

Оценка рисков в отношении резервуарных емкостей в нефтегазовой промышленности

Risk assessment in storage tanks of the oil and gas industry

Аль-Раухани Н.М.^{1*}, Алехин В.Н.¹
Al-Rawhani N.M.^{1*}, Alekhin V.N.¹

¹Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

¹Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia,

*Nal-raukhani@urfu.ru



Аль-Раухани Н.М.



Алехин В.Н.

Резюме. Цель. Аварии на нефтегазовых объектах являются одной из основных причин загрязнения окружающей среды и гибели людей. В целях решения проблемы обеспечения безопасности нефтегазовых объектов был проведен обзор их состояния в Йеменской Республике, проанализированы статистические данные об авариях, определены события, вызывающие пожары в опасных ситуациях, и построены сценарии возникновения и распространения пожаров путем изучения аварии на нефтеперерабатывающем заводе в Адене, а также оценены выбросы в атмосферу масс легковоспламеняющихся веществ в результате пожароопасных ситуаций, определены комплексы факторов пожарной опасности для различных сценариев распространения, оценены последствия воздействия факторов пожарной опасности на людей, разработана основа для оценки рисков и управления ими.

Abstract. Aim. Accidents at oil and gas facilities are among the main causes of environmental pollution and loss of life. In the interests of solving the problem of ensuring the safety of oil and gas facilities, a review of the state of oil and gas facilities in the republic of Yemen was carried out, statistical data on accidents were analysed, defined the events that cause a fire in hazardous situations and build scenarios for the occurrence and development of fires through the study of an accident in the Aden refinery, also assessment of the mass of flammable substances entering the surrounding space as a result of fire hazardous situations, construction of fields of hazardous factors of fire for various scenarios of its development, assessment of the consequences of exposure to hazardous fire factors on people, and a base was developed for risk assessment and management.

Ключевые слова: нефтегазовые объекты, авария, дерево сценариев, тепловой поток, факторы опасности.

Keywords: oil and gas facilities, accident, scenario tree, heat flux, factors of hazardous.

Для цитирования: Аль-Раухани Н.М., Алехин В.Н. Оценка рисков в отношении резервуарных емкостей в нефтегазовой промышленности // Надежность. 2023. №2. С. 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-3-11>

For citation: Al-Rawhani N. M., Alekhin V. N. Risk assessment in storage tanks of the oil and gas industry. Dependability 2023;2:3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-3-11>

Поступила: 04.02.2023 / **После доработки:** 03.05.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 04.02.2023 / **Revised on:** 03.05.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение

Нефтегазовая промышленность в силу ее вклада в ВВП и государственный бюджет Йеменской Республики имела стратегическое значение для страны с момента ее открытия в середине восьмидесятых годов прошлого века и до сегодняшнего дня [1]. Большая часть экономики и, следовательно, огромное количество рабочих мест как прямо, так и косвенно зависят от нее. Таким образом, любое нарушение в ее работе может повлечь

значительный ущерб, а также экономические и экологические последствия.

Риски безопасности на объектах нефтегазовой промышленности существенны и должны оцениваться для определения того, являются ли принимаемые меры безопасности адекватными или нуждаются в усилении.

Целью настоящего исследования было оценить риски в отношении резервуаров для хранения нефти и газа и определить расстояние, которое должно разделять нефтегазовые и другие объекты (школы, дороги, больницы и т.д.).

Обзор состояния нефтегазовых объектов

Нефтегазовая отрасль в Йеменской Республике обладала стратегической значимостью с момента начала своего функционирования. По этой причине было спроектировано и построено множество объектов для хранения и транспортировки нефтегазовых продуктов.

В настоящей статье рассмотрены наиболее важные нефтегазовые объекты в Йеменской Республике (рис. 1).

А) Нефтеперерабатывающие заводы

В Йеменской Республике есть четыре нефтеперерабатывающих завода. Из них в настоящее время работают только нефтеперерабатывающие заводы в Адене и Марибе, а нефтеперерабатывающие заводы в Рас-Исе и Аль-Шахре не функционируют [2, 3].

1. Аденский нефтеперерабатывающий завод [4] – крупнейшее промышленное предприятие в стране и один из старейших нефтеперерабатывающих заводов в Йеменской Республике, построенный компанией British Petroleum в 1954 году. Мощность Аденского нефтеперерабатывающего завода составляет около 5 млн т нефти в год. В 1977 году он перешел в собственность государства. Хотя нефтеперерабатывающему заводу 66 лет, он по-прежнему достаточно эффективно функционирует благодаря постоянному техническому обслуживанию. Он перерабатывает около 170 тыс. баррелей нефти в сутки.

2. Марибский нефтеперерабатывающий завод – один из важнейших объектов по добыче нефти в Йемене, построенный американской нефтяной компанией Hunt в 1986 году. Мощность Марибского нефтеперерабатывающего завода составляет около 10 тыс. баррелей в сутки. В декабре 1995 года, после окончания действия договора с компанией Hunt, он стал собственностью Йемена [4].

Согласно исследованию Statistical Survey of World Energy, доказанные запасы газа в Йеменской Республике составляют 490 млрд кубометров, или около 0,3 процента от мирового объема. Большая часть газа находится на месторождениях Мариб – Аль-Джуф. Его в основном перекачивают для увеличения добычи нефти.

