

С.А. Швырков, С.А. Горячев, В.В. Воробьев, А.С. Швырков
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: pbtp@mail.ru)

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ПРОРЫВА ПРИ РАЗРУШЕНИИ РЕЗЕРВУАРА ТИПА "СТАКАН В СТАКАНЕ"

Представлены лабораторный стенд для исследования волны прорыва, образующейся при квазигновенном разрушении вертикального стального резервуара, и результаты оценки её влияния на геометрические и прочностные параметры защитных стенок резервуаров типа "стакан в стакане".

Ключевые слова: защитная стенка, волна прорыва.

S.A. Shvyrkov, S.A. Goryachev, V.V. Vorobyov, A.S. Shvyrkov

LABORATORY SIMULATION OF WAVE BREAKTHROUGH AT DESTRUCTION OF THE TANK TYPE "GLASS IN THE GLASS"

Presented laboratory stand for the study of the waves breaking, resulting in full destruction of vertical steel tank, and the results assessing its impact on the geometric and strength parameters of the protective walls of tanks of the "glass to glass".

Key words: protective wall, breaking wave.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 6 марта 2017 г.

Вертикальный стальной резервуар с защитной стенкой (РВСЗС) типа "стакан в стакане" является одним из перспективных конструктивных решений по ограничению аварийного разлива хранящихся пожароопасных жидкостей и распространения пожара в резервуарном парке. Такой резервуар состоит из внутреннего (основного) резервуара, предназначенного для хранения продукта, и наружного резервуара, выполняющего функцию защитной стенки, служащей для удержания продукта при нарушении герметичности основного резервуара или его разрушении.

Требования к проектированию, монтажу и эксплуатации РВСЗС предъявляются в действующих нормативных документах по промышленной безопасности:

- **ГОСТ 31385-2016.** Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия;
- **Руководство** по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов;
- **СТО-СА-03-002-2009. Правила** проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.

Анализ ряда требований в этих документах показал, что между ними имеются существенные несоответствия, влияющие на обеспечение безопасности при эксплуатации РВСЗС [1].

В частности, во всех указанных документах отмечается, что высота защитной стенки должна составлять не менее 80 % от высоты стенки основного резервуара при ширине межстенного пространства не менее 1,8 м, но при этом не устанавливаются требования к максимальной ширине этого пространства, влияющей на высоту стенки наружного резервуара. ГОСТ и Правила не требуют устройства защитного железобетонного ограждения, рассчитанного на гидродинамическое давление выходящего продукта из основного хранилища РВСЗС при его мгновенном хрупком разрушении (достаточно обеспечить защиту от растекания, рассчитанную на гидростатическое давление выходящего продукта и обеспечивающую его организованный отвод). В Руководстве вообще отсутствуют какие-либо требования к обустройству дополнительных ограждений вокруг РВСЗС. Необходимо также отметить, что требования указанных документов не соответствуют действующим нормам проектирования складов нефти и нефтепродуктов [2], в которых указано, что требования по обеспечению пожарной безопасности не распространяются на склады нефти и нефтепродуктов с резервуарами типа РВСЗС. При этом иные нормативные документы, регламентирующие требования пожарной безопасности к таким резервуарам, в настоящее время отсутствуют.

Таким образом, выявленные несоответствия в требованиях нормативных документов, а также отсутствие нормативных документов, регламентирующих требования пожарной безопасности к РВСЗС, обуславливают актуальность исследований по обеспечению их пожарной безопасности, по нормированию требований к геометрическим и прочностным параметрам защитной стенки РВСЗС, а также по обоснованию необходимости сооружения дополнительных защитных ограждений.

Изучение влияния волны прорыва на защитную стенку на натурных объектах не представляется возможным, в первую очередь, из-за значительных экономических затрат. Поэтому возникает необходимость в создании модели рассматриваемого объекта, на которой воспроизводимые процессы будут подобны процессам на натурном объекте. В этом случае возможен перенос результатов опытов на натурный объект. При создании модели должны соблюдаться следующие основные условия гидродинамического подобия [3-5]:

- при исследовании протекания жидкости через водосливы (в данном случае волны прорыва при разрушении резервуара) главную роль играют силы тяжести (критерий Фруда, Fr).

