DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.13-23

# *А. С. Швырков* (Академия ГПС МЧС России; e-mail: pbtp@mail.ru)

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ РЕЗЕРВУАРОВ ТИПА "СТАКАН В СТАКАНЕ"

Представлены результаты лабораторных исследований по определению необходимых геометрических параметров защитной стенки и дополнительного ограждения резервуаров типа "стакан в стакане" для предупреждения каскадного развития аварии в резервуарном парке хранения нефти и нефтепродуктов. Полученные результаты рекомендуются для практического использования на объектах хранения нефти и нефтепродуктов в резервуарах типа "стакан в стакане" с целью предупреждения каскадного развития аварии, а также для разработки нормативного документа по пожарной безопасности этих типов резервуаров.

Ключевые слова: разрушение резервуара, волна прорыва, защитная стенка, дополнительное ограждение, геометрические параметры.

#### Введение

В работах [1-3] обоснована актуальность проведения исследований, направленных на нормирование требований пожарной безопасности к геометрическим параметрам ограждений *резервуаров типа "стакан в стакане"* (*danee – PBC3C*<sup>1</sup>), а также дано описание разработанного лабораторного стенда и показана возможность проведения на нём экспериментов по определению необходимой высоты защитной стенки и дополнительного ограждения с целью локализации волны прорыва, образующейся в случае полного разрушения внутреннего резервуара номинальным объёмом от 700 до 30000  $M^3$ . Ниже представлены основные результаты экспериментальных исследований, выполненных с использованием этого стенда и модельных резервуаров в соответствующих масштабах, направленных на решение следующих задач:

- установление минимальной высоты защитной стенки в зависимости от её удалённости до стенки внутреннего резервуара, необходимой для полной локализации волны прорыва при его возможном разрушении;

 получение эмпирической зависимости для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку при её возможном снижении до минимальной высоты, исходя из гидростатического удержания пролитого из резервуара продукта, и установленную на различных расстояниях до стенки резервуара;

- нахождение минимальной высоты дополнительной ограждающей вертикальной стены в зависимости от её удалённости до защитной стенки резервуара, способной полностью удержать частично пролитую жидкость.

© Швырков А. С., 2019

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> РВСЗС – резервуар вертикальный стальной с защитной стенкой

## Постановка задачи

Исходя из конструктивных особенностей основного модельного резервуара на лабораторном стенде, связанных с невозможностью варьировать его диаметр (0,35 *м*), условия геометрического подобия обеспечивали изменением уровня жидкости в этом резервуаре, при котором были найдены масштабные коэффициенты, приведённые в табл. 1. Кроме этого, исходя из экономической эффективности применения рассматриваемых защитных стенок, а также из анализа требований нормативных документов к PBC3C [1] и PBC, изложенных в СП 155.13130.2014 "Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности", сделан вывод о целесообразности обустройства таких преград на расстояниях 1,5-3,0 *м* от стенки внутреннего резервуара.

Таблица 1

оовень жидкости в модельном резервуаре, <i>м</i>
0,30
0,28
0,25
0,22
0,16
0,14

# Масштабные коэффициенты для модельных резервуаров

В дальнейшем эти расстояния и были взяты за основу при проведении экспериментальных исследований, направленных на определение оптимальных геометрических параметров ограждений PBC3C (табл. 2).

Таблица 2

# Значения расстояний для обустройства защитных стенок по периметру модельных резервуаров с учётом масштабных коэффициентов

Масштабный коэффициент	Расстояние от стенки модельного резервуара до защитной стенки для соответствующего натурного расстояния, <i>м</i>			
$\lambda_l$	1,5	2,1	2,4	3,0
30	0,050	0,070	0,080	0,100
43	0,035	0,049	0,056	0,070
60	0,025	0,035	0,040	0,050
81	0,019	0,026	0,030	0,037
114	0,013	0,018	0,021	0,026
130	0,012	0,016	0,018	0,023

### Методика проведения экспериментов

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. На основании лабораторного стенда по периметру модельного резервуара на расчётном расстоянии обустраивалась защитная стенка, конструктивно выполненная в виде стальной обечайки. При этом, в соответствии с требованиями ГОСТ 31385-2016 "Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия", первоначальная высота защитной стенки превышала на 1 *м* (в масштабе проводимого эксперимента для каждого модельного резервуара) уровень жидкости в границах ограждения, образующийся при повреждении модельного резервуара. Герметичность защитной стенки на основании лабораторного стенда обеспечивалась за счёт применения силиконового герметика. Внутри модельного резервуара устанавливалась вкладка из монолитного поликарбоната с высотой, равной высоте уровня жидкости в этом резервуаре. Резервуар заполнялся водой до этого уровня и проводилась имитация его разрушения [2, 3]. В случае перелива жидкости (рис. 1) высоту защитной стенки увеличивали посредством крепления на ней дополнительной цилиндрической обечайки с замковым устройством, позволяющим перемещать её вверх по стенке с шагом от 0,001 *м*. Опыты повторяли до тех пор, пока жидкость полностью не удерживалась в границах ограждения.



