

# Исследования о распространении изменения давления жидкого груза в котле железнодорожной цистерны при гидроударе



**С. В. Беспалько,**  
доктор техн. наук,  
профессор кафедры  
«Вагоны и вагонное  
хозяйство» Московского  
государственного  
университета путей  
сообщения (МИИТ)



**В. И. Богачев,**  
аспирант кафедры  
«Вагоны и вагонное  
хозяйство», МИИТ

В процессе маневрового соударения цистерн нагруженность котлов в значительной степени определяется повышением давления жидкого груза. Уровень значений гидродинамического давления существенно превышает гидростатические значения из-за гидроудара, который возникает в котлах цистерн при определенных условиях динамических процессов. Для их исследования сформирована математическая модель гидроудара, которая внедряется в математическую модель колебаний вагона-цистерны с учетом колебаний жидкого груза.

**П**од гидроударом принято понимать явление резкого изменения давления в жидкости, вызванное быстрым изменением скорости её течения в напорном трубопроводе [1]. Впервые это явление математически описал русский ученый Н. Е. Жуковский [2], который рассмотрел процесс распространения волн повышенного давления и получил формулу давления при гидроударе.

Явление гидроудара исследовалось применительно ко многим областям техники.

Так, в работе [3] приведены результаты экспериментальных исследований гидравлического удара в напорных водоводах насосных станций систем водоснабжения. Подробно рассмотрен случай гидравлического удара, сопровождающегося разрывом сплошности потока. В книге [3] также даны аналитические решения задачи гидравлического удара вязкой сплошной жидкости с квадратичным законом сопротивления. Вопросам защиты напорных трубопроводов водоотведения от гидроударов посвящена статья [4]. Методы применения теории гидравлического удара к расчету трубопроводов гидротурбинных установок приведены в [5]. Полезные свойства явления гидравлического удара реализованы в работе гидравлического тарана. Таран использует энергию падающей воды без превращения ее в другой вид энергии и заменяет

одновременно двигатель и насос. Теория гидравлического тарана и методика расчета и проектирования таранных установок изложены в [6].

Авторы работы [7] для моделирования колебаний жидкого груза в резервуаре автоцистерны использовали механический аналог жидкости, параметры которого вычисляются с учетом возможного появления гидроудара для исследования переходных режимов движения транспортного средства.

Теоретические основы упрощенного расчета гидравлического удара в железнодорожной цистерне представлены в работе [8]. Авторы считают, что давлению гидроудара соответствует квазистатическое состояние жидкости, предшествующее процессу ее плескания. Поэтому теоретической основой упрощенного расчета давления гидроудара в цистерне может служить дифференциальное уравнение равновесия жидкости на случай ее укоренного переносного движения.

О. А. Шимановский рассмотрел процесс распространения волн гидроудара для полностью загруженной цилиндрической емкости цистерны с использованием одномерной модели течения с учетом акустического приближения. Им получен закон изменения давления жидкости в цистерне, которое существенно зависит от закона изменения скорости транспортного средства [9].

Таким образом, несмотря на появляющиеся в последние время работы по исследованию влияния гидравлического удара на динамическую нагруженность транспортных средств с жидким грузом, можно отметить, что в области вагоностроения моделирование маневрового соударения цистерн с учетом возможного появления гидроудара исследовано недостаточно.

Рассмотрим условия, при которых возникает гидроудар в котле железнодорожной цистерны.

При относительно небольших колебаниях жидкого груза его давление ограничивается наличием свободной поверхности, на которой давление жидкости равно давлению газовой фазы. В этом случае движение носит безнапорный характер.

Давления жидкости включает гидростатическую и гидродинамическую составляющие. Гидростатическое давление равно

$$P_{cm} = \rho gh \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – глубина.

Динамическая составляющая давления создается скоростным напором жидкости в сторону данного сечения и равна

$$P_{дин} = \begin{cases} \rho u^2 \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

где  $u$  – скорость движения жидкости вдоль оси котла [3].

