

Студент Джабраилов Н.Г.

*Научный руководитель: доцент Кузнецов. В.А
Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности*

СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ НА НЕФТЕБАЗАХ

Аннотация

В настоящей статье рассматривается размещение резервуаров на нефтебазах, в химической и смежных отраслях промышленности. В идеале резервуары размещаются и устанавливаются с расчетом обеспечения безопасности соседних резервуаров в случае возгорания одного из них. Безопасное расстояние между резервуарами рассчитывается как при безветренных, так и ветреных погодных условиях. В статье используются методы, доступные в литературах, и модифицируется модель точечного источника для учета влияния ветра на высоту пламени при расчете безопасного расстояния между резервуарами. Установлено, что при скорости ветра > 4 м/с модифицированная модель точечного источника обеспечивает безопасное расстояние между резервуарами. Однако при отсутствии ветра и скорости ветра < 4 м/с метод Шокри и Бейлера обеспечивает безопасное расстояние между резервуарами.

Ключевые слова: Резервуарный парк, резервуар, пожар, расчет, безопасность

Annotation

The present paper deals with the location of tanks in a tank farm, in chemical and allied industries. Ideally the tanks are so placed and installed that in case of fire, the neighboring tanks could remain safe. The safe distance of separation among the tanks is calculated in no wind condition, as well as, in the presence of wind. The paper uses the methods available in literature and modifies the point source model to include the effect of wind vector on the flame height during the calculation of safe inter-tank distance. It is found that for wind velocity > 4 m/s, the modified point source model provides appropriate inter-tank distance. However, for no wind and with wind velocity < 4 m/s, the ShokrieBeyler's method provides safe inter-tank distance.

Keywords: Tank farm, tank, fire, calculation, safety

1. Вводная часть

Резервуарный парк либо нефтебаза — это объект для хранения жидких химических веществ, таких как масла, бензин, дизельное топливо, авиакеросин и др. нефтепродукты. Резервуарный парк — комплекс резервуаров с трубной обвязкой в которых хранятся определенное количество нефти и нефтепродуктов.

Ввиду того, что проектирование и строительство резервуаров требует больших финансовых сложений, при хранении летучих и легко воспламеняемых жидкостей требуется детальный их расчет во избежание последующих расходов на обслуживание, модернизацию и обеспечение безопасной их эксплуатации.

Фактор безопасности должен быть в приоритете при проектировании, помимо надлежащего технического обслуживания во время последующей эксплуатации.

Примером может служить инцидент на нефтебазе Indian Oil Corporation Ltd. в Джайпуре, когда загорелись 12 танкеров, содержащих 108 л дизельного топлива и бензина, и огонь продолжался в течение недели, в результате чего несколько человек погибли и около 200 человек получили ранения помимо ущерба в 75 миллионов долларов США. Этот пожар вызвал очень серьезное загрязнение окружающей среды вокруг Джайпура и окружающих районов. Этот случай еще раз подчеркивает важность правильной компоновки резервуаров на стадии проектирования.

В резервуарных парках обычно размещаются несколько резервуаров как одинаковой, так и разной высоты, и вместимости. Резервуары могут располагаться как в форме квадрата, так и треугольника, но решающее значение имеет безопасное расстояние между ними для безопасной эксплуатации, проектирования трубопроводов и доступа для обслуживания, а также мер по контролю и смягчению аварийных/аварийных ситуаций.

Тип хранимых жидкостей и объем резервуаров является основным фактором для расчета расстояния между резервуарами.

Регулирующие органы как Американский институт нефти (API), Национальная ассоциация противопожарной защиты (NFPA) и Агентство по охране окружающей среды (EPA) предложило стандарты для расположения резервуаров на нефтебазе. В отличие от расстояния расположение резервуаров должно учитывать доступность, необходимую для пожаротушения, обеспечивать буферную зону между технологическим оборудованием и дорогами общего пользования, домами и т. д. для защиты окружающей среды. Максимальную безопасность от возможных аварий обеспечиваются расположением резервуаров относительно технологического оборудования.

На Рис. 1а, 1б показано схематическое расположение резервуаров квадратным и треугольным шагом.

