

УДК 629.463.3

В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук; А. О. ШИМАНОВСКИЙ, кандидат технических наук; А. В. ПУТЯТО, младший научный сотрудник ОНИЛ ТТОРЕПС; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

УТОЧНЕННАЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЧЕТЫРЕХОСНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

Описан алгоритм построения конечно-элементной модели железнодорожной цистерны, предназначенной для расчета ее напряженно-деформированного состояния, с учетом колебаний жидкости в котле. Полученные результаты показали, что она дает возможность расчета напряжений и деформаций в наиболее нагруженных узлах конструкции.

При эксплуатации железнодорожных цистерн под действием различных динамических факторов в их деталях возникают значительные напряжения. Статистические данные, собранные на различных участках сети железных дорог, показывают, что наиболее «опасными» являются: зоны крепления котла к раме, места расположения опор на тележку (пятник, надпятниковая коробка), упор автосцепки и зоны у соединения днища с цилиндрической частью оболочки котла. С целью предупреждения брака в работе железной дороги, вызванного внезапным отказом цистерны, необходимо проведение расчетов, позволяющих наметить пути усовершенствования конструкции и обосновать срок работы до деповского и капитального ремонтов.

Исследованию прочности элементов конструкций железнодорожных цистерн различными методами посвящено значительное количество работ. Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) котла успешно используется теория подкрепленных оболочек, значительный вес в развитие которой внес В. Н. Котуранов [6]. Определению НДС котла от внутреннего давления с применением аналитических методов посвящены работы [2, 5]. С развитием ЭВМ для прочностных расчетов широкое практическое применение получил метод конечных элементов (МКЭ). В статьях Г. Ф. Чугунова, С. В. Беспалько [8] приведены расчеты МКЭ котла железнодорожной цистерны при различных видах нагружения. Анализ НДС рамы цистерны при нормативных режимах нагружения выполнен В. М. Долматовым [3]. Расчетам прочности конструкции цистерн с использованием специализированных программных комплексов, реализующих МКЭ, посвящена работа М. Н. Овечникова [7]. Вопросы моделирования различных видов динамического нагружения цистерн рассматривались в работах Р. Донга и Д. Милитару [10], С. В. Киркпатрика и Р. В. Клоппа [12]. Результаты экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния конструкции цистерны представлены в работе А. П. Азовского, Р. С. Глазковой и М. Л. Каменомоста [1].

Однако почти все работы посвящены расчету конструкции цистерны под действием нормативной нагрузки [4]. При этом расчетная схема цистерны оказывается симметричной относительно продольной вертикальной плоскости симметрии. В то же время при движении по кривым либо при переходе на боковой путь, сопровождающемся изменением скорости поезда, происходит существенное перераспределение сил, действующих на котел цистерны со стороны перетекающей в нем жидкости. Это приводит к возникновению значительных напряжений в местах присоединения котла цистерны к раме, и, в конечном счете, к изменению напряженного состояния элементов конструкции. Разработанные в последние годы методы расчета динамики систем «цистерна – колеблющаяся жидкость» [9, 11] дают возможность уточненного учета влияния перетекания жидкости на прочность элементов цистерн при переходных режимах движения.

В связи с вышесказанным целью работы явилось создание уточненной конечно-элементной модели четырехосной железнодорожной цистерны, позволяющей определить ее НДС при действии несимметричных нагрузок и различных случайных воздействий, а также рассчитать напряжения и деформации в областях крепления котла к раме. Моделирование конструкции цистерны выполнено в программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS.

Процесс формирования разработанной авторами конечно-элементной модели включает следующие этапы: построение геометрической модели, создание сетки конечных элементов, моделирование внешних связей, приложение силовых факторов.

Котел железнодорожной цистерны представляет собой тонкостенную сварную конструкцию, к особенностям которой относятся наличие элементов с различными радиусами кривизны, а также присутствие люка, предназначенного для загрузки перевозимого продукта. С целью учета описанных особенностей конструкции котла его объем был

разделен на составные части со сходными геометрическими характеристиками.

