

жающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации».

17. Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 N 89-ФЗ.

18. ГОСТ Р 56060-2014 Производственный экологический мониторинг. Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов.

#### **Данные об авторе:**

**Соломин Игорь Александрович**, доцент кафедры «Организации и технологии строительства объектов природообустройства», кандидат технических наук, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова РГАУ-МСХА.

*e-mail: garik13solomin@yandex.ru*

*РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева*

*Россия, 127550, Москва, Тимирязевская ул., 49.*

#### **Data about the authors:**

**Solomin Igor Alexandrovich**, Associate Professor of the Department “Organizations and Technologies for the Construction of Environmental Facilities”, Candidate of Technical Sciences, Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov RSAU-MSHA.

*RSAU-MSHA named after K.A. Timiryazev*

*Russia, 127550, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49.*

#### **Рецензент:**

**Храбров М.Ю.**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова

УДК 621.64

### **ЗАЩИТНОЕ ОГРАЖДЕНИЕ ГРУППЫ РЕЗЕРВУАРОВ С НЕФТЕПРОДУКТОМ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗМОЖНОЙ АВАРИИ НА ОБЪЕКТЕ**

**Федорян А.В.**

В статье рассмотрено возникновение различных сценариев аварии в группе резервуаров с нефтепродуктом. Выявлены наиболее вероятные и опасные сценарии. На примере резервуарной группы мазутохранилища в г. Усинск проведены расчёты параметров аварии, связанной с разрушением резервуара, и обоснованы инженерно-технические мероприятия для снижения её масштабов.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, резервуары, авария, защитное ограждение, хранение нефтепродуктов, разрушение резервуара, хрупкость металла, строительство

### **GUARD A GROUP OF TANKS WITH OIL PRODUCTS TO MINIMIZE THE EFFECTS OF A POTENTIAL ACCIDENT AT THE FACILITY**

**Fedoryan A.V.**

The article considers the occurrence of various accident scenarios in a group of tanks with petroleum products. The most likely and dangerous scenarios have been identified. On the example of the oil storage tank group in Usinsk, calculations of the parameters of the accident associated with the destruction of the tank were performed and engineering measures were justified to reduce its scale.

**Keywords:** petroleum products, tanks, accident, protective fence, storage of petroleum products, destruction of the tank, metal fragility, construction

Авария на резервуаре в большинстве случаев начинается со взрыва паровоздушной смеси [4]. На образование взрывоопасных концентраций внутри резервуаров оказывают существенное влияние физико-химические свойства хранимых нефти и нефтепродуктов, конструкция резервуара, технологические режимы эксплуатации, а также климатические и метеорологические условия. Взрыв в резервуаре приводит к подрыву (реже срыву) крыши с последующим горением на всей поверхности горючей жидкости [1,2]. При этом, даже в начальной стадии, горение нефти и нефтепродуктов в

резервуаре может сопровождаться мощным тепловым излучением в окружающую среду, а высота светящейся части пламени составлять 1-2 диаметра горящего резервуара. Отклонение факела пламени от вертикальной оси при скорости ветра около 4 м/с составляет 60–70°.

Дальнейшее развитие аварии зависит от места её возникновения, размеров начального очага горения, устойчивости конструкций резервуара, климатических и метеорологических условий, оперативности действий персонала объекта, работы систем противопожарной защиты, времени прибытия пожарных подразделений.

На основе анализа пожаров и аварий, происшедших как у нас в стране, так и за рубежом, а также материалов научных исследований пожары в резервуарах и резервуарных парках могут развиваться по следующим вариантам (рисунок 1) [3,4].

Аварии подразделяются на следующие уровни (рисунок 1):

- первый (А) - возникновение и развитие аварии в одном резервуаре без влияния на соседние;
- второй (Б) - распространение аварии в пределах одной группы;
- третий (В) - развитие пожара с возможным разрушением горящего и соседних с ним резервуаров, переходом его на соседние группы резервуаров и за пределы резервуарного парка.