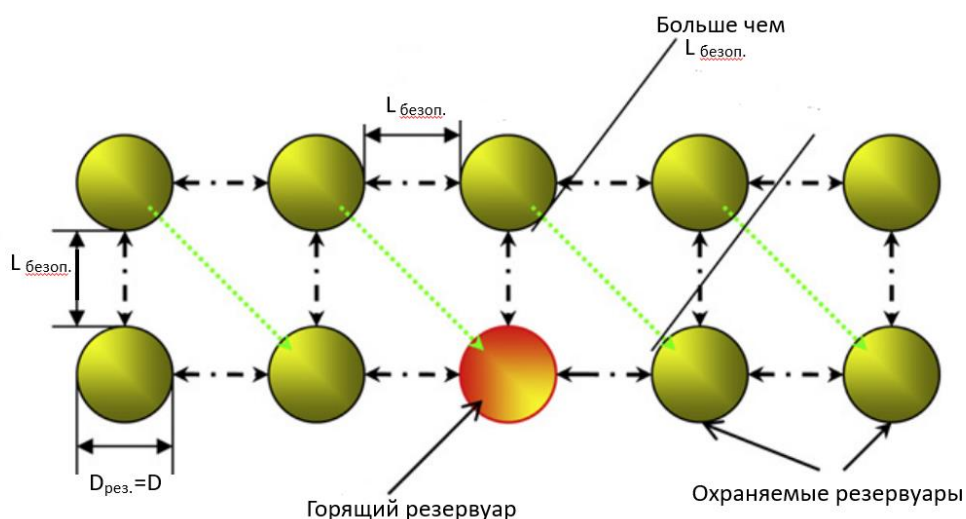


Рис. 1а Расположение резервуаров квадратным шагом

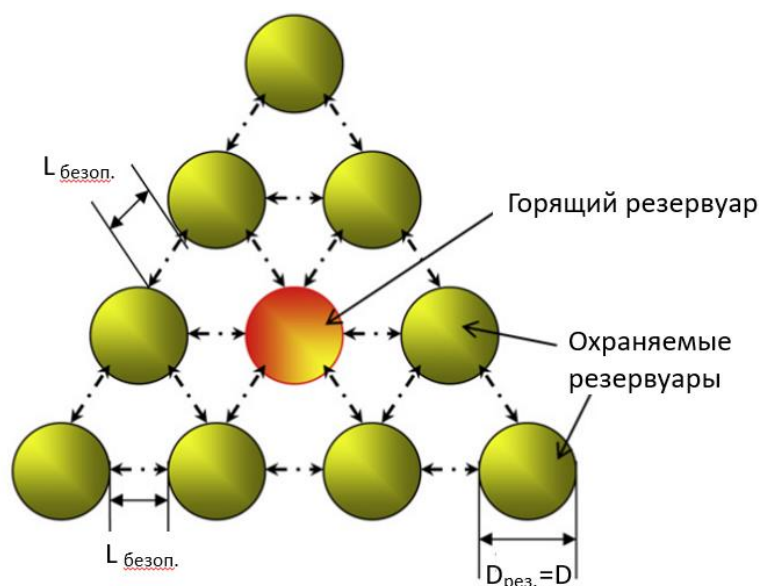


Рис. 1б Расположение резервуаров треугольным шагом

Основные требования к компоновке резервуарных парков НПЗ:

1. Меж резервуарное расстояние и разделительные расстояния между резервуаром и граничной линией, резервуаром и другими объектами имеют принципиальное значение.

2. Должны быть обеспечены подъездные пути для подъезда к резервуарным площадкам передвижных средств пожаротушения и личного состава.

3. Система противопожарного водоснабжения должна быть предусмотрена таким образом, чтобы обеспечить надлежащую противопожарную защиту всех частей зоны хранения и перегрузочных сооружений.

4. Обвалование и осушение территории вокруг резервуаров, должны быть такими, чтобы можно было контролировать утечку из любого резервуара, чтобы свести к минимуму последующее повреждение резервуара и его содержимого. Они также должны свести к минимуму возможность вовлечения других танков.

5. Предпочтительно расположение резервуаров не ниже уровня расположения технологического оборудования.

6. Резервуары для хранения легковоспламеняющихся жидкостей должны быть установлены таким образом, чтобы любая утечка не могла попасть в технологическую зону или к любому другому источнику воспламенения.

