

УДК 614.849

**ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ НА УСТАНОВКАХ
ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**FIRE HAZARD ASSESSMENT AT OIL REFINING PLANTS
BASED ON STOCHASTIC MODELING**

Александр Юрьевич Бруслиновский, Гафур Халафович Самигуллин

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, Россия**

Aleksandr Yu. Bruslinovsky, Gafur Kh. Samigullin

**Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
Saint-Petersburg, Russia**

e-mail: alexander.bruslinovsky@mail.ru

Аннотация. В статье приведена оценка негативного воздействия опасных факторов, возникающих в условиях пожароопасной ситуации, показано, что совместное воздействие теплового потока и внутреннего избыточного давления может привести к разгерметизации и разрушению аппарата, что может вызвать каскадное развитие опасной ситуации. Предлагается применение математической модели для оценки вероятности сохранения целостности стенок оборудования, что обеспечит оценку возможности предотвращения «эффекта домино».

Abstract. An assessment of the negative impact of dangerous factors arising in a fire-hazardous situation is carried out, it is shown that the combined effect of heat flow and internal overpressure can lead to depressurization and destruction of the device, which can cause a cascade development of a

dangerous situation. It is proposed to use a mathematical model to assess the probability of maintaining the integrity of the walls of the equipment, which will provide an assessment of the possibility of preventing the «domino effect».

Ключевые слова: технологическое оборудование, аварийная ситуация, нормальный закон распределения, среднеквадратичное отклонение, математическое ожидание, каскадное развитие аварии

Keywords: technological equipment, emergency, normal distribution law, standard deviation, mathematical expectation, cascade development of an accident

Проблема обеспечения безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования и трубопроводов, эксплуатируемых в составе технологических установок на нефтегазовых производствах, является чрезвычайно острой и актуальной [1, 2]. Реализуемые в настоящее время научно-технические исследования, направленные на повышения качества технического регулирования производственной сферы в области обеспечения безопасности, надежности и ресурса, должны обеспечить нормативные требования по защищенности промышленного оборудования, элементов инфраструктуры, производственного персонала и населения. Достижение требуемого уровня безопасности и минимизация последствий аварий на предприятиях переработки углеводородного сырья диктует необходимость дальнейшего развития и совершенствования методического обоснования мероприятий по безаварийной эксплуатации нефтегазового оборудования и трубопроводов [3, 4].

Значительное конструктивное разнообразие применяемого оборудования на технологических установках по переработке нефти и газа, крупнотоннажные масштабы промышленных технологий, широкий диапазон пожароопасных свойств исходного углеводородного сырья, промежуточных компонентов и товарных нефтепродуктов обуславливают

чрезвычайно высокий уровень потенциальной опасности, образующийся при эксплуатации производственных объектов нефтегазовых предприятий. Априорно всегда существует некоторая потенциальная угроза, могущая привести к негативным событиям в виде отказов, аварий и поломок вследствие разгерметизации емкостного оборудования, агрегатов и технологических трубопроводов. При этом высока вероятность последующего развития локальных аварийных ситуаций до катастрофических масштабов, сопровождающихся пожарами и взрывами, приводящими к значительным материальным потерям, экологическому ущербу и поражению производственного персонала, сопровождающемуся различными увечьями и травмами, включая летальные исходы. В данной цепи негативных событий наиболее неблагоприятным вариантом развития будет являться сценарий, при котором опасные факторы, возникающие при развитии аварийной ситуации, будут инициировать дальнейшие повреждения либо разрушения и разгерметизацию технологического оборудования, что, безусловно, приведет к увеличению количества горючих веществ, участвующих в формировании чрезвычайных ситуаций. Данный характер развития событий классифицируется как прогрессирующее разрушение, проявляющееся в специфическом эффекте «домино», под которым понимаются «...неблагоприятные сценарии развития аварийной ситуации, при которых (вследствие несовершенства систем защиты и (или) неверных действий персонала) возможен выход поражающих факторов аварии за пределы аварийного блока, оборудования или объекта и вовлечение опасного вещества, находящегося в расположенном рядом неаварийном оборудовании, в последующую стадию развития аварии.» [5].

Зарубежными специалистами было установлено [5], что наиболее часто (55–80 %) реализуются аварии с последующим развитием каскадного характера при хранении автомобильных и авиационных моторных топлив, летучих растворителей, смесей углеводородных газов в различных

агрегатных состояниях, причем увеличение тоннажности хранения и минимизация площадей промышленных площадок значительно увеличивают возможные негативные эффекты.

