

В.А. ВОЛКОВ, ОАО «Мариупольский з-д тяж. маш.» (Украина)

В.М. БУБНОВ, д-р техн. наук, ОАО «Мариупольский з-д тяж. маш.» (Украина)

Г.И. БОГОМАЗ, д-р техн. наук, ИТМ НАНУ и НКАУ (Украина)

М.Б. КЕЛЬРИХ, д-р техн. наук, КУЭТТ (Украина)

## **РАЗРАБОТКА ГАЗОВЫХ ЦИСТЕРН НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ, ОБОРУДОВАННЫХ ЗАЩИТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ**

На підставі аналізу даних про аварійні ситуації з вагонами-цистернами й оцінки існуючих засобів захисту днищ казанів розроблена конструкція захисного пристрою у вигляді торцевого щита зі стільниковими енергопоглинаючими елементами. Визначено раціональні параметри запропонованого захисного пристрою і виконано його експериментальне відпрацювання. Створено дослідний зразок вагона-цистерни для перевезення зріджених вуглеводородних газів з торцевими захисними щитами розробленої конструкції.

На основании анализа данных об аварийных ситуациях с вагонами-цистернами и оценки существующих средств защиты днищ котлов разработана конструкция защитного устройства в виде торцевого щита с сотовыми энергопоглощающими элементами. Определены рациональные параметры предложенного защитного устройства и выполнена его экспериментальная отработка. Создан опытный образец вагона-цистерны для перевозки сжиженных углеводородных газов с торцевыми защитными щитами разработанной конструкции.

The response and the stress-strain state of new generation gas tank-car design elements at emergency impacts in the head are investigated. The tank-car is equipped with tank head protection devices of safety shields with cellular energy absorbing element type. Efficiency of their use at emergency loading is shown.

Для обеспечения безопасности железнодорожных перевозок, сохранности грузов и минимизации последствий возможных аварий, связанных, в частности, с расгерметизацией котлов в результате пробивания днищ автоцепкой соседнего вагона или перевозимым в нем длинномерным грузом, актуальной проблемой является разработка и создание нового поколения газовых цистерн с увеличенным объемом котла и пониженной материалоемкостью, оборудованных эффективными средствами защиты днищ от ударных воздействий.

В настоящее время в качестве средств защиты днищ вагонов-цистерн в аварийных ситуациях используются дополнительные металлические накладки на днища (фальшднища), предохранительные торцевые щиты, откидные крышки. Анализ существующих конструкций защиты днищ показал, что они имеют или малую эффективность, или большую массу, значительно ухудшающую технико-экономические характеристики вагона-цистерны. Отсутствие в защитных устройствах (ЗУ) энергопоглощающих элементов обуславливает передачу практически всей энергии аварийного удара на котел цистерны. Поэтому в основу разработки перспективных средств защиты положен принцип максимального поглощения кинетической энергии удара защитным устрой-

ством за счет особенностей его упругопластического деформирования и разрушения, учитывая при этом габариты конструкций цистерн нового поколения, условия их эксплуатации и возможности технического обслуживания.

На основе выполненного анализа разработаны требования к конструкции ЗУ повышенной энергоемкости, в частности:

- наличие в конструкции ЗУ специальных энергопоглощающих элементов;
- с учетом габаритов перспективных конструкций газовых цистерн толщина ЗУ должна составлять 100...170 мм; высота – не менее 1/3 диаметра котла цистерны;
- вес конструкции ЗУ – согласован с нагрузкой на ось;
- изготовление ЗУ – технологичное с использованием доступных материалов;
- конструкция ЗУ – максимально унифицирована для возможности использования на цистернах различных модификаций;
- средний срок службы ЗУ без технического обслуживания должен соответствовать сроку службы нового вагона-цистерны до первого капитального ремонта.

Разработка и выбор рациональных параметров защитных конструкций выполнены на основе предварительных теоретических исследо-

ваний с последующей экспериментальной обработкой.

