

Д.Н. Рубцов, М.С. Шалымов
(Академия ГПС МЧС России; e-mail mcshalym@mail.ru)

О РАЗВИТИИ ПОЖАРА В РЕЗЕРВУАРЕ ТИПА "СТАКАН В СТАКАНЕ" С НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Анализируются теплообменные процессы, протекающие при горении нефти и нефтепродуктов в резервуаре типа "стакан в стакане". Рассчитаны основные геометрические параметры резервуара, влияющие на облучение верхнего пояса защитной стенки. Определены наиболее важные критерии влияния факела пламени пожара на защитную стенку.

Ключевые слова: резервуар, нефть, нефтепродукт, защитная стенка, пожар, коэффициент облученности, теплообмен, численное моделирование.

D.N. Rubtsov, M.S. Shalymov **ABOUT SPREAD OF A FIRE IN TANK** **OF "GLASS IN THE GLASS" TYPE** **WITH OIL AND PETROLEUM PRODUCTS**

Heat transfer processes that occur during combustion of oil and petroleum products in the tank of "glass to glass" type are analyzed. Basic geometric parameters of the tank, affecting the exposure of the upper zone of the protective wall are calculated. The most important criteria of the fire torch impact on the protective wall are defined.

Key words: tank, oil, petroleum products, protective wall, fire, irradiance coefficient, heat transfer, numerical simulation.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 29 марта 2016 г.

В России *резервуары вертикальные стальные с защитной стенкой* РВСЗС типа "стакан в стакане" приняты в эксплуатацию относительно недавно. В 2000 г. вышли первые правила устройства таких резервуаров – ПБ 03-381-00 [1].

Оценке пожарной безопасности резервуаров такой конструкции в посвящено несколько научных публикаций [2, 3], в которых показаны возможности применения защитной стенки по уменьшению площади разлива нефти или нефтепродуктов в случае разрушения основного корпуса резервуара.

Автор работы [4] допускает, что конструкция резервуаров типа "стакан в стакане" повышает их устойчивость к внешним воздействиям и обеспечивает более высокую пожарную и экологическую безопасность. Однако в настоящее время работ, отражающих состояние защитной стенки резервуара в условиях пожара, нет. Следовательно, оценить пожарную безопасность резервуаров с защитной стенкой в настоящее время не представляется возможным.

При пожарах в резервуарных парках плотность теплового потока от пламени пожара оказывает существенное влияние на развитие и распространение пожара по каскадному сценарию, что осложняет условия работы подразделений пожарной охраны и влечёт за собой огромный материальный ущерб. Такая ситуация характерна для резервуаров без защитной стенки, расположенных в общем обваловании.

В резервуарах с защитной стенкой, в случае аварийного разрушения внутреннего (рабочего) резервуара, внешний (защитный) резервуар препятствует растеканию нефти или нефтепродукта за пределы резервуара, что позволяет уменьшить площадь пожара. Также защитная стенка играет роль экрана при пожаре соседнего резервуара либо при пожаре в обваловании, защищая нижнюю и среднюю часть основного резервуара от мощного теплового потока.

Развитие пожара как в границах резервуаров с защитной стенкой, так и за пределами этих границ зависит от огнестойкости защитной стенки и мощности очага пожара.

Для резервуаров типа РВСЗС возможны четыре основных варианта пожара, при которых горение не распространяется за границы защитной стенки резервуара:

1. Пожар в основном резервуаре.
2. Пожар в межстенном пространстве при локальной разгерметизации корпуса основного резервуара.
3. Пожар в основном резервуаре и в межстенном пространстве при выбросе или вскипании нефти или некоторых нефтепродуктов.
4. Пожар в объёме защитного резервуара при разливе продукта в случае полного разрушения основного корпуса резервуара.

На рис. 1 приводятся схематическое изображение указанных вариантов развития пожаров.

Первый вариант пожара в РВСЗС предполагает развитие пожара только в корпусе основного резервуара. В этом случае тепловой поток будет действовать на основную стенку резервуара и частично на защитную стенку.

