

В. И. ПЕРЕХРЕСТ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

(Специальность № 022 — сопротивление материалов
и строительная механика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1967

3106a

НТБ
ДНУЖТ

Работа выполнена в Днепропетровском государственном университете
им. 300-летия воссоединения Украины с Россией.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор **Шевляков Ю. А.**,
кандидат физико-математических наук, доцент **Гопак К. Н.**

Официальные оппоненты:

действительный член Академии Наук Киргизской ССР, доктор физико-математических наук, профессор **Леонов М. Я.**, кандидат технических наук, доцент **Радзиховский Ю. А.** Ведущее предприятие — Институт механики АН УССР.

Автореферат разослан «**23**» **ноября** 1967 г.

Защита диссертации состоится «**9**» **января** 1968 г.
на заседании Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск, 10, ул. Университетская, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДИИТа.

НТБ
ДНУЖТ

На правах рукописи

В. И. ПЕРЕХРЕСТ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

(Специальность № 022 — сопротивление материалов
и строительная механика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1967

3106a

НТБ
ДНУЖТ

Железнодорожная цистерна представляет собою упругую пространственную конструкцию, содержащую жидкость, которая, как правило, наполняет герметически закрытый котел цистерны с малым недоливом. В процессе эксплуатации допускается также транспортировка жидких грузов с большим недоливом, например, вследствие частичного слива на промежуточных станциях по пути следования цистерны.

Одной из определяющих нагрузок, по которым производится расчет на прочность оболочки котла и других силовых элементов цистерны, является динамическое давление транспортируемой жидкости на стенки котла цистерны. Оно возникает при неустановившихся режимах движения цистерны: трогании с места, экстренных торможениях, соударениях. Задача об определении максимального значения этого давления получила в специальной литературе*) название задачи о гидравлическом ударе в котле железнодорожной цистерны.

Фундаментальные теоретические и экспериментальные исследования продольной динамики подвижного состава, проведенные профессором В. А. Лазаряном и его сотрудниками, проф. С. В. Вершипским, Л. Н. Никольским и др., показали, что процессы, возникающие в составе при неустановившихся режимах его движения, имеют ударный характер. Ускорения отдельных вагонов могут достигать значительных величин. В этих условиях в частично заполненных упругих котлах цистерн возникают неустановившиеся движения жидкости с большими амплитудами. Задача о гидроударе в котлах ж. - д. цистерн представляет таким образом сложную комплексную задачу гидромеханики и динамики упругих пространственных конструкций.

Приближенные математические модели гидравлического

*) «Нормы для расчета на прочность и проектирование механической части новых и модернизированных вагонов железных дорог колеи 1524 мм (несамоходных)», сокр. «Нормы ЦНИИ МПС», МПС, М., 1961.

удара в цистернах, предложенные в 1945 г. Шевченко П. В. и в 1957 г. Никифоровой В. М., не учитывают в достаточной мере конструктивные особенности реальных цистерн и приводят к завышенным давлениям в сравнении с результатами натуральных испытаний*).

Формула из «Норм ЦНИИ МПС» для расчета давления гидроудара для 1-го расчетного режима

$$p_{\text{н}} = 250.000 \frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{бр}}} (\pi r^2)^{-1} \quad (1)$$

не выражает зависимости давления от скорости соударения цистерн. Это обстоятельство приводит к затруднениям при проектировании новых цистерн, отличающихся повышенной грузоподъемностью и прогрессивными конструктивными решениями.

В представленной работе особенности конструкции и условия эксплуатации цистерн учтены с большей полнотой, чем в предшествующих работах. Благодаря этому результаты теоретического расчета давлений, усилий в автосцепке и динамических реакций рессорных комплектов для различных скоростей соударения хорошо подтверждаются результатами натуральных экспериментов*).

В кратком введении показано, что задачи о гидроударе при малом и большом недоливах цистерны жидкостью значительно различаются по физическому смыслу. Поэтому для решения этих задач в работе предложены два различных подхода.

В первой главе диссертационной работы сделан обзор теоретических и экспериментальных исследований по динамике твердых и упругих тел с полостями, частично заполненными жидкостью. Обоснована необходимость приближенного решения задачи о гидравлическом ударе в котлах цистерн, пригодного для целей инженерной практики.

Во второй главе проведено решение задачи об определении давления гидравлического удара в упругом котле цистерны, заполненной жидкостью с малым недоливом (2% от полного объема).