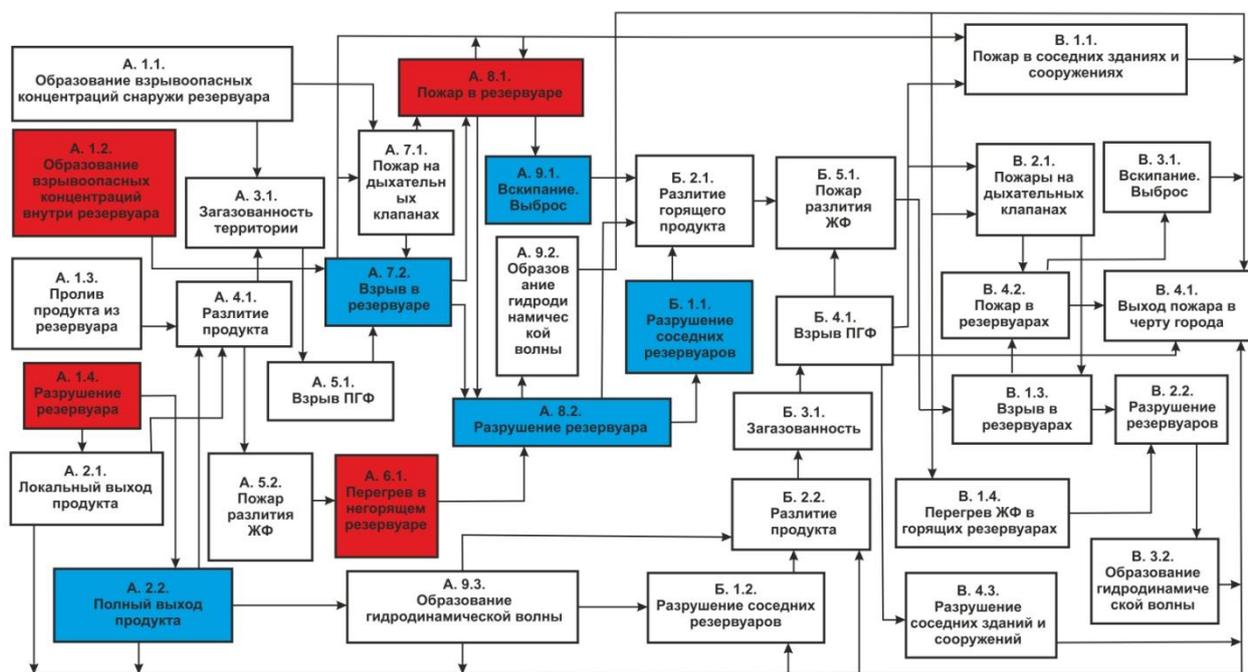


Рисунок 1. Схема вероятных сценариев развития аварии группы резервуаров

На резервуарах с плавающей крышей в результате теплового воздействия локального очага горения происходит разрушение герметизирующего затвора, а полная потеря плавучих свойств и затопление крыши в реальных условиях может произойти через один час.

При низком уровне нефтепродукта, когда горение происходит под понтоном или плавающей крышей, условия тушения пожара усложняются. Проникновению пены на свободную поверхность нефтепродукта препятствуют корпус понтона (плавающей крыши) и элементы герметизирующего затвора.

В железобетонном резервуаре в результате взрыва происходит разрушение части покрытия. Горение на участке образовавшегося проема сопровождается обогревом железобетонных конструкций покрытия. Через 20–30 мин возможно обрушение конструкций и увеличение площади пожара.

Развитие пожара в обваловании характеризуется скоростью распространения пламени по разлитому нефтепродукту, которая составляет для жидкости, имеющей температуру ниже температуры вспышки, – 0,05 м/с, а при температуре жидкости выше температуры вспышки – более 0,5 м/с. После 10–15 мин воздействия пламени происходит потеря несущей способности маршевых лестниц, выход из строя узлов управления коренными задвижками и хлопушками, разгерметизация фланцевых соединений, нарушение целостности конструкции резервуара, возможен взрыв в резервуаре.

