УДК 622.692.23

ЕСТЕСТВЕННАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ ГАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА В РЕЗЕРВУАРЕ С ПОНТОНОМ

М.Г.КАРАВАЙЧЕНКО¹, Н.М.ФАТХИЕВ²

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

² ЗАО «Нефтемонтаждиагностика», Уфа, Республика Башкортостан, Россия

В статье рассматриваются вопросы безопасной эксплуатации вертикальных стальных резервуаров с понтоном при хранении в них легкоиспаряющихся нефтепродуктов. Цель работы – исследование влияния площади вентиляционных проемов и скорости ветра на продолжительность нахождения вертикальных резервуаров с понтоном во взрывоопасном состоянии. Изучено влияние размеров вентиляционных патрубков и скорости ветра на продолжительность нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии. Предложена методика расчета этого времени. Показано, что естественная вентиляция газового пространства резервуара обусловлена действием двух сил, образующихся за счет: 1) разности плотностей паровоздушной смеси в резервуаре и наружного воздуха; 2) ветрового давления, возникающего на крыше резервуара. Получен алгоритм расчета продолжительности нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии при ветровом давлении и отсутствии ветра. Чем больше разность геодезических отметок центрального и периферийных патрубков, тем эффективнее вентиляция. Это расстояние будет наибольшим, если нижние вентиляционные патрубки расположить на верхнем поясе резервуара или оборудовать резервуар продухом. Увеличение скорости ветра более 10 м/с существенно не влияет на продолжительность нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии. Увеличение диаметра центрального патрубка с 200 до 500 мм позволяет значительно сократить продолжительность дегазации резервуара в безветренную погоду.

Ключевые слова: вертикальный стальной резервуар с понтоном; взрывоопасное состояние резервуара; вентиляционные патрубки; время естественной вентиляции

Как цитировать эту статью: Каравайченко М.Г. Естественная вентиляция газового пространства в резервуаре с понтоном / М.Г.Каравайченко, Н.М.Фатхиев // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 637-642. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.637

Введение. Концентрация паров нефтепродукта (горючих газов) в газовом пространстве резервуара над понтоном, обладающим высокой эффективностью по сокращению потерь нефтепродукта от испарения, как правило, бывает меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени. По данным литературных источников [1], нижний предел взрываемости для паров товарной нефти и бензина колеблется от 1 до 2 % от объема. По опыту, проведенному на резервуаре РВСП 10000 с понтоном «Альпон» на ЛПДС «Рязань» в июле 2000 г., концентрация паров нефти при двух измерениях составила 0,88 и 0,76 % по массе. Аналогичные результаты на резервуарах с понтоном были получены и ранее [2, 8]. Эти резервуары были оснащены вентиляционными патрубками.

Целесообразность оснащения резервуаров с понтоном вентиляционными проемами (патрубками) была показана в отечественной литературе сравнительно давно [3]. Необходимость принудительной вентиляции резервуаров перед ремонтными работами рассмотрена в работах [4, 6, 7]

На резервуарах с понтоном, оборудованным вентиляционными проемами, нами были впервые проведены измерения концентрации паров нефти на ЛПДС «Староликеево» в декабре 2002 г. Пробы газа для анализа отбирались по одному с наветренной и подветренной стороны, две пробы – по срединной плоскости резервуара. Концентрация паров нефти составила: наветренная сторона – 420 мг/м³, подветренная – 500 мг/м³, срединная плоскость – от 450 до 500 мг/м³. Это значительно меньше, чем нижний концентрационный предел взрываемости. Аналогичные измерения концентрации паров нефти проводились и в резервуаре № 2 с понтоном ЖБР 10000 на нефтебазе «Шесхарис» АК «Транснефть». Резервуар был оборудован 18 патрубками по периметру и двумя – в зените купола. Эксперимент проводился в декабре при температуре нефти 13 °С, температуре воздуха 9 °С. Концентрация паров нефти составила 116-690 мг/м³. Все эти измерения проводились на резервуарах с новыми технически исправными понтонами при обычном технологичном режиме эксплуатации, без посадки понтона на опорные стойки.

Взрывоопасная концентрация горючих паров в резервуаре с понтоном может образоваться при заполнении нефтепродуктом (нефть, бензин) пустого резервуара, простоявшего с остатком, а также при длительном хранении углеводородного сырья в летних условиях. Причины образования взрывоопасных концентраций в резервуарах с понтоном и вентилируемым надпонтонным пространством более подробно описаны в литературе [5].

