

УДК 629.4.023

А.В. Путьято, доцент, канд. техн. наук

Белорусский государственный университет транспорта

ул. Кирова 34, г. Гомель, Республика Беларусь, 246653

E-mail: putiato@belsut.gomel.by

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ НАРУШЕНИЯ КРЕПЛЕНИЯ КОТЛА К РАМЕ

Разработана компьютерная модель кузова железнодорожной цистерны для оценки прочности ее элементов с учетом нарушения креплений котла к раме. Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния, установлена степень влияния ослабления хомутов на прочность крепления котла к раме в средней части. Даны технические решения и рекомендации по повышению надежности рассматриваемого узла.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, цистерна, прочность, крепление.

1. Постановка задачи

К часто встречающимся повреждениям железнодорожных цистерн можно отнести ослабление стяжных хомутов, предназначенных для предотвращения вертикального смещения котла на консольных опорах. Ослабление или обрыв хомутов могут быть вызваны различными причинами, среди которых изменение влажности деревянных брусков (усадка), разница вертикальных частот подпрыгивания и галопирования, а также боковых колебаний рамы и котла. Обрывы хомутов могут привести к аварийным ситуациям из-за их попадания под колеса вагона. Эксплуатация вагонов-цистерн с ослабленными хомутами приводит к тому, что котел цистерны поднимается над опорой, что, в свою очередь, приводит к вылету защитного металлического кожуха опоры из под котла. Нагрузка, которую должны воспринимать хомуты, передается на лапы котла и рамы, что приводит к их быстрому разрушению. В сварном шве приварки лап к котлу появляются трещины, сминаются и увеличиваются поверхности отверстий под крепежные болты [1].

Целью работы является определение степени влияния ослабления стяжного хомута на напряженно-деформированное состояние элементов конструкции кузова цистерны путем компьютерного моделирования.

2. Определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкции цистерны при ослаблении стяжных хомутов

Для достижения поставленной цели разработана пространственная конечно-элементная модель железнодорожной цистерны для перевозки нефтепродуктов модели 15-1443 в программной среде ANSYS [2], состоящая из котла, элементов крепления котла к раме, включающая опору котла в консольных частях на деревянные бруски с последующим прихватом стяжными хомутами и болтовое закрепление котла к раме в средней части. Для учета дополнительных эффектов, связанных с вертикальными колебаниями кузова вагона, в модели учтены элементы ходовой части в виде опоры кузова через систему «пятник-подпятник» на надрессорную балку тележки, расположенную на упруго-диссипативных элементах, параметры которых эквивалентны параметрам рессорного комплекта грузовой тележки модели 18-100.

Для возможности учета нарушения крепления котла к раме вагона в консольных частях в модели введены упругие элементы, варьируя характеристиками которых выполняется имитация различной степени ослабления стяжных хомутов. В областях задних упоров автосцепного устройства установлены односторонние связи, ограничивающие перемещения в случае возникновения сжимающих напряжений. Выполнено моделирование режима соударения, как наиболее опасного с позиции прочности кузова вагона. Время действия давления от жидкого груза возрастало до значения, рекомендуемого «Нормами для расчета ...» [3]. Продолжительность моделирования переходного процесса 1,4 с.

С использованием описанной модели выполнен комплекс расчетов по определению напряженно-деформированного состояния кузова вагона-цистерны для разных характеристик упругих элементов, имитирующих степень ослабления стяжного хомута. На рисунке 1 показан фрагмент геометрической модели и картина распределения эквивалентных напряжений по Мизесу для момента времени 0,7 с, при жесткости упругих элементов 10^8 Н/м.