Йеменский экспортный завод по производству СПГ в г. Балхаф, открытый в 2009 году, находится в управлении французской нефтяной компании Total. Это крупнейший промышленный проект в Йеменской Республике, основанный на проверенном промышленном стандарте C3/MR API. Он состоит из двух параллельных технологических линий с общей гарантированной производительностью 6,7 млн метрических тонн газа в год. Кроме того, действуют два резервуара для хранения объемом 140 000 м³, а также вспомогательные сооружения, включая производство электроэнергии, опреснение, очистку сточных вод и выработку пара. Это позволяет заводу работать эффективно, надежно и экологично в соответствии с применимыми международными стандартами.

Б) Нефте- и газопроводы

Йеменская Республика располагает сетью нефтепроводов протяженностью 872 мили, которые связывают три крупные нефтяные провинции с пятью экспортными терминалами: Аден, Рас-Иса, Ходейда, Бир-Али и Аш-Шахр.

В 1985 году были спроектированы и построены первые 270 километров трубопроводов от бассейна Мариб до Рас-Исы, крупнейшего экспортного терминала в Красном море пропускной способностью 400 тыс. баррелей в день. Терминал Рас-Иса обслуживается танкером Safer и имеет хранилища емкостью 3 млн. баррелей.

В Йеменской Республике есть три основных маршрута транспортировки сырой нефти из районов добычи в морские порты как в Красном, так и в Аравийском морях. Есть соответственно три порта для экспорта сырой нефти на международный рынок:



Рис. 1. Нефтегазовые объекты в Йеменской Республике

1) Порт Рас-Иса расположен на Красном море в мухафазе Ходейда и представляет собой остров с резервуарным парком для погрузки и разгрузки судов с сырой нефтью на экспорт.

2) Порт Аш-Шахр (Даба), расположенный на берегу Аравийского моря в мухафазе Хадрамаут, который наделен правом загрузать и отправлять суда с сырой нефтью.

3) Порт Балхаф (Бир Али), расположенный на берегу Аравийского моря в мухафазе Шабва и уполномоченный загрузать и отправлять суда с сырой нефтью для экспорта из сектора Западный Айяд, использование которого ограничено ввиду небольшого объема производства в этом секторе и возможности подключения к соседним месторождениям. В этом порту имеется пять резервуаров емкостью 126 тыс. баррелей каждый. Порт был основан в 1990 году.

Трубопроводы неоднократно подвергались нападениям, что привело к сокращению объемов добычи и экспорта нефти.

По данным Министерства нефти и минеральных ресурсов Йеменской Республики, более 92 нефтегазовых объектов, включая нефтеперерабатывающие заводы, нефте- и газопроводы, порты, экспортные терминалы нефти и газа, автозаправочные станции, прекратили работу в период с 2011 по 2020 год из-за множества возникших на них проблем. По этой причине был проведен статистический анализ данных по несчастным случаям.

Анализ аварийности нефтегазовых объектов

Сбор и анализ данных об авариях широко признан углеводородной промышленностью в качестве важного элемента эффективной системы управления безопасностью. По этой причине нами были собраны и проанализированы данные по авариям, произошедшим за последние десять лет на нефтегазовых объектах Йеменской Республики. Информация включала в себя открытые данные органов гражданской обороны, а также сведения о сотрудниках нефтегазовых компаний.

Известно, что ежегодно в мире на объектах нефтепереработки происходит до 1500 происшествий, 4% из которых сопровождаются значительными человеческими жертвами. Ежегодный материальный ущерб от этих аварий превышает 100 миллионов долларов. Аварийность на предприятиях постоянно растет [6].

Основными сценариями чрезвычайных ситуаций, которые представляют опасность для предприятия и прилегающей территории, являются пожар, взрыв топливных агрегатов и аварийное химическое заражение. Так, за период с 2011 по 2020 год произошло 329 опасных происшествий, в том числе 171 пожар (51,98% от общего числа чрезвычайных ситуаций), 142 взрыва (43,16%), 16 выбросов опасных веществ (4,86%). На основании анализа причин произошедших опасных событий можно сделать вывод, что в большинстве случаев причина заключается в человеческом факторе (терроризм, нарушение

правил безопасности, технологического процесса), технических сбоях (отсутствие периодического осмотра и небрежность в процессе технического обслуживания), отсутствие оборудования и внешние воздействия, не предусмотренные конструкцией [7, 8, 9] (рис. 2).

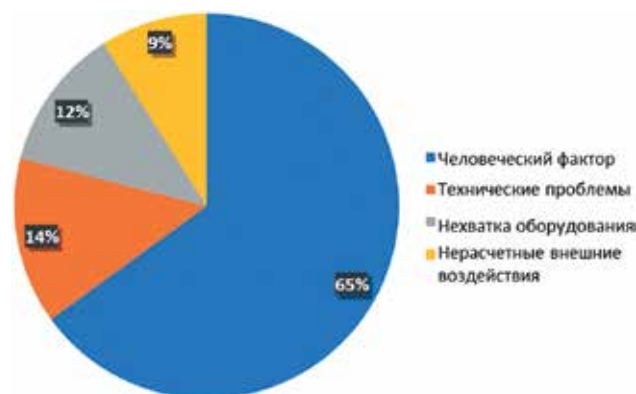


Рис. 2. Анализ причин аварий на нефтегазовых объектах в Йеменской Республике

Анализ результатов расследования причин аварий на нефтегазовых предприятиях Йеменской Республики за последние 10 лет (2011 – 2020 гг.) показывает, что неудовлетворительная работа служб обеспечения безопасности является их основной причиной. При этом значительная часть аварий на нефте- и газопроводах происходит из-за отсутствия необходимых средств защиты, отсутствия оборудования и внешних воздействий, не предусмотренных конструкцией [2, 9].