Для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) и нагруженности элементов конструкций железнодорожных цистерн с устройствами защиты днищ при аварийных ударных воздействиях использована методика [1], основанная на использовании метода конечных элементов в форме метода перемещений. Аварийные удары в днище котла, как правило, сопровождаются появлением остаточных деформаций в виде вмятин и даже могут привести к нарушению целостности котла и элементов его защиты. Методика [1] позволяет выполнять исследования НДС с учетом не только конструктивных особенностей вагона-цистерны и средств защиты днищ с энергопоглощающими элементами, но и специфики деформирования конструкции при сверхнормативных динамических нагрузках. При этом в зависимости от интенсивности ударного воздействия проводится квазистатический анализ НДС конструкции в целом и динамический анализ упругопластического деформирования наиболее нагруженных элементов конструкции (в частности, днищ котла) перед разрушением. Решение задачи оценки НДС элементов конструкции с учетом упругопластического характера ее деформирования проводится в рамках деформационной теории пластичности, учитывая нелинейную зависимость напряжений от деформаций и деформаций от перемещений.

Для расчетов НДС элементов конструкции вагона-цистерны использованы основанные на методе конечных элементов универсальные вычислительные пакеты прикладных программ, соответствующим образом адаптированные к решению поставленной задачи.

Согласно методике [1] проведено исследование динамических нагрузок и напряжений в элементах железнодорожной цистерны для перевозки сжиженных газов при ударах в днище автосцепкой вагона-бойка. Дана оценка динамической нагруженности элементов конструкции вагона-цистерны без средств защиты [2], а также в случае защиты днищ котла дополнительными металлическими накладками [3] или торцовыми щитами без энергопоглощающих элементов. В результате проведенных исследований установлено, что нарушение герметичности оболочки котлов вагонов-цистерн без защитных устройств и при оборудовании днищ дополнительными металлическими защитными накладками толщиной порядка 0,01 м может произойти при аварийных соударениях со ско-

ростями выше 12 км/ч. Следует отметить, что дополнительные накладки не подлежат замене, поскольку даже при минимальной их деформации происходит деформация котла цистерны.

В качестве защитной конструкции рассмотрены торцовые щиты, жестко закрепленные на раме и отстоящие на расстоянии 0,09 м от днищ цистерны. Конструкция торцового защитного щита состоит из экрана размером 1,2×1,26×0,091 м, подкрепленного со стороны днища пятью горизонтальными и четырьмя вертикальными ребрами жесткости переменного сечения, увеличивающегося сверху вниз и от краев к центру.

На рис. 1 показано НДС защитного щита до взаимодействия с днищем котла цистерны (предел текучести материала щита – 310 МПа).

Использование для защиты днищ котлов предохранительных щитов в виде металлических пластин подкрепленных со стороны днищ ребрами жесткости, повышает эксплуатационную надежность защиты и позволяет обеспечить целостность днищ котлов вышеуказанных цистерн при скоростях аварийных столкновений порядка 20 км/ч. Тем не менее, уровень энергии, которая поглощается при упругом деформировании щита до взаимодействия с днищем котла, достаточно мал и составляет приблизительно 5 кДж. Поскольку вертикальные и горизонтальные ребра закреплены на щите со стороны днища, то при взаимодействии торцового щита с днищем упругопластические деформации днища появляются при скоростях удара порядка 4 км/ч.

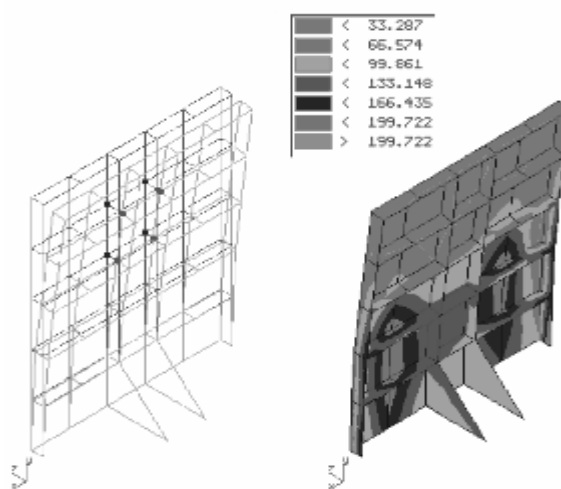


Рис. 1

Исследования показали, что эффективность существующих защитных устройств в виде торцовых щитов можно существенным образом