Рассматривается случай ударных испытаний однопипных цистерн, который соответствует первому расчетному режиму, установленному «Нормами ЦНИИ МПС».

) Долматов А. А., Кудрявцев Н. Н. Динамика и прочность четырехосных железнодорожных цистерн. Труды ВНИИЖТ, вып. 263, Транспортжелезиздат, М., 1963.

Набегающая по прямолинейному горизонтальному пути с постоянной скоростью v_0 цистерна сталкивается с однотипной неподвижной цистерной и сцепляется с ней при помощи автосцепного устройства. При последующем движении механической системы из двух сцепленных цистерн ее центр масс имеет скорость $v_0/2$. Кроме того, возникают упругие колебания цистерн, симметричные относительно плоскости, содержащей центр масс и нормальной к вектору его скорости. Эти колебания в инерциальной системе координат, связанной с центром масс и движущейся поступательно, схематизируются как колебания с одной степенью свободы.

В качестве формы колебаний принимается такое напряженно-деформированное состояние каждой цистерны, которое возникает в ее основных элементах при равномерно-ускоренном движении под действием постоянной силы, равной максимальному значению силы прямого удара в автосцепку.

К решению задачи применен метод Рэлея. Полученное по этому методу уравнение устанавливает зависимость между максимальным избыточным давлением гидроудара на переднем днище p_1 и скоростью соударения цистерн v_0 . Эта зависимость окончательно выражена формулой:

$$v_0 = 2 \sqrt{2} \sqrt{\frac{\sum \Pi_i(p_1)}{(M+m)(1-\Omega)}}, \quad (2)$$

где $\Omega = \frac{2\Theta}{1/4(M+m)v_0^2}$ — коэффициент прикрытия конструкции вагона, введенный проф. В. А. Лазаряном и его сотрудниками. В формуле (2) введены обозначения: M — масса жидкости, m — масса тары цистерны, Θ — эффективность поглощающего аппарата автосцепки.

Предлагаемая методика позволяет использовать как теоретические значения эффективностей применяемых поглощающих аппаратов, так и, в случае необходимости, делать пересчет с использованием опытных значений коэффициента прикрытия.

Получены также формулы и построены соответствующие графики, выражающие зависимости максимальных значений усилий в автосцепке и динамических добавок к реакциям рессорных комплексов тележек от скорости соударения цистерн.

Теоретический анализ упругих свойств конструкции цистерны произведен путем определения зависимостей $\Pi_i(p_1)$ — величин потенциальной энергии деформации основ-

ных элементов цистерны: котла ($i=1$), воздушной подушки ($i=2$), рессор ($i=3$), рамы ($i=4$) и других.

Особенность поведения жидкости при гидроударе в случае малого недолива котла состоит в следующем.

В момент, когда в котле развивается наибольшее давление гидроудара, в каждом его поперечном сечении остается воздух в виде пузырьков, которые играют роль упругих элементов, включенных в несжимаемую жидкость. Математическая модель такой воздушно-жидкостной смеси приводит к нелинейному дифференциальному уравнению для давления гидроудара. Его решение разыскивается в виде разложения в ряд по малому параметру, в качестве которого выбрана величина относительного недолива. В первом приближении получен линейный закон распределения давления по длине котла цистерны при гидроударе. Вычислены перемещения жидкости и воздуха в котле цистерны, а также потенциальная энергия сжатого воздуха $P_2(p_1)$.

Потенциальная энергия $P_1(p_1)$ деформации оболочки котла, находящегося под действием сложной системы статических и динамических нагрузок, определена при помощи теорем о работе внешних сил на перемещениях упругой системы (теоремы Клапейрона и теоремы о взаимности работ). Учитывается безмоментная осесимметричная деформация котла, деформация краевого эффекта, который возникает в местах сочленения цилиндрической обечайки со сферическими днищами, а также деформации котла в области приложения опорных реакций.

При подсчете потенциальной энергии учитываются конструктивные особенности современных рамных и безрамных цистерн.