Ключевым соображением безопасности при размещении резервуаров является разделение несовместимых материалов с помощью внутреннего обвалования внутри резервуарного парка. Предусматривая обвалование предотвращается распространение разлитой нефти в соседние районы, таким образом в случае пожара, охватившего резервуарный парк, огонь ограничивается местом его возникновения. Обвалование должно быть достаточно прочным, чтобы противостоять давлению, которое может возникнуть в случае разлива нефти, и быть способными хранить разлитую жидкость. В литературе доступны некоторые методы моделирования безопасного расстояния между резервуарами в резервуарном парке. Однако эти методы не учитывают влияние бокового ветра, что важно с точки зрения распространения пожара. В настоящей статье рассматривается оценка различных методов оценки безопасного расстояния между двумя резервуарами для хранения в резервуарном парке с точки зрения распространения огня. Предлагается модификация модели точечного источника, учитывающая влияние скорости ветра на наклон пламени и его распространение. Расчетное расстояние также сравнивается со значениями, предоставленными различными регулирующими органами и предписанными стандартами, и приводится в настоящем документе.

2. Модели для определения безопасного расстояния между резервуарами

Для определения безопасного расстояния между резервуарами обычно используются следующие методы:

- (а) Модель точечного источника.
- (б) Метод Шокри и Бейлера.
- (с) Метод Мудана.

С помощью этих методов рассчитывается тепловой поток на различных расстояниях между горящим резервуаром и соседним (целевым) резервуаром.

Расстояние, на котором тепловой поток ниже 4,732 кВт/м² считается безопасным расстоянием между резервуарами (Daniel, Crow, & Louvar, 2002; Lees, 1995; SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1995). При тепловом потоке ниже 4,732 кВт/м² не ожидается воспламенение.

2.1. Модель точечного источника

Простейшей конфигурационной моделью источника излучения является модель точечного источника (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1995), при котором моделируется точечный источник возгорания, который располагается в центре пламени для расчета теплового излучения. На рис. 2 показана принципиальная схема двух резервуаров для использования модели точечного источника. Критическое значение падающего теплового потока, определяемое как минимальное значение теплового потока, способного воспламенить топливо в целевом баке, определяется как:

$$\dot{q}_r'' = \frac{Q_r \cos \theta}{4\pi R^2} \quad (\text{kW/m}^2) \quad (1)$$

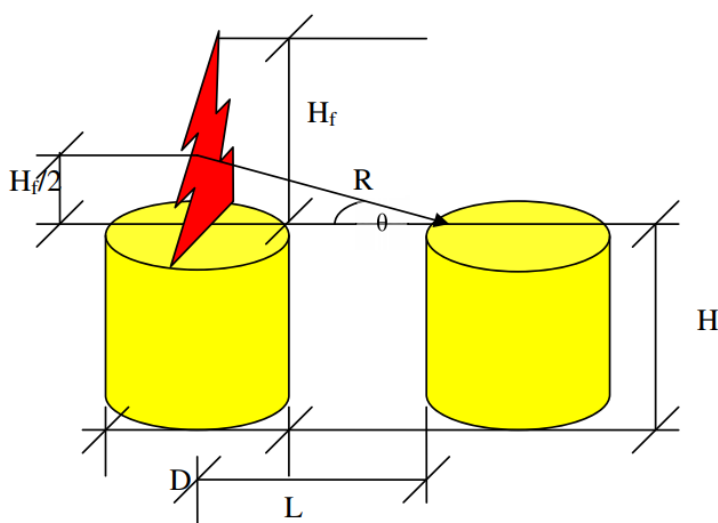


Рис. 2 Принципиальная схема горящего танка для модели точечного источника

$$Q_r = \lambda Q \quad (2)$$

λ определяется как:

$$\lambda = (0,21 - 0,0034 \times D) \quad (3)$$

где D – диаметр резервуара (м).

Q общее тепло, выделяемое при пожаре, и может быть определено следующим образом:

$$Q = \eta \times \dot{m}'' \times \frac{\pi}{4} D^2 \times \Delta H_c \quad (4)$$

где, η - эффективность сгорания,

\dot{m}'' - рассчитывается по кривой скорости регрессии (Drysdale, 1985).