Практическое исследование

Авария с пожаром на нефтеперерабатывающем заводе в Адене

Одно из последних происшествий имело место 11 января 2019 года. После взрыва на нефтеперерабатывающем заводе в Адене произошел сильный пожар (рис. 3) [10]. По информации источников, взрыв произошел в одной из транспортных труб, после чего огонь перекинулся на резервуар № 313 и соседние резервуары. В результате ранения получили более 15 рабочих и пожарных [11]

По информации местного источника в правоохранительных органах причина аварии неизвестна. Источники в профсоюзных организациях на нефтеперерабатывающих заводах Адена указали, что пожар привел к обрушению опорных конструкций резервуара. Последние разделились на две части в результате эрозии металла. В силу небрежного отношения опасность угрожала всем резервуарам еще до пожара.

Согласно методологии [12, 13], для определения расчетных величин риска пожара на производственных объектах при анализе пожарной опасности объектов топливно-энергетического комплекса, где проходят процессы с использованием горючих газов и жидкостей, как правило, рассматриваются иницирующие события, связанные с разгерметизацией и полным квази-мгновен-

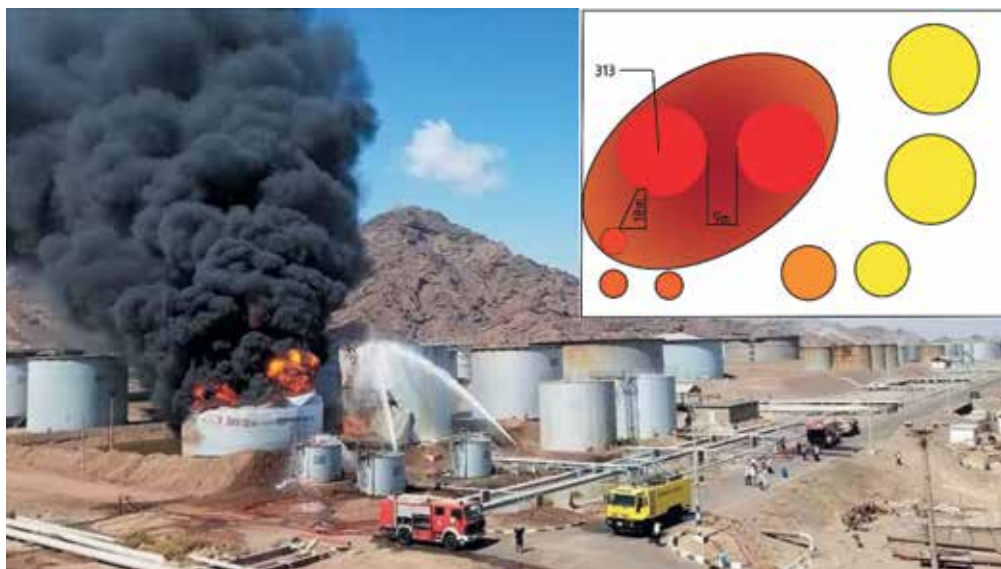


Рис. 3. Пожар на нефтеперерабатывающем заводе

ным разрушением каждой единицы технологического оборудования. Кроме того, при рассмотрении сценария развития пожароопасной ситуации необходимо учитывать все прочие факторы, включая силу и направление ветра, температуру жидкости, давление газа и др. Таким образом, применительно к производственному объекту, даже если число единиц его технологического оборудования относительно невелико, число сценариев распространения пожаров и взрывов, опасные факторы которых необходимо оценить, может достигать порядка тысячи, что практически невозможно без использования соответствующего программного обеспечения [14, 15].

Вначале определяются события, инициирующие пожароопасные ситуации, и строятся сценарии возникновения и распространения пожаров.

Для построения набора сценариев возникновения и развития пожароопасных ситуаций на рассматриваемом объекте был использован метод логических деревьев событий. Логические деревья событий, лежащие в основе оценки риска пожара для рассматриваемого объекта, строились на основе события, рассматриваемого в качестве инициирующего пожароопасные ситуации и пожары на нефтеперерабатывающем заводе:

- разгерметизация резервуаров с образованием разлива в насыпи;
- полное разрушение резервуаров с образованием разлива в насыпи и переливом части жидкости за пределы насыпи.

На рис. 4 показана частота возникновения событий, инициирующих пожароопасные ситуации для оборудо-