По опыту тушения пожаров в РВС, основную стенку необходимо будет защищать от воздействия высокой температуры для обеспечения её устойчивости. Насколько сильное тепловое воздействие будет оказываться на защитную стенку от пожара в основном резервуаре, в настоящий момент не установлено.

Во втором и в третьем вариантах пожара мощному тепловому воздействию будут подвержены как основная, так и защитная стенка, при этом уровень жидкости в межстенном пространстве внесет свои коррективы на теплообменные процессы.

Меры по защите основного резервуара от воздействия пламени пожара в межстенном пространстве необходимо принимать с учётом того, что орошение основной стенки резервуара водой приведёт к попаданию её в межстенное пространство, что через определённый промежуток времени может привести к попаданию горючего в обвалование.

Кроме того, не известно, какое влияние окажет пожар в межстенном пространстве на развитие пожара в основном резервуаре, насколько могут измениться скорость прогрева слоя хранящейся жидкости и интенсивность испарения горючего. Не изучен и сам процесс горения в межстенном пространстве.

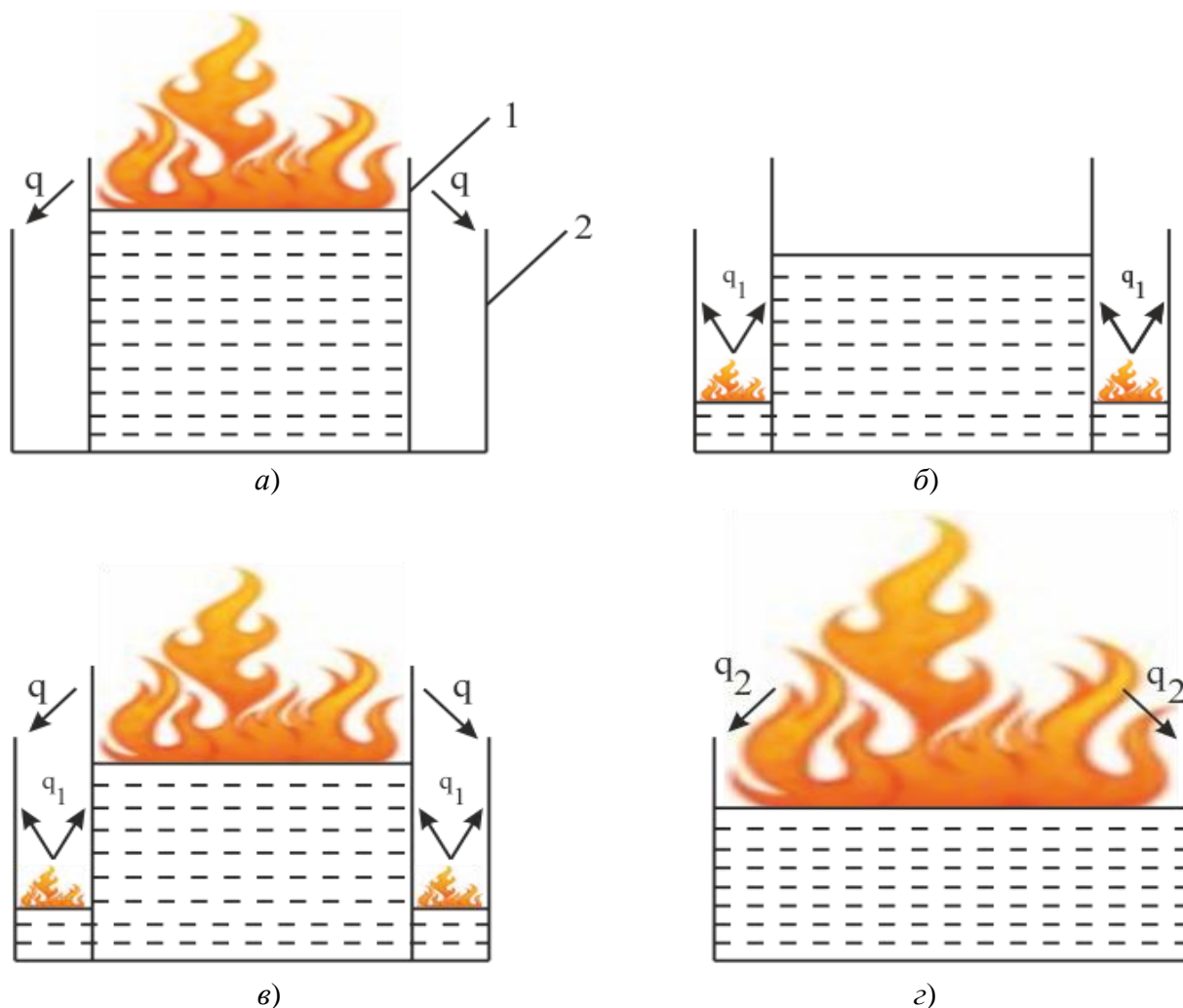


Рис. 1. Варианты развития пожара в резервуаре с защитной стенкой:
a – пожар в основном резервуаре; *б* – пожар в межстенном пространстве;
в – пожар в основном резервуаре и в межстенном пространстве;
г – пожар в объёме защитного резервуара, при разрушении основного резервуара;
 1 – стенка основного резервуара, 2 – защитная стенка; q – тепловой поток, действующий на защитную стенку при пожаре в основном резервуаре;
 q_1 – тепловой поток, действующий на защитную и основную стенки при пожаре в межстенном пространстве; q_2 – тепловой поток, действующий на стенку основного резервуара при пожаре в межстенном пространстве

Ширина межстенного пространства РВСЗС сравнительно небольшая, её количественные значения приведены в табл. 3. Данный геометрический показатель может вносить существенный вклад в процесс развития пожара на РВСЗС за счёт влияния на критическую глубину горения [5].

Экспериментально доказано, что горение в резервуарах с малым диаметром возможно до определенной глубины, затем происходит самозатухание. Для резервуаров с большим диаметром эта глубина больше высоты стенки резервуара, поэтому они могут выгорать полностью. В резервуарах с небольшими диаметрами горение прекращается, а значение критической глубины зависит от типа горючего и непосредственно диаметра резервуара.