повысить за счет усовершенствования их конструкций путем использования сотовых энергопоглощающих элементов, которые отличаются пониженной материалоемкостью и повышенной энергоемкостью. Проведены эксперименты по статическому сжатию под прессом сотового образца, в результате которых определен критерий для выбора геометрических размеров поперечного сечения шестигранного сотового заполнителя [3]. Учитывая особенности работы защитного устройства, которое должно разрушаться до появления вмятин на днище, выбор параметров сотовой ячейки защитного устройства для конкретной модели цистерны должен определяться величиной критического давления, при котором начнут сминаться сотовые элементы. Это давление  $P_{kr\_c}$  определяется из условия, что критическое напряжение потери устойчивости стенки соты как шарнирно опертой пластинки должно быть не ниже предела текучести материала сот, и не должно превышать допускаемого наружного давления  $[p]$ , определяемого из условий прочности и устойчивости днищ котла в пределах упругости [4]:

$$\sigma_T \leq \sigma_{kp} = 3,6E_c \left( \frac{\delta_c}{r} \right)^2 \leq \sigma_{bc},$$

$$\sqrt{\frac{\sigma_T}{3,6E_c}} \leq \frac{\delta_c}{r} \leq \sqrt{\frac{\sigma_{bc}}{3,6E_c}}, \quad P_{kr\_c} = 1,54 \frac{\delta_c}{r} \sigma_T,$$

$$P_{kr\_c} < [p], \quad [p] = \frac{[p]_p}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_p}{[p]_e} \right)^2}},$$

где  $\sigma_{kr}$  – критическое напряжение потери устойчивости стенки соты;  $\sigma_T$  – предел текучести материала сот;  $\sigma_{bc}$  – предел прочности материала сот;  $E_c$  – модуль упругости материала сот;  $\delta_c$  – толщина листа сотового заполнителя;  $r$  – радиус описанной окружности ячейки сотового заполнителя;  $[p]$  – допускаемое значения наружного давления для днища котла, определяемое из условия прочности  $[p]_p$  и из условия устойчивости в пределах упругости  $[p]_e$ .

В результате оценки параметров защитных устройств с энергопоглощающими элементами [3] для вагонов-цистерн, транспортирующих сжиженные газы, предлагается использовать защитные устройства в виде пакета из двух металлических листов, между которыми расположен энергопоглощающий сотовый заполни-

тель толщиной не менее 0,08...0,15 м. Радиус сотовой ячейки должен быть меньше толщины сотового заполнителя, а отношение толщины листов, образующих сотовые элементы, к радиусу сотовой ячейки примерно равно 1/60.

Разработанная конструкция предохранительного торцового щита с деформируемыми сотовыми элементами [5] показана на рис. 2.

Существенным отличием предлагаемого устройства от ранее существовавших защитных конструкций является наличие жестко закрепленных на пластине щита и расположенных между ним и днищем деформируемых блоков (рис 3).

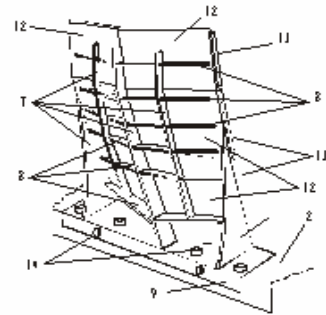
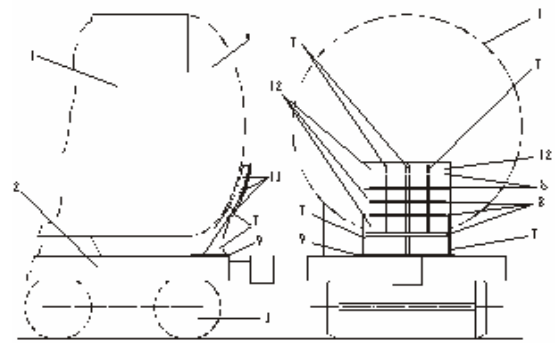


