

УДК 629.463.3

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЖЕННОСТЬ КОТЛА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ ПРИ СОУДАРЕНИИ ВАГОНОВ

А. О. ШИМАНОВСКИЙ⁺, А. В. ПУТЯТО

Белорусский государственный университет транспорта, ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь.

Проведен численный анализ гидродинамической нагруженности котла железнодорожной цистерны в случае ее удара о неподвижное препятствие. Установлены особенности распределения давления перевозимой жидкости по внутренней поверхности котла цистерны. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Введение

Особенностью цистерн по сравнению с вагонами иных типов является возможность перемещения перевозимого груза относительно транспортного средства. Перетекание транспортируемой жидкости приводит к появлению дополнительных гидродинамических давлений, которые необходимо учитывать при расчетах прочности конструкции вагонов. Схема приложения распределенных сил на внутреннюю поверхность котла цистерны, заложенная в Нормы [1], несовершенна, поскольку не учитывает всех особенностей, обусловленных движением с переменными скоростью и ускорением. Для анализа прочности узлов цистерны требуется уточненная информация о характере распределения давления жидкости на котел, которая может быть получена только на основе решения гидродинамических задач.

Исследования динамики тел с полостями, частично заполненными жидкостью, потребовались для обеспечения нормальной эксплуатации самолетов, кораблей, а также в связи с изучением сейсмостойкости различных резервуаров для хранения жидкости. Толчком к интенсификации исследований динамики тел с жидкостью послужило развитие ракетной техники. В результате исследований была разработана общая теория динамики тел с полостями, содержащими жидкость [2–4]. Однако вследствие сложности полученных математических моделей результаты конкретных расчетов были получены лишь для некоторых частных случаев.

Исследования динамики жидкости в котле железнодорожной цистерны до последнего време-

ни развивались по двум направлениям: определение параметров колебаний жидкости при движении поезда по перегону и выяснение условий, соответствующих появлению гидравлического удара при соударении вагонов.

Наиболее заметный вклад в теорию расчета динамики наливного подвижного состава при движении поезда по перегону внесли Ю. М. Черкашин [5], Г. И. Богомаз [6], Ю. М. Бороненко [7]. При создании математической модели цистерны они применяли подход, связанный с заменой находящейся в котле жидкости эквивалентным твердым телом. Аналогичный подход использован Р. Донгом (Dong) и Д. Милитару (Militaru) [8]. Это позволило уточнить значения главного вектора и главного момента сил гидродинамического давления, действующего на котел, однако не давало возможности установления закона распределения сил внутреннего давления.

В последние годы появился ряд работ, в которых движение жидкости описывается уравнениями механики сплошных сред. С. В. Беспалько получил квазиодномерное уравнение движения жидкости в котле цистерны, дальнейшее решение которого выполнил при помощи метода характеристик [9]. Это позволило найти уточненное значение сил давления жидкости на днище котла.

Полный гидродинамический анализ потребовал решения уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса. В работе [10] предложена методика построения математической модели железнодорожной цистерны, частично заполненной жидким грузом, основанной на применении граничных элементов для жидкого груза и конечных элементов для конструкции цистерны. Жидкость в

⁺ Автор, с которым следует вести переписку.

модели принята однородной, невязкой и несжимаемой, вследствие чего рассматриваются только ее малые перемещения и скорости, что приводит к невозможности изучения ряда явлений, в частности, гидроудара.

В работе [11] построен конечный элемент, учитывающий сжимаемость жидкости. Однако результаты расчетов давлений жидкости на днище котла железнодорожной цистерны с использованием этого элемента показали наличие высокочастотных колебаний жидкости значительной амплитуды, которые существенно затрудняют решение.

В работе [12] авторами выполнен анализ влияния волнения жидкости на точность определения сил взаимодействия твердого тела с жидкостью. Установлено, что при частотах колебаний оболочки, значительно превышающих низшие собственные частоты колебаний жидкости в этой оболочке (именно такой случай имеет место в железнодорожных цистернах), деформациями стенок емкости можно пренебречь при нахождении сил давления жидкости на резервуар.

Описанное свойство положено в основу предложенного несколько лет назад метода исследования динамики железнодорожных и автомобильных цистерн [13, 14]. Алгоритм расчета включает нахождение распределения сил давления жидкости на смоченную поверхность котла цистерны. Таким образом, появилась возможность теоретического определения уточненных законов распределения давления жидкости на поверхность котла.

Постановка задачи

В представленной работе поставлена задача нахождения реального закона распределения сил давления жидкости на котел железнодорожной цистерны при переходных режимах движения вагонов.

