

В. И. ПЕРЕХРЕСТ

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЦИСТЕРНЫ

(Специальность № 022 — сопротивление материалов
и строительная механика)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск
1967

3106а

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)

Автореферат
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.

НТБ
ДНУЖТ

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

$$p_{11} = 250.000 \frac{Q_{ж}}{Q_{бр}} (\pi r^2)^{-1} \quad (1)$$

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 нею 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 $\Omega = \frac{2\mathcal{E}}{1/4(M+m)v_0^2}$ — коэффициент прикрытия кон-

струкции вагона, введенный проф. В. А. Лазаряном и его сотрудниками. В формуле (2) введены обозначения: M — масса жидкости, m — масса тары цистерны, \mathcal{E} — 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 $\Pi_2(p_1)$.

Потенциальная энергия $\Pi_1(p_1)$ 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 стенку 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 автосцепку 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 натуральных 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 ЖЗТМ 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.