Несмотря на значительные успехи в сокращении общей аварийности на опасных производственных объектах нефтегазовых производств [6], сохраняется актуальность в области разработки методов оценки опасности нефтегазового оборудования и трубопроводов на основе оценки вероятности реализации каскадного характера развития аварийной ситуации для повышения эффективности систем управления техносферными и пожарными рисками, а также поддержки принимаемых управленческих решений. При этом попытки исследователей сфокусированы на разработке универсальных моделей для комплексной оценки уровня рисков различной природы в условиях нефтегазовых производств при наличии локального источника опасности и возникающих при этом опасных факторов [7, 8].

В связи с этим, прогнозирование каскадного развития аварийной ситуации является достаточно сложной проблемой, поскольку на динамику данного процесса значительное влияние будет оказывать большое число трудно формализуемых факторов – степень совершенства технологических процессов, качество проектирования оборудования, насыщенность пространства технологическими аппаратами, уровень квалификации персонала, погодно-климатические условия и т.д. Вместе с тем, очевидным является предположение, что главным условием, предотвращающим прогрессирующий характер чрезвычайной ситуации, будет обеспечение целостности аппаратов и трубопроводов, которое можно условно обозначить выражением:

$$N \leq G, \quad (1)$$

где N – совокупность негативных факторов: внутренние - избыточное давление и температура технологической среды в оборудовании,

внешние – возникающие при аварии или пожаре – импульс волны давления, тепловое излучение и т.д.;

G – способность материала оборудования воспринимать внешние и внутренние негативные факторы (прочность, несущая способность и др.)

Для предварительной оценки уровня негативного воздействия технологической среды и опасных факторов на техническое состояние оборудования на примере сепаратора типовой установки термического крекинга в условиях гипотетического пожара были проведены расчеты по методике [9], результаты расчетов приведены в таблице 1.

Исходные данные: технологическая среда – бензиновая фракция, диаметр аппарата – 1,5 м, толщина стенки – 12 мм, рабочее давление 1,8 МПа, рабочая температура – 50 °С, материал стенки – сталь 09Г2С, допускаемые напряжения при расчетной температуре – 188,9 МПа.

Таблица 1. Результаты расчетов механических напряжений при воздействии теплового потока на стенки аппарата

Table 1. The results of calculating mechanical stresses when a heat flow is applied to the walls of the apparatus

Характеристики технического состояния	Температура, °С				
	50	60	70	80	90
Механические напряжения от действия внутреннего давления, МПа	123,7	127,5	131,4	135,2	139,1
Механические напряжения от действия теплового излучения, МПа	0	25,2	50,4	75,6	100,8
Суммарные напряжения, МПа	123,7	152,7	181,8	210,8	239,9
Допускаемы напряжения, МПа	188,9	186,5	184,1	181,7	179,3

Приведенные в таблице 1 результаты свидетельствуют о том, что повышение температуры стенки свыше 60 °С аппарата приводит к нарушению его работоспособности и приводит к возникновению риска разгерметизации, соответственно увеличивает количество горючего вещества, участвующего в пожаре с возможным каскадным развитием

пожароопасной ситуации. Графическая интерпретация результатов расчетов приведена на рисунке 1.