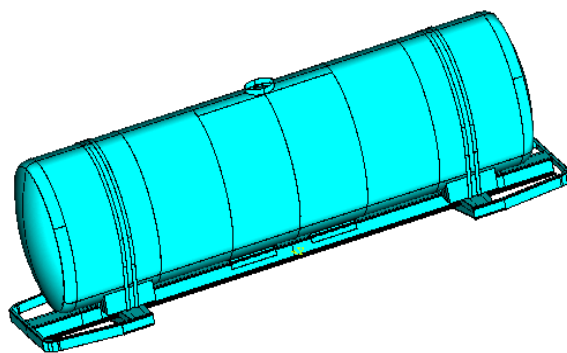
Рама цистерны представляет собой сложную металлоконструкцию, состоящую из ряда сваренных между собой стандартных профилей и специально разработанных деталей достаточно сложной геометрической формы. В модель рамы включены хребтовая балка, составленная из двух швеллеров, перекрытых сверху и снизу накладками, шкворневые балки коробчатого сечения, концевые балки, натяжниковые коробки, упоры автосцепки и пятники. Геометрическая модель рамы также была разбита на составные части с целью создания регулярной сетки конечных элементов.

При разработке модели цистерны предусмотрено, что крепление котла к раме в средней части представляет собой жесткое соединение с помощью фасонных лап, по консоли имеются дополнительные опоры на деревянные бруски. Учтено наличие стяжных хомутов, предназначенных для предотвращения перемещения котла в местах консольных опор в вертикальной плоскости. Разделение на конечные элементы производилось путем нанесения регулярной сетки с учетом особенностей геометрии каждой составной части. Для конечно-элементного моделирования железнодорожной цистерны модели 15–1443 был использован 20-узловой пространственный конечный элемент. В результате построений получено несколько вариантов моделей, причем за базовую принята модель, включающая 516 составных частей и 100264 конечных элементов (рисунок 1).

Моделирование внешних связей включает в себя опору пятника на подпятник, с учетом ограничения перемещения в горизонтальной плоскости котла относительно рамы, обусловленного конструкцией данного узла. При разработке уточненной модели цистерны также учтено опирание в случае несимметричного нагружения на скользуны.

В качестве исходных данных в модель вводится информация о свойствах материалов (модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность), а также величина гравитационной постоянной, что позволяет учесть силу тяжести конструкции. Подразумевается приложение нагрузок от действия жидкости внутри котла, в виде математической зависимости, а также приложение необходимых усилий к упорам автосцепного устройства. Предусматривается возможность расчета цистерны при следующих вариантах нагружения: нормативном, при движении по кривой с переменной скоростью, под действием сил давления удара жидкости о поверхность котла, расчет оболочки котла при внутреннем разрыве.

а)



б)

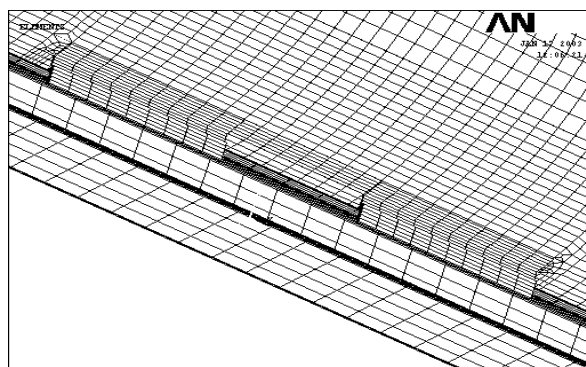


Рисунок 1 – Геометрическая модель железнодорожной цистерны и фрагмент конечно-элементной сетки:

а) – геометрическая модель цистерны модели 15 – 1443;

б) – конечно-элементная сетка в местах соединения котла с рамой

Описанная модель цистерны позволяет применять необходимые расчетные нагрузки и производить прочностной анализ элементов конструкции. Но для варьирования нагрузками и более подробного анализа различных областей она громоздка и недостаточно универсальна. Добиться снижения затрат времени на расчеты при вариации нагрузок и геометрических параметров можно путем применения методов подконструкций и подмоделей.