Рис. 2

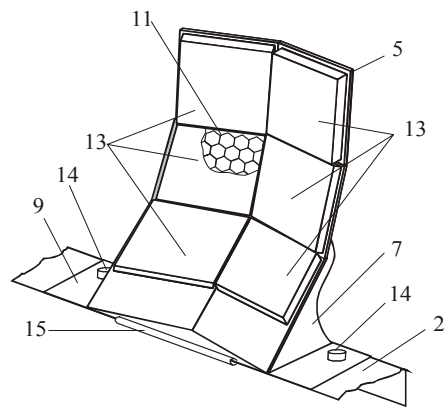


Рис. 3

При этом и блоки, и пластины повторяют по конфигурации форму днища. Особенностью предлагаемой защитной конструкции является

установка вертикальных и горизонтальных ребер на внешней стороне щита, обеспечивающих требуемую жесткость, а также изготовление блоков в виде сотовой конструкции из жестко соединенных между собой гофрированных листов низкоуглеродистой стали.

Проведена экспериментальная отработка предложенной защитной конструкции с помощью натурных испытаний вагона-цистерны при аварийном соударении его с вагоном-бойком, у которого автосцепка была закреплена на высоте, позволяющей осуществлять удары в днище котла (рис. 4).

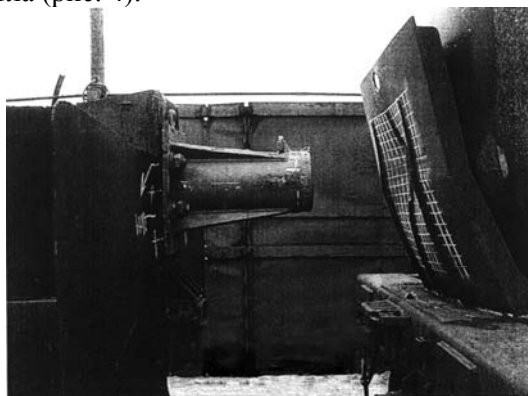


Рис. 4

Экспериментально получено, что использование в защитных устройствах пластически деформируемых сотовых элементов позволяет смягчить ударное воздействие на вагон-цистерну. Показана возможность использования предохранительного щита с энергопоглощающими элементами в качестве эффективного средства защиты днищ котлов вагонов-цистерн при аварийных ситуациях.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили корректность используемой методики расчета и математических моделей. В результате проведенных натурных испытаний конструкция защитного устройства была доработана, и выбраны параметры предохранительного щита и сотовых элементов (высота, толщина, радиус ячейки) для вагона-цистерны нового поколения (модель 15-9503 АВП), предназначенной для транспортировки сжиженных углеводородных газов (бутана, пропана и их смесей). Доработанная конструкция торцевого защитного щита с сотовыми энергопоглощающими элементами показана на рис. 5.

В соответствии с методикой математического моделирования [1] проведены исследования напряженно-деформированного состояния котла железнодорожной цистерны нового поколения для перевозки сжиженных газов модели 15-9503 АВП, оборудованной разработанными

защитными устройствами повышенной энергоемкости, при эксплуатационных режимах нагружения и аварийных ударах в днище.

В результате выполненных исследований обоснована возможность снижения толщины днищ и обечайки котла цистерны с 0,024 до 0,022 м. Установлено, что наличие рассматриваемых средств защиты днищ котла от пробивания в аварийной ситуации позволяет сохранить герметичность котла при скорости соударения 34 км/ч. Выбранные параметры вагона-цистерны обеспечивают в соответствии с Нормами [6] требуемую прочность конструкции, а применение предохранительных щитов, содержащих сотовые энергопоглощающие элементы, повышает ее эксплуатационную безопасность.



Рис. 5

Для оценки прочности крепления предохранительных щитов с энергопоглощающими сотовыми элементами на раме вагона-цистерны (рис. 6) от действия ударных и вибрационных-эксплуатационных нагрузок были проведены натурные испытания на испытательных участках ИЦ «Азовмаштест».