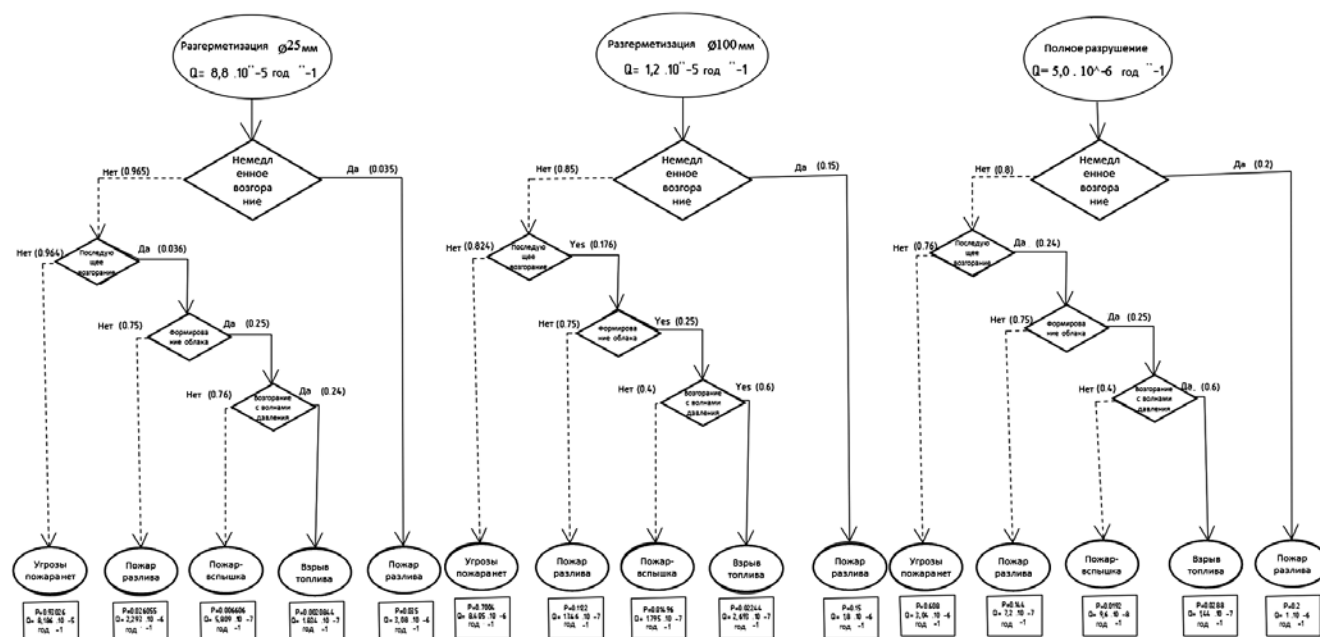


Рис 4. Дерево сценариев

вания нефтеперерабатывающего завода в Адене, взятая в соответствии с методикой определения расчетных значений риска пожара на производственных объектах (дерево сценариев) [16, 17].

Изучая сценарии пожара на объекте с помощью программного обеспечения «PromRisk» [15], мы можем узнать пределы наиболее масштабных сценариев, которые могут иметь место и с учетом которых мы можем спроектировать границы объекта и провести информирование работников на объекте и в прилегающих районах.

Мы можем провести оценку массы горючих веществ, попадающих в окружающее пространство в результате пожароопасных ситуаций.

Количество горючих веществ, попадающих в окружающее пространство, которые могут образовывать взрывоопасные газозвушнне смеси или разливы горючих сжиженных газов, легко воспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется исходя из следующих допущений:

а) в одном из резервуаров происходит рассчитанная авария;

б) все содержимое емкости или часть продукта попадает в окружающее пространство. В этом случае, если на объекте имеется несколько резервуаров, расчет следует проводить для каждого.

Масса жидкости, поступающей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, определяется по формуле:

$$m_i = V_i \cdot \rho_i, \quad (1)$$

где m_i – масса жидкости, кг; ρ_i – плотность жидкости, кг/м³; V_i – объем жидкости в резервуаре, м³.

Масса жидкости, поступающей самотеком при полном разрушении резервуара, определяется по формулам:

$$m_i = G_L \cdot \tau + \pi d_i^2 / 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho_i, \quad (2)$$

$$Q_i = \mu \cdot d^2 / 4 \cdot \sqrt{2gH_i}, \quad (3)$$

где m_i – масса жидкости, кг; ρ_i – плотность жидкости, кг/м³; G_L – начальная скорость потока жидкости, вытекающей из резервуара по разгерметизированному

трубопроводу, кг/с; τ – расчетное время остановки трубопроводов, связанное с разгерметизацией, с; Q_i – объемная скорость потока вытекающей жидкости; d_i – диаметр трубопроводов, м (в случае если диаметры трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, различаются, объем вытекающей жидкости рассчитывается для каждого трубопровода отдельно); L_i – длина i -го участка трубопровода от запорного устройства до места разгерметизации, м; n – число секций трубопровода, связанных с участком разгерметизации; H_i – высота столба жидкости (от верхнего уровня жидкости в резервуаре до уровня точки разгерметизации), м; μ – коэффициент экспирации; g – ускорение свободного падения, м/с² ($g = 9,81$).

Результаты расчета массы горючих веществ, попадающих в окружающее пространство в результате аварии, представлены в табл. 1.

На рис. 5 показаны области, в которые выбрасывается нефть из резервуара 313 и резервуара 306 с а) разгерметизацией Ø25 мм, б) разгерметизацией Ø100 мм, в) полным разрушением с попаданием в окружающее пространство в результате пожароопасных ситуаций.

Для локализации разлива топлива в случае аварии, а также для уменьшения площади разлива рекомендуется возводить монолитную железобетонную стену (насыпь) вокруг парка резервуаров таким образом, чтобы технические параметры устройства насыпи соответствовали объему резервуаров.

При построении наборов факторов пожарной опасности для различных сценариев учитывается следующее:

1) тепловое излучение при горении факела, горении разливов горючих веществ на поверхности и огненных шарах;

2) избыточное давление и импульс волны давления при сгорании парогазозвушной смеси в открытом пространстве;

3) избыточное давление и импульс волны давления при разрыве резервуара в результате воздействия огня;

4) осколки, образующиеся при взрывном разрушении элементов технологического оборудования;

5) расширение продуктов сгорания при быстром расширении пламени.