Метод подконструкций представляет собой выделение из модели более простых ее составных частей – подконструкций. В основе метода подконструкций лежит матричное уплотнение, посредством которого жесткость и, если это необходимо, масса, а также матрицы сопротивлений приводятся к системе ведущих степеней свободы.

Каноническая форма статических уравнений метода конечных уравнений имеет вид

$$[K][u] = [P], \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости всей системы; $[u]$ – матрица узловых перемещений; $[P]$ – матрица заданных нагрузок.

Уравнение может быть записано в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} [K_{ii}] & [K_{ij}] \\ [K_{ji}] & [K_{jj}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [u_i] \\ [u_j] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P_i] \\ [P_j] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь группа i соответствует группе наложенных степеней свободы на узлы конечных элементов.

тов, j – группе удаленных степеней свободы. В результате ряда преобразований получается, что между перемещениями граничных и внутренних узлов подконструкции имеется следующая связь

$$[u_j] = [K_{jj}]^{-1} \sum_{k=1}^n b_k [P_{jk}] - [K_{jj}]^{-1} [K_{ji}] [u_i],$$

где b_k – нагрузочный коэффициент.

Перемещение удаленных узлов можно использовать для уменьшения времени решения и повышения эффективности процесса моделирования за счет приведения группы или набора элементов к одному эквивалентному, самостоятельному элементу – суперэлементу. Метод подконструкций удобен также при исследовании различных степеней нагруженности рассматриваемой конструкции, что достигается путем изменения значения нагрузочного коэффициента b_k .

Метод подмоделей основывается на принципе Сен-Венана, предполагающем, что эффекты концентрации напряжений ограничены вблизи концентратора, поэтому если границы подмодели достаточно далеки от него, с использованием названного метода могут быть рассчитаны достаточно точные значения напряжений.

Метод подмоделей удобно использовать, к примеру, если после проведения анализа для полной модели оказалось, что для некоторых областей результаты недостаточно подробны. При этом при первоначальном анализе достаточно создать конечно-элементную модель с такой сеткой, которая вполне достаточна для адекватного описания особенностей нагружения и выделения зон высоких напряжений, но является недостаточно мелкой для получения точных результатов для таких зон. Выявив интересующую область, необходимо создать новую модель (подмодель), которая содержит эту область исходной конструкции. Сетку конечных элементов подмодели можно сделать значительно мельче для получения более точных результатов. При этом, как и в методе подконструкций, важным шагом является задание граничных условий для подмодели на основе отклика основной конструкции. И, наконец, производится анализ подмодели, который уже не зависит от исходной конструкции, что исключает необходимость повторять анализ всей модели.

Таким образом, метод подмоделей дает возможность исследования влияния внесения в конструкцию локальных изменений геометрии без повторного анализа конструкции целиком, а также исключает необходимость описания мелких подрешностей геометрии модели.

Для оценки работоспособности разработанной модели выполнен расчет напряженно-деформированного состояния при нормативном нагружении железнодорожной цистерны. Нормативное нагружение подразумевает приложение продольной

ударной нагрузки к упору автосцепного устройства (для I режима нагружения она составляет 3,5 МН) и внутреннего давления на стенки котла, представленного в виде суммы двух слагаемых: давления насыщенных паров жидкости и давления гидравлического удара, аппроксимированного линейным законом распределения.

В результате получено несколько областей с максимальными значениями напряжений.

1 Зона крепления котла к раме посредством фасонных лап. Расчеты показали, что в местах приварки элементов крепления к раме напряжения близки к пределу текучести материала (рисунок 2).

