

УДК 629.4.02

Д-р техн. наук, проф. В. И. СЕНЬКО, канд. техн. наук А. В. ПУТЯТО

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВАГОНОВ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЕРЕВОЗИМЫМИ ГРУЗАМИ

Ключевые слова: совершенствование конструкции; взаимодействие; вагон-цистерна; жидкий груз; метод конечных элементов

В сложившихся рыночных условиях, а также с целью реализации программы импортозамещения в Республике Беларусь происходит развитие ряда направлений промышленности путем создания предприятий, продукция которых имеет перспективу рынка сбыта. В рамках развития вагоностроения в Республике Беларусь необходимо создание подвижного состава, проектирование и изготовление которого основано на применении современных и инновационных технологий в данной отрасли. Учитывая, что одним из основных показателей, определяющих конкурентоспособность продукции вагоностроения, является ее надежность, крайне важно уже на стадии проектирования иметь возможность учета максимально широкого спектра динамических нагрузок, имеющих место при эксплуатации. Существующая нормативная база в ряде случаев не позволяет учитывать или учитывает весьма приближенно отдельные случаи нагружения кузова, связанные, например, с перевозкой жидкостей и насыпных грузов. В связи с чем появляется необходимость разработки теории пространственного взаимодействия кузова вагона с перевозимым грузом в процессе эксплуатации, использование которой позволит разработать комплекс технических предложений по совершенствованию элементов конструкций подвижного состава.

Предлагаемая методологическая схема исследований приведена на рис. 1. Алгоритм совершенства-

ния конструкции вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами можно разделить на четыре блока (I–IV).

Первый блок включает в себя накопление и переработку информации, связанной с анализом особенностей конструкции основных типов грузовых вагонов, их недостатками, выявленными в процессе эксплуатации (на основе имеющихся статистических данных), реальным физическим состоянием эксплуатируемого подвижного состава, родом перевозимых грузов (преимущественно жидких и сыпучих) и их физико-механическими характеристиками.

Реализация работ в рамках второго блока является наиболее трудоемкой и сложной, поскольку связана с разработкой теории математического описания поведения грузов в транспортном средстве. В процессе реализации указанного блока анализируется опыт ведущих исследователей в области математического моделирования жидких и сыпучих сред, выявляются достоинства и недостатки применения тех или иных методов для реализации поставленной задачи. На основе проведенного анализа исследований в области механики жидких и сыпучих материалов в блоке II разраба-



Рис. 1. Методологическая схема исследований

V. I. Senko, A. V. Putyato. Improving car design taking into account interaction with transported goods

The algorithm of improving car design taking into account interaction with transported goods especially liquid and bulky is proposed. The realisation of this algorithm relating to improving design of cars for transporting liquid goods is presented as well as methods enabling to determine hydrodynamics loading of tank and its stress-deformed state taking into account interaction with transported goods. The method of finite elements was applied when modelling interaction at liquid — metal structure of tank system for solving equations of Navier — Stokes, continuity (applied with modelling hydrodynamics of liquid goods) and dynamics of elastic structure of carbody. Conducted researches provided a base for elaborating some technical solutions on improving design of tank car; their novelty and usability have been confirmed by patents.

Keywords: design improvement; interaction; tank car; liquid goods; method of finite elements

тываются математические модели, адаптированные к описанию поведения соответствующих грузов в кузове вагона при его эксплуатации и имеющие возможность учета необходимых физико-механических характеристик материалов, определяемых в предыдущем блоке исследований.

На основе анализа информации, полученной в блоке I, разрабатывается модельная база кузовов грузовых вагонов основных типов для определения их напряжений и деформаций. При этом имеется возможность варьирования требуемыми характеристиками для учета реального физического состояния кузовов вагонов. В ходе реализации блока II одной из главных задач является экспериментальная проверка адекватности результатов, получаемых на разработанных математических моделях.

