
Оценка прочности конструкций при строительстве вертикальных стальных резервуаров хранения нефтепродуктов

С.Н. Терёхин¹, Г.Л. Шидловский¹, М.С. Немчинов¹, С.Г. Немчинов²

¹*Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева*

²*ООО "Инженерный центр пожарной робототехники "ЭФЭР", Петрозаводск*

Аннотация: В данной статье произведен расчет и оценка строительных конструкций вертикальных стальных резервуаров, которые подвергаются различным нагрузкам.

Ключевые слова: нефтяная промышленность, нефтепродукты, аварии, вертикальные стальные резервуары, нагрузка.

В настоящее время нефтегазовая промышленность является одним из основных направлений развития страны как для Российской Федерации, так и для ряда других государств [1]. По результатам 2022 года, добыча нефти в РФ достигла 535,2 млн тонн, что превышает показатель предыдущего года на 2%. В связи с возникающими трудностями с поставкой нефти и нефтепродуктов в другие страны, происходит значительное увеличение нагрузки на резервуарные парки с хранением горючих жидкостей.

Помимо увеличения добычи нефти, в 2022 году увеличилось количество аварий на объектах нефтяной промышленности [2]. В последние десятилетия человечество теряет 5-10% совокупного валового продукта из-за возникших ЧС техногенных аварий [3].

Основным видом аварии является выброс опасных веществ (см. рис. 1), что является большой экологической и материальной проблемой, которую необходимо решать.

Для определения видов и причин аварий широко используются методы системного анализа [4]. Анализ проведенных исследований по авариям на объектах, находящихся под надзором Ростехнадзора, показывает, что

основной причиной аварий послужила неисправность и износ оборудования (см. рис. 2). Все это является следствием коррозии и усталости металла.

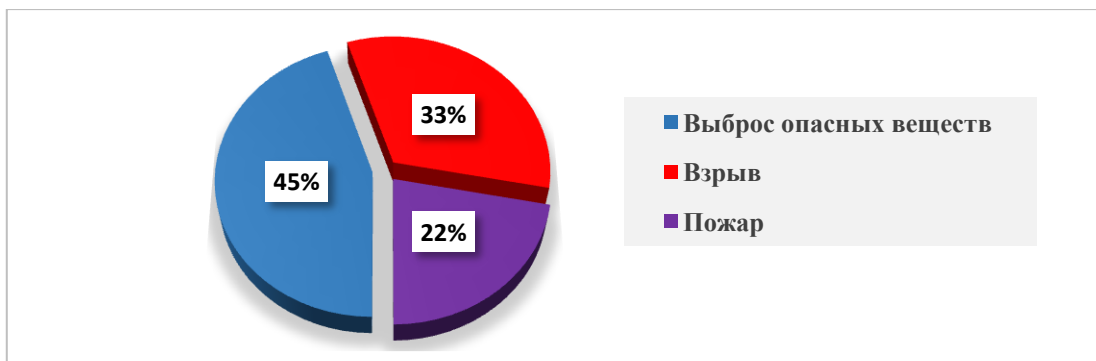


Рис. 1. – Виды аварий за 2022 г.

Значительная часть оборудования на предприятиях по производству и переработке нефти подлежит замене или ремонту, так как более 70% оборудования, которое эксплуатируется в настоящее время на территории России, имеет срок эксплуатации 30-35 и более лет [5].