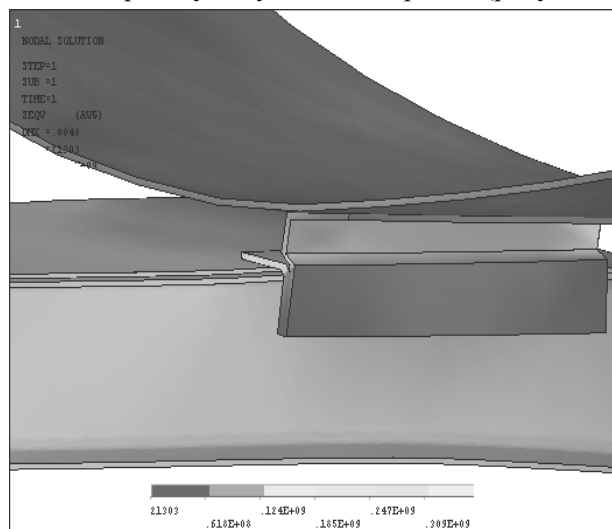


Рисунок 2 – НДС крепления котла к раме в средней части

2 Места консольного опирания котла на раму посредством деревянных брусков. Максимальные напряжения в этих местах составляют порядка 190 – 210 МПа (рисунок 3).

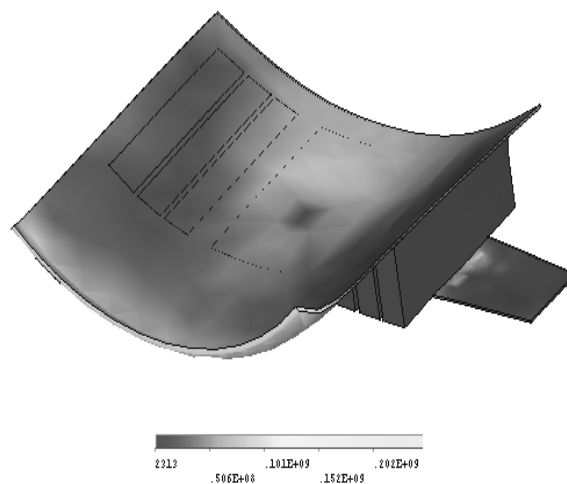


Рисунок 3 – НДС консольной опоры котла на раму

3 Области крепления упора автосцепного устройства и надпятниковой коробки (порядка 300 МПа).

На рисунке 4 представлены графические зависимости распределения напряжения и деформации в вертикальной плоскости верхнего листа хребтовой балки.

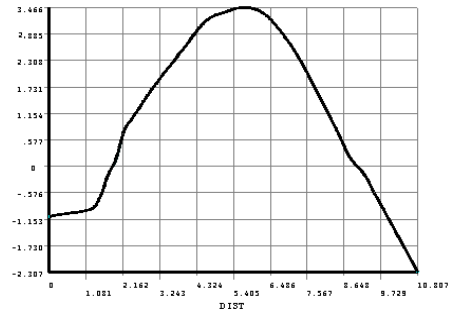
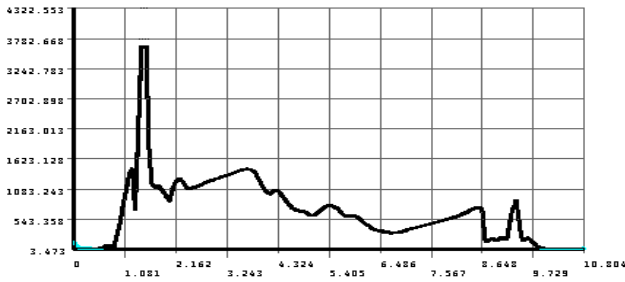


Рисунок 4 – Графические зависимости распределения напряжения и деформации в вертикальной плоскости верхнего листа хребтовой балки

На рисунке 5 представлена эпюра распределения эквивалентных напряжений по средней линии цилиндрической оболочки котла в средней части консольной опоры.

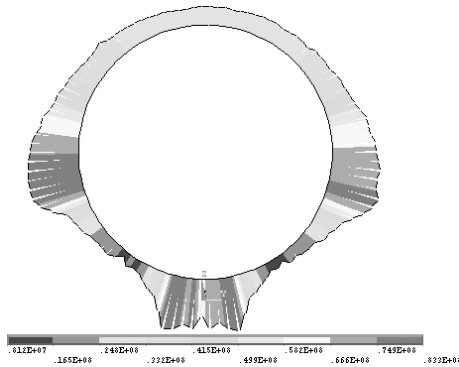


Рисунок 5 – Эпюра распределения эквивалентных напряжений по средней линии оболочки котла в средней части консольной опоры

Сравнение результатов расчетов напряжений и деформаций в конструкции цистерны с данными, приведенными в работе [3], отражает работоспособность принятой модели.