Третий блок подразумевает разработку методики, позволяющей определять взаимовлияние компонентов, получаемых при реализации математических моделей грузов и моделей единиц подвижного состава. Здесь необходима разработка математических моделей (разделение как минимум на две системы: кузов вагона — жидкий груз, кузов вагона — сыпучий груз), обеспечивающих интерактивную «склейку» двух математических моделей: в частности, для вагона-цистерны — модель гидродинамики жидкости в котле цистерны и модель для расчета напряженно-деформированного состояния ее кузова. Реализация такого подхода позволит выполнять виртуальный мониторинг прочности конструкции вагона при любом заданном режиме нагружения на рассматриваемом интервале времени с учетом взаимодействия с перевозимым грузом.

Полученные результаты теоретических исследований дают возможность определить особенности напряженно-деформированного состояния кузовов вагонов с учетом взаимодействия с перевозимыми грузами, в том числе при экстремальных режимах эксплуатации, что в совокупности является основой для создания комплекса технических предложений, направленных на создание новых и совершенствование существующих элементов конструкций кузовов грузового подвижного состава (реализация блока IV).

Рассмотрим реализацию предлагаемой методологической схемы применительно к совершенствованию элементов конструкций вагонов для перевозки наливных грузов.

К особенностям расчета на прочность металлоконструкции вагона-цистерны относится учет воздействия перевозимого в котле жидкого груза. Большое количество работ посвящено расчетам на прочность котлов и рам железнодорожных цистерн, в которых предусматривается нормативное нагружение котла цистерны жидким грузом [1, 2]. Однако нормативное

распределение не полностью учитывает особенности, связанные с движением вагона с переменной скоростью и при входе в кривую, а также возможный недолив котла.

Исследование особенностей динамики наливного подвижного состава привело к бурному развитию методов учета подвижности жидкого груза в транспортном резервуаре [3, 4], использование которых позволило выполнить уточненную оценку напряженно-деформированного состояния металлоконструкции цистерны путем квазистатического приложения сил при максимальном давлении жидкости (получаемых при рассмотрении переходного режима) к внутренней поверхности котла, распределение которых близко к реальному [5]. В то же время такое решение проблемы прочности кузова цистерны не позволяет учесть особенностей напряженного состояния, вызванных взаимодействием упругой конструкции котла и жидкого груза.

Предлагаемый подход основан на совместном решении задач гидродинамики и прочности на каждом заданном шаге времени с применением современного многодисциплинарного комплекса программ ANSYS [6], реализующего метод конечных элементов, в частности ANSYS Workbench для решения задачи прочности и CFX для решения задачи гидродинамики.

С этой целью созданы конечно-элементные модели металлоконструкции кузова вагона-цистерны и внутренней области котла (в качестве объекта исследования выбрана цистерна модели 15-1443). Создание двух моделей выполнялось параллельно: в пакете ANSYS Workbench построена модель кузова вагона, в пакете CFX — модель жидкого груза. Граничные условия задавались отдельно для каждой модели в соответствующем программном модуле. Для металлоконструкции кузова цистерны введены связи в плоскостях передних и задних упоров автосцепного устройства, ограничивающие соответствующие продольные перемещения, а также запрещены вертикальные перемещения в области пятников. Для учета возможных больших вертикальных перемещений котла в консольных частях вагона (при ослаблении стяжных хомутов) в узлах опирания котла на деревянные бруски смоделированы контактные области, а в местах крепления стяжных хомутов к раме вагона введены дополнительные упругофрикционные элементы, дающие возможность имитации степени ослабления стяжных хомутов. Материал кузова рассматривался в упругой постановке и был задан следующими характеристиками: модуль Юнга — $2,1 \cdot 10^{11}$ Па, плотность — 7850 кг/м^3 , коэффициент Пуассона — 0,3.