Рис.1. Схема вентиляции газового пространства резервуара с понтоном

Для подтверждения этого рассмотрим пример. Резервуар РВСП 10000, $D = 34,2$ м; давление насыщенных паров нефтепродукта (ГОСТ 1756-2000) $P_s = 350$ мм рт. ст., температура в резервуаре 20°C . При такой температуре давление насыщенных паров будет 275 мм рт. ст. Резервуар стоял с остатком бензина высотой не более 300 мм, понтон был на уровне 2 м, клапан понтона открыт. Объем газового пространства над понтоном 10500 м^3 . Под понтоном будет насыщенная паровоздушная смесь объемом 1600 м^3 . В этом объеме будет находиться 460 м^3 паров нефтепродукта.

Концентрация паров нефтепродукта под понтоном не менее 29 %. Среда горючая, но не взрывоопасная. При последующем заполнении этого резервуара пары нефтепродукта перейдут в надпонтонное пространство и концентрация паров нефтепродукта над понтоном станет не менее 4,4 %. Это уже взрывоопасная концентрация, газовое пространство необходимо вентилировать.

Согласно ГОСТ 12.1.044-89, одним из способов предотвращения взрывоопасности в резервуаре является исключение возможности образования горючей среды. Для нижнего концентрационного предела это условие

$$\varphi_{г.без} \leq 0,9(\varphi_n - 0,7R), \quad (1)$$

где φ_n – нижний концентрационный предел распространения пламени по смеси горючего газа с воздухом; R – воспроизводимость метода определения показателя пожарной опасности при доверительной вероятности 95 %. Для нижнего предела эта величина не должна превышать 0,3 % по объему.

ГОСТ 31385-16 предусматривает обязательное проветривание через патрубки газового пространства резервуара с понтоном. Общая площадь сечения патрубков должна быть больше или равна $0,06 D$ (в квадратных метрах), где D – диаметр резервуара. Патрубки должны располагаться равномерно по периметру на расстоянии не более 10 м друг от друга и один – в центре (рис.1).

Эти требования заимствованы из стандарта США API Std 650-13, и в условиях России расчетами и экспериментально не проверялись. В стандарте API Std 650-13 площадь центрального отверстия равна $0,032\text{ м}^2$, что соответствует круглому отверстию диаметром 200 мм. В ГОСТ 31385-16 требование к центральному отверстию отсутствует. Малое сечение центрального патрубка свидетельствует о том, что стандарт API Std 650-13 не учитывает вентиляцию за счет разности плотностей паровоздушной смеси и воздуха (за счет гравитации). ГОСТ 31385-16 также не придает этому значения. При отсутствии ветра единственным источником вентиляции является разность плотностей паровоздушной смеси и воздуха.

Цель работы – исследование влияния площади вентиляционных проемов (патрубков) и скорости ветра на продолжительность нахождения вертикальных резервуаров с понтоном во взрывоопасном состоянии.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- анализ существующей системы естественной вентиляции газового пространства резервуаров с понтоном, принятой ГОСТ 31385-16;
- оценка расчетными методами продолжительности взрывоопасных периодов в газовом пространстве резервуаров с понтоном в процессе естественной вентиляции, происходящей под действием разности плотностей паровоздушной смеси и воздуха и под действием ветрового давления на крыше резервуара.

Математическая модель процесса вентиляции газового пространства резервуара с понтоном. На рис.1 показана схема вентиляции за счет разности плотностей паровоздушной смеси и воздуха. Более тяжелая паровоздушная смесь выходит через нижние патрубки, воздух входит через верхний.

По мере поступления воздуха в резервуар концентрация горючего газа уменьшается и может быть ниже нижнего концентрационного предела распространения пламени. Поэтому для поддержания взрывобезопасной концентрации кратность газообмена должна быть как можно

больше. Газообмен в резервуаре происходит (здесь заполнение и опорожнение резервуара не рассматриваются) за счет разности плотностей паровоздушной смеси и воздуха и за счет ветрового давления, а также при температурном расширении и сжатии газа (малое дыхание).

Расход газов из резервуара через патрубки при вентиляции за счет разности плотностей паровоздушной смеси и воздуха определяется по формуле

$$q_{\text{п}} = \mu S_{\text{ц}} \sqrt{2gH \frac{C(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{в}})}{\rho_{\text{п}}C + (1-C)\rho_{\text{в}}}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент расхода, $\mu = 0,62$; $S_{\text{ц}}$ – площадь сечения центрального патрубка, м^2 ; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность паров нефтепродукта и воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; H – разность высот расположения патрубков, м; C – концентрация паров нефтепродукта, дол. ед.