Табл. 1. Анализ расчета массы горючих веществ, попадающих в окружающее пространство в результате аварии

Тип оборудования		(Резервуар 313) 5000 м ³ нефти	(Резервуар 306) 100 м ³ нефти
Нарушение герметичности Ø25 мм	Площадь аварийного разлива нефти, м ²	424,4	268,4
	Масса разлитой жидкости, кг	15809,6	9998,9
	Масса образовавшихся паров, кг	481	304,2
Нарушение герметичности Ø100 мм	Площадь аварийного разлива нефти, м ²	6790,7	2000
	Масса разлитой жидкости, кг	252954,2	74500
	Масса образовавшихся паров, кг	7695,2	2266,4
Полное разрушение	Площадь аварийного разлива нефти, м ²	65027,8	11907,8
	Масса разлитой жидкости, кг	3725000	74500
	Масса образовавшихся паров, кг	73694,7	13494,9

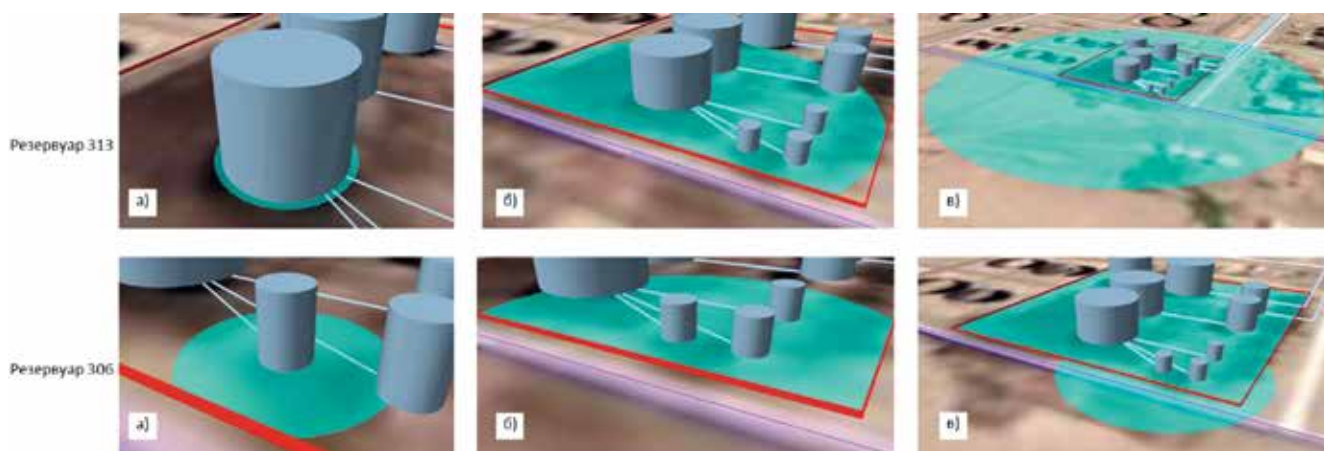


Рис. 5. Резервуары 313 и 306: а) – с разгерметизацией $\varnothing 25$ мм, б) – с разгерметизацией $\varnothing 100$ мм, в) – с полным разрушением

Тепловой поток (также называемый лучистым теплообменом, интенсивностью или плотностью теплового потока, тепловым излучением) – это часть тепловой энергии, проходящая через некоторую произвольную область в единицу времени. Тепловое излучение является разновидностью передачи энергии [18].

Тепловое излучение пламени зависит от многих факторов: диаметра зоны горения, температуры и размера пламени, концентрации сажи, различных химических компонентов продуктов сгорания и т.д. [19].

Интенсивность теплового излучения q , кВт/м², для пожара при разливе жидкости рассчитывается по формуле:

$$q = E_f F_q \tau, \quad (4)$$

где E_f – средняя поверхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²; F_q – геометрический

коэффициент видимости, который определяет долю энергии, излучаемой огнем, которая получается принимающим объектом (угловой коэффициент падающего излучения); τ – коэффициент прозрачности атмосферы к тепловому излучению.

Угловой коэффициент падающего излучения F_q определяется по формуле:

$$F_q = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}, \quad (5)$$

где F_v , F_h – коэффициенты падающего излучения в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно.

На рис. 6а показаны значения плотности теплового потока на различных расстояниях от края зоны пожара. На графике (рис. 6б) показаны зависимости теплового потока от расстояния от края пожара для всех указанных вариантов силы ветра. На графике (рис. 6в) показаны зависимости избыточного давления взрыва и импульса фазы сжатия на различных расстояниях от центра облака; г) – поле избыточного давления взрыва