Максимальное значение давления имеет место на нижней образующей поверхности котла при притоке и равно

$$P_{max} = \rho gh_{max} + \rho u^2 \quad (3)$$

где  $h_{max}$  – максимальная глубина.

Отметим, что при определении давления скорость колебаний жидкости можно полагать постоянной в пределах одного поперечного сечения жидкости, что соответствует теории мелкой воды.

При увеличении размаха колебаний уровень свободной поверхности может достичь верхней образующей котла, то есть жидкость заполняет (смачивает) все днище до верха. В результате в торцевой части котла образуется область, заполненная жидкостью и не имеющая свободной поверхности. Именно в этой области и возникает гидроудар.

Так как большинство жидких грузов практически не сжимаемы, торцевую область жидкости можно временно считать неподвижной относительно котла. Если приток жидкости к этой области продолжается, то притекающая жидкость «наталкивается» на относительно «неподвижные» слои, уплотняя их. В результате этого уплотнения давление в остановившейся массе жидкости будет возрастать. При этом неподвижная область расширяется за счет притекающей жидкости, и граница свободной поверхности отодвигается от соответствующего днища.

Отсутствие свободной поверхности делает возможным в замкнутой области жидкости принципиально неограниченное повышение давления, что соответствует напорному характеру движения или явлению гидроудара.

Для определения гидродинамического давления в этом случае рассмотрим сначала элементарный импульс, создаваемый набегающей жидкостью на границе заполненной области. Пусть за малый промежуток времени  $dt$  к торцевой области притекала жидкость с дополнительной скоростью  $du$ , учитывая

уже имевшее место значение скорости  $u$ . При этом будем полагать скорость всех точек поперечного сечения жидкости одинаковой. Кроме того, днище полагаем плоским.

Возмущение начинает распространяться от границы свободной поверхности в виде волны повышенного давления, как показано на эюре рис. 1а. Здесь полагается, что гидроудар происходит у правого днища. Скорость движения фронта волны с равна скорости звука в жидкости и определяется по формуле Жуковского [1]:

$$c = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho \left( 1 + \frac{D}{e} \cdot \frac{E_{ж}}{E} \right)}}, \quad (4)$$

где  $E_{ж}$  – модуль объемной упругости жидкости;  $E$  – модуль упругости материала стенок котла;  $D$  – внутренний диаметр цилиндрической части котла;  $e$  – толщина стенок котла.