При действии ветра на резервуар на наветренной стороне крыши наблюдается наибольшее отрицательное ветровое давление (вакуум), наименьшее – на подветренной стороне. Газ будет выходить с наветренной стороны. В зависимости от соотношения ветровых давлений на наветренной и подветренной сторонах через центральный патрубок может выходить газ или входить воздух.

Расход газов за счет ветрового давления, возникающего на купольной крыше резервуара, определяется по формуле

$$q_{\text{вет}} = \mu S_{\text{пер}} \sqrt{2gH_{\text{вет}}}, \quad (3)$$

где $H_{\text{вет}}$ – напор от ветрового давления, м; $H_{\text{вет}} = P/\gamma_{\text{в}}$; P – ветровое давление, $\text{Н}/\text{м}^2$; $\gamma_{\text{в}}$ – удельный вес воздуха, $\text{Н}/\text{м}^3$; $S_{\text{пер}}$ – общая площадь сечения периферийных патрубков, через которые выходит газ или входит воздух (по величине они равны, так как резервуар «атмосферный»), м^2 .

Суммарная площадь периферийных патрубков на порядок больше центрального, поэтому расход паровоздушной смеси при действии ветрового давления через центральный патрубок практически отсутствует. Возможно, по этой причине в стандарте API 650-13 площадь центрального отверстия столь мала.

Ветровое давление определяется согласно СП 43.13330-10

$$P = P_0 k(z) c, \quad (4)$$

где P_0 – нормативное значение ветрового давления, $\text{Н}/\text{м}^2$; $k(z)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте, для резервуаров высотой 20 м можно принять равным 0,85; c – аэродинамический коэффициент; для резервуаров при $f/D = 0,2$; где D – диаметр, f – высота купола. Получены следующие значения c : наветренная сторона $c = -0,95$; подветренная сторона $c = -0,3$; по срединной плоскости резервуара, перпендикулярной к направлению ветра, в том числе в центре крыши $c = -0,75$.

Эти данные показывают, что на всей поверхности купольной крыши образуется отрицательное ветровое давление. На первый взгляд через все патрубки должен выходить газ. Это противоречит принципу: сколько газа вышло, столько же воздуха должно входить, так как резервуар «атмосферный». Значит, через какие-то патрубки будет входить воздух. Такими являются патрубки, расположенные в зоне меньшего по абсолютной величине давления. С учетом этого ветровой напор для расчета вентиляции

$$H_{\text{вет}} = (P_{\text{нав}} - P_{\text{подв}}) / \gamma_{\text{в}}, \quad (5)$$

где $P_{\text{нав}}$, $P_{\text{подв}}$ – ветровое давление на наветренной и подветренной стороне купольной крыши резервуара, $\text{Н}/\text{м}^2$.

При вентиляции за счет разности плотностей паровоздушной смеси и воздуха воздух поступает через центральный патрубок, площадь его задается. Однако при действии ветрового давления общая площадь патрубков, через которые входит воздух (выходит паровоздушная смесь), зависит от ветрового давления на всей площади крыши. Так как точное распределение ветрового давления по всей крыше определить весьма затруднительно, в первом приближении можно принять, что площадь сечения патрубков, через которые входит воздух, равна площади, через которые выходит паровоздушная смесь.

Пусть в резервуаре объем газовой смеси с концентрацией горючих газов $C_0 = V$. Через вентиляционный патрубок газ выходит с расходом Q и концентрацией горючих газов C (переменная величина, меняется от C_0 до нуля).

За время $d\tau$ в резервуар поступает $Qd\tau$ воздуха, а вытесняется $QCd\tau$ паров или горючих газов. Одновременно происходит выход паров нефтепродукта через неплотности затвора в надпонтонное пространство. Объем таких паров можно определить по уравнению

$$\frac{dV_{\text{п}}}{d\tau} = kL(C_S - C)(P_a/\gamma_{\text{п}}), \quad (6)$$

где k – коэффициент, учитывающий степень герметичности затвора, м/ч; L – длина уплотняющего затвора, м; P_a – атмосферное давление, Н/м²; $\gamma_{\text{п}}$ – удельный вес паров нефтепродукта, Н/м³; C_S – концентрация паров на уровне насыщения, дол. ед.; C – концентрация паров в газовом пространстве, дол. ед.

По американским данным, для наружных плавающих крыш $k = (0,6 - 1,0)10^{-5}$ м/ч.