В случае подтверждения возможности самозатухания в межстенном пространстве и определения критической глубины, появится возможность разработки дополнительных и действенных мер пожарной безопасности для резервуаров типа РВСЗС.

Четвертый вариант пожара наиболее сложный, с точки зрения тушения. При полном разрушении основной стенки резервуара, может произойти разрушение уторного шва с дальнейшим смещением основного корпуса резервуара. При этом максимальное давление образуется у основания резервуара, что приведёт к смещению нижнего пояса стенки дальше верхнего. В результате чего образуются так называемые "карманы", которые ограничат попадание огнетушащих веществ для тушения пожара.

Для объективного изучения развития пожара и способов его тушения необходимо знать геометрические параметры защитной стенки резервуара.

Диаметр защитного резервуара рекомендуется выбирать таким образом, чтобы в случае повреждения внутреннего резервуара и перетекания части продукта в защитный резервуар уровень хранящейся жидкости оказался на 1 м ниже верхнего края стенки защитного резервуара. При этом ширина межстенного пространства выбирается не менее 1,8 м, а высота защитной стенки – не менее 80 % высоты стенки основного резервуара [6].

Руководствуясь указанными требованиями, проведены расчёты параметров резервуаров с защитной стенкой, результаты которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры РВС ЗС

Объём РВС, м ³	Диаметр РВС, м	Высота основного корпуса, м	Высота защитной стенки, м	Разность высот между основной и защитной стенками ΔH , м	Ширина межстенного пространства (расчётная), м	Ширина межстенного пространства (принимаемая), м
100	4,73	6	4,8	1,2	0,53	1,8
200	6,63	6	4,8	1,2	0,78	1,8
300	7,58	7,5	6	1,5	0,58	1,8
400	8,53	7,5	6	1,5	0,78	1,8
700	10,43	9	7,2	1,8	0,78	1,8
1000	10,43	12	9,6	2,4	0,87	1,8
2000	15,18	12	9,6	2,4	1,1	1,8
3000	18,98	12	9,6	2,4	1,1	1,8
5000	22,8	12	9,6	2,4	2,2	2,2
	20,92	15	12	3	1,6	1,8
10000	28,5	18	14,4	3,6	1,2	1,8
	34,2	12	9,6	2,4	2,2	2,2
20000	39,9	18	14,4	3,6	1,86	1,86
	47,4	12	9,6	2,4	3,6	3,6
30000	45,6	18	14,4	3,6	3,9	3,9
40000	56,9	18	14,4	3,6	2,4	2,4
50000	60,7	18	14,4	3,6	4,2	4,2
100000	95,4	18	14,4	3,6	1,1	1,8