Точки, до которых уже дошла волна, имеют единое значение давления, равное

$$dP_{yd} = \rho |du| c \quad (5)$$

После того как ударная волна до-

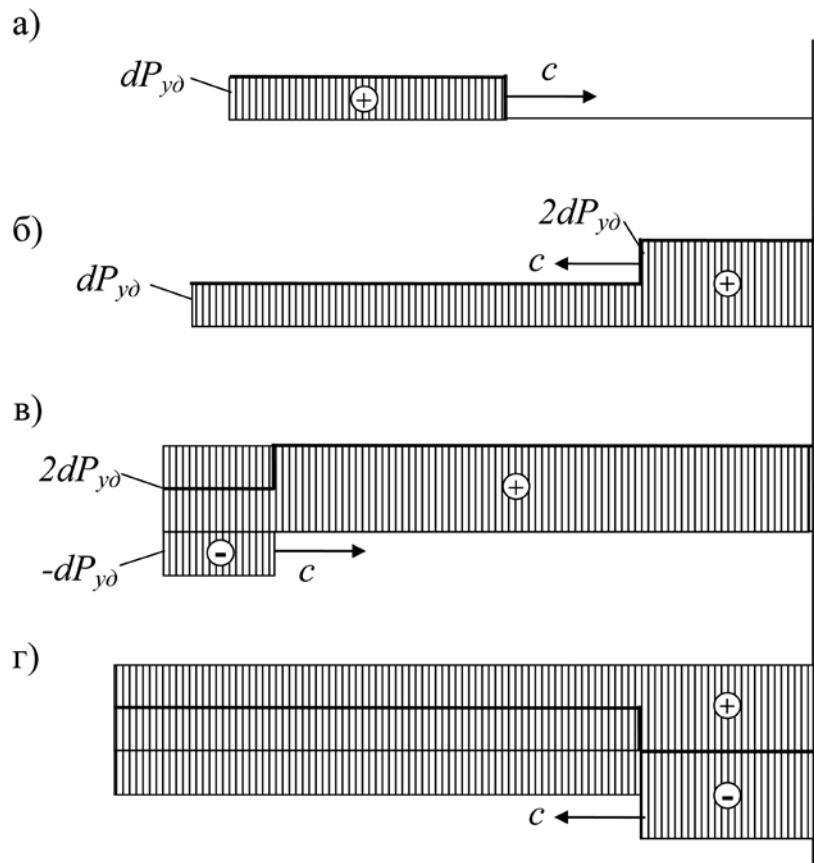


Рис. 1. Распространение ударной волны от элементарного импульса

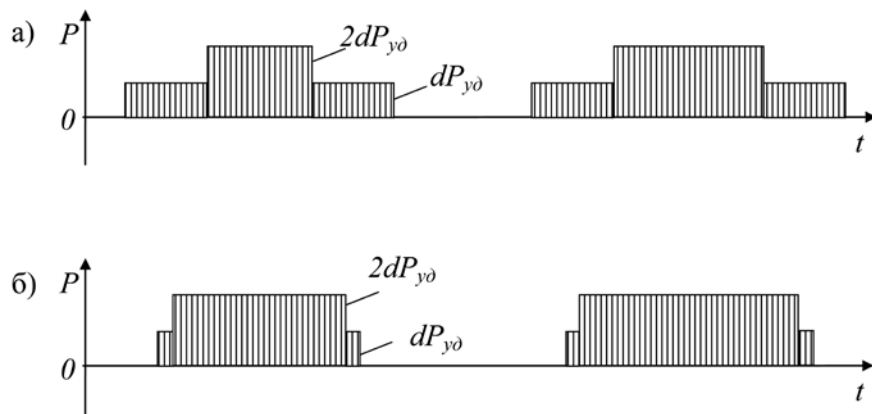


Рис. 2. Зависимость давления от времени:  
а) сечение в средней части заполненной зоны; б) сечение вблизи дна

стигнет дна, она отразится от него, при отражении волны от препятствия порождается волна того же знака, как показано на рис. 1б. Следует отметить, что заполненная область расширилась влево от дна, благодаря притоку жидкости.

Отражение фронта ударной волны от границы свободной поверхности порождает волну противоположного знака (рис. 1в). Результирующая эпюра давления показана толстой линией. Фронт волны противоположного знака движется на этой фазе вправо. Затем «отрицательная» ударная волна отражается от дна (не меняя знака), как показано на рис. 1г, где фронт волны движется влево.

Когда фронт достигнет границы свободной поверхности, эпюра давлений от данного элементарного импульса станет нулевой. После этого процесс повторяется, начиная с положительной волны  $dP_{yd}$ , движущейся вправо (рис. 1а).

На рис. 2 показан закон изменения во времени давления вблизи правого дна от воздействия данного элементарного импульса.

Таким образом, каждый элементарный импульс создает в зоне гидроудара серию всплесков давления, длительность которых зависит от ширины заполненной области, удлиняясь при притоке жидкости к данному дну (расширение области гидроудара) и укорачиваясь при оттоке (сужение области гидроудара).

При наложении подобных малых, но конечных импульсов результирующая зависимость давления гидроудара от времени будет иметь следующий вид (рис. 3, штриховая линия).

Осцилляции на графике зависимости давления обусловлены конечной величиной элементарных импульсов. При рассмотрении бесконечно малых импульсов будет иметь место гладкая кривая (рис. 3, сплошная линия).