Одним из наиболее важных параметров, характеризующих развитие пожара в резервуаре, является его тепловой режим. В зависимости от физико-химических свойств горючих жидкостей возможен различный характер распределения температур в объеме жидкости. При горении керосина, дизельного топлива, индивидуальных жидкостей значение температуры экспоненциально снижается от температуры кипения на поверхности до температуры хранения в глубинных слоях. Характер кривой распределения температуры горючей жидкости изменяется с увеличением времени горения.



**Рисунок 2. Общий вид резервуаров мазутохранилища центральной водогрейной котельной в городе Усинск**

При горении мазута, нефти, некоторых видов газового конденсата и бензина в горючем образуется прогретый до температуры кипения топлива гомотермический слой, увеличивающийся с течением времени.

Накопление тепловой энергии в горючем оказывает значительное влияние на увеличение расходов пенных средств. Кроме того, увеличение времени свободного развития пожара повышает опасность его распространения на соседние резервуары, способствует образованию факторов, усложняющих тушение, создает угрозу вскипания, выброса.

Горение нефти и нефтепродуктов в резервуарах может сопровождаться вскипанием и выбросами. Вскипание горючей жидкости происходит из-за наличия в ней взвешенной воды, которая при прогреве горячей жидкости выше  $100^{\circ}\text{C}$  испаряется, вызывая вспенивание нефти или нефтепродукта. Вскипание может произойти примерно через 60 мин горения при содержании влаги в нефти (нефтепродукте) более 0,3%. Вскипание также может произойти в начальный период пенной атаки при подаче пены на поверхность горючей жидкости с температурой кипения выше  $100^{\circ}\text{C}$  [4]. Этот процесс характеризуется бурным горением вспенившейся массы продукта.

При горении жидкости на верхнем уровне разлива возможен перелив вспенившейся массы через борт резервуара, что создает угрозу людям, увеличивает опасность деформации стенок горящего резервуара и перехода огня на соседние резервуары и сооружения.

Рассмотрим возникновение аварийной ситуации на объекте. В качестве объекта будем рассматривать группу из двух резервуаров с мазутом мазутохранилища Центральной водогрейной котельной в городе Усинск Республики Коми.

Общий вид резервуаров на современный уровень показан на рисунке 2.

Срок эксплуатации резервуаров составляет 5 лет.

Мазутохранилище Центральной водогрейной котельной имеет в своём составе два вертикальных стальных резервуара каждый ёмкостью по  $5000\text{ м}^3$  (РВС 5000).

Компоновка всего комплекса сооружений центральной водогрейной котельной показана на рисунке 3.



**Рисунок 3. Компоновка комплекса сооружений центральной водогрейной котельной**

На основе вероятных сценариев развития аварии (рисунок 1), для объекта Мазутохранилище делаем вывод о следующих возможных авариях (выделено на рисунке 3.1 закрашиванием – красным инициирующее событие, синим её косвенные последствия в виде группы последующих аварий):

- А 1.2 – образование взрывоопасных концентраций внутри резервуара, что вызовет А 7.2 «Взрыв в резервуаре» и А 8.2 – «Разрушение резервуара»;
- А 1.4 – разрушение резервуара, что повлечёт А.2.2 «Полный выход продукта»
- А 8.1 – пожар в резервуаре, что повлечёт А. 9.1 «Вскипание и выброс»;
- А. 6.1 - перегрев в негорящем резервуаре, что повлечёт А 8.2 разрушение резервуара, и возможно Б.1.1 – разрушение соседних резервуаров, в нашем случае – это резервуары соседнего промышленного объекта.

На основе рассмотренных аварий были проведены расчёты и сделаны технические предложения, изложенные ниже.

Наибольшую опасность для населения и территории представляют случаи полного разрушения резервуаров с ЛВЖ [3,5]. Разрушения вертикальных резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, хотя и редко, но случаются. Каждый случай – это серьезное событие, угрожающее жизни людей и экологической катастрофой и, по меньшей мере, значительным экономическим ущербом: нужно учесть, что стоимость хранящегося продукта значительно превышает стоимость самого резервуара [7,8].

