другой – крайне необходимо в реальной практике разработки инновационных изделий. Таким образом, происходит естественное соединение требуемых и обеспечиваемых качеств, что предоставляет принципиально новые возможности при решении прикладных задач по сравнению с традиционными подходами.

В ходе проведения исследований установлены зависимости прочностных характеристик отдельных тонкостенных машиностроительных конструкций от их проектно-технологических параметров и эксплуатационных режимов. Продемонстрировано, что такие зависимости не носят унимодальный характер. Если, к тому же, согласно предложенному подходу, в целевую функцию включить учет ряда дополнительных факторов, получаемые в результате поверхности отклика могут иметь сложный характер поведения. Во многих случаях они характеризуются пологостью и наличием большого количества неярко выраженных локальных экстремумов. Кроме того, могут встречаться овраги с дном вдоль сложной траектории. Также встречаются изломы и скачки на поверхности отклика. Эта особенность целевой функции составляет трудность при оптимизации.

Предложенный метод аппроксимации поверхности отклика и поиска оптимального решения предполагает объединение двух процессов – измельчения сетки дискретизации и смещения зоны дискретизации в область положения текущего приближения к решению. Тем самым получаем разновидность технологии «серого ящика», предусматривающую, в отличие от вариантов «белого (прозрачного) ящика» и «черного ящика», получение частичного знания о поведении аппроксимируемой функции. В частности, предложена линеаризация изменения зависимых параметров в окрестности текущей точки параметрического пространства. При этом чувствительность контролируемых величин на варьирование параметров определяется на основе конечно-разностных вычислений с использованием «реперных» решений задач анализа. Положение исходной точки, а также величины шагов по параметру, определяют точность приближения действительной поверхности отклика, т. е. увеличивается степень «прозрачности серого ящика». Это свойство дает возможность отвлекаться от локальных особенностей поведения поверхности отклика, в большей степени нацеливаясь на глобальные тенденции ее зависимости от варьируемых параметров. Дело в том, что глобальный оптимум, лежащий в области сильной кривизны функции отклика, является зоной высокой чувствительности оцениваемых характеристик на варьирование изменяемых параметров. Таким образом, даже незначительное изменение в ходе изготовления закладываемых в проект значений параметров, а также изменение эксплуатационной нагрузки, может существенно сказаться (как правило, в сторону ухудшения) на прочностных и жесткостных качествах

проектируемого изделия. Этого недостатка лишен предложенный подход. В то же время следует отметить, что его применение может привести к потере (пропуску) еще более рационального технического решения. Однако этот недостаток перекрывается за счет повторного проведения решения задачи с другими исходными точками.

7. Выводы

1. На основе параметрического моделирования разработан подход к проектному обеспечению прочности инновационных ТСМСК. При этом усовершенствован подход к аппроксимации функции отклика на основе комбинации преимуществ технологий «черного ящика» и «прозрачного ящика». В отличие от них, предлагается повышать степень дискретизации областей поиска по ходу итерационного процесса уточнения текущего приближений решения, вместе с этим сдвигая область уточнения дискретизации к этому текущему приближению.

2. Для вычисления чувствительности отдельных величин к варьированию параметров предложено использовать конечно-разностные соотношения, причем приоритетным является построение аппроксимационной поверхности отклика, отражающей в целом «глобальные» тенденции изменения решения, а не «локальные» как в традиционных подходах. Это позволяет найти такое техническое решение, которое, не будучи строго оптимальным, тем не менее, является, во-первых, к нему близким, а во-вторых, не приводит к резкому ухудшению технических характеристик инновационных изделий при варьировании исходных данных.

3. На примере ряда изделий установлены зависимости контролируемых характеристик (напряжения, масса, упругие перемещения и т. п.) от варьироваемых параметров (например, размеры в плане, в сечении и по толщине элементов ТСМСК). Путем целенаправленного варьирования параметров определяется их рациональное сочетание, а, соответственно, и рекомендации по проектно-технологическим решениям. В результате обосновываются новые технические решения инновационных изделий. В частности, на основе проведенных исследований разработаны рекомендации по обоснованию проектных параметров инновационных изделий: каркасов кузовов автобусов, выдерживающих заданный уровень испытательных нагрузок; универсальных вагонов-платформ и железнодорожных полувагонов с увеличением грузоподъемности; силовых элементов кабины трактора по критерию обеспечения сохранения зоны безопасности для оператора в случае опрокидывания; силовой внутренней структуры и обшивки многоцелевого тягача семейства МТ-Л при модернизации с сохранением плавучести и прочности.

В дальнейших исследованиях предполагается применить предложенные разработки к обоснованию технических решений широкого множества инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций.

Литература

1. Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures / Neittaanmäki P., Repin S., Tuovinen T. (Eds.). Switzerland: Springer, 2016. 328 p. doi: 10.1007/978-3-319-23564-6
2. Zarchi M., Attaran B. Performance improvement of an active vibration absorber subsystem for an aircraft model using a bees algorithm based on multi-objective intelligent optimization // *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49, Issue 11. P. 1905–1921. doi: 10.1080/0305215x.2017.1278757
3. Serpik I. N., Mironenko I. V., Averchenkov V. I. Algorithm for Evolutionary Optimization of Reinforced Concrete Frames Subject to Nonlinear Material Deformation // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 1311–1316. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.304
4. Kuczek T. Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures // *Engineering Optimization*. 2015. Vol. 48, Issue 2. P. 351–360. doi: 10.1080/0305215x.2015.1017350
5. Инновационный вагон-цистерна для перевозки легковесных химических продуктов модели 15-6899 / Чепурной А. Д., Шейченко Р. И., Граборов Р. В., Ткачук Н. А., Бондаренко М. А. // *Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: материалы XII Международной научно-технической конференции*. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 32–33.
6. Analysis and synthesis of complex spatial thin-walled structures / Marchenko A., Chepurnoy A., Senko V., Makeev S., Litvinenko O., Sheychenko R. et al. // *Proceedings of the Institute of Vehicles*. Institute of Vehicles of Warsaw University of Technology. 2017. Issue 1. P. 17–29.
7. Nocedal J., Wright S. *Numerical Optimization*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2006. 664 p.
8. Chinneck J. W. *Practical optimization: a gentle introduction*. URL: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html>
9. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Zhu J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 756 p.
10. Sachsenberg B., Schittkowski K. A combined SQP–IPM algorithm for solving large-scale nonlinear optimization problems // *Optimization Letters*. 2015. Vol. 9, Issue 7. P. 1271–1282. doi: 10.1007/s11590-015-0863-x
11. Sample size selection in optimization methods for machine learning / Byrd R. H., Chin G. M., Nocedal J., Wu Y. // *Mathematical Programming*. 2012. Vol. 134, Issue 1. P. 127–155. doi: 10.1007/s10107-012-0572-5
12. Динамические и прочностные характеристики тонкостенных элементов машиностроительных конструкций при уменьшении толщины в процессе эксплуатации / Танченко А. Ю., Ткачук Н. А., Артемов И. В., Литвиненко А. В. // *Актуальные вопросы машиноведения*. 2013. Вып. 2. С. 210–213.
13. Карманов В. Г. *Математическое программирование*. 6-е изд. М.: Физматлит, 2008. 263 с.
14. Васидзу, К. *Вариационные методы в теории упругости и пластичности*. М.: Мир, 1987. 542 с.