Свойством созданной модели внутреннего объема котла является возможность варьирования характери-

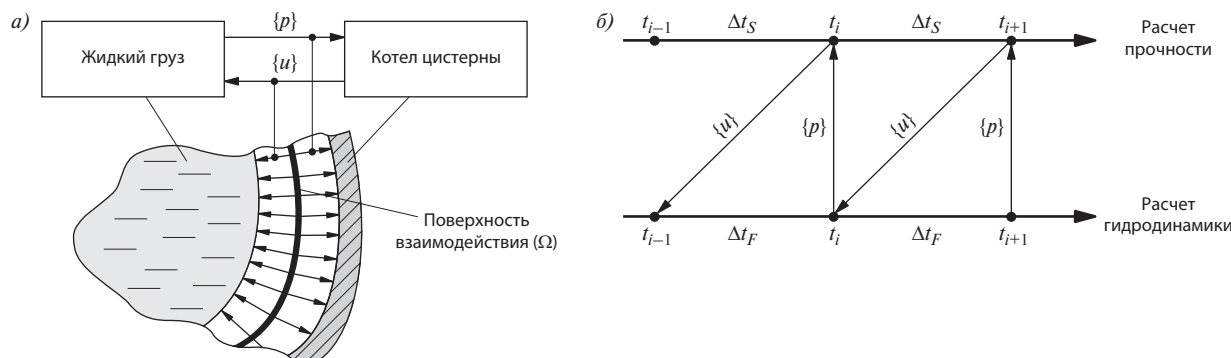


Рис. 2. Схемы взаимодействия жидкого груза с металлоконструкцией котла цистерны (а) и итерационного процесса (б)

стиками жидкого груза, а также рассмотрения различного уровня налива.

Важным шагом при создании расчетных моделей для взаимосвязанного междисциплинарного анализа является задание поверхности сопряжения (взаимодействия), в данном случае жидкости и конструкции. При этом подходе весь процесс расчета разбивается на интервалы, число которых зависит от принятого шага по времени, определяемого исходя из размеров конечных элементов и величины средней скорости движения жидкости при переходном режиме [7, 8]. Несмотря на то что общая расчетная схема носит нестационарный характер, т. е. временные шаги могут быть различными, в нашем случае (учитывая разработанные конечно-элементные модели и опыт расчета гидродинамики жидкости в котле цистерны) в программном обеспечении шаг по времени Δt принят равным 0,01 с.

Рассмотрим алгоритм решения задачи. На первом шаге выполняется расчет прочности металлоконструкции котла при гидростатическом давлении. Затем полученные на этом шаге деформации $\{u\}$ передаются в модуль CFX, где решается задача гидродинамики с учетом перемещений соответствующих узлов поверхности взаимодействия. Найденные силы в узлах поверхности взаимодействия (давление жидкости) $\{p\}$ передаются в прочностной модуль, и выполняется расчет с системой сил, соответствующей новому положению жидкого груза. Далее информация о деформации конструкции передается в модуль для расчета гидродинамики, и цикл расчетов и обмена информацией повторяется до заданного конечного времени (рис. 2). Таким образом, на протяжении рассматриваемого режима движения выполняется мониторинг прочности металлоконструкции котла с учетом взаимодействия с перевозимым жидким грузом.

Кратко рассмотрим математическую реализацию вышеуказанного процесса для случая взаимодействия в системе жидкость — конструкция. В общем случае рассматриваемый процесс может быть описан матричным уравнением

$$\begin{bmatrix} [M_S] & [0] \\ [M_{FS}] & [M_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & [0] \\ [0] & [C_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & [K_{FS}] \\ [0] & [K_F] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_S(t)\} \\ \{F_F(t)\} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где $[M_S]$ — матрица масс котла цистерны; $[M_F]$ — матрица масс жидкого тела; $[C_S]$ — матрица коэффициентов сопротивлений для металлоконструкции котла (при их наличии и учете); $[C_F]$ — матрица коэффициентов сопротивлений для жидкого тела (при их наличии и учете); $[K_S]$ — матрица жесткости для металлоконструкции котла; $[K_F]$ — матрица жесткости для жидкости; $[M_{FS}]$, $[K_{FS}]$ — матрица масс и матрица жесткости поверхности взаимодействия жидкость — конструкция; $\{u\}$ — матрица узловых перемещений конструкции котла; $\{p\}$ — матрица давлений жидкого тела; $\{F_S(t)\}$ — матрица приложенных узловых сил к металлоконструкции котла; $\{F_F(t)\}$ — матрица приложенных узловых сил к жидкому телу.