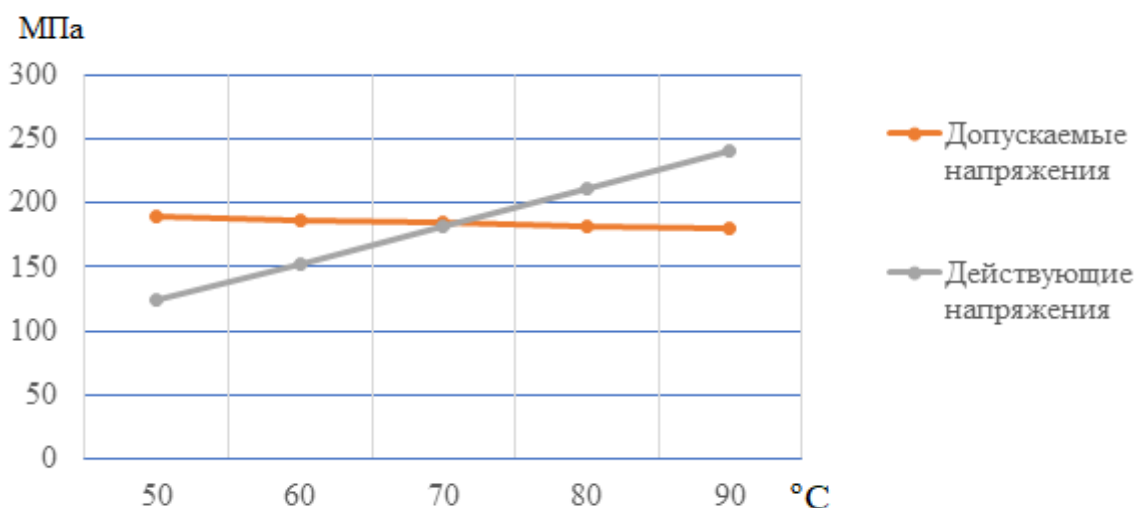


Рисунок 1. Сопоставление действующих и допускаемых напряжений в стенках аппарата в условиях пожара

Figure 1. Comparison of the effective and permissible stresses in the walls of the apparatus under fire conditions

Проведенный анализ пожароопасной ситуации выполнен в квазистационарных условиях, без учета динамического характера воздействия теплового потока на оборудование, при отсутствии теплоизоляции на аппарате и не учитывает теплофизические свойства технологической среды и материала стенки оборудования. В такой детерминистической постановке конечное решение задачи прогнозирования развития опасной ситуации представляется весьма трудоемким и малоперспективным.

Для оценки вероятности реализации каскадного развития пожароопасной ситуации на установках переработки нефти был разработан алгоритм на основе стохастического моделирования.

При этом был принят ряд упрощений и допущений, основным из которых является возможность описания указанных явлений с помощью

аппарата случайных чисел. Приведенные в неравенстве (1) величины, в условиях недостаточной либо недостоверной информации, могут быть представлены с помощью классических законов распределения, при известных значениях математического ожидания (МО) и среднеквадратичного отклонения (СКО).

В соответствии с положениями, приведенными в работе [10], применяя зависимости закона распределения функции случайного аргумента, получим выражения:

$$f(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_N} \exp \left[-\frac{(N-M_N)^2}{2S_N^2} \right]; \quad (2)$$

$$f(G) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_G} \exp \left[-\frac{(G-M_G)^2}{2S_G^2} \right], \quad (3)$$

где $f(N)$, $f(G)$ – функции распределения соответственно для совокупно действующих технологических воздействий (нагрузок) и несущей способности (механической прочности) материала стенок оборудования;

M_N , M_G – соответственно значения МО для совокупно действующих технологических воздействий (нагрузок) и несущей способности (механической прочности) материала стенок оборудования;

S_N , S_G – значения СКО для совокупно действующих технологических воздействий (нагрузок) N и несущей способности (механической прочности) материала стенок оборудования G .

Разность $G-N$ также будет распределена по нормальному закону $g(G-N)$ с математическим ожиданием M_g и дисперсией D_g :

$$M_g = M_G - M_N; \quad (4)$$

$$D_g = D_N + D_G; \quad (5)$$

$$S_g = \sqrt{D_g}, \quad (6)$$

где g – искомая функция распределения случайной величины $(G - N)$;

M_g , D_g , S_g – значения МО, дисперсии и СКО разности $(G - N)$;

D_N, D_G – дисперсии соответственно для совокупных действующих нагрузок и несущей способности (прочности) материала.

Герметичность технологических аппаратов и трубопроводов можно будет оценить при условии наличия известных параметров распределения $g(G - N)$, по расчетному значению вероятности, определяемому по выражению:

$$P(0 < R - Q < \infty) = \int_0^{\infty} g(R - Q) d(R - Q) = \Phi\left(\frac{M_g}{S_g}\right), \quad (7)$$

где $\Phi\left(\frac{M_g}{S_g}\right)$ – табличная функция нормального распределения.

Герметичность аппарата будет обеспеченной, если в ходе реализации аварийной ситуации значение вероятности, вычисленное по выражению (7), будет близка к единице.