Скорость регрессии представляет собой объемную потерю жидкости на единицу площади поверхности бассейна и определяется следующим образом:

$$\dot{m}'' = \frac{\rho(R_\infty)}{60,000} + \frac{Q_e''}{\Delta H_V} \quad (5)$$

где, ρ – плотность топлива, R_∞ - степень регрессии, Q_e – внешний радиационный тепловой поток, ΔH_V – теплота испарений. Значение 60000 в уравнении (5) предназначена для преобразования скорости регрессии из мм/с в м/мин.

R и $\cos\theta$ в уравнении (1) задаются следующим образом:

$$R = \sqrt{\left(\frac{H_f}{2}\right)^2 + L^2} \quad (6)$$

где, H_f – высота пламени(м) над резервуаром. Высота пламени получена из отношения Хескестада (Heskestad, 1984), как указано ниже:

$$H_f = 0.235Q^{2/5} - 1.02D \quad (7)$$

$$\cos\theta = \frac{L}{R} \quad (8)$$

где, L — расстояние между резервуарами, измеренные от центра исходного резервуара до края целевого резервуара. Подставляя все значения в уравнение (1) и вычислив расстояние q_{rc}'' для различных расстояний, для

каждой из конфигураций можно получить безопасное расстояние, соответствующее критическому тепловому потоку q_{rc}'' , который обычно принимается равным 4,732 кВт/м²

2.2. Метод Шокри и Бейлера

Шокри и Бейлер (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1995) разработали метод прогнозирования радиационного теплового потока от возгорания резервуара. Разработана зависимость для корреляции экспериментальных данных излучения пламени от края резервуара по средней эффективной мощности излучения пламени. Предполагается, что пламя представляет собой цилиндрическое черное тело и однородный излучатель со средней мощностью излучения. Лучистый тепловой поток определяется как:

$$\dot{q}_r'' = E \times F_{12} \quad (9)$$

Мощность излучения определяется как:

$$E = 58 \times 10^{-0.00823D} \quad (10)$$

где, D - диаметр резервуара(м). Коэффициент обзора (F_{12}) зависит от местоположения защищаемого резервуара, высоты пламени и диаметра резервуара и находится в промежутке между 0 и 1. Фактор формы определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} F_{12,H} &= \frac{B-1/s}{\pi\sqrt{B^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(B+1)(s-1)}{(B-1)(s+1)}} - \frac{A-1/s}{\pi\sqrt{A^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(s-1)}{(A-1)(s+1)}} \\ F_{12,V} &= \frac{1}{\pi \cdot s} \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{s^2-1}} \right) - \frac{h}{\pi \cdot s} \tan^{-1} \sqrt{\frac{s-1}{s+1}} + \frac{Ah}{\pi \cdot s\sqrt{A^2-1}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A+1)(s-1)}{(A-1)(s+1)}} \\ F_{12} &= \sqrt{F_{12,H}^2 + F_{12,V}^2} \end{aligned} \quad (11)$$

где,

$$\begin{aligned} A &= \frac{h^2+s^2+1}{2s} \\ B &= \frac{1+s^2}{2s} \\ s &= \frac{2L}{D} \\ h &= \frac{2H_f}{D} \end{aligned}$$

Здесь H_f (м) определяется уравнением (7). Подставляя значения всех параметров в уравнение (9) и вычисляя q_{rc}'' для различных расстояний, для

каждой из конфигураций можно рассчитать безопасное расстояние, составляющее $q_{rc}'' = 4,732$ кВт/м².

2.3. Метод Мудана

Мудан (Mudan, 1984) также представил метод оценки теплового излучения от возгорания резервуаров. Интенсивность теплового излучения вне очага пламени определяется следующим уравнением:

$$\dot{q}_r'' = E \times F_{12} \times \tau \quad (12)$$

Мощность излучения определяется как:

$$E = 140 \exp(-0.12D) + 20[1 - \exp(-0.12D)] \quad (13)$$

F_{12} можно определить так же, как это было сделано в случае метода Шокри и Бейлера. Коэффициент прозрачности (τ) варьируется от 0 до 1 и может быть определен следующим образом (Daniel et al., 2002; Lees, 1995).

$$\tau = 2.02 \times (P_w \times x)^{-0.09} \quad (14)$$

где P_w — парциальное давление водяного пара в воздухе (Па), а x — длина пути (м).