Видно, что в уравнении (1) совмещены матричные формы записи динамической задачи конструкции и задачи гидродинамики жидкого груза, которая основана на уравнениях Навье — Стокса и уравнениях неразрывности [7]. Ключевым моментом является наличие матриц $[M_{FS}]$ и $[K_{FS}]$, которые обеспечивают взаимодействие двух сред (F — жидкая среда, S — металлоконструкция). Так, при рассмотрении, например, несжимаемой жидкости можно записать

$$[M_{FS}] = \rho [R]^T; [K_{FS}] = -[R],$$

где ρ — плотность жидкости;

$$[R]^T = \int_{(\Omega)} \{N_S\} \{N_F\}^T \{n\} d(\Omega);$$

$\{N_S\}$ — матрица функций форм для дискретизации области металлоконструкции котла; $\{N_F\}$ — матрица функций форм для дискретизации области жидкого тела (давлений); $\{n\}$ — матрица нормальных векторов к поверхности раздела (взаимодействия) двух сред; Ω — смоченная поверхность (поверхность взаимодействия).

В данной математической модели рассмотрен процесс соударения вагонов с возникновением ускорения $3,5g$ на протяжении $0,3$ с, что рекомендовано [9] при расчете на прочность грузовых вагонов. Жидкий груз в начальный момент времени принимался неподвижным, с плоской свободной поверхностью.

Время расчета варьировалось в зависимости от заданного уровня налива котла, достигало нескольких суток (частота двухъядерного процессора 6 ГГц, оперативная память 4 ГБайт); расчет занимал меньше времени (при меньшем наливе котла) с учетом распараллеливания итерационного процесса на два ядра процессора. В ходе расчета программа формирует две группы результатов: напряженно-деформированное состояние для металлоконструкции кузова вагона и гидродинамические характеристики жидкого груза. Используя полученную информацию, можно определить соответствующие характеристики для каждого момента времени рассматриваемого переходного процесса.

На рис. 3 приведено распределение эквивалентных напряжений в металлоконструкции котла и положение жидкого тела при нормативном наливе, соответствующие моменту времени $0,3$ с после начала соударения. На рис. 4, а приведены временные зависимости гидродинамической нагруженности для одной из наиболее нагруженных областей котла (область 3, см. рис. 3), соответствующие различным уровням заполнения жидким грузом. Характерно, что максимальные давления жидкости при различных наливах котла реализуются в разные моменты времени и чем меньше

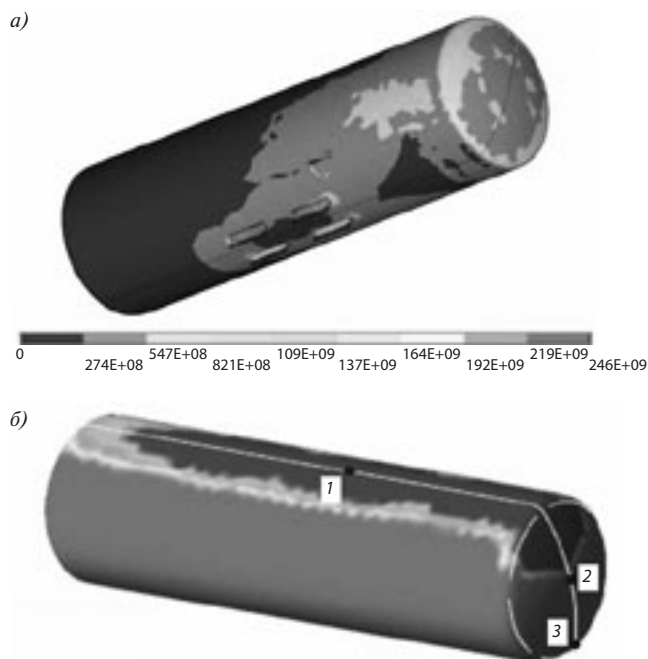


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений (Па) в металлоконструкции котла и положение жидкого тела, соответствующие моменту времени $0,3$ с после соударения