Причинами нарушения прочности корпуса являются [6]:

- дефекты сварочно-монтажных работ;
- хрупкость металла;
- перепады температур и т. д.

Аварии при полном разрушении резервуара следует рассматривать, как чрезвычайную ситуацию. Например, на Каменской нефтебазе в Ростовской области вследствие полного разрушения резервуара вместимостью 700 м<sup>3</sup> с бензином произошел пожар с катастрофическими последствиями. Пожар охватил все строения и часть резервуарного парка нефтебазы и по разлившемуся продукту распространился на жилые дома, находящиеся за территорией на расстоянии 60 м. Погиб 61 человек.

Особую опасность представляют случаи полного разрушения резервуаров в период тушения пожара. В 1976 г. в Азербайджане на нефтебазе горело 4 резервуара с нефтепродуктами. При разрушении от взрыва РВС-700 осветительный керосин в количестве 120 тонн разлился на площади 3000 м<sup>2</sup>. Разрушение сопровождалось отрывом корпуса от днища и полетом на расстояние до 25 метров.

Установлено, что площадь разлива ЛВЖ при полном разрушении резервуара в основном прямо пропорциональна объему разлившейся жидкости [3]:

$$F_{3-p} = f_3 \cdot \varepsilon_p \cdot V_p; \quad (1)$$

где:  $F_{з-р}$  - площадь зоны разлива,  $m^2$ ;  
 $f_з$  - коэффициент разлива,  $m^{-1}$ ;  
 $\varepsilon_p$  - степень заполнения резервуара;  
 $V_p$  - номинальная вместимость резервуара,  $m^3$ .

Степень заполнения резервуара допускается принимать равной 0,9.

Коэффициент разлива ЛВЖ или, вернее, затопления, определяют, исходя из расположения наземного резервуара на местности:

$$\left\{ \begin{array}{l} f = 12 - \text{при расположении на поверхности с уклоном, более } 1\%; \\ f = 5 - \text{при расположении на равнине} \end{array} \right. \quad (2)$$

Приведенную форму разлива ЛВЖ при крупномасштабной аварии принимают в зависимости от расположения резервуара на местности:

- в низине или на ровной поверхности (с уклоном до 1 %) – в виде круга с радиусом:

$$R_{ж} = \sqrt{\frac{F_{ж}}{\pi}}; \quad (3)$$

- на возвышенности - в виде эллипса.

Значения осей эллипса (рисунок 4) определяют по следующим формулам:

- малой полуоси:

$$b = \sqrt{\frac{K_{ук} \cdot F_{ж}}{\pi}}; \quad (4)$$

- большой полуоси:

$$a = 4 \cdot F_{ж} / (\pi \cdot b); \quad (5)$$

где  $K_{ук}$  - коэффициент, характеризующий уклон, благоприятствующий разливу жидкости, значение которого определяют исходя из уклона местности:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{ук} = 8 - \text{при уклоне не более } 3\%; \\ k_{ук} = 16 - \text{при расположении на равнине} \end{array} \right. \quad (6)$$

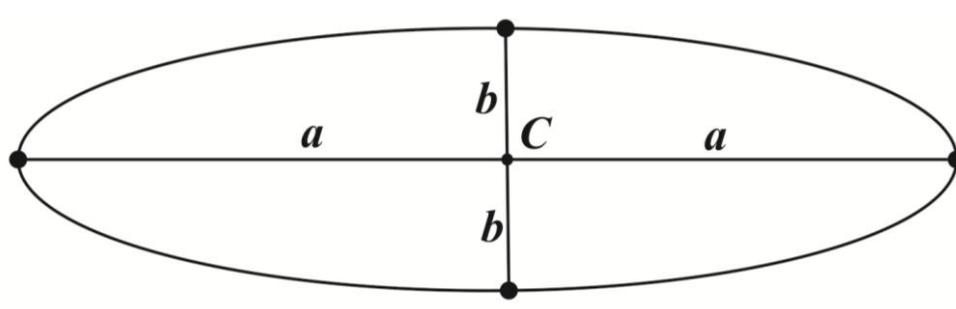


Рисунок 4. Полуоси эллипса разлива нефтепродукта

Примерная площадь разлива ЛВЖ:

$$F_{з-р} = f_з \cdot \varepsilon_p \cdot V_p = 12 \cdot 0,95 \cdot 5000 = 57000 \text{ м}^2;$$

Уклон примем равным 5%.

