

УДК 614.8

otrid@rambler.ru

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДА  
ПРИ ДЕСТРУКТИВНОМ СОБЫТИИ НА НЕФТЕПРОВОДЕ****ASSESSMENT OF THE DEGREE OF THE HAZARD  
OF HYDROCARBON BURNING DURING A DESTRUCTIVE  
EVENT ON THE OIL PIPELINE**

*Королев Д. С., кандидат технических наук,  
Воронежский государственный технический университет, Воронеж*

*Korolev D.,  
Voronezh state technical university, Voronezh*

В рамках санкционной политики, проводимой странами Европейского союза, США и другими против Российской Федерации, возникла необходимость срочной диверсификации нефтяных потоков в страны Азии. Однако транспортирование кислородсодержащих углеводов – сложный, взрывоопасный технологический процесс. В работе рассматривается ситуация, когда в сети нефтепровода возникает гидроудар, что провоцирует быстрое распространение углеводородов. Вследствие чего проводится анализ пожарной опасности, разрабатывается дерево событий и предлагаются пробит-функции по определению негативного воздействия на людей. Установлено, что реализация наиболее опасного сценария может унести человеческие жизни, при этом вероятность реализации такого события составляет 0,0000006. Столь низкий показатель характеризует не степень опасности ситуации, а малую вероятность возникновения взрыва при разливе нефти. Однако ситуация кардинально изменится, если в качестве транспортируемого вещества будет выступать взрывоопасный состав.

*Ключевые слова:* пожарная безопасность, технологический процесс, нефтепродукты, транспортирование, вероятность.

As part of the sanctions policy pursued by the countries of the European union, the United States of America and others against the Russian Federation, there was an urgent need to diversify oil flows to Asian countries. However, the process of transporting oxygen-containing carbohydrates is a complex, explosive technological process. The paper considers a situation when a water hammer occurs in the oil pipeline network, which contributes to the rapid spread of hydrocarbons. As a result, a fire hazard analysis is carried out, an event tree is developed and probit functions are proposed to determine the negative impact on people. It is established that the implementation of the most dangerous scenario will be able to take away human life, while the probability of such an event will be 0.0000006. Such a low indicator characterizes not the degree of danger of the situation, but the low probability of an explosion during an oil spill. However, the situation will change dramatically if an explosive composition acts as the transported substance.

*Keywords:* fire safety, technological process, oil products, transportation, probability.

В ресурсно-сырьевой и крупным производителем, потребителем и технологической базе мировой энергетики экспортером кислородсодержащих Российская Федерация занимает углеводородов. При этом основной целью уникальное место, являясь одновременно развития отрасли является максимальное

содействие социально-экономическому становлению страны, а также укреплению и сохранению позиций на мировой арене [1].

Согласно статистическим данным, представленным на рис. 1 добыча нефти и газового конденсата в общем эквиваленте выросла на 14 % в сравнении с ранними периодами, что обусловлено широкомасштабным освоением месторождений в Восточной Сибири,

Республике Саха и Каспийского моря. В настоящее время на полную мощность вышел нефтеналивной терминал «Ворота Арктики», на который сырье поступает с Приразломного месторождения, расположенного на арктическом континентальном шельфе. Таким образом, достигнутый уровень добычи существенно превышает внутренние потребности страны [2].