Установлено, что к наиболее опасным областям при рассматриваемом режиме нагружения следует отнести зону крепления рамных лап к верхнему листу хребтовой балки (рисунок 1, поз. I), фасонных лап к оболочке котла (поз. II), а также стяжной хомут со стороны разгружаемой консольной опоры (поз. III). С увеличением жесткости упругих элементов, соединяющих хомут и раму цистерны напряжения в средней части котла снижаются, а по мере ослабления хомута наблюдается их существенный рост. В то

же время, наблюдается увеличение напряжений в стяжном хомуте с разгружаемой стороны по мере увеличения жесткости упругого элемента. Рост напряжений в средней части объясняется ослабленным хомутом и, как следствие, вертикальным перемещением консольной части котла, расположенной с противоположной стороны места соударения вагонов. Описанные процессы подтверждаются зависимостями, приведенными на рисунке 2.

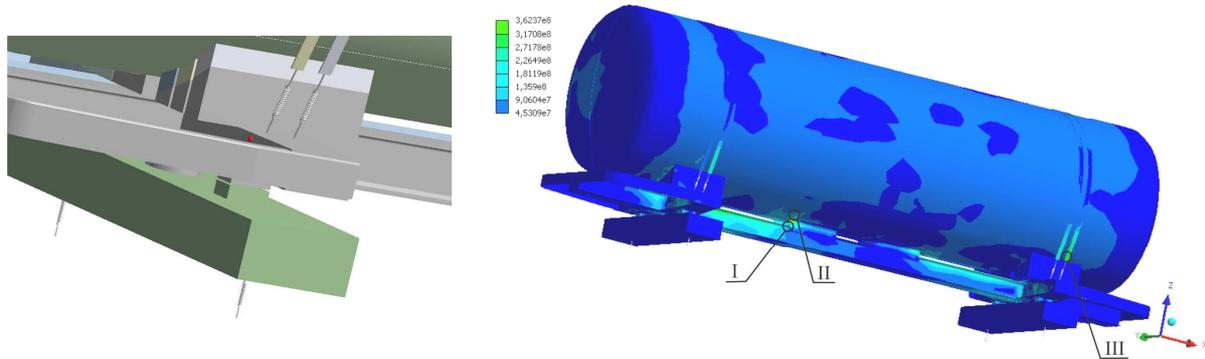


Рисунок 1 – Фрагмент геометрической модели вагона-цистерны и распределение эквивалентных напряжений (Па) в кузове для момента времени 0,7 с при жесткости упругих элементов 10^8 Н/м: I – зона крепления рамной лапы к хребтовой балке; II – зона крепления фасонной лапы к котлу; III – стяжной хомут

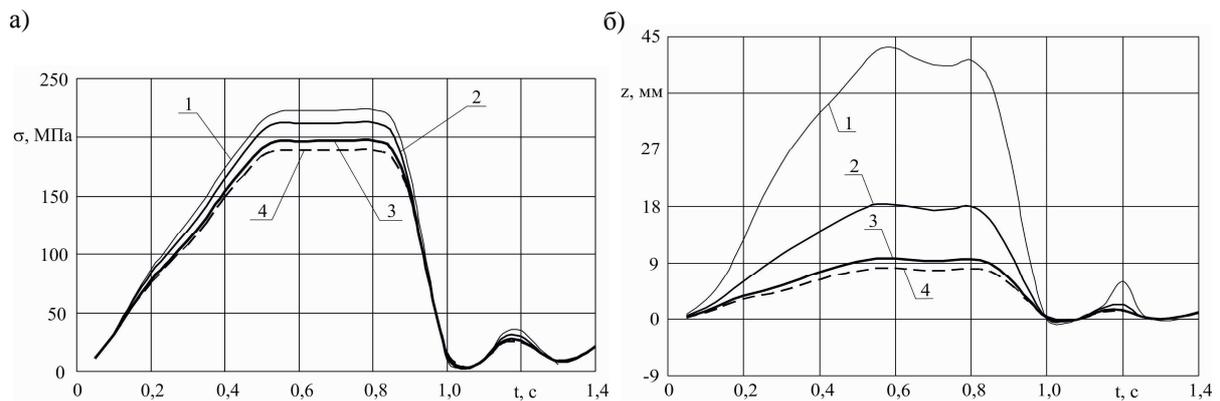


Рисунок 2 – Временные зависимости изменения напряжений в зоне II (рис. 1) и перемещения котла относительно рамы для различных жесткостей упругих элементов: 1 – $c = 10^6$ Н/м; 2 – $c = 10^7$ Н/м; 3 – $c = 5 \cdot 10^7$ Н/м; 4 – $c = 10^8$ Н/м