налив котла, тем больший временной интервал следует рассматривать, а экстремум временной зависимости становится менее выраженным. В то же время при рассмотрении зависимости максимальных значений давлений жидкости от налива котла (в исследуемой области) установлено, что при наливе $70-80\%$ наблюдаются наибольшие значения давления (серая область на рис. 4, б). Установлено, что с увеличением вязкости перевозимого груза максимальные значения давлений жидкости также находятся в диапазоне $70-80\%$ налива, но наблюдается закономерное снижение относительно значений максимальных давлений, регистрируемых при нормативном заполнении котла.

На графиках рис. 4, в приведены зависимости, демонстрирующие расхождение результатов давлений жидкости при рассмотрении оболочки котла в виде абсолютно твердого тела (граничное условие на смоченной поверхности — условие Неймана) и с учетом его деформаций. Установлено, что расхождение результатов достигает 55% в начальный момент времени и затем практически стабилизируется и сводится к нулю (см. рис. 4, в, кривые 3 и 2) в более жестких областях металлоконструкции (после $0,1$ с). В то же время в области 1 (см. рис. 3, б) наблюдается существенное колебание в расхождении результатов (см. рис. 4, в, кривая 1), что связано с более низкой частотой собственных колебаний рассматриваемой области оболочки котла цистерны. Анализ полученных результатов показал, что при нормативном заполнении котла цистерны водой минимальная собственная частота оказалась равной $9,6$ Гц и это сопоставимо с экспериментальными и расчетными результатами, приведенными в [10].

Аналогичная временная динамика зафиксирована при анализе напряжений в рассматриваемых областях. Характерные зависимости главных напряжений для области 1 приведены на рис. 4, г.

Заключение. Предлагаемая методологическая схема исследований с целью совершенствования элементов конструкций вагонов для перевозки наливных грузов, в рамках которой разработана методика, позволяющая определять гидродинамическую нагруженность котла и напряженно-деформированное состояние кузова вагона-цистерны с учетом взаимодействия с перевозимой жидкостью, легла в основу разработки комплекса технических предложений, новизна и полезность которых подтверждена патентами на полезные модели BY 2429, BY 3011, BY 5795, BY 6056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструирование и расчет вагонов: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Лукин [и др.]; под ред. В. В. Лукина. М.: УМК МПС России, 2000. 731 с.