В качестве примеров применения разработанной методики проведены вычисления зависимостей давления гидроудара, усилий удара в автосцепку и динамических реакций рессорных комплектов от скоростей соударения для двух конструктивно различных типов цистерн, выпускаемых ЖЗТМ:

1) серийной 4-осной рамной цистерны грузоподъемностью 60 тонн (проект 890.00.000) и 2) 8-осной 120-тонной безрамной цистерны (проект 871.00.000)

Из условий прочности и продольной устойчивости цистерны от схода с рельсов, установленных «Нормами ЦНИИ МПС», определяются допустимые скорости соударения этих цистерн.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что 120-тонная цистерна безрамной конструкции обладает хо-

рошими показателями продольной устойчивости. В этом отношении 60-тонная серийная цистерна менее совершенна. Условие продольной устойчивости при увеличении скоростей соударения для нее нарушается в первую очередь. Для большегрузной безрамной цистерны фактором, определяющим допустимую скорость соударения — 8 км/час, является ограничение ударного усилия в автосцепке нормативным значением 250 тонн.

Для 60-тонной цистерны допустимая скорость соударения 10 км/час вытекает из условия продольной устойчивости от схода с рельсов. При указанных скоростях соударения в обеих цистернах суммарные давления: гидростатическое, рабочее и давление гидроудара, не представляют непосредственной угрозы для прочности котла, т.е. не превосходят величины допускаемого давления.

Расчитанные по изложенной методике значения давлений гидроудара, усилий в автосцепке и динамических добавок к реакциям рессорных комплектов хорошо согласуются с результатами натурных экспериментов, проведенных в ЦНИИ МПС, Кременчугском филиале ВНИИ вагоностроения и на Ждановском заводе тяжелого машиностроения*).

Разработанная методика исследования гидроудара в котлах ж.-д. цистерн нашла применение в практической работе конструкторского бюро отдела главного конструктора вагоностроения ЖЗТМ.

Третья глава посвящена исследованию различных случаев неустановившегося движения цистерны, заполненной идеальной несжимаемой жидкостью с большим недоливом. Котел цистерны предполагается абсолютно жестким.

Под большим недоливом подразумевается наполнение котла цистерны до такого уровня, при котором давление воздуха, находящегося над свободной поверхностью жидкости в герметично закрытом котле, остается постоянным при любых движениях жидкости.

Рассмотрен случай соударения двух цистерн, движущихся с различными скоростями, и случай движения цистерны с постоянным ускорением.

Соударение цистерн предполагается таким, что обе цистерны после соударения сцепляются и движутся вместе с

*) Отчет об испытаниях трех опытных образцов восьмиосных цистерн безрамной конструкции грузоподъемностью 120 тонн, МИИТ, тема № 12/65, ВНИИВ, тема № 20707—64-Ц, ЦНИИ МПС, тема № И-138-65, М., 1965.

постоянной скоростью, равной скорости движения их центра масс. В котле каждой из цистерн возникают большие колебания жидкости, при которых ее центр масс перемещается по криволинейной траектории, расположенной в вертикальной плоскости симметрии котла.

Динамическое действие жидкости на цистерну определяется в смысле главного вектора и главного момента при следующих предположениях:

1. Свободная поверхность жидкости на протяжении первой четверти периода ее больших колебаний в котле сохраняет форму плоскости, которая поворачивается относительно горизонтальной плоскости, составляя с нею некоторый угол.

2. Кинетическая энергия движения жидкости относительно системы координат, связанной с ее центром масс и движущейся поступательно, приближенно выражается через переменный главный центральный момент инерции жидкого груза и скорость вращения его главных центральных осей инерции.

Параметры траектории центра масс и другие геометрические характеристики движения жидкости определены с помощью принятых выше предположений.

Скорость движения центра масс по траектории, главный вектор и главный момент динамических давлений жидкости на стенки котла находятся из совместного рассмотрения уравнений движения центра масс, теоремы об изменении кинетического момента жидкости относительно центра масс и уравнения сохранения механической энергии жидкости.

При рассмотрении движения цистерны с постоянным ускорением указанные выше уравнения составлены в ускоренной системе отсчета, связанной с подвижной цистерной.

Принятая расчетная схема позволяет оценить как импульсивное воздействие жидкости на котел, так и развивающиеся при больших колебаниях гидродинамические усилия и моменты.

Полученные формулы выражают зависимости гидродинамических усилий и моментов, усилия в автосцепке и реакций рессорных комплектов от вертикальной координаты траектории центра масс жидкости, отсчитываемой от его первоначального положения.

Для наполовину заполненной жидкостью 60-тонной цистерны на ЭЦВМ «Урал-1» проведены вычисления и построены графики зависимости главного вектора разности давлений жидкости на переднее и заднее днища от указанной координаты для различных скоростей соударения и ускорений

цистерн. Из приведенных в работе таблиц и графиков видно, что максимальные значения продольного усилия существенно зависят от скоростей соударения и ускорений цистерн. Очевидно также, что эти зависимости имеют нелинейный характер.