**Рис. 1.** Характерные кадры взаимодействия потока жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:30 к натурному РВС-700 *м*<sup>3</sup> с защитной стенкой, установленной на расстоянии 0,07 *м* (2,1 *м* для натурного объекта)

С целью удобства проведения аналогичных опытов с другими модельными резервуарами и защитными стенками для лабораторного стенда была разработана специальная вставка, конструктивно выполненная из влагостойкой фанеры толщиной  $0,02 \ m$  с размерами в плане  $1,0 \times 1,0 \ m$ . В центре вставки имеется отверстие диаметром  $0,6 \ m$ , вплотную к которому на равноудаленном друг от друга расстоянии примыкают восемь направляющих с усиленными стальными уголками. В целом разработанная конструкция позволяла закреплять на уголках изготовленные из листовой оцинкованной стали расчётной высоты защитные стенки и устанавливать их на необходимом расстоянии от модельного резервуара (рис. 2). Перед проведением каждого эксперимента инструментальной слесарной линейкой производился замер уровня жидкости в модельном резервуаре, а после имитации его разрушения – уровня жидкости в границах ограждения. Далее определяли оставшийся объём жидкости в границах ограждения и находили долю перелившейся через защитную стенку жидкости. Таким образом, получен массив экспериментальных данных с оценкой доли жидкости (Q, %), перелившейся через защитную стенку в зависимости от её высоты ( $h_{cr}$ , m) и расстояния (l, m) до соответствующего модельного резервуара при максимальном первоначальном уровне жидкости в резервуаре ( $h_0$ , m), равном высоте стенки этого резервуара.



**Рис. 2.** Общий вид лабораторного стенда со специальной вставкой и закрепленной на ней защитной стенкой

### Результаты

По результатам анализа массива экспериментальных данных получены зависимости безразмерного параметра ( $h_{\rm cr}/h_0$ ), определяющего минимальную высоту защитной стенки для локализации потока жидкости при полном разрушении соответствующего натурного резервуара, от расстояния (l, m), на котором установлена защитная стенка (рис. 3). Для сравнения на этом же рисунке приведены расчётные зависимости для определения высоты защитной стенки, рассчитанной на гидростатическое удержание пролитого из резервуара продукта, а также нормативная высота защитной стенки, равная 80 % от высоты стенки основного резервуара по ГОСТ 31385-2016.



Из приведённых на рис. 3 данных видно, что для всех рассматриваемых типов резервуаров с целью удержания продукта в границах защитной стенки её высота в изучаемом диапазоне расстояний *l* должна быть больше не только высоты стенки, рассчитанной на гидростатическое удержание пролитого продукта, но и нормативно рекомендуемой высоты. При этом анализ экспериментальных данных показывает, что для полного удержания продукта в границах защитной стенки при условии её расчёта на гидродинамические нагрузки, отношение  $h_{cr}/h_0$  должно быть не менее 1,1. Очевидно, что на практике защитные стенки такой высоты применять экономически нецелесообразно, поэтому дальнейшие исследования были направлены на оценку доли перелившейся через защитную стенку жидкости при снижении её высоты до уровня, рассчитанного на гидростатическое удержание вышедшего из резервуара при аварии продукта. На рис. 4 представлен массив экспериментальных данных, использованный для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку в зависимости от её высоты и расстояния до резервуара. Анализ данных позволил предположить наличие зависимости вила:

$$Q = f\left(\frac{L}{R}; \frac{h_{\rm cr}}{h_0}\right),\tag{1}$$

где L = l + R – характерный размер от центра резервуара до защитной стенки, *м*;

*R* – радиус резервуара, *м*.



Рис. 4. Графическое отображение массива экспериментальных данных для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку

Нахождение искомой зависимости производилось методом многофакторного регрессионного анализа с использованием программы *STATGRAPHICS* [4]. В результате обработки данных получена зависимость для соответствующего диапазона изменения параметров, величина достоверности аппроксимации ( $R^2$ ), критическое значение *F*-критерия Фишера ( $F_{\rm kp}$ ), значение *F*-критерия Фишера в модели ( $F_{\rm M}$ ), а также доверительный интервал ( $\Delta$ ) при уровне значимости  $\alpha = 5$  %, общий вид и указанные значения которых, представлены ниже.