Решение задачи

Для решения поставленной задачи использована математическая модель, построенная на применении уравнений движения вязкой несжи-

маемой жидкости Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{f} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 \vec{v}, \quad \text{div } \vec{v} = 0$$

где $\vec{v}$ – вектор скоростей частиц жидкости, $\vec{f}$ – плотность распределения внешних объемных сил, действующих на частицу жидкости; p – давление; ρ – плотность жидкости в рассматриваемой точке (в рассматриваемом случае жидкость считается несжимаемой, поэтому ее плотность постоянна); ∇^2 – оператор Лапласа; ν – кинематическая вязкость жидкости.

При создании модели поведения жидкости в котле учитывались основные особенности его конструкции, в том числе форма криволинейного сопряжения цилиндрической обечайки со сферическим днищем. Принималось, что в начальный момент жидкость находилась в состоянии относительного покоя и ее свободная поверхность была плоской. В качестве кинематического граничного условия использовалось условие прилипания, то есть равенство нулю скорости жидкости на стенках котла цистерны.

Численное решение поставленной задачи реализовано с применением программного комплекса конечноэлементного анализа ANSYS. Произведены расчеты перетекания жидкости внутри железнодорожной цистерны при ее ударе о неподвижное препятствие. Рассматривались как нормативный уровень налива цистерны, так и частичное ее заполнение. В качестве перевозимой жидкости принят бензин, с плотностью 870 кг/м^3 и динамической вязкостью $0,0006031 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$.

Результаты расчетов и их обсуждение

На рис. 1 приведена эпюра распределения давления по внутренней поверхности котла при его 90 % и 97% (нормативном) заполнениях.

Замедление цистерны варьировалось в пределах от 1 до 34 м/с^2 (согласно Нормам при расчете на прочность для ударного нагружения принимается замедление $3,5g$, где g – ускорение сво-

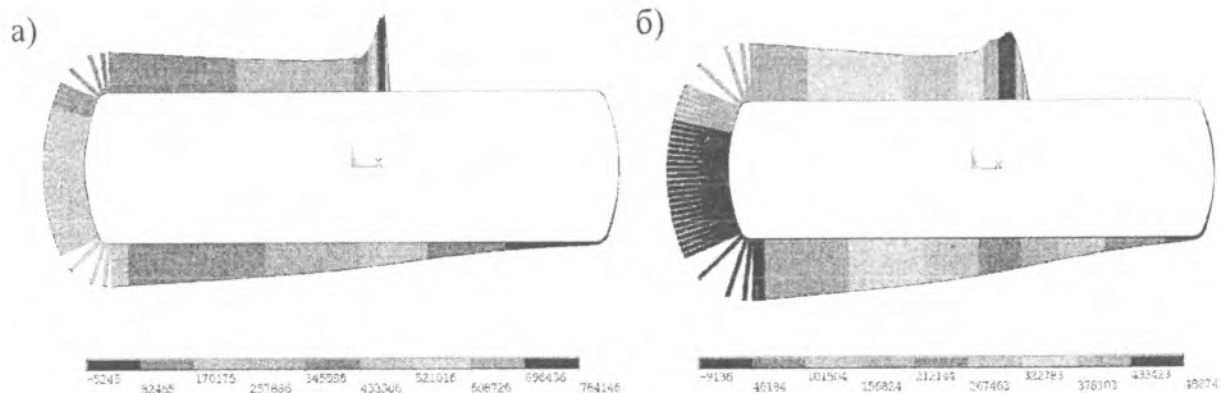


Рис. 1. Эпюры распределения избыточного давления (Па) жидкости на внутреннюю поверхность котла: а – заполнение 90%; б – нормативное заполнение

бодного падения). Результаты расчета максимальных избыточных давлений (без учета давления насыщенных паров) на днище котла в зависимости от процента заполнения для различных замедлений цистерны приведены на рис. 2. Установлено, что при замедлениях от 1 до 10 м/с² максимальное гидродинамическое давление возрастает по мере заполнения котла жидким грузом. При замедлениях цистерны превышающих 10 м/с² (они имеют место при маневровых соударениях, экстренном торможении и т.п.) максимальное давление на днище наблюдается при заполнении котла жидкостью на 90 %, причем чем выше ускорение, тем экстремум более ярко выражен. При этом превышение максимального давления, соответствующего нормативному наливу, достигает 26%. Установлено, что время, при котором проявляется максимальное давление, зависит от уровня заполнения котла и находится в диапазоне 0,08–0,64 с.