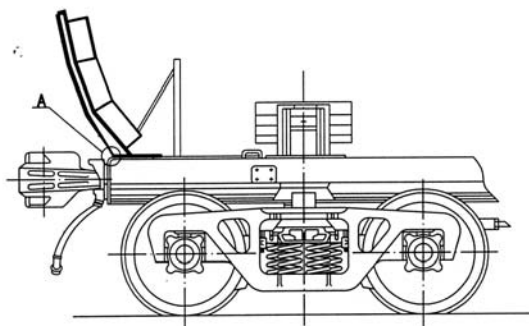


Рис. 6

Испытания проходили в два этапа. На первом этапе были проведены испытания на соударение и испытания по сбрасыванию с клиньев. Основная задача испытаний на соударение – определение величин амплитуд напряжений в элементах крепления щита на раме вагона, количества циклов колебаний щита после соударений, ускорений его элементов при ударах в автосцепку с нормативными значениями сил.

Испытаниям на соударение подвергалась цистерна в порожнем состоянии стоящая в подпоре, так как этот режим является наиболее неблагоприятным для обеспечения прочности узлов крепления подвесного и навесного оборудования. Соударения проводились со скоростями от 3,3 до 13,0 км/ч сериями по 5 соударений в каждой. После каждой серии соударений щит и элементы его крепления осматривались. Всего было произведено 46 соударений с усилиями от 0,40 до 2,30 МН.

Основная задача испытаний по сбрасыванию с клиньев – определение уровня, статистической повторяемости и частотного состава динамических напряжений, возникающих в элементах крепления щита при движении цистерны. При испытаниях по сбрасыванию с клиньев порожняя цистерна накатывалась на клинья, установленные под все колеса одной тележки (имитация галопирования). Всего было проведено три опыта. При испытаниях фиксировались нагружения в элементах щита и частота колебания щита.

Второй этап включал в себя непосредственно вибрационные усталостные испытания щита, основная задача которых – определение количественных характеристик сопротивления усталости предохранительного щита и элементов его крепления на раме вагона-цистерны при обоснованно заданных режимах длительного вибрационно-циклического нагружения. Испытаниям подвергалась цистерна в порожнем состоянии, так как этот режим является наиболее неблагоприятным для обеспечения прочности узлов крепления подвесного и навесного оборудования. При проведении вибрационных испытаний в центре щита был установлен пневматический вибратор, который вызывал колебания щита. Всего было произведено 5702400

циклов вибрации с частотой 18 Гц (собственная частота колебаний щита) и амплитудой динамических напряжений 40 МПа.

При проведении испытаний определялись: целостность сварных швов элементов крепления щита на раме цистерны; скорость соударения вагонов и сила удара в автосцепку; напряжения в элементах щита и количество циклов его колебаний; собственные частоты колебаний щита.

В результате проведенных испытаний получено, что конструкция крепления щита обеспечивает запас прочности при действии ударных и вибрационных нагрузок в эксплуатации на срок службы нового вагона-цистерны для перевозки сжиженных газов до первого капитального ремонта (10 лет). Вагон-цистерна для перевозки сжиженных углеводородных газов (модель 15-9503 АВП), оборудованная разработанными торцовыми защитными щитами с сотвыми энергопоглощающими элементами, внедрена в серийное производство.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомаз Г.И., Волков В.А., Соболевская М.Б., Хрущ И.К. Особенности математического моделирования напряженно-деформированного состояния элементов железнодорожных цистерн при сверхнормативных ударных воздействиях в днище // Транспорт. – 2000. – Вып. 5. – С. 25-30.
2. Богомаз Г.И., Волков В.А., Соболевская М.Б. Динамическая нагруженность элементов конструкций вагонов-цистерн при аварийных ударах в днище // Транспорт. 2000. – Вып. 6. – С. 48-51.
3. Богомаз Г.И., Бубнов В.М., Волков В.А., Соболевская М.Б., Хрущ И.К. Оценка параметров средств защиты днищ котлов железнодорожных цистерн при аварийных воздействиях // Техническая механика. 2000. – Вып. 1. – С. 135-143.
4. Средства защиты в машиностроении: Расчет и проектирование: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – С. 269-277.
5. Заявка на винахід № 2004021252 від 20.02.04. Україна, МПК7 В 61 D 5/00; Залізнична цистерна / Волков В.А., В.М. Бубнов, Богомаз Г.І. та інші; ООО “ГСКБ”, ТД “Азовмаш”, ОАО “Азовобше-маш”. – 15 с.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИвагоностроения – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.