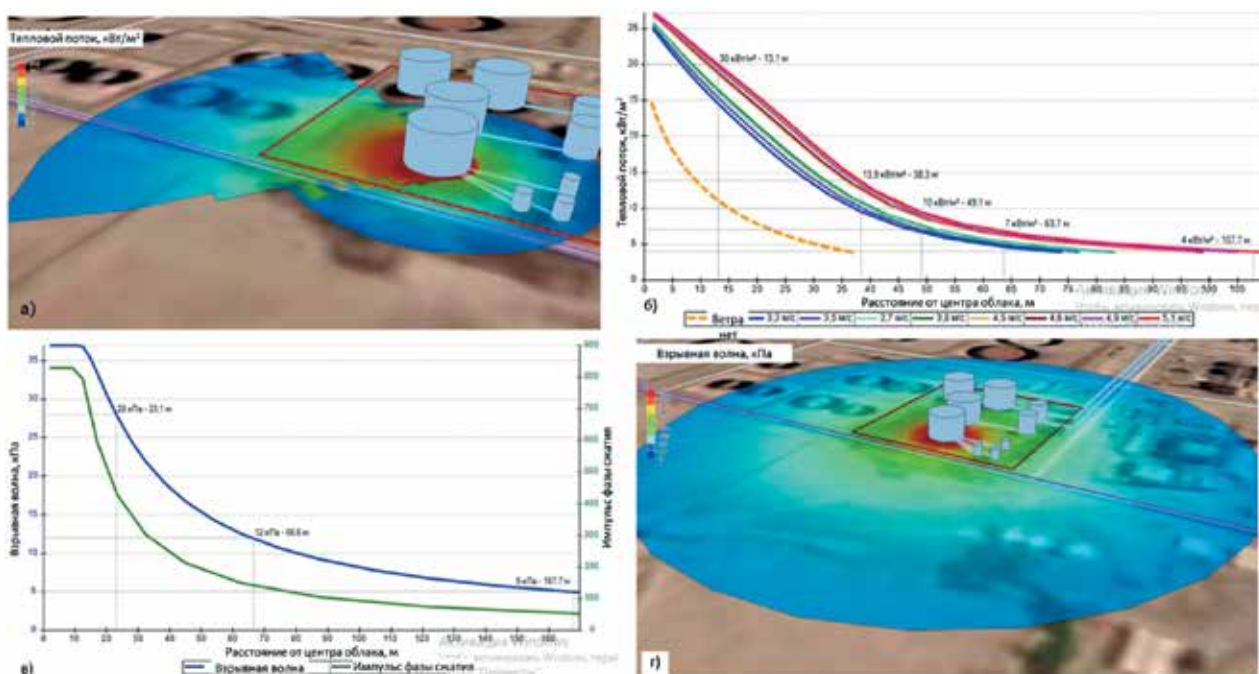


Рис. 6. Резервуар 313: а) – значения плотности теплового потока на различных расстояниях от края зоны пожара; б) – зависимости теплового потока от расстояния от края пожара для всех указанных вариантов силы ветра; в) – избыточное давление взрыва и импульс фазы сжатия на различных расстояниях от центра облака; г) – поле избыточного давления взрыва

потока от расстояния от края пожара для всех указанных вариантов силы ветра. На графике (рис. 6в) показано избыточное давление взрыва и импульс фазы сжатия на различных расстояниях от центра облака. На рис. 6г – поле избыточного давления взрыва в резервуаре 313.

Также для расчета условной вероятности поражения человека тепловым излучением в точке, расположенной на некотором расстоянии от края зоны пожара, используется формула:

$$Q_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) \cdot dU, \quad (6)$$

где Pr – значения функции вероятности.

Необходимо знать расстояние от точки до зоны, где интенсивность теплового излучения не превышает без-опасного значения (4 кВт/м^2).

На рис. 7а показаны значения условных вероятностей поражения человека тепловым излучением на различных расстояниях от края зоны пожара; а на рис. 7б график показывает зависимость условной вероятности поражения человека от расстояния от края пожара для всех приведенных вариантов силы ветра.

Результаты показывают, что при пожаре в резервуаре 313 интенсивность теплового излучения пожара увеличивается вместе с распространением горения. Максимальная интенсивность излучения в центре пламени составляет $43,1 \text{ кВт/м}^2$. Интенсивность излучения сначала снижается, а затем остается на уровне $24,8 \text{ кВт/м}^2$ в силу стабильности горения и эффекта атмосферной турбулентности. Высота пламени составляет около 23 метров, максимальная скорость дыма – $5,1 \text{ м/с}$.

Заключение

В работе проведен обзор опасных нефтегазовых объектов в Йеменской Республике. Проанализированы аварии на нефтегазовых объектах, произошедшие в Йеменской Республике за последние 10 лет (2011 – 2020 гг.)

Результаты расследования причин аварий на нефтегазовых предприятиях в Йеменской Республике показывают, что основная из них – неудовлетворительное состояние служб обеспечения безопасности, а большая часть аварий на нефтеперерабатывающих заводах про-

исходит из-за отсутствия необходимых средств защиты и периодических проверок, халатного отношения к техническому обслуживанию, отсутствия поправок на внешние факторы.

В результате расчетов были получены графики зависимостей опасных факторов пожара (плотности теплового потока для всех направлений и силы ветра, избыточного давления взрыва и импульса фазы сжатия) от расстояния до технологического оборудования, графики вероятности поражения людей во всех сценариях.

Все указанное дает возможность провести глубокий анализ пожарной опасности используемого технологического оборудования, а также разработать мероприятия, направленные на снижение пожарной опасности объекта и обеспечение требуемого уровня пожарной безопасности для людей: как работников предприятия, так и населения на прилегающей территории.

В соответствии с критериями ущерба/поражения, при интенсивности теплового излучения $37,5 \text{ кВт/м}^2$ в пределах 40,25 метров от интересующей точки до центра пожара пролива оборудование и здания могут быть полностью уничтожены, а люди погибнут в течение одной минуты [20]. При заданных условиях моделирования интенсивность теплового излучения составляет $24,8 \text{ кВт/м}^2$, а радиус поражения составляет 28,46 метра, что может вызвать повреждение соседних 5 резервуаров (306, 307, 315, 317, 318) и трубопроводов между резервуарами для хранения, а также вызвать вторичный пожар и взрыв.

Последствия аварии на нефтеперерабатывающем заводе в Адене очень серьезны. Полученные результаты имеют важное значение применительно к изучению закономерностей распространения пожаров, оценке их воздействия на окружающую среду и безопасному проектированию резервуаров для хранения.