Максимальные значения гидродинамических давлений и усилий, действующих на котел в случае соударений цистерн с большим недоливом, значительно меньше, чем в цистернах с малым недоливом. Например, при соударении двух 60-тонных цистерн с 2% недоливом со скоростью 10,75 км/час максимальное избыточное давление гидроудара составляет 2,5 ати. В случае мгновенной остановки наполовину заполненной 60-тонной цистерны, движущейся с такой же скоростью, давление гидроудара равно 0,27 ати. При соударении с указанной выше скоростью цистерн, одна из которых неподвижна, динамические давления уменьшаются еще в два раза. Такие давления не могут угрожать прочности котла цистерны и вызывать сколько-нибудь значительные его деформации.

Практический интерес представляет вывод о том, что при больших колебаниях жидкости относительно котла появляется значительный опрокидывающий момент и возникает опасность потери продольной устойчивости цистерны от схода с рельсов.

В приложении к диссертации даны таблицы конструктивных параметров серийной 60-тонной и 120-тонной безрамной цистерн, которые были использованы при расчете гидравлического удара в этих цистернах.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В настоящей диссертационной работе впервые теоретическим путем установлены величины гидродинамического давления, силы удара в автоцепку и динамических реакций рессор в зависимости от скорости соударения цистерн, заполненных жидкостью с малым и большим недоливом. Применяемая в настоящее время в практике расчетно-конструкторских бюро формула ЦНИИ МПС для расчета давления гидроудара не выражает зависимости давления от скорости.

2. Методика расчета давлений гидроудара в цистернах с малым (2%) недоливом учитывает особенности конструкции и условия эксплуатации более полно, чем это сделано авторами предыдущих исследований гидроудара. Благодаря этому результаты теоретического расчета динамических давлений и усилий для двух конструктивно различных типов ци-

стерн — рамной и безрамной — хорошо совпадают с результатами натурных испытаний этих цистерн.

3. В работе предложена также новая методика определения динамического действия жидкости на заполненную с большим недоливом цистерну при больших колебаниях жидкости, которые возникают в случае соударения цистерн и в некоторых других расчетных случаях. Как и в случае малого недолива, определены давления, усилия в автосцепке и реакции рессорных комплектов тележек.

4. Сопоставление результатов, полученных для случаев соударений цистерн с малым и большим недоливом, позволяет сделать следующие выводы:

а) динамические давления и усилия значительно меньше в случае соударения цистерн с большим недоливом. Ранее к такому же выводу приходили авторы экспериментальных исследований гидроудара на натуральных цистернах.

б) при соударениях цистерн с большим недоливом возникает опасность потери продольной устойчивости цистерны от схода с рельсов.

5. Разработанная методика теоретического исследования гидравлического удара в котлах железнодорожных цистерн внедрена в расчетную практику отдела главного конструктора вагоностроения Ждановского завода тяжелого машиностроения.

Основные результаты диссертационной работы были доложены на семинаре по механике Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта, на научно-технических совещаниях отдела главного конструктора вагоностроения ЖЭТМ и опубликованы в следующих работах:

1. К. Н. Гопак, В. И. Перехрест. «Колебания цилиндрической цистерны, частично заполненной жидкостью», «Гидроаэромеханика», вып. 3, X., Изд. Харьк. ун-та, 1966.

2. К. Н. Гопак, В. И. Перехрест. «О гидравлическом ударе в котлах железнодорожных цистерн». «Гидроаэромеханика», вып. 4, X., Изд. Харьк. ун-та, 1966.

3. К. Н. Гопак, В. И. Перехрест. «Гидравлический удар в железнодорожной цистерне». «Гидроаэромеханика и теория упругости», вып. 7, X., Изд. Харьк. ун-та, 1967, принято к печати.

4. К. Н. Гопак, В. И. Перехрест. «Гидравлический удар в железнодорожной цистерне при большом недоливе». «Гидроаэромеханика и теория упругости», вып. 8, X., Изд. Харьк. ун-та, 1968, принято к печати.

БТ 21324. Областная книжная типография

Днепропетровского областного управления по печати,

г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.

Заказ № 2280-м. Тираж 200. Объем 0,75 п. л. Подп. к печати 3.XI-67 г.