Соответственно, риск разгерметизации аппарата H можно оценить по формуле:

$$H = 1 - P, \quad (8)$$

где P – вероятность сохранения герметичности при возникновении пожароопасной ситуации;

В алгоритме оценки технического состояния оборудования учитываются взаимно конкурирующие процессы: с одной стороны, увеличение интенсивности технологических нагрузок в совокупности с опасными факторами аварии либо пожара; с другой стороны, накопление повреждений и снижение прочности материала при повышении температуры стенок оборудования и технологической среды. Графически данные встречно направленных процессов изображены на рисунке 2.



w – область риска возникновения аварии;
 x_1 – начальный момент времени;
 x_2 – расчетный момент времени

Рисунок 2. Графическая иллюстрация принципа оценки состояния герметичности технологического оборудования

Figure 2. Graphic illustration of the principle of assessing the state of the tightness of technological equipment

Техническое состояние рассматриваемого аппарата будет характеризоваться некоторой величиной диапазона $(X_1 - X_2)$, которую можно отождествлять с показателем резерва работоспособности, а увеличивающаяся область пересечения двух функций распределения $f(N)$ и $f(G)$ позволяет оценить вероятность возможной разгерметизации либо полного разрушения технологического аппарата при наступлении случая $(X_1 - X_2) = 0$, что физически будет означать момент наступления равенства действующих нагрузок и механической прочности материала.

Вывод

Таким образом, на основе анализа негативного воздействия опасных факторов пожара, приводящих к повышению температуры более чем на 20°C , происходит потеря прочности материала стенок аппаратов из-за воздействия теплового потока, возникают значительные тепловые напряжения в совокупности с напряжениями от действия внутреннего

избыточного давления, что в совокупности может привести к разгерметизации либо разрушению аппарата. Для недопущения подобных ситуаций предлагается проведение оценки вероятности каскадного развития чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазовых производств основе модели, основанной на определении вероятности разгерметизации технологического оборудования, работающего под избыточным давлением.

Список источников

1. Краснов А.В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю., Мухин И.А. 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: 19.10.2021).
2. Хуснутдинова С.М., Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф., Мингазетдинов Р.Ф. Расчет удельной массовой скорости выгорания нефтепродуктов // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2021. № 2. С. 5-14. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2021/ogbus_2_2021_p5-14.pdf (дата обращения: 19.10.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2021-2-5-14.
3. Хафизов Ф.Ш., Хафизов И.Ф., Карпова А.Ю., Султанов Р.М., Шарафутдинов А.А. Анализ критериев пожарной опасности блока газопоршневой генераторной установки // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. Вып. 4 (114). С. 121-128. DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-4-121-128.
4. Samigullin G., Schipachev A., Samigullina L. Control of Physical and Mechanical Characteristics of Steel by Small Punch Test Method // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1118. Article Number 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012038.

5. Азаров Н.И., Давидюк О.В., Кошовец Н.В., Лисанов М.В. Анализ возможности каскадного развития аварии на взрывопожароопасных объектах // Безопасность труда в промышленности. 2007. № 5. С. 42-47.

6. Kovshova Y.S., Kuzeev I.R., Naumkin E.A. The Assessment of Damage and Resource of Vessel and Apparatus Elements, Taking into Account the Adaptation of the Material to Long-Term Quasistatic Loading // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1515. Article Number 052056. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052056.

7. Abdrakhmanov N.Kh., Fedosov A.V., Shaibakov R.A., Abdrakhmanova K.N., Sharipov G.A., Kozlowski W. Organization of Safe Management of Fire Operations on Gas Pipelines // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. 2019. № 6 (382). С. 272-279.

8. Тангирова К.Б., Киреев И.Р., Абдрахманова К.Н. Определение сценариев возможных аварий в пункте подготовки и сбора нефти // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2020. № 1. С. 89-107. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2020/ogbus_1_2020_p89-107.pdf (дата обращения: 19.10.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2020-1-89-107.

9. Абдрахманова К.Н., Шабанова В.В., Федосов А.В., Абдрахманов Н.Х. Применение моделирования процесса развития аварии и оценки риска в целях обеспечения безопасной эксплуатации объектов нефтегазового комплекса // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 2. С. 2-13. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-2-13.

10. Самигуллин Г.Х. Оценка надежности и ресурса производственных зданий нефтегазовых предприятий на основе критериев живучести // Безопасность труда в промышленности. 2016. № 2. С. 64-67.