Давление в каждый момент времени можно принять равным

$$P_{уд} = \rho |u_{гр}| c, \quad (6)$$

где  $u_{гр}$  – скорость притока жидкости к границе заполненной области, равная по модулю скорости перемещения границы и направленная в противоположную сторону.

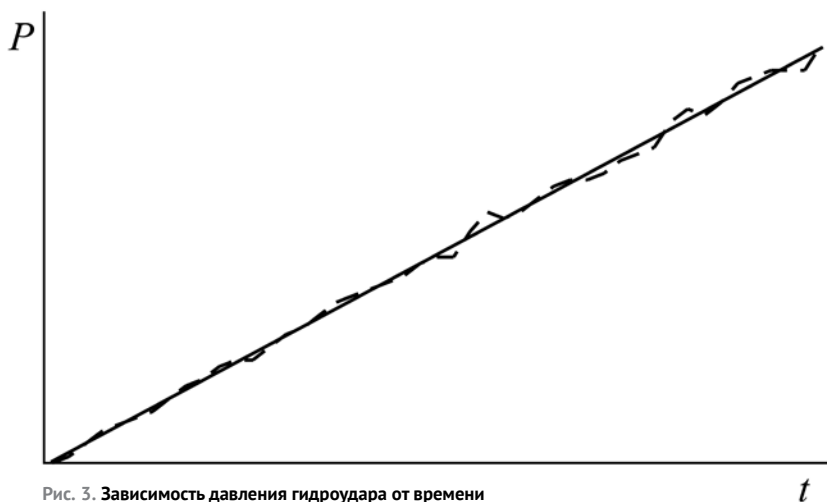


Рис. 3. Зависимость давления гидроудара от времени

Для вычисления суммарной силы давления на днище необходимо взять интеграл по вертикальной координате от суммы проекций гидростатического и гидродинамического давлений на днище на продольную ось котла.

Изложенная математическая модель гидроудара внедряется в математическую модель колебаний вагона-цистерны с учетом колебаний жидкого груза. Она позволяет установить связь между уравнениями колебаний жидкости и уравнениями движения твердых частей вагона. При этом на каждом шаге интегрирования по времени колебания котла цистерны определяют ускорение, которое воздействует на жидкий груз. В свою очередь, жидкость воздействует на котел через силы давления на левое и правое днище.

**Литература**

1. Чугаев Р. Р. Гидравлика: учеб. для вузов. 4 изд., доп. и перераб. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. 672 с.
2. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.; Л.: Гос. изд-во технико-теоретич. лит., 1949. 104 с.
3. Смирнов Д. Н., Зубов Л. Б. Гидравлический удар в напорных водоводах. М.: Стройиздат, 1975. 125 с.
4. Твардовская Н. В. Защита напорных трубопроводов водоотведения от гидравлических ударов // Изв. Петербург. гос. ун-та путей сообщения. 2005. Вып. 1. С. 167–171.
5. Жмудь А. Е. Гидравлический удар в гидротурбинных установках. Элементы теории и расчет. Л.; М.: Гос. энергетич. изд-во, 1953. 236 с.
6. Овсепян В. М. Гидравлический таран и таранные установки. М.: Машиностроение, 1968. 124 с.
7. Гриднев С. Ю., Будковой А. Н. Динамическое воздействие автоцистерн с отсеками на путь при учете гидроудара // Строительная механика и конструкции. 2012. Т. 2, № 4. С. 116–121.
8. Кельрих М. Б., Криль С. И. Теоретические основы упрощенного расчета давления гидроудара в железнодорожной цистерне // 36. наук. праць ДонІЗТ, 2011. № 25. С. 162–170.
9. Шимановский А. О. Колебания и устойчивость автомобильных и железнодорожных цистерн, перевозящих жидкие грузы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук, 01.02.06. Минск, 2011. 46 с.