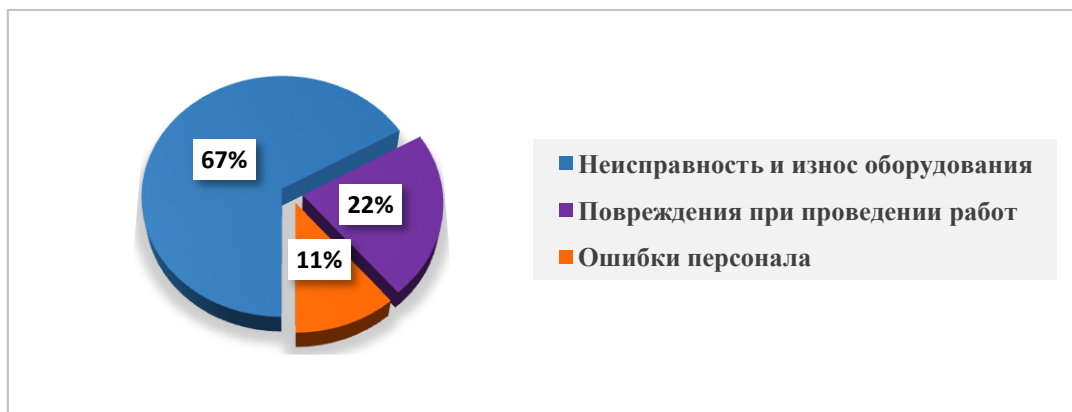


Рис. 2. – Причины аварий за 2022 г.

По результатам проверок объектов, находящихся под контролем Ростехнадзора, было выявлено 21 658 нарушений требований промышленной безопасности, что на 26 % превышает показатель 2021 г. (15 935 нарушений).

Характерные нарушения требований промышленной безопасности:

- отсутствие должной организации ремонта и технического обслуживания;
- эксплуатация оборудования при нарушении их работоспособности [6];
- отсутствие должного контроля промышленной безопасности [7].

Для предотвращения и предупреждения аварий, связанных с недостаточным соблюдением норм эксплуатации и требований промышленной безопасности, необходимо знать и понимать, какие конструктивные элементы резервуаров подвергаются наибольшему воздействию агрессивных сред, способствующих их разрушению.

Горизонтальные резервуары используют для хранения маленьких объемов жидкости, что является относительно небольшим показателем, если сравнивать с вертикальными емкостями. Объем вертикальных резервуаров может достигать свыше 100000 м³, что требует определенных технических решений и обеспечения дополнительными требованиями безопасности при их строительстве и эксплуатации. Самым востребованным и главным способом хранения нефтепродуктов являются металлические резервуары, из них самые распространенные - резервуары вертикальные стальные. На долю РВС приходится до 60 % всех объектов нефтегазового комплекса [8]. Поэтому в данной статье рассмотрим строительные конструкции, применяемые для строительства вертикальных резервуаров.

Все конструктивные элементы делятся на группы А, Б (основные конструкции) и В (вспомогательные конструкции) [5].

Основные конструкции, которые включают в себя почти все строительные элементы РВС, подвергаются наибольшему воздействию агрессивной среды, которая находится непосредственно в самом резервуаре.

Но все же главными конструкциями, которые подвергаются нагрузке и давлению жидкости, являются днище и стенки резервуара.

Начнем с того, каким образом происходит монтировка вертикальных резервуаров. По способам монтажа и сборки РВС делятся на:

- резервуары рулонной сборки, листовые конструкции - в виде рулонизируемых полотнищ;
- резервуары полистовой сборки, все конструкции состоят из отдельных листов;
- резервуары комбинированной сборки, монтаж производится и рулонной сборкой, и полистовой сборкой.

Стенки резервуаров объемом 10000 м³ и более, не рекомендуется изготавливать и монтировать в виде рулонизируемых полотнищ, а объемом 20000 м³ и более не допускается вовсе.

Для определения наиболее уязвимого места, где действует наибольшая нагрузка, перейдем к расчетам прочности РВС [9]. Проведем все вычисления на примере резервуара объемом 20000 м³ в городе Кириши. Исходные данные для расчета берем следующие:

$\delta_{ст} = 18$ мм – толщина стенки нижнего пояса;

$R = 19,5$ м – радиус резервуара

$H = 17,91$ м - высота стенки резервуара

$\delta_{дн} = 14$ мм – толщина окрайки днища;

$c = 60$ мм – ширина окрайки днища;

$B = 2,0$ м – ширина листа;

$p_{кр} = 0,55 \frac{кН}{м^2}$ – нормативное давление покрытия.

Вес покрытия резервуара можем определить по формуле (1):

$$G_{кр} = p_{кр} \cdot \pi \cdot R^2 = 0,55 \cdot \pi \cdot 19,5^2 = 656 \text{ кН} . \quad (1)$$

Вес стенки стального вертикального резервуара определяется по формуле (2):

$$G_{cm,i} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot B \cdot \gamma_{cm} \cdot \sum_{k=i}^a \delta_k . \quad (2)$$

где a – номер крайнего пояса (отсчет снизу); $\gamma_{cm} = 78,5 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ – удельный вес стали.