Библиографический список

1. Al-Maitami M. Call to Resume Donor Support to Yemen // Yemen Socio-Economics Update. 2016. Issue 16. Pp. 1-6.
2. Energy Investment and Business Climate Report for Observer Countries the Republic of Yemen / T. Sufian,

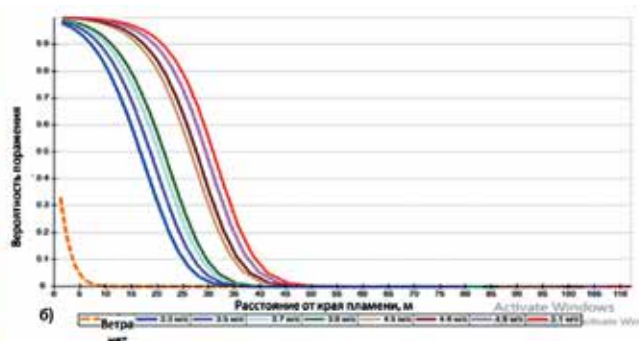
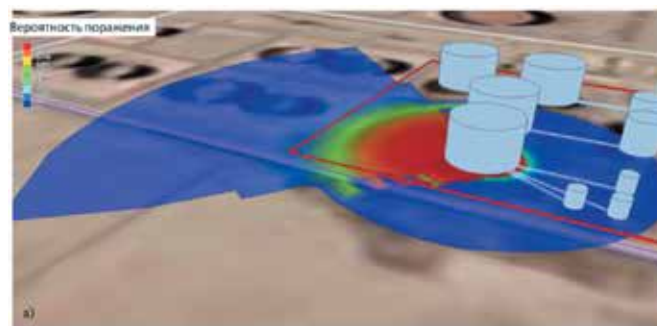


Рис. 7. а) – значения условных вероятностей поражения человека тепловым излучением на различных расстояниях от края зоны пожара; б) – график зависимости условной вероятности поражения человека от расстояния от края пожара для всех приведенных вариантов силы ветра

C. Ogutcu, M. Barra: Retrieved from Energy Charter Secretariat. 2017. 53 p. URL: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/Yemen_Investment_Report.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

3. Household Energy Supply and Use in Yemen: Volume I, Main Report. 2005. Dec. URL: https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/FR315-05_YEMEN_Household_Energy_Supply_Use_vol1.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

4. Yemen Extractive Industries Transparency Initiative (YEITI) Second Reconciliation. Final Report. 2013. June, 30th. URL: <https://s3.amazonaws.com/rgi-documents/fa1011b859e6d7bb2094b4a296803139d595d960.pdf> (дата обращения: 17.04.2023).

5. Is an ageing oil tanker threatening an environmental disaster off the coast of Yemen? / Conflict and Environment Observatory. 2018. May, 15th. URL: <https://ceobs.org/is-an-ageing-oil-tanker-threatening-an-environmental-disaster-off-the-coast-of-yemen/> (дата обращения: 17.04.2023).

6. Краснов А.В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю. и др. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007–2016 гг. // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2017. № 6. С. 179–191. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2017/ogbus_6_2017_p179-191_KrasnovAV_ru.pdf (дата обращения: 01.05.2023)

7. Morvan M., L'Hégaret P., Carton X. et al. Life cycle of mesoscale eddies in the Gulf of Aden Geophys // Ocean Science. 2019. Vol. 15. No. 6. Pp. 1531–1543.

8. Connelly C. Will Yemen Be a Gas Exporter Again? / The Arab Gulf States Institute in Washington. 2020. Mar, 10th. URL: <https://agsi.w.org/will-yemen-be-a-gas-exporter-again/> (дата обращения: 17.04.2023).

9. Sufian T. Post Conflict Reconstruction Strategy Study for the Electricity and Energy Sector of Yemen / International Energy Charter: Energy Charter Secretariat Knowledge Center, 2019. 84 p. URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2019-Yemen_paper_final.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

10. Watch: Violent explosion shakes Yemen's Aden refineries, massive fire breaks out / Alarabiya News. 2019. Jan, 11th. URL: <https://english.alarabiya.net/en/News/gulf/2019/01/11/Violent-explosion-shakes-Yemen-s-Aden-refineries-breaks-out-massive-fire> (дата обращения: 17.04.2023).

11. Explosion sparks fire at Aden refinery, cause unknown / Middle East Affairs. URL: http://arabic.news.cn/2019-01/13/c_137739312_5.htm (дата обращения: 01.05.2023).

12. Srivastava A., Gupta J.P. New methodologies for security risk assessment of oil and gas industry // Process Safety and Environmental Protection. 2010. Vol. 88. No. 6. Pp. 407–412.

13. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404, с изм.). URL: http://www.fireevacuation.ru/files/prikaz_404.pdf (дата обращения: 17.04.2023)

14. Кокорин В.В., Субачев С.В. Применение программного обеспечения PROMRISK при моделировании аварии на АЗС // Техносферная безопасность. 2018. № 4(21). С. 82–87.

15. Руководство пользователя PromRisk. URL: https://www.pyrosim.ru/download/PromRisk_manual.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

16. Гордиенко Д.М. Пожарная безопасность особо опасных и технически сложных производственных объектов нефтегазового комплекса: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / Гордиенко Денис Михайлович ; ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. М., 2004. – 48 с. : ил. Библиогр. : с. 35. URL: <https://academygps.ru/upload/iblock/83e/83e404c-3baaf11a6dec4af7587e8721b.pdf> (дата обращения: 17.04.2023).

17. Галеев А.Д., Поникаров С.И. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. 152 с.

18. Fleury R. Evaluation of Thermal Radiation Models for the Propagation of Fire between Objects: Master Thesis in Fire Engineering / Faculty of Civil and Natural Resources, University of Canterbury. Christchurch, New Zealand, 2010.

19. Labovská Z., Labovský J. Estimation of thermal effects on receptor from pool fires // Acta Chimica Slovaca. 2016. Vol. 9. No. 2. Pp. 169–179.

20. Zhang M., Song W., Wang J. et al. Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike // Procedia Engineering. 2014. Vol. 84. Pp. 565–577.