Следует отметить, что характерный вид временных зависимостей изменения эквивалентных напряжений в зоне I для различных жесткостей упругих элементов аналогичен приведенным на рисунке 2,а, но если в зоне II рост напряжений при рассматриваемом диапазоне жесткостей составляет около 20 %, то в зоне I зафиксирован рост напряжений более чем в 6 раз.

Рассмотрим результаты определения напряженного состояния вышеуказанных областей в случае предварительного натяжения стяжных хомутов. Для определения принципиальной зависимости выполним расчеты при варьировании предварительной затяжкой N в диапазоне $0 \div 200$ кН для жесткости $c = 10^6$ Н/м. Полученные результаты представлены зависимостями на рисунке 3.

Установлено, что снизить значения напряжений в зоне I, расположенной со стороны разгружаемой консоли возможно путем подбора значения предварительной затяжки хомутов (зависимость 1). В то же время в аналогичной зоне, расположенной с ударной стороны зафиксирован незначительный рост напряжений (зависимость 3) не превышающих предела текучести материала (зависимость 2).

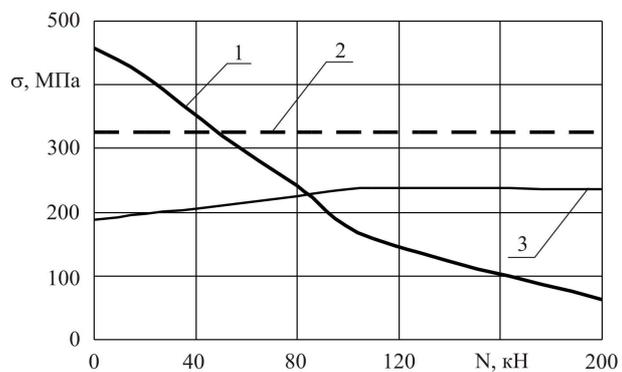


Рисунок 3 – Изменение напряжений в зоне I в зависимости от значения предварительной затяжки хомутов для жесткости упругих элементов $c = 10^6$ Н/м

3. Определение остаточных напряжений и деформаций в креплениях котла к раме в средней части

Расчеты показали, что в области крепления котла к раме в средней части, в частности, зоне приварки рамной лапы к верхнему листу хребтовой балки, в ряде случаев имеют место напряжения, значительно превышающие допускаемые значения.

Эквивалентные напряжения в указанной области при нормативном наливе котла цистерны в отдельных случаях сочетания рассматриваемых силовых факторов могут превышать предел текучести материала, что указывает на возможное появление пластических деформаций и неприменимость линейной теории деформирования материала в рамках действия закона Гука.

Метод конечных элементов может быть использован при учете как геометрической, так и физической нелинейности. Учет любого из этих двух типов нелинейности приводит к получению разрешающей системы уравнений, содержащей нелинейные составляющие, относительно определяемых основных неизвестных членов. Присутствие в уравнениях нелинейных членов не позволяет получить их решение в замкнутом виде подобно тому, как это выполняется в случае расчета линейных систем. Здесь приходится использовать различные процедуры последовательных приближений [3].

При учете физической нелинейности связь между вектором напряжений $\{\sigma\}$ и вектором деформаций $\{\epsilon\}$ может быть выражена формулой

$$\{\sigma\} = [E_\epsilon(\epsilon)] \{\epsilon\},$$

где матрица $[E_\epsilon(\epsilon)]$ зависит от подлежащего определению деформированного состояния $\{\epsilon\}$, которое, как известно, в методе конечных элементов является однозначной функцией узловых перемещений $\{u\}$.