Подставляя исходные данные получаем, что вес стенки первого пояса будет равен:

$$G_{cr,1} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot B \cdot \gamma_{cr} \cdot \sum_{k=1}^8 \delta_k = \\ = 2 \cdot \pi \cdot 19,5 \cdot 2,0 \cdot 78,5(15,55 + 11,55 + 10,55 + 5 \cdot 8,55)10^{-3} = 1545 \text{ кН} .$$

А вес стенки второго пояса будет равен:

$$G_{cr,2} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot B \cdot \gamma_{cr} \cdot \sum_{k=2}^8 \delta_k = 1246 \text{ кН} .$$

Нормативная снеговая нагрузка на РВС определяется по формуле (3):

$$p_{сн} = \mu \cdot c_e \cdot c_t \cdot S_g . \quad (3)$$

Для данного расчета берем резервуар, находящийся в городе Кириши, что является IV снеговым районом, для которого $S_g = 2000 \text{ Н}$. Коэффициенты c_e , c_t принимаются равными 1, т.к. район г. Кириши имеет среднюю температуру января -6°C . Для такой крыши коэффициент $\mu = 1$.

Рассчитываем вес снегового покрова, действующего на всю крышу (4):

$$G_{сн} = p_{сн} \cdot \pi \cdot R^2 = \mu \cdot S_g \cdot \pi \cdot R^2 = 1 \cdot 2,0 \cdot \pi \cdot 19,5^2 = 2365,5 \text{ кН} . \quad (4)$$

Нагрузку от вакуума на покрытие рассчитываем по формуле (5):

$$G_{\text{вак}} = \pi \cdot R^2 \cdot p_{\text{вак}} = \pi \cdot 19,5^2 \cdot 0,25 = 298 \text{ кН}. \quad (5)$$

Определяем напряжение в первом поясе (6):

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{n_3 \cdot (G_{\text{кр}} + G_{\text{ст,и}}) + \psi \cdot (n_{\text{сн}} \cdot G_{\text{сн}} + n_2 \cdot G_{\text{вак}})}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta_1} = \\ &= \frac{1,05(656 + 1545) + 0,9(1,4 \cdot 2365,5 + 1,2 \cdot 298)}{2 \cdot \pi \cdot 19,5 \cdot 15,55 \cdot 10^{-3}} = 2,95 \text{ МПа}. \quad (6) \end{aligned}$$

Проводим расчет давления в нижней точке резервуара (7):

$$\begin{aligned} p_0 &= n_1 \cdot \rho_{\text{н}} \cdot g \cdot H - n_2 \cdot p_{\text{изб}} = 1,05 \cdot 900 \cdot 9,81 \cdot 17,91 - 1,2 \cdot 2500 \\ &= 1,63 \cdot 10^5 \text{ Н/м}. \quad (7) \end{aligned}$$

Определяем функции Крылова по следующим формулам:

$$\theta = e^{-m_{\text{дн}} \cdot c} \cdot \cos(m_{\text{дн}} \cdot c) = 0,85, \quad (8)$$

$$\xi = e^{-m_{\text{дн}} \cdot c} \cdot \sin(m_{\text{дн}} \cdot c) = 0,12, \quad (9)$$

$$\varphi = \theta + \xi = 0,97, \quad (10)$$

$$\psi = \theta - \xi = 0,73. \quad (11)$$

Для определения характеристик деформации элементов строительных конструкций необходимо рассчитать коэффициент постели днища (12) и стенки РВС (15), цилиндрическую жесткость днища (13) и стенки (16), коэффициент деформации для днища (14) и стенки РВС (17).