References

1. Krasnov A.V., Sadykova Z.Kh., Perezhgin D.Yu., Mukhin I.A. Statistika chrezvychainykh proisshestvii na ob"ektakh neftepererabatyvayushchei i neftekhimicheskoi promyshlennosti za 2007-2016 gg. [Statistics of Emergency Accidents in the Refining and Petrochemical Industry for the 2007-2016 Years]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2017, No. 6, pp. 179-191. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2017/ogbus_6_2017_p179-191_KrasnovAV_ru.pdf (accessed 19.10.2021). [in Russian].
2. Khusnutdinova S.M., Khafizov F.Sh., Khafizov I.F., Mingazetdinov R.F. Raschet udel'noi massovoi skorosti vygoraniya nefteproduktov [Calculation of the Specific Mass Burn-Up Rate of Petroleum Products]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2021, No. 2, pp. 5-14. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2021/ogbus_2_2021_p5-14.pdf (accessed 19.10.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2021-2-5-14. [in Russian].
3. Khafizov F.Sh., Khafizov I.F., Karpova A.Yu., Sultanov P.M., Sharafutdinov A.A. Analiz kriteriev pozharnoi opasnosti bloka gazoporshnevoi generatornoi ustanovki [Analysis of Fire Hazard Criteria for the Gas Reciprocating Unit]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov – Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2018, Issue 4 (114), pp. 121-128. DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-4-121-128. [in Russian].
4. Samigullin G., Schipachev A., Samigullina L. Control of Physical and Mechanical Characteristics of Steel by Small Punch Test Method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1118, Article Number 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012038.

5. Azarov N.I., Davidyuk O.V., Koshovets N.V., Lisanov M.V. Analiz vozmozhnosti kaskadnogo razvitiya avarii na vzryvopozharoopasnykh ob"ektakh [Analysis of the Possibility of Cascade Development of an Accident at Explosive and Fire Hazardous Facilities]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2007, No. 5, pp. 42-47. [in Russian].

6. Kovshova Y.S., Kuzeev I.R., Naumkin E.A. The Assessment of Damage and Resource of Vessel and Apparatus Elements, Taking into Account the Adaptation of the Material to Long-Term Quasistatic Loading. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1515, Article Number 052056. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/5/052056.

7. Abdrakhmanov N.Kh., Fedosov A.V., Shaibakov R.A., Abdrakhmanova K.N., Sharipov G.A., Kozlowski W. Organization of Safe Management of Fire Operations on Gas Pipelines. *Vestnik Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan – Bulletin of the National Academy of Sciences of Republic of Kazakhstan*, 2019, No. 6 (382), pp. 272-279.

8. Tangirova K.B., Kireev I.R., Abdrakhmanova K.N. Opredelenie stsensariy vozmozhnykh avarii v punkte podgotovki i sbora nefi [Identification of Possible Accident Scenarios at Oil Treatment and Gathering Point]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2020, No. 1, pp. 89-107. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2020/ogbus_1_2020_p89-107.pdf (accessed 19.10.2021). DOI: 10.17122/ogbus-2020-1-89-107. [in Russian].

9. Abdrakhmanova K.N., Shabanova V.V., Fedosov A.V., Abdrakhmanov N.Kh. Primenenie modelirovaniya protsessa razvitiya avarii i otsenki riska v tselyakh obespecheniya bezopasnoi ekspluatatsii ob"ektov neftegazovogo kompleksa [Application of Emergency Process Development Modeling and Risk Assessment to Ensure Safe Operation of Oil and Gas Industrial Facilities]. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnnykh sistem – Safety of Technogenic and Natural Systems*, 2020, No. 2, pp. 2-13. DOI: 10.23947/2541-9129-2020-2-2-13. [in Russian].

10. Samigullin G.Kh. Otsenka nadezhnosti i resursa proizvodstvennykh zdaniy neftegazovykh predpriyatii na osnove kriteriev zhivuchesti [Assessment of Reliability and Service Life of Production Buildings of Oil and Gas Enterprises on the Basis of Survival Criterion]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2016, No. 2, pp. 64-67. [in Russian].

Сведения об авторах

About the Authors

Бруслиновский Александр Юрьевич, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Aleksandr Yu. Bruslinovsky, Post-Graduate Student of Training of Highly Qualified Personnel Faculty, Saint Petersburg University State Fire Service EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

e-mail: alexander.bruslinovsky@mail.ru

Самигуллин Гафур Халафович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

Gafur Kh. Samigullin, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Training of Highly Qualified Personnel Faculty, Saint Petersburg University State Fire Service EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

e-mail: samigullin.g@igps.ru