Согласно СП 43.13330-10 и СНиП 2.09.03-85, $k = 1 \cdot 10^{-5}$ м/ч.

Для современных затворов понтонов отсутствуют экспериментальные данные по этому коэффициенту, поэтому в расчетах воспользуемся данными для плавающих крыш. Для резервуара РВСП 20000 ($L = 125$ м) при $C_S = 0,4$; $C = 0,01$ по формуле (6) получаем $V = 1,8$ м³, или около 5 кг паров в час. Эта величина мала по сравнению с объемом паров, находящихся в надпонтонном пространстве, поэтому ею можно пренебречь.

Изменение объема горючего газа в резервуаре в процессе естественной вентиляции составит

$$\frac{VdC}{\lambda} = Qd\tau - QCd\tau - kL(C_S - C)\frac{P_a}{\gamma_{\text{п}}}d\tau, \quad (7)$$

где $Q = q_{\text{п}} + q_{\text{вет}}$ – суммарный расход газов через патрубки.

Входящий в резервуар воздух перемешивается с газом не мгновенно, а постепенно, поэтому введен коэффициент λ : он учитывает неравномерность перемешивания газов со входящим воздухом. При мгновенном перемешивании $\lambda = 1$, чего на практике быть не может, поэтому этот коэффициент, как правило, меньше единицы.

Из (7) получаем дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$d\tau = \frac{VdC}{\lambda \left[Q(1 - C) - kL(C_S - C)\frac{P_a}{\gamma_{\text{п}}} \right]}. \quad (8)$$

Так как $Q = q_{\text{п}} + q_{\text{вет}}$, окончательно получим дифференциальное уравнение, описывающее ход изменения концентрации горючих газов (паров) в газовом пространстве резервуара в процессе вентиляции:

$$d\tau = \frac{VdC}{\lambda \mu \left[S_{\text{п}} \sqrt{2gH \frac{C(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{в}})}{\rho_{\text{п}}C + \rho_{\text{в}}(1 - C)}} + S_{\text{пер}} \sqrt{2gH_{\text{вет}}} \right] (1 - C) - kL(C_S - C)\frac{P_a}{\gamma_{\text{п}}}}. \quad (9)$$

Интегрировав это уравнение по времени от 0 до τ , концентрацию от C_0 до C , получим величину продолжительности времени, в течение которого концентрация горючих газов уменьшится от C до нижнего концентрационного предела распространения пламени, например до $C_0 = 0,01$ (1 %):

$$\tau = \int_{C_0}^C \frac{VdC}{\lambda \mu \left[S_{\text{п}} \sqrt{2gH \frac{C(\rho_{\text{п}} - \rho_{\text{в}})}{\rho_{\text{п}}C + \rho_{\text{в}}(1 - C)}} + S_{\text{пер}} \sqrt{2gH_{\text{вет}}} \right] (1 - C) - kL(C_S - C)\frac{P_a}{\gamma_{\text{п}}}}. \quad (10)$$

Результаты и обсуждение. Результаты расчетов по формуле (10) приведены на рис.2. На рис.2, а представлены результаты расчета продолжительности дегазации вертикального стального

резервуара РВСП 20000 м³, $D = 39,9$ м при следующих параметрах: $\lambda = 0,3$; $\mu = 0,62$; $C_S = 0,4$; $L = 125$ м; $\rho_n = 2,75$ кг/м³; $\rho_v = 1,25$ кг/м³; $P_a = 10^5$ Н/м²; $g = 9,81$ м/с²; $C = 0,08$; $C_0 = 0,01$; $S_{\Sigma} = 0,283$ м² (диаметр 500 мм). Видно, что при диаметре центрального патрубка 200 мм (согласно ГОСТ 31385-16) и перепаде высот между патрубками до 10 м, время нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии не менее 60 ч.

Увеличение диаметра центрального патрубка от 200 до 500 мм снижает время нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии, при отсутствии ветра в нашем примере до 9,8 ч (более чем в 6 раз).

Рассмотрена продолжительность дегазации резервуара при тех же параметрах со скоростью ветра до 15 м/с и различных площадях сечения нижних патрубков (рис.2, б). Установлено, что наличие ветра значительно сокращает продолжительность дегазации резервуара. Так, при суммарной площади сечения нижних патрубков, равной $0,036 D$ и скорости ветра 10 м/с, продолжительность нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии в нашем примере не превышает 1,08 ч, а при скорости ветра 15 м/с – 0,88 ч (кривая 1). Увеличение суммарной площади сечения нижних патрубков до $0,06 D$ (кривая 2) и скорости ветра 10 м/с продолжительность нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии не превышает 0,63 ч, а при $v = 15$ м/с – 0,51 ч.