Равенство критерия Фруда в соответствующих точках потоков, удовлетворяющих геометрическому, кинематическому и динамическому подобию, обеспечивает подобие сил тяжести:

$$Fr = \frac{g_m^2}{g_m h_m} = \frac{g_n^2}{g_n h_n}, \quad (1)$$

где g_m, g_n – скорость потока в соответствующих точках (на расстоянии l_m и l_n от стенки резервуара);

$g_m = g_n$ – ускорение свободного падения;

h_m, h_n – характерная для изучаемого процесса линейная величина, в данном случае, глубина (высота) потока на расстоянии l_m, l_n от стенки резервуара (здесь и далее индексы "н" и "м" показывают отношение величины соответственно к натуре и модели);

- турбулентный поток жидкости на натурном объекте должен быть турбулентным и в модели, то есть $Re_m > Re_{кр}$ (здесь Re_m – критерий Рейнольдса; $Re_{кр}$ – критическое значение критерия Рейнольдса при моделировании открытых потоков, как правило, более 10000 [6]):

$$Re_m = \frac{g_m R_m}{\nu_m}, \quad (2)$$

где R_m – гидравлический радиус (для открытых русел большой ширины вместо гидравлического радиуса принимают среднюю глубину потока на расстоянии l_m);

ν_m – кинематическая вязкость жидкости;

- наименьший допустимый масштаб модели определяется по формуле:

$$\lambda_{мин} = (30 \div 50) \sqrt[3]{g_n^2 R_n^2}; \quad (3)$$

- поток жидкости на натурном объекте в спокойном состоянии ($\Pi_k < 1$) или в бурном состоянии ($\Pi_k > 1$) должен быть в таком же состоянии и на модели (здесь Π_k – параметр кинетичности потока). В условиях плоской задачи и для прямоугольных русл при спокойном состоянии потока $\Pi_k = Fr < 1$, при бурном состоянии потока $\Pi_k = Fr > 1$ [6];

- влияние поверхностного натяжения должно быть настолько малым, чтобы оно не мешало образованию волн, поэтому необходимо, чтобы скорость потока со свободной поверхностью на модели была более 0,23 м/с.

Использование формул (1) и (3) возможно (при условии соблюдения идентичности вязкости жидкости на натурном объекте и в модели), если известны скорость и высота волны прорыва на натурном объекте на соответствующих расстояниях от резервуара, для определения которых использованы результаты ранее выполненного с участием специалистов кафедры пожарной безопасности технологических процессов Академии ГПС МЧС России эксперимента по определению параметров волны прорыва при квазимгновенном разрушении РВС-700 м³ с водой (диаметр 10,43 м, высота 9,0 м), а также теоретических и экспериментальных исследований на моделях [7]. Поэтому данный тип резервуара был выбран в качестве прототипа при разработке лабораторного стенда и создания модели резервуара в масштабе 1:30.

При определении высоты и скорости волны прорыва по трассе растекания использовались следующие зависимости [7]:

$$H_{\text{вп}} = L \cdot 10^{1,293 \lg(H_p / L) + 0,991 \lg(R_p / L) - 0,444}; \quad (4)$$

$$U_{\text{вп}} = \sqrt{g L} \left(0,144 + \frac{0,152}{\sqrt{H_p / L}} - \frac{0,343}{\sqrt{R_p / L}} + 2,521 \sqrt{\frac{H_p}{L}} - \frac{1,998 \sqrt{H_p R_p}}{L} \right), \quad (5)$$

где $H_{\text{вп}}$ – высота волны прорыва, м;

$U_{\text{вп}}$ – скорость волны прорыва, м/с;

L – расстояние от центра резервуара до характерной точки на трассе растекания потока, м;

H_p – высота уровня жидкости в резервуаре до его разрушения, м;

R_p – радиус резервуара, м.

С учётом критериев подобия и соблюдения условий моделирования рассмотренных процессов разработан лабораторный стенд для проведения экспериментов по удержанию волны прорыва защитной стенкой, устанавливаемой на различных расстояниях от основного резервуара (рис. 1).