Из табл. 1 видно, что минимальная ΔH составляет 1,2 м, а максимальная ΔH составляет 3,6 м, причем в большинстве случаев ширина межстенного пространства остаётся в пределах 1,8-2 м.

Разница между минимальным и максимальным ΔH составляет 2,4 м. Учитывая неизменность ширины межстенного пространства можно предположить, что при пожаре в основном резервуаре плотность *теплового потока*, падающего на защитную стенку, для резервуаров большого диаметра будет значительно меньшей, чем для резервуаров небольшого диаметра.

Указанная гипотеза основывается на том, что в соответствии с [7], теплопередача от факела пламени горящего резервуара с нефтью и нефтепродуктами осуществляется за счет теплового излучения. Доля конвекции в данном случае составляет примерно 1 %.

Например, при первом варианте пожара на резервуаре вместимостью 20000 м³, из-за перепада высот между основной и защитной стенкой, возможно появление зоны, в которую тепловой поток не попадет. В результате нагрев защитной стенки будет минимален. Диаметр такого резервуара составляет 39,9 м, высота основной стенки 18 м. В этом случае ΔH составит 3,6 м, а ширина межстенного пространства – 1,86 м.

Получается, что угол наклона между верхними гранями основной и защитной стенки составит около 30°. На рис. 2 представлена схема для определения угла наклона от пламени к верхнему краю защитной стенки при разнице высот корпуса основного резервуара и его защитной стенки.

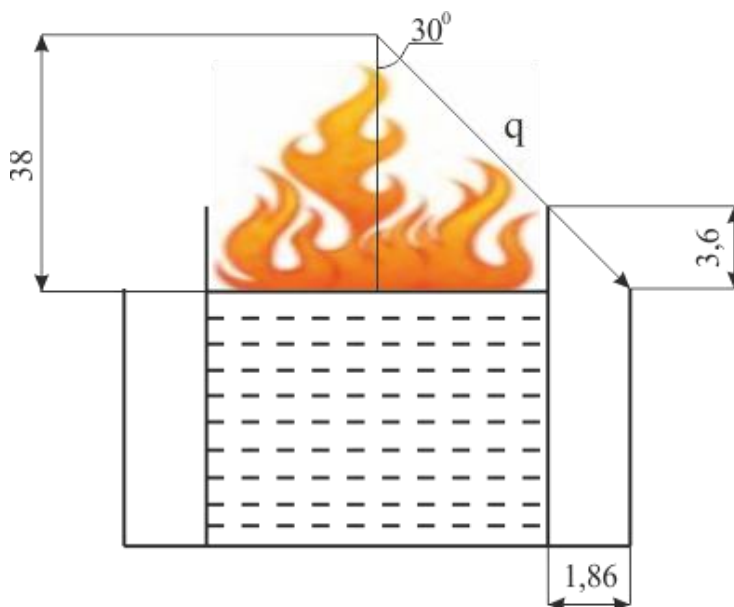


Рис. 2. Схема для определения угла наклона от пламени к верхней зоне защитной стенки

На основании вышеизложенного получаем, что для попадания теплового потока на верхний пояс защитной стенки, при указанных выше геометрических условиях, высота факела пламени должна составлять более 38 м.

Высота факела пламени определяется в соответствии с [8] по следующей формуле:

$$H_f = 42 \cdot d_r \cdot \left(\frac{m}{\rho_0 \cdot \sqrt{g \cdot d_r}} \right)^{0,61}, \quad (1)$$

где m – удельная массовая скорость выгорания топлива, $кг/(м^2 \cdot с)$;
 d_r – диаметр горящего резервуара, $м$;
 ρ_0 – плотность окружающего воздуха, $кг/м^3$;
 g – ускорение свободного падения, $м/с^2$.