References

1. Al-Maitami M. Call to Resume Donor Support to Yemen. *Yemen Socio-Economics Update* 2016;16:1–6.

2. Sufian T., Ogutcu C., Barra M. Energy Investment and Business Climate Report for Observer Countries the Republic of Yemen. In: Energy Charter Secretariat; 2017. (accessed: 17.04.2023). Available at: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/Yemen_Investment_Report.pdf.

3. Household Energy Supply and Use in Yemen: Volume I, Main Report; 2005. Dec. (accessed: 17.04.2023). Available at: https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/FR315-05_YEMEN_Household_Energy_Supply_Use_vol1.pdf.

4. Yemen Extractive Industries Transparency Initiative (YEITI) Second Reconciliation. Final Report. 2013. June, 30th. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://s3.amazonaws.com/rgi-documents/fa1011b859e6d7bb2094b4a296803139d595d960.pdf>.

5. Is an ageing oil tanker threatening an environmental disaster off the coast of Yemen? Conflict and Environment Observatory; 2018. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://ceobs.org/is-an-ageing-oil-tanker-threatening-an-environmental-disaster-off-the-coast-of-yemen/>.

6. Sustainable Development Strategy of the Company About the Company Corporate Governance Operating Results Information for Shareholders and Investors. (accessed 04.12.2020). Available at: www.rosneft.com.

7. Morvan M., L'Hégaret P., Carton X. et al. Life cycle of mesoscale eddies in the Gulf of Aden Geophys. *Ocean Science* 2019;15(6):1531-1543.

8. Connelly C. Will Yemen Be a Gas Exporter Again? The Arab Gulf States Institute in Washington; 2020. Mar, 10th. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://agsiw.org/will-yemen-be-a-gas-exporter-again/>.

9. Sufian T. Post Conflict Reconstruction Strategy Study for the Electricity and Energy Sector of Yemen. International Energy Charter: Energy Charter Secretariat Knowledge Center; 2019. (accessed 04.2023). Available at: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2019-Yemen_paper_final.pdf.

10. Watch: Violent explosion shakes Yemen's Aden refineries, massive fire breaks out. Alarabiya News; 2019. Jan, 11th. (accessed: 17.04.2023). Available at: <https://english.alarabiya.net/en/News/gulf/2019/01/11/Violent-explosion-shakes-Yemen-s-Aden-refineries-breaks-out-massive-fire>.

11. Explosion sparks fire at Aden refinery, cause unknown. Middle East Affairs. (accessed 01.05.2023). Available at: http://arabic.news.cn/2019-01/13/c_137739312_5.htm.

12. Srivastava A., Gupta J.P. New methodologies for security risk assessment of oil and gas industry. *Process Safety and Environmental Protection* 2010;88(6):407-412.

13. [Method for defining target values of fire hazard in manufacturing facilities (approved by order of EMERCOM of Russia dated 10.07.2009 no. 404, as amended)]. (accessed 17.04.2023). Available at: http://www.fireevacuation.ru/files/prikaz_404.pdf.

14. Kokorin V.V., Subachev S.V. Application of the PROMRISK software for simulating accidents at gas stations. *Technosphere safety* 2018;4(21): С. 82-87. (in Russ.)

15. PromRisk user guide. (accessed 17.04.2023). Available at: https://www.pyrosim.ru/download/PromRisk_manual.pdf.

16. Gordienko D.M. [Fire safety of highly dangerous and technically complex industrial facilities of the oil and gas industry: abstract of a Doctor of Engineering thesis: 05.26.03. ФГБУ All-Russian Badge of Honour Research Institute of Fire Defence of the EMERCOM of Russia. Moscow; 2004. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://academygps.ru/upload/iblock/83e/83e404c3baaf11a6de-c4af7587e8721b.pdf>.

17. Galiaev A.D., Ponikarov S.I. [Analysis of the risk of accidents at hazardous manufacturing facilities]. Kazan: Kazan National Research Technological University; 2017. (in Russ.)

18. Fleury R. Evaluation of Thermal Radiation Models for the Propagation of Fire between Objects: Master Thesis in Fire Engineering. Faculty of Civil and Natural Resources, University of Canterbury. Christchurch, New Zealand; 2010.

19. Labovská Z., Labovský J. Estimation of thermal effects on receptor from pool fires. *Acta Chimica Slovaca* 2016;9(2):169-179.

20. Zhang M., Song W., Wang J. et al. Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. *Procedia Engineering* 2014;84:565-577.

Сведения об авторах

Аль-Раухани Нор Аддин Мохаммед Ахмед – аспирант (3 курс, специальность 08.06.01 Техника и технологии строительства) кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства Институт строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Свердловская область, Российская Федерация, 620002, e-mail: Nal-raukhani@urfu.ru.

Алехин Владимир Николаевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства Институт строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Свердловская область, Российская Федерация, 620002.

About the authors

Al-Rawhani Nor Addin Mohammad Ahmed, Post-graduate Student (3-rd year, program 08.06.01 Construction Technology and Processes), Department of Automated Design Systems in Construction, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University, 19 Mira st., 620002, Yekaterinburg, Sverdlovsk Oblast, Russian Federation, e-mail: Nal-raukhani@urfu.ru.

Vladimir N. Alekhin, Candidate of Engineering, Professor, Head of Department of Automated Design Systems in Construction, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University, 19 Mira st., 620002, Yekaterinburg, Sverdlovsk Oblast, Russian Federation.

Вклад авторов в статью

Аль-Раухани Н.М. – формулировка и развитие ключевых целей и задач, сбор, анализ и интерпретация исходных данных, разработка методологии исследования, создание моделей, проведение статистического анализа.

Алехин В.Н. – научное руководство работой, критический пересмотр рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания, участие в научном дизайне, подготовка окончательной версии работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.