Корреляция высоты пламени, используемая в этом методе, основана на корреляции средней высоты турбулентного диффузионного пламени H_f , разработанной Томасом (Attalah and Donald, 1970; Mudan, 1984; Thomas, 1963). Предполагается, что пламя имеет цилиндрическую форму, а H_f определяется как

$$H_f = 42 \times D \times \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \times \sqrt{g \times D}} \right)^{0.61} \quad (15)$$

2.4. Модификация модели точечного источника

При наличии ветра, пламя уже не остается вертикальным. Пламя наклоняется, как показано на рис. 3, и на его распространение и передачу тепла от пламени к целевому резервуару влияет вектор скорости ветра.

Таким образом, модель точечного источника, применяемая к вертикальному пламени при отсутствии ветра, становится недействи-

тельной при ветре. Следовательно, модель требует модификации для учета влияния ветра. Наклон пламени (ϕ) рассчитывается следующим образом:

$$\cos \phi = \begin{cases} 1 & \text{for } u^* \leq 1 \\ 1/\sqrt{u^*} & \text{for } u^* \geq 1 \end{cases} \quad (16)$$

где ϕ - наклон пламени по вертикали, как показано на рис. 3, и дается Американской газовой ассоциацией (AGA) (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 1995).

u^* — безразмерная скорость, определяемая выражением

$$u^* = \frac{u}{(g\dot{m}''D/\rho_v)^{1/3}} \quad (17)$$

где g — ускорение свободного падения (9,81 м/с²), ρ_v — плотность паров топлива (кг/м³) и \dot{m}'' — массовая скорость горения на единицу площади резервуара (кг/м²/с).

Высота наклоненного пламени может быть рассчитана по соотношению, данному Томасом (1963).

$$H_f = 55 \times D \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \times \sqrt{g \times D}} \right)^{0.67} \times (u^*)^{-0.21} \quad (18a)$$

Мурхаусом было предложено формула для расчета наклонного пламени для сжиженного природного газа (Mudan, 1984)

$$H_f = 62 \times D \times \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_a \times \sqrt{g \times D}} \right)^{0.254} \times (u^*)^{-0.044} \quad (18b)$$

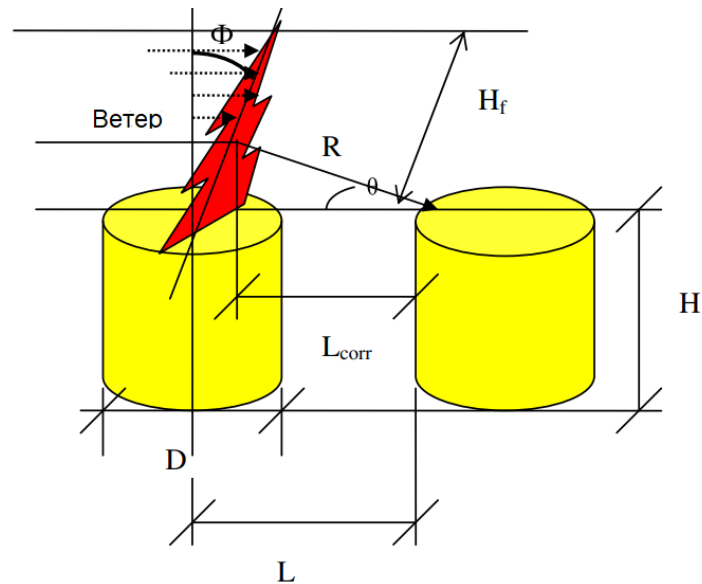


Рис. 3. Схема горящего резервуара под воздействием ветра

Откорректированное меж резервуарное расстояние, L_{corr} , будет выглядеть следующим образом:

$$L_{corr} = L - \left(\frac{H_f}{2} \sin \phi \right) \quad (19)$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{H_f}{2} \right)^2 + L_{corr}^2} \quad (20)$$

$$\cos \theta = \frac{L_{corr}}{R} \quad (21)$$

Q , Q_r , q_{rc} и λ рассчитываются по формуле (1). m'' рассчитывается по уравнению (5). Уравнения (19) - (21) могут быть использованы для расчёта безопасного расстояния в условиях бокового ветра.