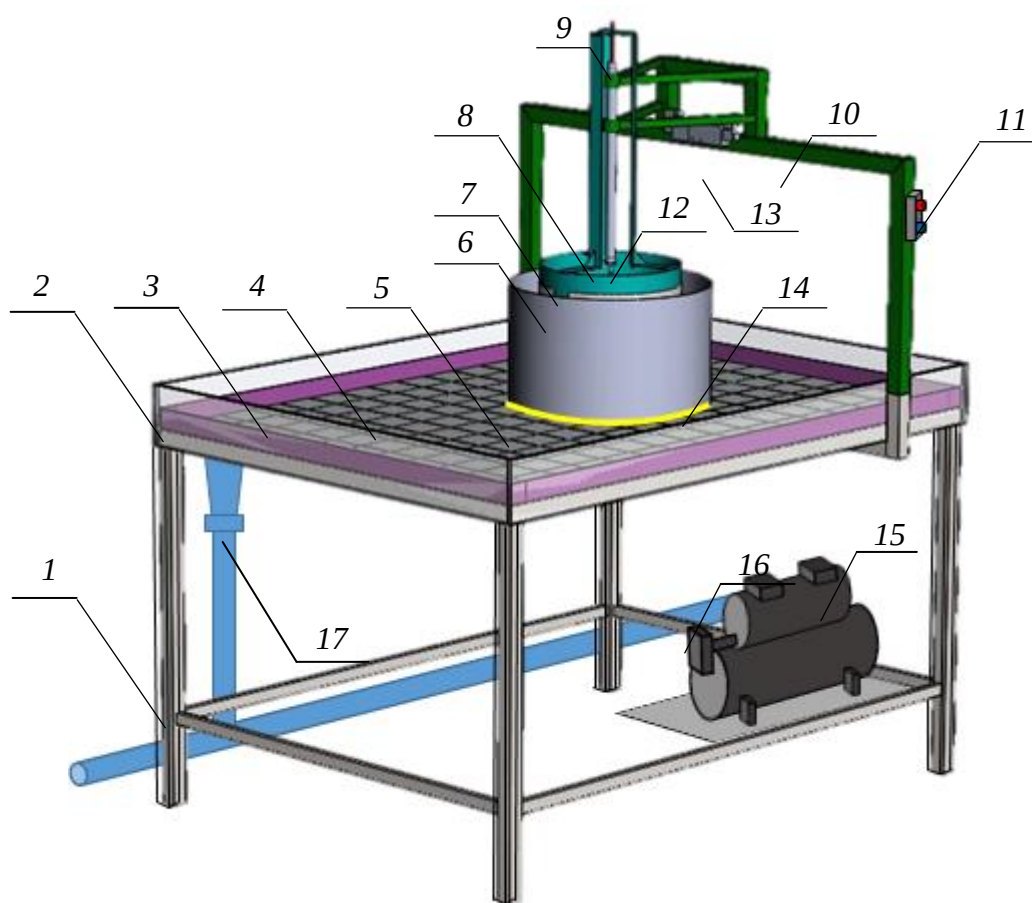


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда для исследований параметров волны прорыва и её влияния на ограждения резервуаров

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 – каркас из стального профиля ($B \times Ш \times Г$: $0,9 \times 1,6 \times 1,1$ м); 2 – экраны из прозрачного органического стекла высотой $0,025$ м; 3 – столешница в виде поддона из нержавеющей стали с высотой борта $0,05$ м; 4 – основание из листового алюминия толщиной $0,01$ м с четырьмя регулируемыми по высоте опорами и двумя встроенными пузырьковыми горизонтальными уровнями; 5 – уплотнительное резиновое кольцо; 6 – вкладка из прозрачного поликарбоната толщиной $0,0006$ м и высотой $0,3$ м; 7 – обечайка модельного резервуара диаметром $0,35$ м и высотой $0,3$ м; 8 – три направляющие, жёстко закреплённые на обечайке модельного резервуара; 9 – узел крепления направляющих к штоку пневматического поршня; 10 – стальная рама, жёстко закреплённая на каркасе стенда; 11 – кнопки управления резким подъёмом модельного резервуара и его плавным опусканием на уплотнительное резиновое кольцо; 12 – пневматический поршень; 13 – манометр с датчиками давления; 14 – защитные стенки в виде стальных цилиндрических обечаек; 15 – воздушный поршневой компрессор с ресивером; 16 – трубопровод канализации; 17 – сливная арматура.

Для обеспечения идентичности воспроизведения процесса разрушения стенок натурального резервуара внутрь модельного резервуара (поз. 7) устанавливается вкладка из листа поликарбоната (поз. 6), которая плотно прижимается к стенкам модельного резервуара при заполнении его водой, повторяя его форму.

Разрушение модельного резервуара происходит при быстром поднятии с помощью пневматического поршня обечайки модельного резервуара, после чего, установленная внутри него поликарбонатная вставка свободно раскрывается на 180° под действием напора воды, имитируя разрушение резервуара по вертикальному шву.

В качестве защитных стенок используются стальные цилиндрические обечайки (поз. 14). При постоянной высоте в $0,3$ м обечайки имеют различный диаметр (от $0,45$ до $0,55$ м), что позволяет производить опыты в широком диапазоне расстояний от них до модельного резервуара.