## Динамика изменения добычи нефти на территории РФ

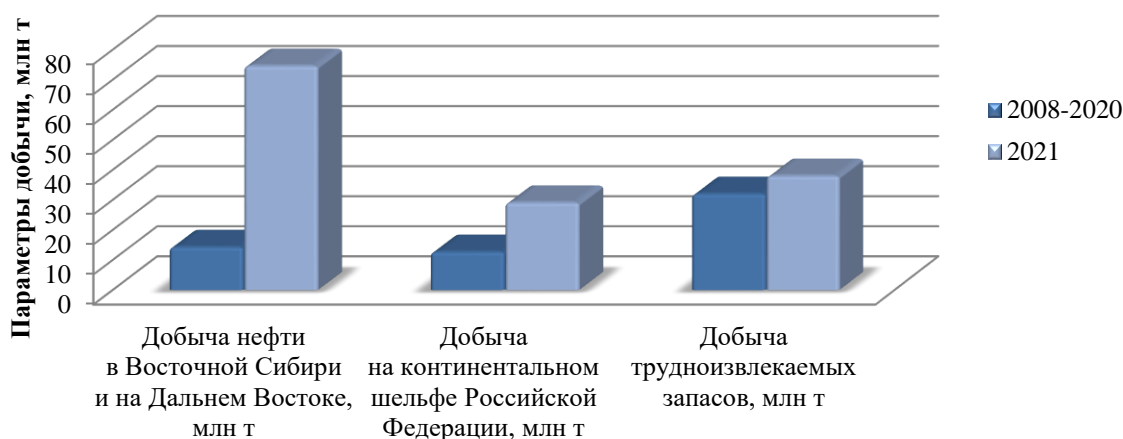


Рисунок 1. Добыча нефти и газового конденсата на территории РФ

Не менее важным моментом является модернизация нефтеперерабатывающих заводов, при которой введены в строй 83 современные установки вторичной переработки нефти, увеличившие объем перерабатываемого сырья на 22,9 %, глубину переработки – на 10,1 %, выход светлых нефтепродуктов – на 5,4 %, а также завершены работы по развитию систем магистральных трубопроводов [1, 3]:

– введена в эксплуатацию нефтепроводная система «Восточная Сибирь – Тихий океан» до порта Козьмино, «Сковородино – Мохэ – Дацин», Балтийская система;

– построены нефтепроводные системы «Пурпе – Самотлор», «Заполярье – Пурпе», «Куюмба – Тайшет»;

– модернизированы нефтепроводы для увеличения поставок в порты Приморск и Новороссийск.

Поэтому необходимость разработки мероприятий и комплекса современных технических решений, предупреждающих и исключающих опасные факторы пожара, непосредственно влияющие на состояние защищенности: нефтебаз, складов с горюче-смазочными материалами, систем трубопроводов – является неотъемлемым условием эксплуатации взрывопожароопасных объектов. Причем это становится особенно важным в условиях [4, 5]:

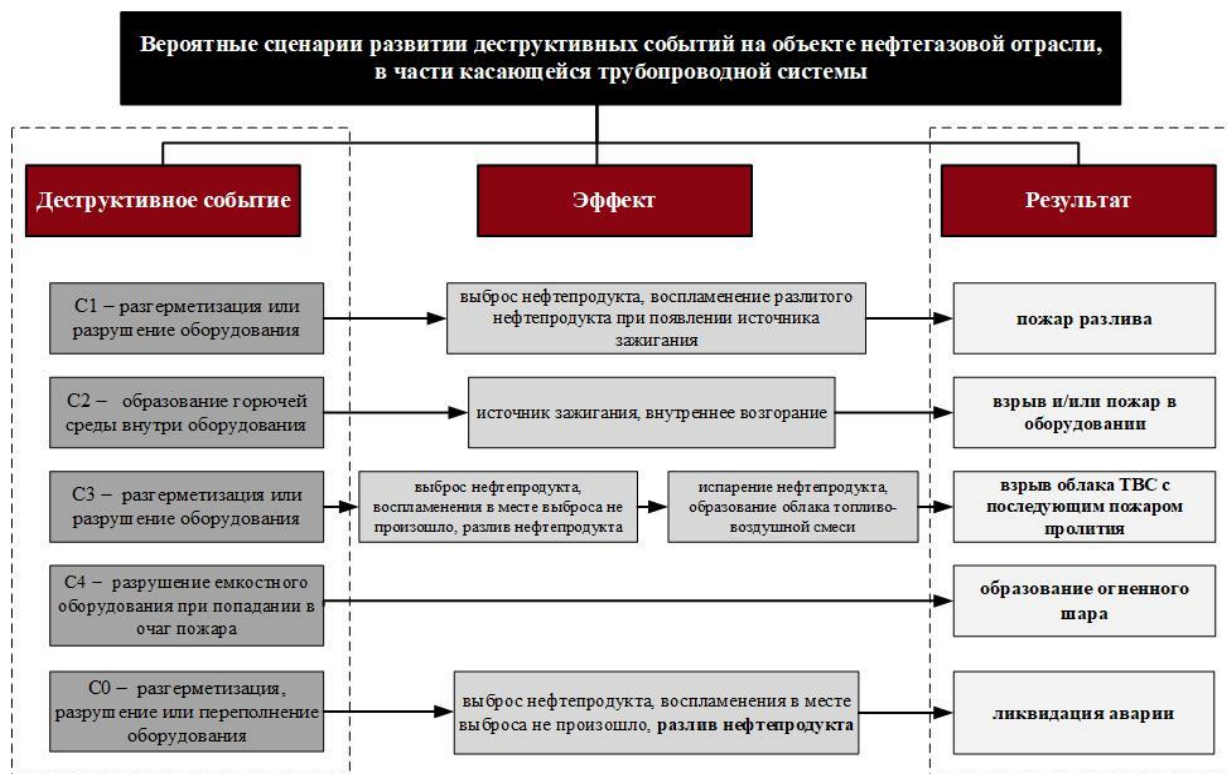
– использования высокопроизводительного оборудования, выполняющего несколько