Значение коэффициента разлива ЛВЖ принято равным 12, так как уклон, более 1%.

Толщина слоя разлившейся ЛВЖ:

$$\delta_{ж} = 1/f_з = 1/12 = 0,083 \text{ м};$$

Приведенную форму разлива ЛВЖ принимаем в виде эллипса. Значения осей эллипса определяют по следующим формулам:

- малой полуоси:

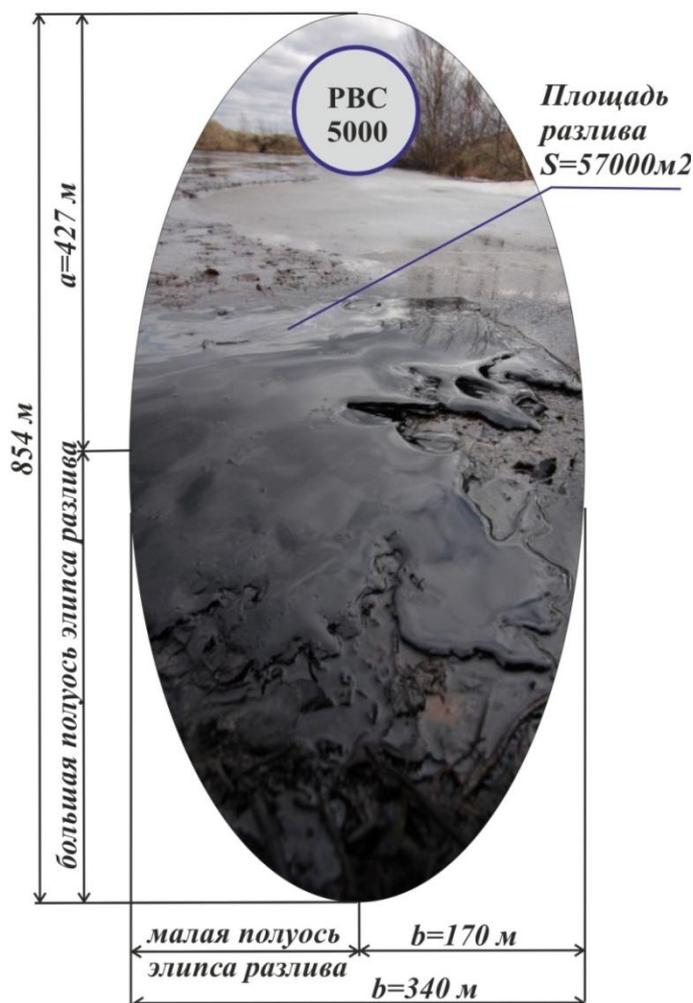
$$b = \sqrt{\frac{K_{ук} \cdot F_{ж}}{\pi}} = \sqrt{\frac{16 \cdot 57000}{3,14}} = 170,00 \text{ м};$$

- большой полуоси:

$$a = 4 \cdot F_{ж} / (\pi \cdot b) = 4 \cdot 57000 / (3,14 \cdot 170) = 427,00 \text{ м};$$

Значение коэффициента, характеризующий уклон, благоприятствующий разливу ЛВЖ, принято равным 16, так как уклон более 3 %.

В итоге наносим результаты расчёта на схему разлива (рисунок 5).