$$k_{\text{см}} = \frac{E \cdot \delta_{\text{см}}}{R^2} = \frac{220 \cdot 10^9 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{19,5^2} = 10,1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2, \quad (12)$$

$$D_{\text{см}} = \frac{E \cdot \delta_{\text{см}}^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{220 \cdot 10^9 \cdot (18 \cdot 10^{-3})^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} = 1,17 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (13)$$

$$m_{cm} = \sqrt[4]{\frac{k_{cm}}{4 \cdot D_{cm}}} = \sqrt[4]{\frac{10,1 \cdot 10^6}{4 \cdot 1,17 \cdot 10^5}} = 2,15 \text{ м}^{-1}, \quad (14)$$

$$k_{\partial n} = \frac{E \cdot \delta_{\partial n}}{R^2} = \frac{220 \cdot 10^9 \cdot 14 \cdot 10^{-3}}{19,5^2} = 8,1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2, \quad (15)$$

$$D_{\partial n} = \frac{E \cdot \delta_{\partial n}^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{220 \cdot 10^9 \cdot (14 \cdot 10^{-3})^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} = 0,55 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (16)$$

$$m_{\partial n} = \sqrt[4]{\frac{k_{\partial n}}{4 \cdot D_{\partial n}}} = \sqrt[4]{\frac{8,1 \cdot 10^6}{4 \cdot 0,55 \cdot 10^5}} = 2,45 \text{ м}^{-1}, \quad (17)$$

Чтобы определить неизвестные, необходимо составить систему уравнений, которые характеризуют условие совместности деформаций стенки резервуара и днища [9]:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{\partial n}) \cdot X_1 + \delta_{12}^{cm} \cdot X_2 + \Delta_{1p}^{cm} + \Delta_{1p}^{\partial n} = 0; \\ \delta_{21}^{cm} \cdot X_1 + \delta_{22}^{cm} \cdot X_2 + \Delta_{2p}^{cm} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Определяем коэффициенты и перемещения, находящиеся в системе уравнений:

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{1}{m_{ct} \cdot D_{ct}} = \frac{1}{2,2 \cdot 1,17 \cdot 10^5} = 3,88 \cdot 10^{-6} \text{ Н}^{-1}, \quad (19)$$

$$\delta_{12}^{cm} = \delta_{21}^{cm} = \frac{1}{2 \cdot m_{ct}^2 \cdot D_{ct}} = \frac{1}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^2 \cdot 1,17 \cdot 10^5} = 0,88 \cdot 10^{-6} \text{ м/Н}, \quad (20)$$

$$\delta_{22}^{cm} = \frac{1}{2 \cdot m_{ct}^3 \cdot D_{ct}} = \frac{1}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^3 \cdot 1,17 \cdot 10^5} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Н}, \quad (21)$$

$$\Delta_{1p}^{cm} = \frac{\rho_n \cdot g}{k_{ct}} = \frac{900 \cdot 9,81}{11,1 \cdot 10^6} = 7,9 \cdot 10^{-4}, \quad (22)$$

$$\Delta_{2p}^{cm} = \Delta_{1p}^{cm} \cdot H = 7,9 \cdot 10^{-4} \cdot 17,91 = 141,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \quad (23)$$

$$\begin{aligned}\delta_{11}^{\text{дн}} &= \frac{1}{m_{\text{дн}} \cdot D_{\text{дн}}} \cdot \frac{1 + \varphi^2 + 2 \cdot \theta^2}{4} = \\ &= \frac{1}{2,45 \cdot 0,55 \cdot 10^5} \cdot \frac{1 + 0,97^2 + 2 \cdot 0,85^2}{4} = 6,28 \cdot 10^{-6} \text{ Н}^{-1},\end{aligned}\quad (24)$$

$$\begin{aligned}\Delta_{1p}^{\text{дн}} &= -\frac{p_0 \cdot m_{\text{дн}}}{2 \cdot k_{\text{дн}}} [1 - \varphi \cdot \psi + 2 \cdot \theta \cdot \xi] = \\ &= -\frac{1,63 \cdot 10^5 \cdot 2,45}{2 \cdot 2 \cdot 10^8} [1 - 0,97 \cdot 0,73 + 2 \cdot 0,85 \cdot 0,12] = -4 \cdot 10^{-4}.\end{aligned}\quad (25)$$

После получения значений в предыдущих расчетах, вносим в систему уравнений полученные данные:

$$\begin{cases} (3,88 \cdot 10^{-6} + 6,28 \cdot 10^{-6}) X_1 + 0,88 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 + 7,9 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4} = 0, \\ 0,88 \cdot 10^{-6} \cdot X_1 + 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 + 141,5 \cdot 10^{-4} = 0; \\ \begin{cases} 10,16 \cdot X_1 + 0,88 \cdot X_2 + 390,0 = 0, \\ 0,88 \cdot X_1 + 0,4 \cdot X_2 + 14150,0 = 0. \end{cases} \end{cases}$$