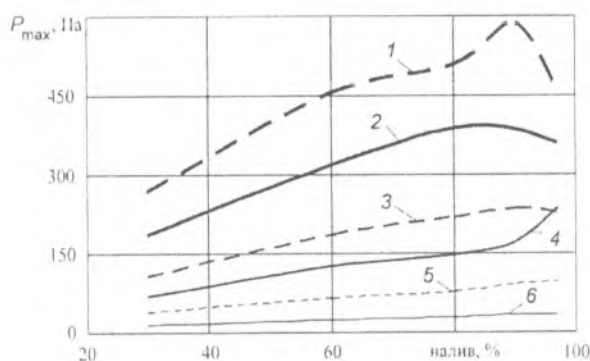


Рис. 2. Зависимость максимального давления на котел от уровня заполнения при различных замедлениях: 1 – 34 м/с²; 2 – 25 м/с²; 3 – 15 м/с²; 4 – 10 м/с²; 5 – 5 м/с²; 6 – 1 м/с²

Полученные результаты соответствуют данным о величине и характере распределения по всему контуру котла цистерны гидродинамического давления жидкости в зависимости от скорости соударения и степени заполнения котла жидким грузом, приведенным в работах [15, 16].

Проведенный анализ показал, что названное увеличение давления обусловлено возникновением области локального сжатия жидкости при заполнении цистерны до величины близкой к нормативному уровню. Уровни заполнения, при которых это наблюдается, зависят от плотности перевозимого груза. Анализ показал, что область сжатия зарождается в области перехода от сферического днища к цилиндрической обечайке, а затем «бежит» к противоположному днищу. На рис. 3 представлены схемы распределения избыточного давления жидкости, соответствующие различным моментам времени.

Расчеты показали, что локальное давление в области крышки загрузочного люка может более чем в 2 раза превышать значение, соответствующее испытательному нагружению. Этот же эффект обнаружен при испытаниях цистерн [17]. Наличие описанного явления может являться причиной нарушения плотности прилегания крышки загрузочного люка-лаза, а также привести к потере перевозимого груза и загрязнению окружающей среды.

Соударение жидкости с областью котла, прилегающей к его верхней образующей, приводит к возникновению высокочастотных флуктуаций давления, которые проявляются в местах соприкосновения жидкости с оболочкой котла (рис. 4).

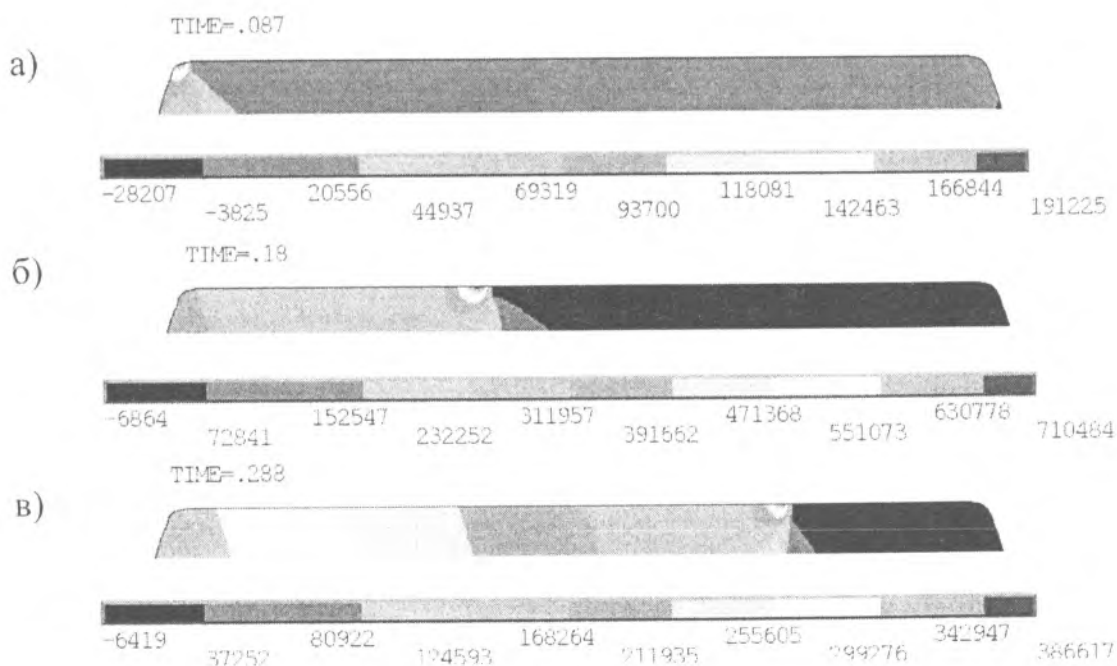


Рис. 3. Схемы изменения от времени давления (Па) жидкости на верхнюю часть цилиндрической обечайки котла: а – время 0,087 с; б – 0,18 с; в – 0,288 с