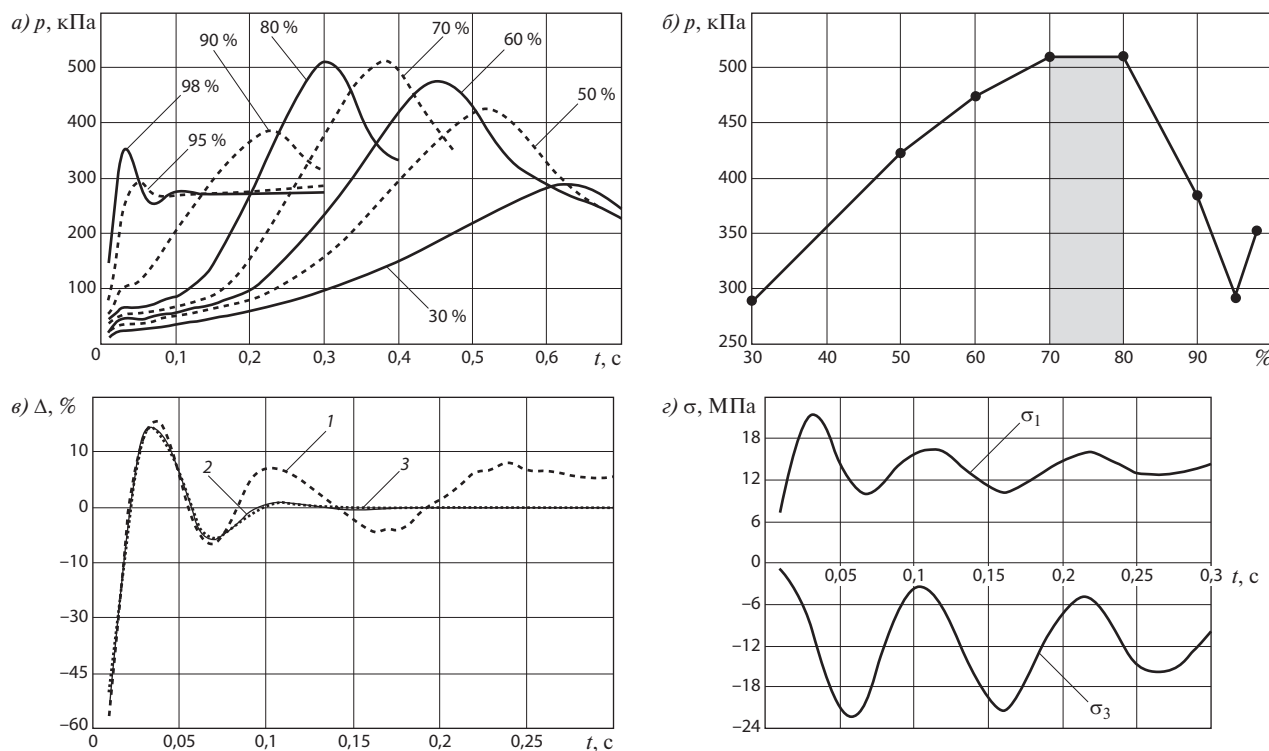


Рис. 4. Результаты расчетов:

a — временные зависимости гидродинамической нагруженности котла в области *З* для различных уровней его заполнения жидким грузом; *б* — максимальные значения давления жидкости в области *З* в зависимости от налива; *в* — расхождение результатов гидродинамической нагруженности при рассмотрении котла с абсолютно твердыми стенками при учете его упругости; *г* — временные зависимости главных напряжений в оболочке котла области *И*

2. Овечников М.Н. Решение проблемы снижения повреждаемости котлов и рам железнодорожных цистерн для перевозки нефтепродуктов с использованием современных программных средств моделирования и расчета конструкции: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. М.: МГУПС, 2001. 47 с.

3. Черкашин Ю.М. Динамика наливного поезда // Труды ЦНИИ МПС. Вып. 543. М.: Транспорт, 1975. 136 с.

4. Богомаз Г.И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн. Киев: Наукова думка, 2004. 223 с.

5. Сенько В.И., Путятю А.В., Шимановский А.О. Прочность кузова железнодорожной цистерны с учетом перемещения перевозимого жидкого груза. Гомель: УО «БелГУТ», 2006. 210 с.

6. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: справочное пособие. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.

7. Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика: учеб. пособие для вузов. Л.: Судостроение, 1982. 456 с.

8. Ершов Н.Ф., Шахверди Г.Г. Метод конечных элементов в задачах гидродинамики и гидроупругости. Л.: Судостроение, 1984. 240 с.

9. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. М., 1996. 319 с.

10. Шаринов И.Л. Свободные колебания цилиндрических оболочек котлов железнодорожных цистерн // Вестник ВНИИЖТ. 1982. № 3. С. 38–41.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕНЬКО Вениамин Иванович,
ректор Белорусского государственного
университета транспорта.
246653, Беларусь, Гомель, ул. Кирова, д. 34.
Тел.: +375 (232) 77-72-15.

ПУТЯТО Артур Владимирович,
старший научный сотрудник Белорусского
государственного университета транспорта.
Тел.: +375 (232) 95-37-91.
E-mail: putiato@belsut.gomel.by (адрес для переписки)