Доля жидкости (Q), перелившейся через ограждение в зависимости от характерного расстояния L = l + R (здесь: l – расстояние от стенки резервуара до ограждения (защитной стенки); R – радиус резервуара), высоты ограждения  $h_{\rm cr}$  и уровня жидкости в резервуаре  $h_0$ , соответствующего высоте стенки резервуара, в диапазоне изменения параметров:

$$1,5 \ \ m \le l \le 3,0 \ \ m; \qquad 5,2 \ \ m \le R \le 22,8 \ \ m; \\9,0 \ \ m \le h_0 \le 18,0 \ \ m; \qquad 0,4h_0 \ \ m \le h_{\rm cr} \le 1,1h_0 \ \ m; \\Q = 89,8017 - 17,1986 \frac{L}{R} - 68,899 \sqrt{\frac{h_{\rm cr}}{h_0}}; \\R^2 = 92,91 \ \ m; \qquad F_{\rm \kappa p} = 3,035; \qquad F_{\rm M} = 1708,9; \quad \Delta = 1,732.$$

Выполненные исследования позволили произвести сравнительный анализ с результатами ранее выполненных работ [5], [6]. На рис. 5 показаны результаты определения доли жидкости, перелившейся через ограждение, в сравниваемом интервале изменения соответствующих параметров для типовых резервуаров номинальным объёмом от 700 до 30000 *м*<sup>3</sup>.



**Рис. 5.** Сравнительный анализ зависимостей по определению доли жидкости, перелившейся через ограждение при разрушении типовых резервуаров номинальным объёмом от 700 до 30000 *м*<sup>3</sup> включительно (закрашенная область между зависимостями 3 и 4 включает в себя остальные зависимости, определяемые по формуле (2))

Из рис. 5 прослеживается общий характер закономерностей для всех анализируемых зависимостей – уменьшение доли перелившейся через ограждение жидкости при увеличении высоты ограждения. При этом полученные на лабораторном стенде в широком диапазоне изменения исходных параметров ( $l, R, h_0, h_{ct}$ ) экспериментальные данные (кривые 3 и 4), хорошо согласуются с экспериментальными данными, представленными в работе [6] (кривая 2). Существенное отличие зависимостей, полученных для типовых резервуаров по формуле (2) (кривые 3 и 4), от зависимостей 1 и 2, связанно с найденными экспериментально конкретными значениями отношений  $h_{ct}/h_0$ , при которых не наблюдался перелив жидкости через ограждение (Q = 0 %).

Таким образом, в результате выполненных исследований и обработки экспериментальных данных, получена эмпирическая зависимость для определения доли жидкости, перелившейся через защитную стенку в зависимости от её высоты и расстояния до резервуара, которая и рекомендуется для практического использования при оценке пожарных и промышленных рисков и разработки соответствующих мероприятий, направленных на предотвращение каскадного развития пожара на объектах нефтегазовой отрасли с PBC3C. При этом вследствие возможного перелива части жидкости через защитную стенку при её высоте менее  $1,1h_0$ , необходимо обустройство дополнительного ограждения (земляное обвалование или вертикальная ограждающая стена из негорючих материалов), на определение геометрических параметров которого и были направлены дальнейшие исследования.

Для определения геометрических параметров дополнительного ограждения (высоты ограждения в зависимости от расстояния до защитной стенки резервуара) на разработанном лабораторном стенде выполнена серия опытов, общая методика проведения которых аналогична описанной выше. Эксперименты также проводились с модельными резервуарами, соответствующими в выбранном масштабе моделирования натурным резервуарам, номинальным объёмом от 700 до 30000 м<sup>3</sup> (см. табл. 1). Дополнительное ограждение в виде вертикальной стены высотой от 1 до 2 м (в масштабе моделирования) устанавливалось на начальном расстоянии 3 м от защитной стенки резервуара. Затем проводился эксперимент по имитации разрушения внутреннего резервуара. При визуальном наблюдении перелива жидкости через дополнительное ограждение, последнее отодвигалось от защитной стенки с шагом 1 м для нахождения минимального расстояния, на котором не происходило перелива жидкости через дополнительное ограждение. На рис. 6, в качестве примера, представлены характерные кадры взаимодействия потока жидкости с защитной стенкой и дополнительным ограждением при разрушении модельного резервуара, выполненного в масштабе 1:30 к натурному PBC-700 м<sup>3</sup>.