Таким образом, полученная уточненная конечного-элементная модель позволяет:

1 Произвести оценку НДС элементов конструкции в комплексе.

2 Дает возможность учесть несимметричный характер нагружения элементов конструкции железнодорожной цистерны и его влияние на нагруженность узлов крепления котла к раме в средней части и в местах консольных опор на деревянные бруски.

3 На базе методов подмоделей и подконструкций с минимальной затратой времени произвести расчет НДС при изменении конструкции и характера нагружения железнодорожной цистерны.

Список литературы

1 Азовский А. П., Глазкова Р. С., Каменомост М. Л. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния восьмиосной цистерны для светлых нефтепродук-

тов//Динамика и прочность грузовых вагонов: Межвуз. сб. науч. тр. – М.: МИИТ, 1986. – С. 82–86.

2 Бружкин И. В. Влияние внутреннего давления на напряженно-деформированное состояние котлов железнодорожных цистерн / МИИТ. – М., 1990. – 16 с.– Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 10.04.90 №5213 – жд90.

3 Долматов В. М. Анализ напряженно-деформированного состояния и частот колебаний рам цистерн: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07.–Екатеринбург, 1999.–131 с.

4 Лукин В. В. и др. Конструирование и расчет вагонов: Учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. – М., 2000. – 436 с.

5 Мышков В. Г. Разработка методов оценки динамических напряжений котла цистерны с учетом влияния жидкости: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.01. – М., 1984. – 133 с.

6 Нагруженность элементов конструкции вагона: Учебник для вузов ж.-д. трансп./В. Н. Котуранов и др., – М.: Транспорт, 1991. – 238 с.

7 Овечников М. Н. Особенности построения КЭ схемы и расчета котла и рамы ж.-д. цистерны с использованием специализированных программных комплексов ARIES, NASTRAN: Доклад на второй российской конф. пользователей MSC: Опыт применения передовых компьютерных технологий инженерного анализа фирмы MSC.Software на предприятиях России, Белоруссии, Украины. 28 октября 1999. – М., 1999. – 12 с.

8 Чугунов Г. Ф., Беспалько С. В. Особенности расчета котлов железнодорожных цистерн на совместное действие внутреннего давления и локальных нагрузок//Вестник ВНИИЖТа. 1992. – №3. – 4 с.

9 Шимановский А. О., Лагодин А. В. Математическое моделирование процесса перетекания жидкости в котле частично заполненной цистерны//Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономических и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию Белорусской государственной политехнической академии. – Минск, 2000. – С. 86.

10 Dong, R. and Militaru D., Dynamic Structural Characterization of Stub Sill Tank Cars Utilizing ADAMS and ANSYS Simulation Models, Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council Canada, Technical Report No. CSTT-RYV-TR-010. March, 1997.

11 Rumold W. Modeling and Simulation of Vehicles Carrying Liquid Cargo//Multibody System Dynamics 5, Institute B of Mechanics, University of Stuttgart, D-70550 Stuttgart, Germany, pp. 351–374, 2001.

12 Kirkpatrick S.W., Klopp, R.W. Hazard Assessment for Pressure Tank Cars Involved in Accidents, ICrash 2000. Proceedings of the International Crashworthiness Conference, September 6–8, 2000, London, UK, E. C. Chirwa and D. Otte Eds., pp. 223–235.

Получено 12.01.2004

V. I. Senko, A. O. Shimanovsky, A. V. Putiatio. Specified final-element model of the fore-axled railway tank.

There is a description of the algorithm of development of model from final elements of the railway tank, adopted for calculation of it's stress-deformed conditions, taking into account fluctuations of a liquid in the tank. The received results have shown, that the model gives the possibility of calculation in the most loaded units of the construction.