**Рисунок 5. Разлив мазута в полном объеме из резервуара РВС 5000 в результате образования макротрещины**

Очевидно, что в этом расчётном случае полученная площадь разлива при выходе всего продукта может достигать  $57000 \text{ м}^2$  (рисунок 5) и иметь значительную глубину – практически до 900 м, это приведёт к тяжёлым последствиям, в том числе и экологическим. И будет характеризоваться сценарием аварии А 9.3 и В.4.1 (рисунок 1), что практически говорит о нарастании последствий и возможном большом количестве пострадавших. С неизбежным экологическим и материальным ущербом.

Поэтому для объекта – резервуарной группы мазутохранилища в г. Усинск нами предложен вариант защитной стенки с волноотражающим козырьком [3], защитный козырёк позволяет уменьшить высоту ограждения.

Одним из эффективных технических решений, способных предотвратить последствия гидродинамического истечения жидкости на случай внезапного разрушения резервуара, считается [3-6]:

- применение конструкции резервуара с защитной стенкой;
- устройство принципиально нового ограждения (рисунок 6) [3].

Схема технического решения ограждающей стенки имеет следующую имеющего конструктивную особенность – волноотражающий козырек – 2, который позволяет уменьшить высоту стены ограждения и защитный зуб – 4, а также наклонную плоскость – 3 со стороны разлива ЛВЖ стенки – 1, для принятия основной нагрузки, возникающей при гидродинамическом истечении.

Высоту ограждающей стены определяют по номограмме (рисунок 7) на основании расчетной схемы, приведенной на рисунке 8.

Для наиболее неблагоприятного случая гидродинамического истечения конструкция ограждающей стены должна быть рассчитана на нагрузку, равную 150 тоннам на погонный метр [1,7,8].

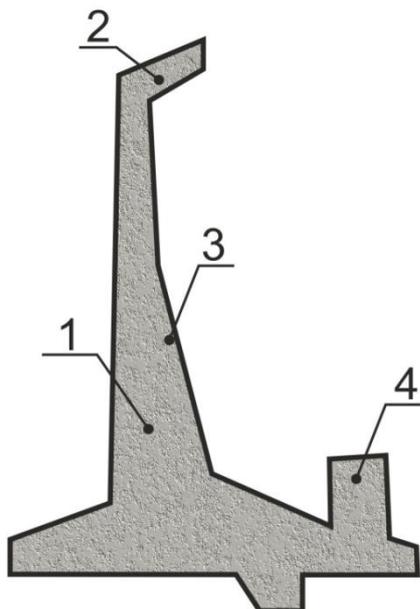


Рисунок 6. Схема технического решения ограждающей стенки

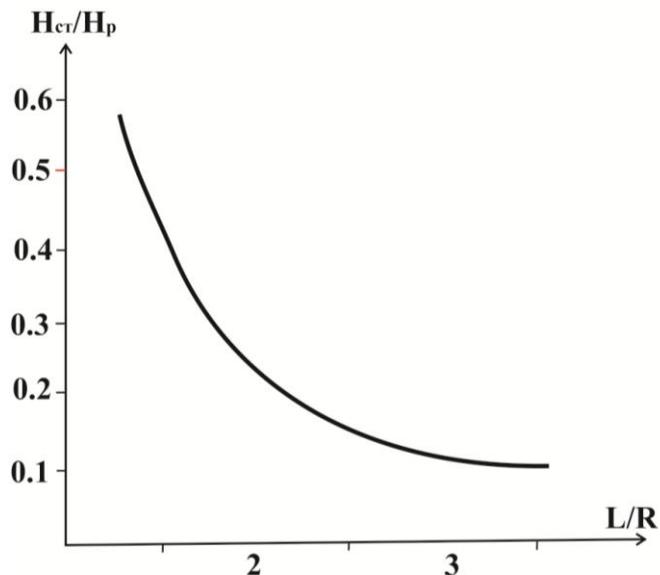


Рисунок 7. Номограмма для определения высоты ограждающей стенки

В качестве дополнительных мер, направленных на ограничение площади аварийного разлива нефтепродуктов на случай полного разрушения резервуара, следует рассматривать использование кольцевой дороги вокруг группы резервуаров, имеющей возвышение не менее 1,5 м над планировочной отметкой внутри основного обвалования.