Устройство продуха шириной 50 мм в области соединения купола со стенкой резервуара позволяет сократить продолжительность нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии до 0,19 ч (кривая 3).

На территории России с 2000 г. построено более 60 вертикальных стальных резервуаров с понтоном и купольной крышей из алюминиевых сплавов, оснащенных продухами шириной от 50 до 100 мм. Опыт эксплуатации таких резервуаров показал их высокую пожарную безопасность. Кроме того, удаление вентиляционных патрубков с поверхности купольной крыши резервуара значительно снижает снегозадерживающий эффект.

Рис.2. Зависимость времени нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии: а – от диаметра центрального патрубка и разности высот вентиляционных патрубков при скорости ветра, равной нулю (1 – $S = 0,032$ м² ($d = 200$ мм); 2 – $S = 0,196$ м² ($d = 500$ мм)); б – от скорости ветра и сечения вентиляционных патрубков (1 – $S_1 = 0,196$ м² ($d = 500$ мм); 2 – $S_2 = 0,283$ м² ($d = 600$ мм); 3 – продух шириной 50 мм)

Выводы

1. Естественная вентиляция газового пространства резервуара обусловлена действием двух сил, образующихся за счет:
 - разности плотностей паровоздушной смеси в резервуаре и наружного воздуха;
 - ветрового давления, возникающего на крыше резервуара.
2. Получен алгоритм расчета продолжительности нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии при ветровом давлении, а также при отсутствии ветра.

3. Чем больше разность геодезических отметок центрального и периферейных патрубков, тем эффективнее вентиляция. Это расстояние будет наибольшим, если нижние вентиляционные патрубки расположить на верхнем поясе резервуара или оборудовать резервуар продухом.

4. Увеличение скорости ветра (более 10 м/с) существенно не влияет на продолжительность нахождения резервуара во взрывоопасном состоянии.

5. Увеличение диаметра центрального патрубка с 200 до 500 мм позволяет значительно сократить продолжительность дегазации резервуара в безветренную погоду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вентиляция резервуара: Справочник химика XIX в. // Химия и химическая технология. URL: [http:// www.chem21.info](http://www.chem21.info) (дата обращения 04.07.2018).
2. Евтихин В.Ф. Резервуар вместимостью 10 тыс. м³ с понтоном повышенной плавучести и вентиляцией надпонтонного пространства / В.Ф.Евтихин, С.Г.Малахов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 1984. № 5. С. 3-5.
3. Исследование процесса вентиляции резервуаров с остатками нефтепродукта / О.М.Волков, В.П.Назаров, Н.Ф.Шатров, А.Д.Шухатович // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 1980. № 2. С. 9-12.
4. Киршев А.А. Снижение пожаровзрывоопасности процесса вентиляции цилиндрических резервуаров с нефтепродуктами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Академия государственной противопожарной службы. М., 2014. 22 с.
5. Клубань В.С. Обеспечение пожарной безопасности резервуаров с понтоном на нефтебазах Вьетнама / В.С.Клубань, Нгуен Ле Зуй // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. 2016. Вып. № 5 (69). URL: [http:// ipb. mos. ru/ttb](http://ipb.mos.ru/ttb) (дата обращения 04.07.2018)
6. Назаров В.П. Вентиляция резервуаров перед ремонтными работами / В.П.Назаров, А.А.Киршев // Технологии техносферной безопасности. 2012. № 4 (44). С.1-4.
7. Назаров В.П. Повышение эффективности вентиляции резервуаров с нефтепродуктами / В.П.Назаров, А.А.Киршев // Пожаровзрывоопасность. 2014. Т.23. № 7. С. 52-57.
8. Экспериментальное исследование потерь нефти из резервуара с понтоном / Л.Г.Загруднинова, Н.М.Фатхиев, Ю.М.Яхин, Х.М.Муслимов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1977. № 5. С. 47-49.

Авторы: М.Г.Каравайченко, д-р техн. наук, профессор, ktgnmd@yandex.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия), Н.М.Фатхиев, канд. техн. наук, научный консультант, rko@ntmdcomp.ru (ЗАО «Нефтемонтаждиагностика», Уфа, Республика Башкортостан, Россия).

Статья поступила в редакцию 04.04.2018.

Статья принята к публикации 15.06.2018.