**Рис. 6.** Характерные кадры взаимодействия потока жидкости при разрушении резервуара в масштабе 1:30 к натурному PBC-700  $M^3$  с защитной стенкой высотой 0,9 $h_0$ , установленной на расстоянии 0,17 M (5,0 M для натурного объекта) до дополнительной вертикальной стены, высотой 0,05 M (1,5 M для натурного объекта) Следует отметить, что аналогичные результаты перелива жидкости через защитную стенку и дополнительное ограждение наблюдались и при разрушении остальных рассматриваемых модельных резервуаров. В табл. 3 представлены результаты экспериментов по удержанию дополнительным ограждением в виде вертикальной стены части жидкости, переливающейся через защитную стенку при разрушении внутреннего резервуара, в зависимости от её высоты и удаленности до дополнительного ограждения.

Таблица 3

внутреннего резервуара РВСЗС номинальным объёмом от 700 до 30000 м <sup>3</sup>					
Высота защитной стенки РВСЗС h <sub>ст</sub> , <i>м</i>	Минимальное расстояние от защитной стенки до дополнительного ограждения I <sub>лон</sub> , м	Минимальная высота дополнительного огражления h <sub>лоте</sub> м			
$0,8h_0$	7,0	2,0			
$0,9h_0$	6,0	1,5			
	5,0	2,0			
$h_0$	6,0	1,0			
	5,0	1,5			

## Минимальная высота дополнительной вертикальной стены для полной локализации пролива жидкости при разрушении внутреннего резервуара PBC3C номинальным объёмом от 700 до 30000 *м*<sup>3</sup>

#### Выводы

Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлена минимальная высота дополнительного ограждения (вертикальной стены или земляного обвалования), в зависимости от удалённости до защитной стенки PBC3C и её высоты, при которой происходит полная локализация потока жидкости в случае полного разрушения внутреннего резервуара.

В целом, полученные результаты могут использоваться при расчётном определении величин пожарных рисков, формировании управленческих решений для тушения пожаров в резервуарных парках, разработке планов пожаротушения, локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, а также являться основной для создания нормативного документа по пожарной безопасности объектов защиты с эксплуатацией PBC3C [1, 7-10].

#### 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. Швырков С. А., Горячев С. А., Воробьев В. В., Швырков А. С. Лабораторное моделирование волны прорыва при разрушении резервуара типа "стакан в стакане" // Технологии техносферной безопасности. 2017. Вып. 2 (72). С. 75-82. http://academygps.ru/ttb.

3. Швырков С. А., Пузач С. В., Горячев С. А., Швырков А. С. Исследование параметров волны прорыва при разрушении резервуаров объёмом до 30000 м<sup>3</sup> в лабораторных условиях // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 12-18. DOI: 10.25257/FE.2019.1.12-18.

4. Рубан А. И., Кузнецов А. И. Методы обработки экспериментальных данных: учебное пособие. Красноярск, 2008. 80 с. http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/17/lab/lab.pdf.

5. Шебеко Ю. Н., Шевчук А. П., Смолин И. М. Расчёт влияния обвалования на растекание горючей жидкости при разрушении резервуара // Химическая промышленность. 1994. Т. 71. № 4. С. 230-233.

6. Greenspane H. P., Young R. E. Flow over a containment dyke // J. Fluid Mechanics. 1978. V. 87. № 1. Pp. 179-192.

7. Демехин Ф. В., Таранцев А. А., Белов Д. И. О проблеме тушения пожаров в резервуарах с кольцевой защитной стенкой // Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России. 2013. № 2. С. 68-75. http://vestnik.igps.ru.

8. Демехин Ф. В., Цой А. А. Проблемы обеспечения пожарной безопасности резервуаров с защитной стенкой // Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России. 2015. № 1. С. 34-40. http://vestnik.igps.ru.

9. Данилов М. М., Денисов А. Н., Опарин И. Д. Подход к формированию управленческого решения при пожаротушении в резервуарном парке // Технологии техносферной безопасности. 2014. Вып. 2 (54). С. 76-80. http://academygps.ru/ttb.

10. Данилов М. М., Денисов А. Н. Алгоритмизация ведения оперативно-тактических действий при тушении пожара в двустенном резервуаре с нефтепродуктом // Технологии техносферной безопасности. 2014. № 5(57). С. 77-84. http://academygps.ru/ttb.