На рис. 2 показан общий вид лабораторного стенда.

С целью подтверждения возможности использования стенда для изучения характеристик волны прорыва и её влияния на защитные стенки проведена первичная серия опытов по свободному истечению жидкости из модельного резервуара (без защитной стенки).

Процессы образования, распространения и воздействия волны прорыва на трапецидальное ограждение, соответствующее в принятом масштабе моделирования нормативному обвалованию при проведении натурального эксперимента [7], регистрировались цифровой фотокамерой марки *Nikon 1J1*, позволяющей создавать 5-секундные видеоролики с замедленной съёмкой формата *HVGA* $640 \times 240/400$ кадров в секунду (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда

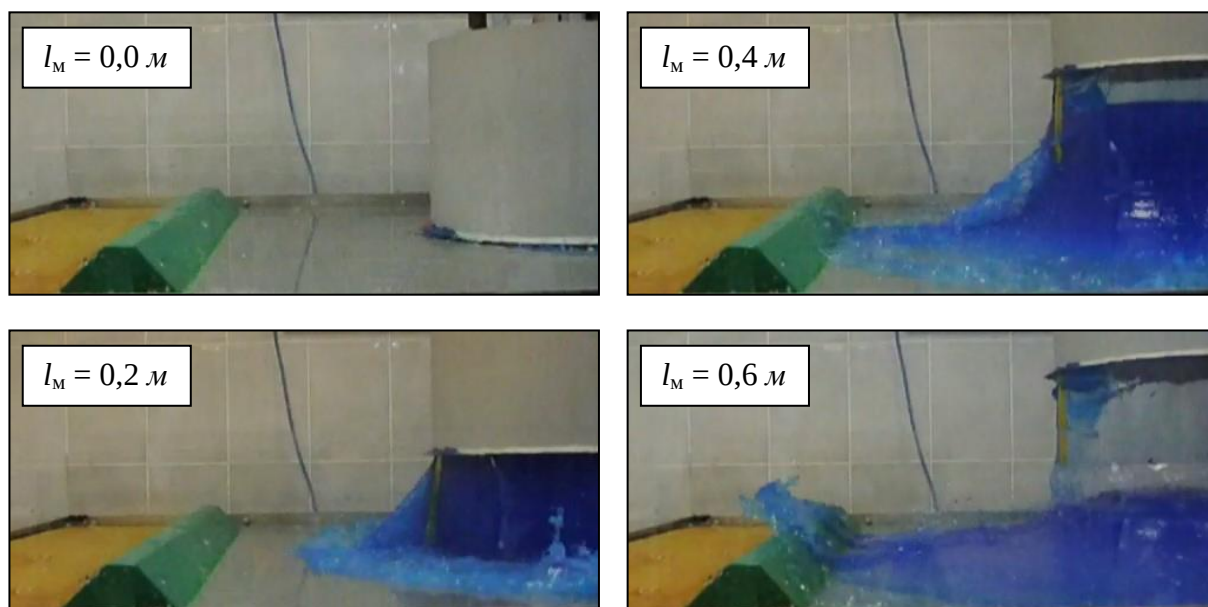


Рис. 3. Характерные кадры видеосъёмки при проведении эксперимента

В результате обработки экспериментальных данных определены параметры волны прорыва и критериев подобия, необходимые для сравнения с аналогичными параметрами, полученными при проведении натурного эксперимента (табл. 1).

Сравнительная оценка данных натурного испытания и лабораторных опытов

Параметры натурного опыта				Параметры лабораторных экспериментов				
$l_{н}, м$	$g_{н}, м/с^*$	$h_{н}, м^{**}$	$Fr_{н}$	$l_{м}, м$	$g_{м}, м/с$	$h_{м}, м$	$Fr_{м}$	$Re_{м}$
3,00	7,27	1,98	2,72	0,10	1,33	0,067	2,70	89333
6,00	8,67	1,33	5,76	0,20	1,57	0,044	5,70	69020
9,00	9,33	0,98	9,05	0,30	1,69	0,032	9,10	54085
12,00	9,59	0,77	12,23	0,40	1,76	0,026	12,12	45714
15,00	9,60	0,62	15,06	0,50	1,74	0,020	15,42	34783
18,00	9,45	0,52	17,41	0,60	1,71	0,017	17,62	29143

Примечание: * – по зависимости (5); ** – по зависимости (4)

Из данных, приведённых в табл. 1, следует, что равенство чисел Фруда ($Fr_{м} \approx Fr_{н} = idem$) выполняется, следовательно, скоростные характеристики волны прорыва, образующейся при разрушении модельного резервуара, являются подобными волне прорыва, образующейся при разрушении натурального резервуара.