Результаты расчётов высоты факела пламени пожара в основном резервуаре РВСЗС 20000 для светлых и темных нефтепродуктов представлены в табл. 2 в зависимости от вида горючей нагрузки.

Таблица 2

Высота факела пламени пожара РВСЗС 20000

Тип горючего	Нефть	Бензин	Дизельное топливо	Мазут
Высота факела пламени пожара, $м$	34	43	34	31

Из полученных результатов следует, что только в случае горения бензина высота факела пламени пожара будет достаточной для облучения защитной стенки резервуара. Дальнейший анализ показал, что для РВСЗС 20000 высота факела пламени будет превышать 38 $м$ только для горючих и легковоспламеняющихся жидкостей с удельной массовой скоростью выгорания более $0,048 кг/(м^2 \cdot с)$.

Важным показателем воздействия пожара в основном резервуаре на защитную стенку является плотность теплового потока, излучаемого факелом пламени пожара.

Количественная характеристика теплового потока зависит от геометрических параметров формы пламени. Поэтому для моделирования пожаров нефтепродуктов в резервуарах форма факела пламени идеализируется. Она представляется в виде конуса или цилиндра с основанием, равным площади поверхности зеркала горящего нефтепродукта в резервуаре, а форма излучающей поверхности принимается в виде треугольника или прямоугольника соответственно [9]. Проведенный анализ фотоснимков горящих резервуаров показал, что нельзя выделить одну или другую форму пламени как наиболее часто встречающуюся.

Кроме того, расчётная плотность падающего теплового потока зависит от коэффициента облученности φ_n . Коэффициент облученности для элементарной площадки резервуара, расположенного рядом с горящим резервуаром, определяется по следующей формуле [10]:

$$\varphi_n = \frac{1}{\pi} \left(\frac{B_1}{\sqrt{1+B_1^2}} \arcsin \frac{C_1}{\sqrt{1+B_1^2+C_1^2}} + \frac{C_1}{\sqrt{1+C_1^2}} \arcsin \frac{B_1}{\sqrt{1+B_1^2+C_1^2}} \right), \quad (2)$$

где $B_1 = x_1/2y_1$;
 $C_1 = h_\phi/y_1$.

Значения x_1 и y_1 определяют исходя из геометрических размеров рассматриваемых резервуаров по формулам (3, 4)

$$x_1 = \frac{2d_p \sqrt{l_p(l_p + d_p)}}{d_p + 2l_p}; \quad (3)$$

$$y_1 = \sqrt{l_p(l_p + d_p) - (0,5x_1)^2}. \quad (4)$$

где l_p – расстояние между резервуарами, м.

Вопрос о возможности применения указанных зависимостей для определения падающего теплового потока на защитную стенку при пожаре в основном резервуаре, с учётом угла наклона, является актуальным при изучении процессов развития пожара в резервуарах типа "стакан в стакане".

С целью оценки возможности применения расчётных методов определения нагрева верхнего пояса защитной стенки, необходимо провести численное моделирование указанного процесса. Для чего разработана конечно-элементная модель РВСЗС с идеализированной формой пламени в виде конуса в основном резервуаре, представленная на рис. 3.

Для дальнейшего проведения численного эксперимента необходимо установить ряд исходных данных, таких как плотность теплового потока, коэффициент облученности, которые являются целью проведения дальнейшего огневого эксперимента на модели РВСЗС.