3. Результат исследования

Для иллюстрации вышеописанных методов и сравнения результатов, был проведен компьютерный расчет для сравнения полученных результатов расчета расстояния между резервуарами в резервуарном парке. Вводные данные используемые для расчета при безветренном и ветряных условиях приведены ниже:

Случай I: Резервуар с бензином:

1. $D = 10$ m
2. $D_T = 10$ m

3. $H_1 = H_2 = 7 \text{ m}$
4. $\eta = 1$
5. $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$
6. $C_p = 510 \text{ J/kg/K}$
7. $h_g = 620 \text{ W/m}^2/\text{K}$
8. $K_g = 0.15 \text{ W/m/K}$
9. $Q_E = 190 \text{ W/m}^2$ (Solar Radiation Handbook, 2008)

Случай II: Резервуар с сжиженным природным газом:

1. $D = 10 \text{ m}$
2. $D_T = 10 \text{ m}$
3. $H_1 = H_2 = 7 \text{ m}$
4. $\eta = 1$
5. $\rho = 424 \text{ kg/m}^3$
6. $C_p = 2340 \text{ J/kg/K}$
7. $h_g = 75 \text{ W/m}^2/\text{K}$
8. $K_g = 0.031 \text{ W/m/K}$
9. $Q_E = 190 \text{ W/m}^2$ (Solar Radiation Handbook, 2008)

В таблице 1 приведены расчетные значения различных параметров. Выявлено, что высота пламени, рассчитанная по методу Томаса (Thomas, 1963), меньше, чем рассчитанная по методу Хескестада в случае бензина.

Таблица 1

Скорость горения и высота пламени в безветренном погодном условии

Бензин	Сжиженный природный газ (СПГ)
Объем горящего резервуара = 549.78 м ³	Объем горящего резервуара = 549.78 м ³
Объем соседнего резервуара = 549.78 м ³	Объем соседнего резервуара = 549.78 м ³
Скорость регрессии = 3.8 мм/мин	Скорость регрессии = 6.6 мм/мин
$\dot{m}'' = 0.04384 \text{ кг/м}^2/\text{с}$	$\dot{m}'' = 0.046147 \text{ кг/м}^2/\text{с}$
Общая излучаемая теплота = 23,360.986 кВт	Общая излучаемая теплота = 31,849.453 кВт
Высота пламени (Хескестада) = 18.24 м	Высота пламени (Хескестада) = 19.61 м
Высота пламени (Томас) = 13.75 м	Высота пламени (Томас) = 151.24 м

Таблица 2

Сравнение значений безопасного расстояния с различными стандартами и моделями

Стандарты и модели	Расстояние между торцами резервуаров (м)
NFPA	3.33
ЕРА	30.48
API	15
Модель точечного возгорания	Бензин = 13.6, СПГ = 14.6
Метод Шокри и Бейлера	Бензин = 16.25, СПГ = 20.35
Метод Мудана	Бензин = 12.5, СПГ = 15

В случае СПГ высота пламени, рассчитанная по методу Хескестада, дает более низкое значение, чем по методу Мудана.

В таблице 2 представлены результаты расчетов, полученные с использованием вышеуказанных методов. Рис. 4 и 5 показаны падающий тепловой поток на различных расстояниях и безопасное расстояние между резервуарами при горении резервуара при отсутствии ветра для бензина и СПГ соответственно. Понятно, что при отсутствии ветра тепловой поток уменьшается с увеличением расстояния между баками. В то время как метод Шокри и Бейлера дает самое высокое значение безопасного расстояния, методы точечного источника и Мудана дают очень близкие значения, но ниже, чем у метода Шокри и Бейлера. Из таблицы 2 видно, что значения безопасных расстояний, предлагаемые разными стандартами, сильно различаются; самая консервативная и самая высокая оценка дана ЕРА, а самая низкая оценка NFPA (NFPA-30, 2001, глава 4). Значение, рекомендованное API, близко к значению, полученному по модели точечного источника и по методу Мудана для пожара СПГ. Для бензина значения, полученные по модели точечного источника и методу Шокри и Бейлера, ближе к значению API.