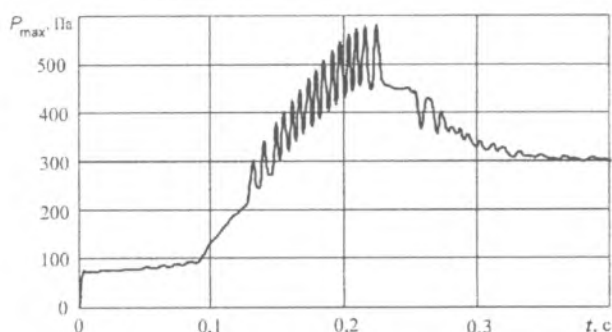


Рис. 4. Зависимость максимального давления на днище котла от времени

Заключение

Таким образом, выполненные расчеты позволили установить особенности распределения давления перевозимой жидкости на поверхность котла цистерны. Полученные результаты могут быть использованы для уточненного анализа напряженно-деформированного состояния элементов конструкции вагона, обусловленного перемещением жидкости относительно котла.

Литература

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колес 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ. – 1996
2. Моисеев Н. Н., Румянцев В. В. Динамика тела с полостями содержащими вязкую жидкость. – М.: Наука. – 1965
3. Черноусько Ф. Л. Движение твердого тела с полостями, содержащими вязкую жидкость // Математические методы в динамике космических аппаратов. – М.: Вычислительный центр АН СССР. – 1968
4. Abramson H. N., Rausleben G. E. Jr. Some comparison of sloshing behavior in cylindrical tanks with flat and conical bottoms. – ARS Journal. – 1961 (31), N 4, 542–544
5. Черкашин Ю. М. Динамика наливного поезда / Труды ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт. – 1975, вып. 543
6. Богомаз Г. И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн. – Киев: Наукова думка. – 2004
7. Бороненко Ю. П. Математическая модель пространственных колебаний вагона при перевозке маловязких жидких грузов в мягкой емкости // Межвузовский сборник научных работ. Динамика вагона. – Л.: ЛИИЖТ. – 1982, 33–41
8. Dong R., Militaru D. Dynamic structural characterization of stub-sill tank cars utilizing ADAMS and ANSYS simulation models // ADAMS user conference papers. – 1997 [Электрон. ресурс] режим доступа: <http://support.adams.com/userconf/pdfs/uc970024.pdf>
9. Беспалько С. В. К вопросу о моделировании продольных колебаний цистерны, частично заполненной жидкостью // Вестник ВНИИЖТа. – 1999, № 4, 35–40
10. Прасолов А. Н. Исследование свободных колебаний жидкого груза в железнодорожных цистернах с учетом податливости конструкции // Динамика, прочность и надежность транспортных машин. – Брянск: БГТУ. – 1997, 25–32
11. Ольшевский А. А., Ольшевский А. А., Смирнов С. В. Решение статических и динамических задач для упругих сосудов, заполненных жидкостью // Тезисы докладов 55-й научной конференции профессорско-преподавательского состава. – Брянск: БГТУ. – 1999, 69–70
12. Богадица Э. С., Брусилковский А. Д., Шмаков В. П. Численная реализация метода расчета собственных и вынужденных колебаний упругой оболочки вращения, заполненной жидкостью // Тр. I семинара «Динамика упругих и твердых тел взаимодействующих с жидкостью». – Томск. – 1972, 3–16
13. Шимановский А. О. Математическая модель и расчет динамики цистерн, частично заполненных жидкостью // Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической и прикладной механике. – Мн.: Технопринт. – 2001, 506–510
14. 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. – 2001, 351–374
15. Кривовязюк Ю. П. Оценка эквивалентной нагруженности четырехосной железнодорожной цистерны с жидкими грузами различной плотности при продольных ударах: Дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск. – 1986
16. Биличенко Ю. Н. Определение методом физического моделирования гидродинамической нагруженности котлов железнодорожных цистерн при ударах в автосцепку. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Днепропетровск. – 1990
17. Долматов А. А., Кудрявцев Н. Н. Динамика и прочность четырехосных железнодорожных цистерн // Сб. тр. ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат. – 1963

Shimanovskii A. O., Putyato A. V.

Hydrodynamical loading of the boiler of the railway tank at impact of cars.

Numerical research of hydrodynamical loading of the boiler of the railway tank in case of its impact to a fixed obstacle was carried out. Peculiarities of the pressure distribution of a transported liquid over an internal surface of the tank boiler were established. The received results are in sufficiently close agreement with experimental data.

Поступила в редакцию 21.03.2005.

© А. О. Шимановский, А. В. Путято, 2005.