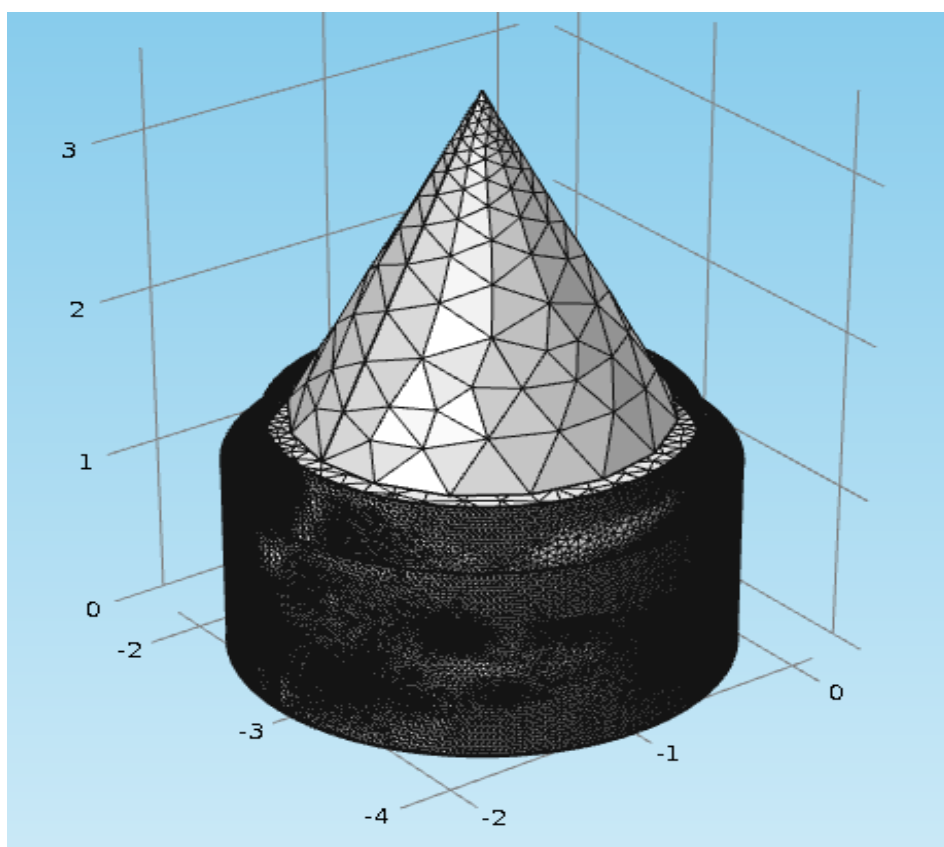


Рис. 3. Конечно-элементная модель РВСЗС

Проведённый анализ вариантов развития пожара в резервуаре типа "стакан в стакане", позволяет говорить об актуальности исследования и его практической значимости. Планируется разработка требований по проектированию систем противопожарной защиты резервуара с защитной стенкой типа "стакан в стакане", а также рекомендаций по ведению действий подразделениями пожарной охраны по тушению пожара на РВСЗС.

Литература

1. **ПБ** 03-381-00 "Правилами устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов".
2. **Еленицкий Э.Я., Дидковский О.В., Худяков Е.В.** Повышение безопасности резервуарных парков за счет применения резервуаров со стальной защитной стенкой. Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2007. № 1. С. 17-22.
3. **Муцанов В.Ф., Роменский И.В., Роменский Д.И.** Проблемы совершенствования проектирования двухстенчатых резервуаров // Металлические конструкции. Т. 13. № 1. 2007. С. 51-64.
4. **Скляр Н.А.** Стакан в стакане: безопасное решение // Нефтегазовая вертикаль (Москва). № 002. 2.2.2007.
5. **Блинов В.И., Худяков Г.Н.** Диффузионное горение жидкостей. М.: изд-во Академии наук СССР, 1961. 208 с.
6. **Приказ** Ростехнадзора от 26 декабря 2012 г. № 780 "Об утверждении Руководства по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов".
7. **Сучков В.П.** Исследование пожарной опасности паровоздушной среды в резервуарах при хранении в них керосина и дизельного топлива: дис. ... канд. тех. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1978. 233 с.
8. **Приказ** МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 "Об утверждении методики определения расчётных величин пожарного риска на производственных объектах".
9. **Волков О.М., Проскураков Г.А.** Пожарная безопасность на предприятиях транспорта и хранения нефти и нефтепродуктов. М.: Недра, 1981. 255 с.
10. **Сучков В.П.** Методы оценки пожарной опасности технологических процессов. М.: Академия ГПС МЧС России, 2010. 155с.