Из Таблицы 2 видно, что резервуары для хранения СПГ требуют большего разделительного расстояния, чем для бензина, при отсутствии влияния ветра. Это очевидно, поскольку СПГ (температура вспышки = $-148,89^{\circ}\text{C}$) более огнеопасен, чем бензин (температура вспышки = $-42,7^{\circ}\text{C}$).

Таблица 3

Горючее	Скорость ветра	Высота пламя	Угол наклона	Безоп.расст.
Бензин	4	9.53	60.62	12.23
	6	8.76	66.38	14.42
	8	8.24	69.70	18.52
	10	7.86	71.92	17.59
	12	7.51	73.54	12.71
СПГ	4	10.63	54.17	13.55
	6	9.76	61.45	13.60
	8	9.19	65.55	19.36
	10	8.77	71.92	14.25

Из табл. 3 видно, что высота пламени уменьшается с увеличением скорости ветра, а угол наклона по отношению к вертикальной оси увеличивается с увеличением скорости ветра. Предполагается, что в результате уменьшения высоты пламени уменьшится безопасное расстояние между двумя резервуарами. Но из-за наклона пламени безопасное расстояние увеличивается до скорости ветра 8 м/с. После этого она начинает уменьшаться из-за уплощения пламени. Можно сделать вывод что 8 м/с это критическая скорость ветра которое требует максимального отделения резервуаров друг от друга. Квадратное расположение резервуаров в резервуарном парке требует большей площади на каждый резервуар, чем требуется для треугольного шага. Однако расположение резервуарного парка с квадратным шагом обеспечивает лучшую проходимость между резервуарами и для беспрепятственного обслуживания и контроля.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компоновка резервуарного парка для хранения летучих и легковоспламеняющихся веществ очень важна. Хотя существуют некоторые методы определения минимального расстояния отделения

одного резервуара от другого, эти методы не учитывают влияние ветра на высоту пламени и распространение огня. В модель точечного источника были введены изменения, чтобы учесть влияние скорости ветра на высоту пламени и его распространение. Метод Шокри и Бейлера обеспечивает более высокое безопасное расстояние по сравнению с другими методами при отсутствии ветра. Тепловой поток увеличивается в ветреную погоду, поэтому безопасное расстояние между баками также увеличивается. Для определения увеличенного безопасного расстояния можно использовать модифицированную модель точечного источника. Однако при скорости ветра менее 4 м/с безопасное расстояние между резервуарами, рассчитанное по методу Шокри-Бейлера, может сохраняться. При скорости ветра более 8 м/с безопасное расстояние разделения уменьшается, так как пламя при этом практически сплющивается. Таким образом, модифицированную модель точечного источника, предложенную в данной статье, следует использовать для компоновки резервуарного парка, когда скорость ветра в целом остается выше 4 м/с. Установлено, что квадратный шаг может быть использован для планировки резервуарного парка с точки зрения безопасности.

Использованные источники:

1. Attalah, S., & Donald, S. A. (1970). Safe separation distances from liquid fuel fires.
2. Daniel, A., Crowl, J., & Louvar, F. (2002). Chemical process safety e fundamentals with applications.
3. Digrado, D. B., & Throp, A. G. (1995). The aboveground steel storage tank handbook. Wiley.
- Drysdale, D. (1985). An introduction to fire dynamics (2nd ed.). Wiley.
- Heskestad, G. (1984). Engineering relations for fire plumes. Fire Safety Journal, 7
- Lees, F. P. (1995) (2nd ed.). Loss prevention in process industries, Vol. 3 Butterworth Heinemann.

Long, B., & Gardner, B. (2004). Guide to storage tanks and equipment. Wiley.

Mudan, S. K. (1984). Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. Progress in Energy and Combustion Science.

NFPA-30. (2001). Aboveground tank installation for tank storage.

SFPE handbook of fire protection engineering. (1995) (2nd ed.)

Solar radiation handbook. (2008).

A joint project of Solar Energy Center, MNRE, Indian Metrological Department.

Thomas, P. H. (1963). The size of flames from natural fires. In 9th International combustion symposium. Pittsburgh, PA: Combustion Inst.