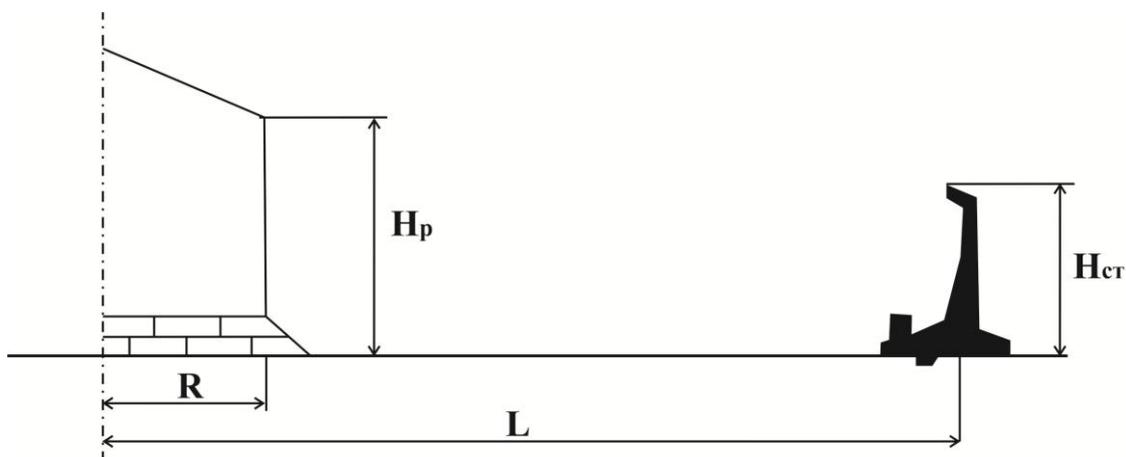


Рисунок 8. Расчетная схема к определению высоты ограждающей стенки

Временными мерами, обеспечивающими как снижение опасности хрупкого разрушения резервуара, так и последствий разрушения, могут быть:

- бандажирование стенок резервуаров;
- регламентирование максимального уровня разлива нефтепродукта с учетом технического состояния резервуара.

При помощи номограммы для определения высоты ограждающей стенки (рис. 6) определим высоту ограждающей конструкции и расстояние от РВС до ограждающей конструкции (рис. 7).

В нашем случае высота резервуара  $H_p = 12$  м, радиус резервуара  $R = 11,4$  м, расстояние до ограждающей конструкции  $L$  примем равным половине расстояния между двумя РВС, т.е:

$$L = 15/2 = 6,5 \text{ м.}$$

Перенесём материалы расчётной схемы рисунка 8 на ситуацию с нашим объектом – группы из двух резервуаров мазутохранилища (рис. 9).

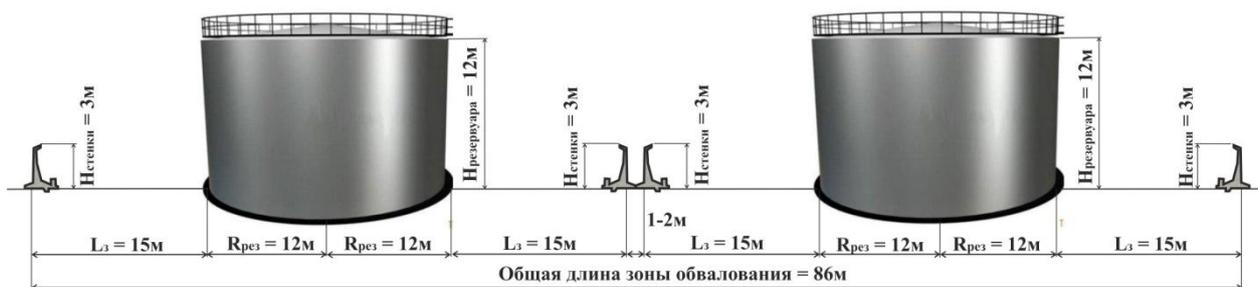


Рисунок 9. Компоновка защитного ограждения

В таком случае получаем:  $L/R = 6,5/11,4 = 0,6$ , пользуясь номограммой определяем, что:

