

ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КОТЛЕ ЦИСТЕРНЫ ПРИ ЕЕ МГНОВЕННОЙ ОСТАНОВКЕ

Numerical definition of values pressure of a fluid in the boiler of the tankcar at her instant shut-down

А. О. Шимановский, А. В. Путято

Белорусский государственный университет транспорта
Гомель, Беларусь

Выполнен гидродинамический анализ перетекания жидкости в котле цистерны при ее мгновенной остановке. Приведены численные результаты определения максимальных давлений на днище котла.

The hydrodynamic analysis of an overflow of a fluid in the boiler of the tankcar is executed at her instant shut-down. Numerical results of definition of the maximum pressures on the head are reduced.

Исследование прочности элементов конструкций железнодорожных цистерн различными методами посвящено значительное количество работ [1, 2, 3].

Однако, почти все работы посвящены расчету конструкции цистерны под действием нормативной нагрузки [4]. Разработанные в последние годы методы расчета динамики систем «цистерна — колеблющаяся жидкость» [5, 6], дают возможность уточненного учета влияния перетекания жидкости на прочность элементов цистерн при переходных режимах движения.

«Нормами...» предусматривается, что учет сил инерции жидкости, действующих на днище, должен осуществляться путем введения распределенных сил давления, которое определяется суммой двух слагаемых

$$P = P_1 + P_2,$$

где P_1 — давление насыщенных паров жидкости; P_2 — давление от гидравлического удара.

Давление P_2 принимают линейно убывающим от максимума на днище со стороны удара до нуля у противоположного дни-

ща. Максимум этого давления определяется по формуле

$$P_2 = \frac{N \frac{m_{жиг}}{m_{ваг}}}{\pi R^2}, \quad (1)$$

где $m_{жиг}$ — масса жидкости, $m_{жиг} = 60$ т; $m_{ваг}$ — масса вагона брутто, $m_{ваг} = 83$ т; N — продольная сила удара-рывка, приложенная к автосцепке, или тормозная сила вагона, $N = 3,5$ МН.

Для определения максимальных значений давления жидкости на внутреннюю поверхность котла цистерны рассмотрим процесс ее перетекания при мгновенной остановке железнодорожной цистерны. При этом приняты следующие допущения:

- изменением объема частиц жидкости под действием приложенных к ним сил можно пренебречь и рассматривать жидкость как несжимаемую;

- при определении сил давления жидкости оболочку котла можно считать абсолютно твердым телом.

Для решения поставленной задачи о нахождении распределения давления на котел при учете реального поведения жидкости использована система, включающей уравнения движения вязкой жидкости Навье-Стокса и неразрывности [7]:

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

$$\text{div } \vec{v} = 0$$

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.

Значение давления представляется в следующем виде для подвижной системы координат частицы жидкости

вижной системы координат частицы жидкости

$$p = P_1 - \rho \cdot \vec{a} \cdot \vec{r} + \frac{1}{2} \rho (\vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}) \cdot \vec{r}, \quad (3)$$

где P_1 — давление насыщенных паров; \vec{a} — вектор массовой силы, отнесенный к единице массы частицы жидкости; \vec{r} — радиус-вектор жидкой частицы относительно подвижной системы координат; $\vec{\omega}$ — вектор угловой скорости частицы.

Объединяя уравнения (2) и (3) и переходя к глобальной системе координат, получаем уравнение, на решении которого построено определение параметров жидкости при ее перетекании внутри котла цистерны

$$\rho \frac{d\vec{v}^2}{dt} + 2\rho \cdot \vec{\omega} \times \vec{v} + \rho \cdot \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r} = \rho \cdot \vec{a} + \nu \rho \nabla^2 \vec{v}.$$

Численное решение поставленной задачи реализовано с применением программного комплекса конечноэлементного анализа ANSYS [8]. Были произведены расчеты перетекания жидкости внутри котла железнодорожной цистерны при ее ударе о неподвижное препятствие с нормированным замедлением 3,5g. Рассматривались как нормативный уровень налива котла, так и частичное его заполнение. В качестве перевозимой жидкости принят бензин, с плотностью 870 кг/м³ и динамической вязкостью 0,0006031 кг/м·с.