Учет геометрической нелинейности приводит к тому, что зависимость между $\{\epsilon\}$ и $\{u\}$ перестает быть линейной. В результате получается, что матрица жесткости зависит не только от жесткостных параметров конструкции, но и от ее напряженно-деформированного состояния, выраженного через узловые перемещения. Именно это обстоятельство и приводит к тому, что система алгебраических уравнений

$$[K] \{u\} = \{P\} \Rightarrow [K(u)] \{u\} = \{P\}$$

оказывается нелинейной. Ее решение может быть получено с помощью итерационных методов.

К основным методам решения нелинейных задач следует отнести [3]: метод последовательных приближений, метод упругих решений; метод шагового нагружения; модифицированный метод Ньютона-Рафсона.

Несмотря на то, что приведенные выше методы процедурно различны, их объединяет общее стремление ликвидировать невязку, которая служит оценкой отклонения положения системы от ее действительного равновесного состояния. К наиболее распространенному и эффективному методу решения нелинейных задач относится метод Ньютона-Рафсона, который применен для решения поставленной задачи.

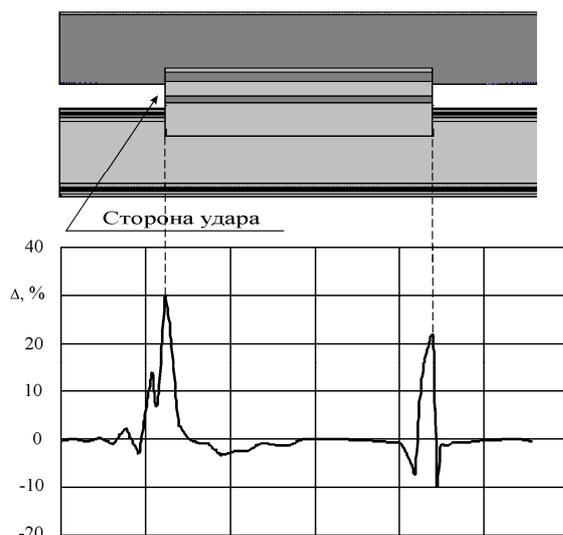


Рисунок 4 – Расхождение значений эквивалентных напряжений при использовании линейной зависимости $\sigma(\epsilon)$ и с учетом пластичности материала

При расчете с учетом зон пластических деформаций элементов креплений котла к раме была использована диаграмма деформирования, приведенная в работе [4].

С использованием разработанных компьютерных моделей кузова цистерны выполнены расчеты по определению напряженно-деформированного состояния с учетом свойств пластичности материала элементов крепления котла на раме. Для интенсификации расчетов и уточненной дискретизации узла крепления последний представлен подмоделью. Метод подмоделей основывается на принципе Сен-Венана, предполагающем, что эффекты концентрации напряжений ограничены вблизи концентратора, поэтому, если границы подмодели достаточно далеки от концентратора напряжений, в подмодели могут быть рассчитаны достаточно точные их значения.

На рисунке 4 приведена зависимость, характеризующая расхождение в результатах определения эквивалентных напряжений при

указанных расчетах по длине участка крепления рамной лапы к верхнему листу хребтовой балки. Из графика видно, что погрешность расчета, вызванная пренебрежением свойств пластичности материала, достигает 30 % в зоне крепления рамной лапы со стороны соударении вагонов.

С целью определения значений остаточных деформаций и напряжений расчеты выполнены в несколько этапов. На первом этапе проведен расчет напряженно-деформированного состояния кузова при статическом состоянии вагона от действия массы тары, на втором этапе элементы конструкции нагружались системой сил, соответствующей ударному взаимодействию вагонов при нормативном заполнении котла жидким грузом. Третий этап соответствует первому этапу, четвертый и пятый – второму и первому соответственно. Таким образом, рассматривались два цикла нагружения.