$$H_{ст}/H_p = 0,4,$$

$$H_{ст} = H_p \cdot 0,4 = 12 \cdot 0,4 = 4,8\text{ м}.$$

Возводить стенку такой высотой будет экономически и технически нецелесообразно, тогда увеличиваем расстояние до ограждающей конструкции  $L$  вдвое, что будет означать общее обвалование для двух резервуаров, следовательно:

$$L = 30/2 = 15\text{ м}.$$

В таком случае получаем:  $L/R = 15/11,4 = 1,3$ , пользуясь номограммой определяем, что:

$$H_{ст}/H_p = 0,25,$$

$$H_{ст} = H_p \cdot 0,4 = 12 \cdot 0,25 = 3,0\text{ м}.$$

Высоту ограждающей конструкции принимаем  $3,0\text{ м}$  (рис. 9).

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Возможная площадь разлива нефтепродукта в случае разрушения резервуара от гильотинной макротрещины, без защитного ограждения способна достигнуть  $57\text{ тыс. м}^2$ , а локализация разлива в предложенной стенке ограждения уменьшит эту площадь до  $4,6\text{ тыс. м}^2$ . Что в процентном отношении составит уменьшение площади подверженной развитию аварийной ситуации на  $91\%$ . Это минимизирует возможность развития самых негативных сценариях при аварии.

### Литература

- ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. – введ. 2017-03-01. – М. Изд-во стандартов, 2017.
- Лапшин, А.А. Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления: учеб. пособие / А.А. Лапшин, А.И. Колесов, М.А. Агеева; Нижегород. гос. архит-строит. ун-т. – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 122 с.
- Сучков В.П. Пособие по применению методов оценки пожарной опасности технологических систем, используемых при анализе пожарных рисков / В. П. Сучков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 135 с.
- Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках Дата введения 2000-01-01. URL: <http://www.consultant.ru>. (дата обращения: 02.04.2020).
- Федорян А.В., Пожарная безопасность технологических процессов. Анализ пожарной опасности и защита технологических процессов [Текст]: практикум для студентов специальности 280104 «Пожарная безопасность» и направления подготовки 280700 «Техносферная безопасность», профиля «Пожарная безопасность» / А.В. Федорян; Новочерк. инж.-мелиор ин-т. ДГАУ – Новочеркасск, 2014. – 67 с.
- Федорян А.В. Пожарная безопасность технологических процессов [Текст]: Курс лекций для студентов заочной формы обучения Новочерк. инж.-мелиор. ин-т. ДГАУ. - Новочеркасск, 2016. – 347 с.
- Вансович, К.А. Проектирование нефтехранилищ: учеб. пособие / К.А. Вансович, М.В. Кучеренко. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – 140 с.
- Николаев, Н.В. Стальные вертикальные резервуары низкого давления для нефти и нефтепродуктов / Н.В. Николаев, В.А. Иванов, В.В. Новосёлов. - М. ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. - 496 с.

### Данные об авторах:

**Федорян Алексей Валерьевич**, доцент, заведующий кафедры «Техносферная безопасность и природообустройство», кандидат технических наук, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова.

Донской государственный аграрный университет

Россия, 346411, Ростовская область, г. Новочеркасск, пер. Сорокина, 5.

### Data about the authors:

**Fedoryan Alexey Valeryevich**, associate Professor, head of the Department "Technosphere safety and environmental management", candidate of technical Sciences, Novocherkassk engineering and reclamation Institute named after A. K. Kortunov.

*Donskoy state agrarian university*

*Russia, 346411, Rostov region, Novocherkassk, Sorokina lane, 5.*

**Рецензент:**

**Сукало Г.М.**, профессор кафедры «Техносферная безопасность и природообустройство» Новочеркасского инженерно-мелиоративного института им. А.К. Кортунова ФГБОУ ВО Донской ГАУ, г. Новочеркасск, Россия.