Выражаем X_1 из первого уравнения системы.

$$0,88 \cdot \left(\frac{1,63 \cdot 10^5 \cdot 2,45}{2 \cdot 2 \cdot 10^8} \right) \cdot X_2 + 0,4 \cdot X_2 - 14150,0 = 0, \text{ откуда}$$

$$X_2 = -29784 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Из первого уравнения системы получаем X_1 :

$$10,16 \cdot X_1 + 0,88 \cdot (-29784) + 390,0 = 0,$$

$$X_1 = 2541,3 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}}.$$

Далее осуществляем проверку прочности стенки в точке сопряжения с дном по следующей формуле (26):

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{изг}}{W_x} + \frac{N}{F} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (26)$$

$$M_{изг} = X_1 = 2,5 \frac{\kappa H \cdot M}{m}. \quad (27)$$

$$W_x = \frac{\delta_{cm}^2}{6} = \frac{18^2 \cdot 10^{-6}}{6} = 54,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (28)$$

$$\frac{N}{F} = \sigma_{11} = 2,95 \text{ МПа}. \quad (29)$$

$$\gamma_c \cdot R_y = 0,7 \cdot 293 = 205,1 \text{ МПа}. \quad (30)$$

Осуществляем проверку на прочность:

$$\sigma_{\max} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{54 \cdot 10^{-6}} + 2,95 = 46,23 + 2,95 = 49,25 \text{ МПа}.$$

Таким образом, условие прочности $\sigma_{\max} \leq \gamma_c \cdot R_y$ выполняется, т.к. $49,25 \leq 205,1$.

Соединения окраек между собой выполняют стыковыми швами [9]. В нашем случае толщина окрайки $\delta_{дн} = 14 \text{ мм}$.

Проверку прочности дна проводим по напряжениям, возникающим от изгибающего момента $M_{изг} = X_1$ (31):

$$\sigma_{\max} = \frac{X_1}{W_x} \leq \gamma_c \cdot R_y. \quad (31)$$

В данном случае момент сопротивления сечения дна равен (32):

$$W_x = \frac{\delta_{\text{дн}}^2}{6} = \frac{14^2 \cdot 10^{-6}}{6} = 32,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (32)$$

Для окрайки расчетное сопротивление будет такое же, как и для нижнего пояса стенки и равно 205 МПа. Проводим проверку на прочность (33):

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{X_1}{W_x} = \frac{2500}{32,7 \cdot 10^{-6}} = 76,5 < 205,1 \text{ МПа}. \quad (33)$$

Условие прочности выполняется.

Проверяем сварной шов на прочность:

Катет углового шва таврового соединения должен быть не более 12 мм [10]. В краевой зоне возникает изгибающий момент.

$$N = \sqrt{\left(\frac{X_1}{\delta_{\text{ст}}}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2,5}{18 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{29,8}{2}\right)^2} = 139 \text{ кН/м}. \quad (34)$$

Проверка условия прочности сварного шва осуществляется по следующей формуле (35):

$$\frac{N}{\beta_f \cdot k_f \cdot l_w} \leq \gamma_c \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf}, \quad (35)$$

Осуществляем проверку сварного шва, подставляя значения в формулу (35):

$$\frac{N}{\beta_f \cdot k_f} = \frac{139}{0,7 \cdot 12 \cdot 10^{-3}} = 16,5 \text{ МПа},$$

$$\gamma_c \cdot \gamma_{wf} \cdot R_{wf} = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 215 = 150,5 \text{ МПа}.$$

Поскольку $16,5 < 150,5$, то условие прочности сварного шва выполняется.

Подводя итог проведенным расчетам, следует отдельно обозначить нагрузки, которые будут получать элементы резервуара, работая в стационарном режиме:

- На стенку резервуара действует нагрузка 49,25 МПа;
- На днище резервуара действует нагрузка 76,5 МПа;
- На шов, соединяющий стенку и днище резервуара действует нагрузка 16,5 МПа.

Исходя из вышесказанного, стоит отметить, что особого внимания требует днище резервуара. Основной эксплуатационной нагрузкой, действующей на РВС, является гидростатическое давление и именно на днище действует максимальное давление жидкости и строительных конструкций РВС, что делает его наиболее уязвимым местом.