На рисунке 5 приведена диаграмма, характеризующая накопление остаточных деформаций ($\epsilon_{ост}$) и напряжений ($\sigma_{ост}$) в двух описанных циклах нагружения. Значение остаточных напряжений можно определить следующим образом:

$$\sigma_{ост} = \sigma_3 - \sigma_1,$$

где σ_1, σ_3 – эквивалентные напряжения, соответствующие первому и третьему этапам нагружения.

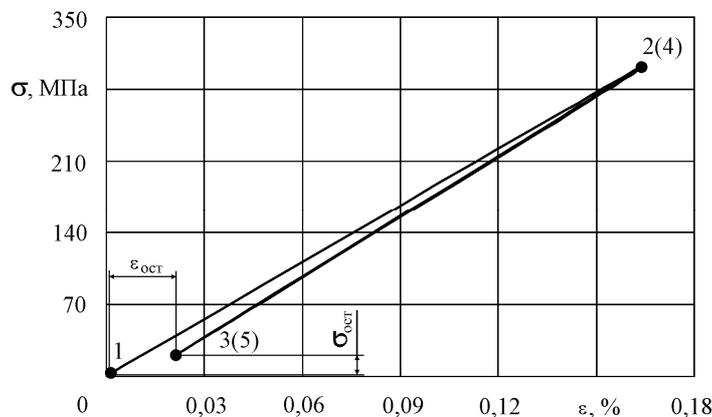


Рисунок 5 – Накопление остаточных напряжений и деформаций в двух циклах нагружения: 1, 3, 5 – масса тары вагона; 2, 4 – нагружение согласно I расчетному режиму (нормативный налив)

Установлено, что значения остаточных напряжений в узле крепления котла к раме в средней части после воздействия нагрузок, соответствующих столкновению вагонов, составляют 18,8 МПа. Следует отметить, что при рассмотрении последующих циклов нагружения значения остаточных напряжений $\sigma_{ост}$ (рисунок 6, а) и пластических деформаций $\epsilon_{пл}$ (рисунок 6, б) и пластических деформаций $\epsilon_{ост}$ остаются практически на том же уровне, т. е.

$$\sigma_{i\dot{н}д} = \sigma_{i+2} - \sigma_i \rightarrow 0; \epsilon_{i\dot{н}д} = \epsilon_{i+2} - \epsilon_i \rightarrow 0, i \geq 3.$$

Таким образом, при рассмотрении напряженно-деформированного состояния элементов конструкции с учетом особенностей, связанных с конструктивными нерегулярностями, а также при существенных внешних силовых факторах следует вести расчеты с учетом возможного проявления свойств пластичности материала. Результаты исследований показали, что рассмотрение задач прочности элементов вагонных конструкций только в упругой постановке может привести к появлению