#### Материал поступил в редакцию 2 апреля 2019 г.

Для цитирования: Швырков А. С. Результаты экспериментального определения геометрических параметров ограждений резервуаров типа "стакан в стакане" // Технологии техносферной безопасности. – Вып. 3 (85). – 2019. – С. 13-23. DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.13-23.

#### A. S. Shvyrkov

## THE RESULTS OF THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE ENCLOSURES OF RESERVOIRS OF THE TYPE "GLASS IN GLASS"

The results of laboratory researches on definition of geometrical parameters of a protective wall and an additional protection of reservoirs of the type "glass in the glass" are presented.

As a result of experiments:

- the minimum height of the protective wall is established, depending on its distance to the wall of the main tank, necessary for full localization of fluid flow resulting from the destruction of the main reservoir;

- a dependence is obtained for determining the fraction of liquid that can overflow through the protective wall when it is reduced to a minimum height, calculated on hydrostatic retention of spilled liquid from the main reservoir, and installed at various distances to the wall of the main reservoir;

- the minimum height of the additional vertical enclosing wall was found, depending on its distance to the protective wall of the main tank, necessary for the complete retention of partially spilled liquid.

The results obtained are recommended for practical use at oil and oil products storage facilities in glass-in-glass tanks in order to prevent the cascade development of an accident, as well as for the development of a regulatory document on fire safety of these types of tanks.

Key words: tank destruction, breakthrough wave, protective wall, additional fence, geometric parameters.

#### References

1. Shvyrkov S. A., Gorychev S. A., Shvyrkov A. S. Topical issues of regulation of fire safety to the protective wall of the oil tanks of the type "glass in the glass". *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 3 (67), 2016, pp. 56-63. Available at: http://academygps.ru/ttb (in Russian).

2. Shvyrkov S. A., Goryachev S. A., Vorobyov V. V., Shvyrkov A. S. Laboratory simulation of wave breakthrough at destruction of the tank type "glass in the glass". *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology* of technosphere safety, vol. 2 (72), 2016, pp. 75-82. Available at: http://academygps.ru/ttb (in Russian).

3. Shvyrkov S. A., Puzach S. V., Goryachev S. A., Shvyrkov A. S. Research of breakout wave parameters at destruction of tanks with a capacity up to 30 000 m<sup>3</sup> in experimental conditions. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiia / Fire and emergencies: prevention, elimination.* 2019, no. 1, pp. 12-18 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2019.1.12-18.

4. Ruban A. I., Kuznecov A. I. *Metody obrabotki eksperimental'nyh dannyh: uchebnoe posobie* [Methods for processing experimental data: tutorial]. Krasnoyarsk, 2008, 80 p. Available at: http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/17/lab/lab.pdf.

5. Shebeko Yu. N., Shevchuk A. P., Smolin I. M. Raschyot vliyaniya obvalovaniya na rastekanie goryuchej zhidkosti pri razrushenii rezervuara [Calculation of the influence of debris on the spreading of a combustible liquid during the destruction of the tank]. Himicheskaya promyshlennost' / Chemical industry. 1994, vol. 71, no. 4, pp. 230-233.

6. Greenspane H. P., Young R. E. Flow over a containment dyke. J. Fluid Mechanics. 1978, vol. 87, no. 1, pp. 179-192.

7. Demekhin F. V., Tarantsev A. A., Belov D. I. On the problem of extinguishing in reservoirs with the ringtype protective wall. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii / Newsletter of Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia*. 2013, no. 2, pp. 68-75. Available at: http://vestnik.igps.ru.

8. Demehin F. V., Tsoy A. A. Problems of fire safety of tanks with a protective wall. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MCHS Rossii / Newsletter of Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia. 2015, no. 1, pp. 34-40. Available at: http://vestnik.igps.ru.

9. Danilov M. M., Denisov A. N., Oparin I. D. Approach to formation managerial decisions in firefighting in the tank farm. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 2 (54), 2014, pp. 76-80. Available at: http://academygps.ru/ttb (in Russian).

10. Danilov M. M., Denisov A. N. Algorithmization of conducting operational and tactical actions during fire fighting double wall tanks with oil products. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 5 (57), 2016, pp. 77-84. Available at: http://academygps.ru/ttb (in Russian).

**For citation**: Shvyrkov A. S. The results of the experimental determination of the geometric parameters of the enclosures of reservoirs of the type "glass in glass". *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti / Technology of technosphere safety*, vol. 3 (85), 2019, pp. 13-23 (in Russian). DOI: 10.25257/TTS.2019.3.85.13-23.

© Shvyrkov A. S., 2019