Также, проводя исследование формул, можно сделать вывод, что толщина стенки и днища играет особую роль, так как при ее выборе чаще всего возникает экономическая выгода, что может привести к возникновению дополнительных повреждений резервуара. В данном случае следует осуществлять выбор в сторону более практичной и безопасной толщины стенок резервуара, с необходимым требуемым запасом прочности.

Эти факты необходимо учитывать на начальном этапе проектирования и при дальнейшем строительстве, чтобы обеспечить безаварийную работу резервуарного парка.

Литература

1. Pedersen A., Bazilian M. Considering the impact of oil politics on nation building in the Republic of South Sudan, the Extractive Industries and Society, 2014, pp. 163–175.

2. Котляревский В.А., Шаталов А.А., Ханухов Х.М. Безопасность резервуаров и трубопроводов, 2000. 555 с.
3. Савчук О.Н., Крейтор В.П. Безопасность жизнедеятельности. Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера, 2019. 152 с.
4. Касьяненко А.А., Михайличенко К.Ю. Анализ риска аварий техногенных систем, 2008. 182 с.
5. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов, 2013. 240 с.
6. Campbell R. Fires in industrial and manufacturing properties. National Fire Protection Association, 2018. 116 p.
7. Самигуллин Г.Х., Кадочникова Е.Н. Основы обеспечения производственной безопасности, 2019. 479 с.
8. Малинин В.Р. Теоретические основы оценки и способы снижения техногенной опасности резервуарного хранения нефти и нефтепродуктов, 2005. 243 с.
9. Вансович К. А., Кучеренко М. В. Проектирование нефтехранилищ, 2010. 140 с.
10. Лимонов Б.С., Шидловский Г.Л., Власова Т.В., Терехин С.Н., Тихонов Ю.М., Гугучкина М.Ю. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре. Часть I. Строительные материалы, их пожарная опасность и поведение в условиях пожара, 2016. 186 с.

References

1. Pedersen A. The Extractive Industries and Society, 2014. pp. 163–175.
2. Kotlyarevskij V.A., Shatalov A.A., Hanuxov X.M. Bezopasnost` rezervuarov i truboprovodov [Safety of tanks and pipelines]. 2000. 555 p.

3. Savchuk O.N., Krejtor V.P. Bezopasnost` zhiznedeyatel`nosti. Prognozirovanie posledstvij chrezvy`chajny`x situacij texnogennogo i prirodnogo xaraktera [Life safety. Forecasting the consequences of man-made and natural emergencies], 2019. 152 p.

4. Kas`yanenko A.A., Mixajlichenko K.Yu. Analiz riska avarij texnogenny`x system [Analysis of the risk of accidents of man-made systems], 2008. 182 p.

5. Rukovodstvo po bezopasnosti vertikal`ny`x cilindricheskix stal`ny`x rezervuarov dlya nefti i nefteproduktov [Safety manual for vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products], 2013. 240 p.

6. Campbell R. Fires in industrial and manufacturing properties. National Fire Protection Association, 2018. 116 p.

7. Samigullin G.X., Kadochnikova E.N. Osnovy` obespecheniya proizvodstvennoj bezopasnosti [Fundamentals of industrial safety]. 2019. 479 p.

8. Malinin V.R. Teoreticheskie osnovy` ocenki i sposoby` snizheniya texnogennoj opasnosti rezervuarnogo xraneniya nefti i nefteproduktov [Theoretical foundations of assessment and ways to reduce the technogenic danger of tank storage of oil and petroleum products]. 2005. 243 p.

9. Vansovich K. A., Kucherenko M. V. Proektirovanie neftexranilishh [Design of oil storage facilities]. 2010. 140 p.

10. Limonov B.S., Shidlovskij G.L., Vlasova T.V., Terexin S.N., Tixonov Yu.M., Guguchkina M.Yu. Zdaniya, sooruzheniya i ix ustojchivost` pri pozhare. Chast` I. Stroitel`ny`e materialy`, ix pozharnaya opasnost` i povedenie v usloviyax pozhara [Buildings, structures and their resistance to fire. Part I. Building materials, their fire hazard and behavior in fire conditions]. 2016. 186 p.