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

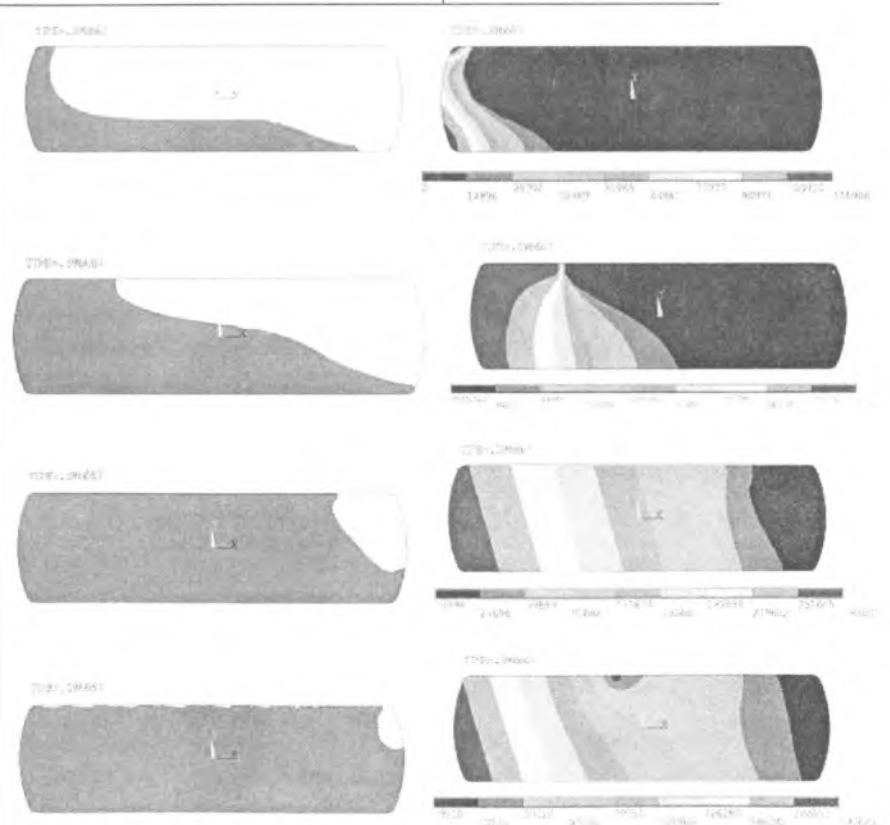


Рис. 1. Положения свободной поверхности и эпюры распределения давления жидкости (Па) для различных моментов времени при заполнении котла на 30%, 60%, 90% и 97%

есть отсутствие скорости жидкости на стенках котла цистерны.

С целью определения максимального давления на внутреннюю поверхность котла, рассматривался интервал времени, соответствующий набеганию жидкости на днище с ударной стороны. На рисунке 1 представлены положения перетекаемой жидкости и эноры распределения давления, для соответствующих положений, в случае заполнения котла цистерны на 30%, 60%, 90% и нормативный уровень в момент времени 0,4 с после удара. Следует отметить, что приведенные результаты получены без учета давления насыщенных паров, которое согласно «Нормам...» принимается равным 150 кПа.

После проведения многократных расчетов было установлено, что максимальное давление на днище реализуется по истечению небольшого промежутка времени после начала переходного процесса, причем по мере заполнения котла оно уменьшается (рисунок 2)

В таблицу 1 сведены значения максимальных давлений для различных наливов котла и соответствующие им давления жидкости на днище котла цистерны после начала переходного процесса. Именно на эти значения следует ориентироваться при

Таблица 1
Значения максимальных давлений жидкости на днище котла для различных наливов и соответствующее время после остановки цистерны

Налив, %	Время, с	Давление, кПа
30	0,642	265,5
60	0,453	454,9
80	0,339	508,3
90	0,222	584,9
95	0,165	523,2
97	0,06	494,5

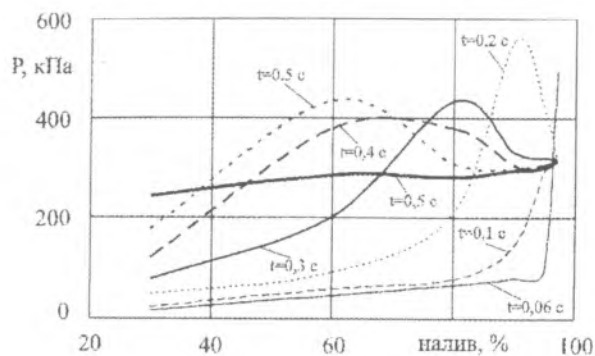


Рис. 2. Максимальные давления жидкости на днище котла для различных моментов времени.

проведении расчетов на прочность элементов конструкции железнодорожной цистерны.

Таким образом, максимальное давление жидкости на днище

– по «Нормам...» из уравнения (1)

$$P = 150 + \frac{3,5 \cdot 10^3 \cdot \frac{60}{83}}{3,14 \cdot 1,5^2} = 508,1 \text{ кПа};$$

– по расчетным данным

$$P = 150 + 584,9 = 734,9 \text{ кПа.}$$

Таким образом, установлено, что максимальное давление на днище котла при мгновенной остановке цистерны в случае нормативного заполнения котла жидким грузом (97...98%) соответствует нормативному значению максимального давления на днище, в то время как при заполнении на 90 % оно составляет 734,9 Па, что на 44,6 % больше принятого в «Нормах...». Учитывая весьма малую продолжительность наличия максимального расчетного давления ($\approx 10^{-4} - 10^{-5}$ с), его увеличение по сравнению с нормативной величиной может сказаться на локальном воздействии на котел, например, в областях перехода от сферического днища на цилиндрическую обечайку, в то время при оценке НДС конструкции в целом этот эффект может быть не замечен [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукин В. В. Конструирование и расчет вагонов: Учеб. Для студентов вузов ж.-д. транспорта/В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. Н. Котуранов и др. — МПС России, 2000.

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/Минво путей сообщения РФ. Моск. гос. ун-т путей сообщения. — М., 2001. — 47 с.

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

5. Шимановский А. О., Лагодин А. В. Математическое моделирование процесса перетекания жидкости в котле частично заполненной цистерны//Материалы международной научно-технической конференции «Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений произ-

водственно-хозяйственной деятельности, разработку экономичных и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения», посвященной 80-летию Белорусской государственной политехнической академии. — Мн., 2000. — с. 86.

6. 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.

7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей : В 2-х т.: Т. 2.: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991.

8. Moaveni S. Finite element analysis. Theory and application

with ANSYS. — Upper Saddle River, New Jersey, 1999. — 527 p.

9. Сенько В. И., Путято А. В. Влияние перетекания жидкости в котле цистерны на напряженно-деформированное состояние ее рамы // Известия Белорусской инженерной академии, 2004. — №1 (17)/1. — С. 96—99.

Рецензент: кандидат технических наук, профессор Г.Я. БЕЛЯЕВ