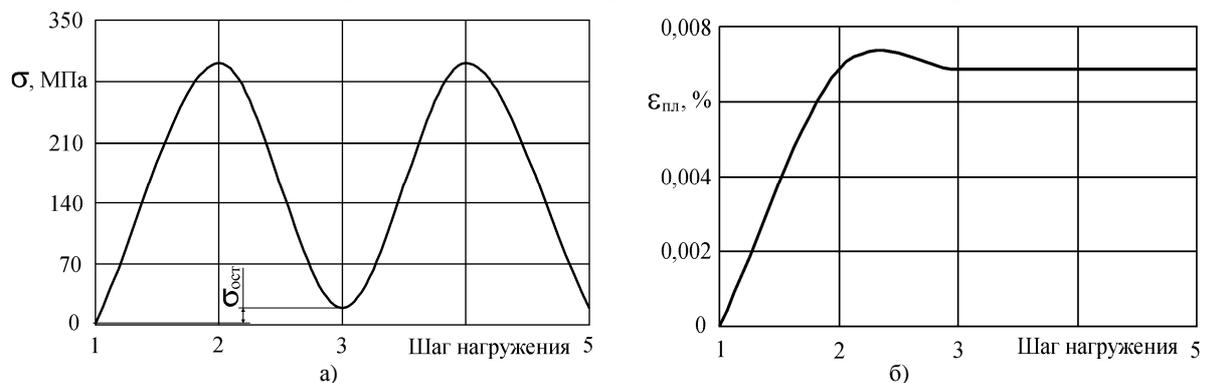


Рисунок 6 – Зависимости уровня напряжений и пластических деформаций от шага нагружения: а – напряжения по Мизесу; б – пластические деформации

существенной погрешности при определении их прочностных характеристик. Учет появления пластических деформаций позволил определить значения остаточных напряжений, возникающих в области крепления котла к раме в средней части.

Заключение

Длительная эксплуатация подвижного состава позволяет выявить конструкторские недостатки, допущенные при постройке вагона и учесть их при проектировании новых конструкций и модернизации существующих. При выполнении проектно-конструкторских работ по наливному подвижному составу следует максимально полно учитывать особенности взаимодействия котла с рамой вагона, а также в дальнейшем учесть влияние частичного заполнения котла жидким грузом.

На основе проведенных исследований разработан ряд технических решений, направленных на повышение надежности элементов конструкций кузовов вагонов-цистерн для перевозки нефтепродуктов: крепление котла на раме вагона-цистерны (патент ВУ 2429), устройство для предохранения от скручивания стяжного хомута (патент ВУ 3011), котел железнодорожной цистерны (патент ВУ 6056). Технические предложения и рекомендации, предлагаемые на основе проведенных исследований пригодны для реализации в условиях вагонных депо.

Библиографический список использованной литературы

1. Казимиров А.С. Изменение напряжений в нижнем листе котла вагона-цистерны при ослаблении тарельчатых пружин хомутов / А.С. Казимиров // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты: тезисы докладов II науч.-техн. конф., 4-6 июля 2001 г. — Санкт-Петербург, 2001. — С. 29–30.
2. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, С.А. Смалюк. — М.: Машиностроение, 2004. — 512 с.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. — М., 1996. — 319 с.
4. Постнов В.А. Строительная механика корабля и теория упругости: учеб. для вузов / В.А. Постнов, В.П. Суслов. — Л.: Судостроение, 1987. — Т. 1. — 288 с.
5. Битюцкий А.А. Разработка комплексного метода проектирования, расчета и испытания грузовых вагонов: дис... докт. техн. наук / А.А. Битюцкий. — СПб.: ПГУПС, 1995. — 359 с.

Поступила в редакцию 3.06.2011 г.

Путято А.В. Моделювання напружено-деформованого стану залізничної цистерни при ударному навантаженні з урахуванням порушення кріплення котла до рами

Розроблено комп'ютерну модель кузова залізничної цистерни для оцінки міцності її елементів з урахуванням порушення кріплень котла до рами. Виконано розрахунки напружено-деформованого стану, встановлено ступінь впливу ослаблення хомутів на міцність кріплення котла до рами в середній частині. Дано технічні рішення та рекомендації щодо підвищення надійності розглянутого вузла.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, цистерна, міцність, кріплення.

Putyato A.V. Simulation of the stress-strain state of the railway tank at shock loading considering defects of boiler's mounting to the frame

A computer model of a body of the tank car is developed for an estimation of strength of its elements taking into account defects of a boiler's mounting to the frame. Calculations of the stress-strain condition are conducted, as a result, the influence degree of loosening of the yokes on the strength of boiler's mounting to the frame is established. Designs are developed, and recommendations on increasing the reliability of the considered node are made.

Keywords: computer simulation, tank, strength, mounting.