Числа Рейнольдса в рассматриваемом диапазоне изменений параметров потока на лабораторном стенде много больше критического значения ($Re_{м} > Re_{кр} = 10000$), то есть модельный поток, также как и натуральный, находится в турбулентном состоянии.

Условие масштаба моделирования также соблюдается, так как принятый масштаб (1:30) почти в десять раз превышает допустимое значение:

$$\lambda_{мин} = 50 \cdot \sqrt[3]{7,27^2 \cdot 1,98^2} = 296.$$

Кроме этого, из табл. 1 видно, что числа Фруда для рассматриваемой области движения волны прорыва как в натуре, так и на модели превышают критическое значение, равное 1, при котором поток из спокойного состояния переходит в бурное. Таким образом, параметр кинетичности потока на модели соответствует аналогичному параметру в натуре, то есть подобие потоков соблюдается.

Наконец, вследствие того, что скорость потока воды при проведении экспериментов на лабораторном стенде в 6 и более раз превышала критическое значение (0,23 м/с), то можно утверждать о незначительном влиянии на процесс сил поверхностного натяжения, вследствие чего нет необходимости в увеличении масштаба модельного резервуара, то есть условие волнообразования соблюдается.

Таким образом, соблюдение рассмотренных критериев подобия и условий моделирования позволяет сделать общий вывод о том, что изучаемый процесс находится в автомодельной области, а разработанный лабораторный стенд может использоваться для изучения влияния волны прорыва на геометрические и прочностные параметры защитных стенок резервуаров типа "стакан в стакане".

Литература

1. Швырков С. А., Горячев С. А., Швырков А. С. Актуальные вопросы нормирования требований пожарной безопасности к защитной стенке нефтяных резервуаров типа "стакан в стакане" // Технологии техносферной безопасности. 2016. Вып. 3 (67). С. 56-63. <http://academygps.ru/ttb>.
2. СП 155.13130.2014. Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности.
3. Гидрологическое лабораторное моделирование: учеб. пособие для вузов / В. И. Полтавцев и др. Л.: ЛГМИ, 1982. 143 с.
4. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика: учебн. для вузов. М. : Стройиздат, 1972. 648 с.
5. Лурье М. В. Техника научных исследований. Размерность, подобие и моделирование явлений в проблемах транспорта и хранения нефти и газа. М. : Нефть и газ, 2002. 111 с.
6. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов. М. : Стройиздат, 1969. 464 с.
7. Швырков С. А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 289 с.

References

1. Shvyrkov S. A., Gorjachev S. A., Shvyrkov A. S. Aktual'nye voprosy normirovaniya trebovanij pozharnoj bezopasnosti k zashhitnoj stenke neftjanyh rezervuarov tipa "stakan v stakane" (Topical issues of regulation of fire safety to the protective wall of the oil tanks of the type "glass in the glass") // Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti. 2016. Vyp. 3 (67). Pp. 56-63. <http://academygps.ru/ttb>.
2. SP 155.13130.2014. Sklady nefti i nefteproduktov. Trebovaniya pozharnoj bez-opasnosti (Warehouses of oil and petroleum products. Fire safety requirements).
3. Hidrologicheskoe laboratornoe modelirovanie: ucheb. posobie dlja vuzov (Hydrological laboratory modelling) / V. I. Poltavcev i dr. L.: LGMI, 1982. 143 p.
4. Bogomolov A. I., Mihajlov K. A. Gidravlika (Hydraulics): uchebn. dlja vuzov. M. : Strojizdat, 1972. 648 p.
5. Lur'e M. V. Tehnika nauchnyh issledovanij. Razmernost', podobie i modelirova-nie javlenij v problemah transporta i hranenija nefti i gaza (Technique scientific research. Dimension, similarity and modeling of phenomena in the transport and storage of oil and gas). M. : Neft' i gaz, 2002. 111 p.
6. Chou V. T. Gidravlika otkrytyh kanalov (Hydraulics of open channels). M. : Strojizdat, 1969. 464 p.
7. Shvyrkov S. A. Pozharnyj risk pri kvazimgnovennom razrushenii neftjanogo rezervuara (Fire risk when quasi instantaneous the destruction of the oil tank) : monografija. M. : Akademija GPS MChS Rossii, 2015. 289 p.