технологических процессов в одной установке;

- совершенствования технологических процессов;
- увеличения мощности единичных производственных агрегатов;
- увеличения количества взрывоопасных веществ.

Таким образом, сознательное повышение пожарной опасности технологических процессов требует проведения качественной оценки действующей системы обеспечения пожарной безопасности, прогнозирования аварийных ситуаций с целью снижения количества возгораний и материального ущерба.

Анализ пожарной опасности возникновения и развития деструктивных событий на объектах нефтегазовой отрасли позволил установить, что их предшественниками являются: повреждение технологической системы, нарушение режима работы, некорректное выполнение работ по очистке и промывке оборудования, потеря герметичности фланцевых соединений и запорной арматуры, воздействие атмосферного электричества, коррозия и эрозия, температурная деформация, брак, усталость металла. В связи с чем были предложены возможные сценарии развития аварийных ситуаций на взрывоопасных объектах (рис. 2) [6, 7].



*Рисунок 2. Вероятные сценарии развития аварийных ситуаций в системе нефтепроводов*

Любой взрывоопасный сценарий начинается с инициирующего события, например, в результате утечки различной интенсивности в связи с отказом оборудования или гидравлическим ударом. Рассмотрим ситуацию, когда в системе трубопроводов третьего класса, что работают

под давлением или высокой температурой, произошел гидроудар при закрытии задвижки. В этом случае определим прочность стального нефтепровода  $d = 400$  мм и с толщиной стенки 5 мм, скорость протекания сырья – 1,2 м/с, объемный вес – 860 кг/м<sup>3</sup>.

При определении приращения давления в нефтепроводе воспользуемся формулой Н. Е. Жуковского (1) [8], а для расчета скорости распространения ударной волны – формулой (2):

$$\Delta P = \rho \cdot v \cdot \Delta W, \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho \cdot \left(1 + \frac{d \cdot E_{ж}}{\sigma \cdot E}\right)}}, \quad (2)$$

где,  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$$v = \sqrt{\frac{1,3 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{730 \cdot \left(1 + \frac{0,390 \cdot 1,3 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{0,005 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 10^4}\right)}} = 552 \text{ м/с}$$

$$\Delta P = 730 \cdot 552 \cdot (1,2 - 0) = 484209 \text{ Па} = 0,484 \text{ МПа}$$

Приращение давления составит 0,484 МПа, что выше допустимой нормы. В этом случае возможно повреждение трубопровода и истечение нефти, тогда площадь разлива нефти (зависит от ряда факторов: плотность, вязкость, климатические условия и ландшафта) можно рассчитать по формуле (3):

$$S = Q_{\text{сумм}} \cdot K_{\text{эмп}} \quad (3)$$

$$S = 5576 \cdot 0,5 = 2788 \text{ м}^2$$

где,  $Q_{\text{сумм}}$  – суммарный объем нефтепродуктов, высвободившихся из оборудования при разгерметизации;

$K_{\text{эмп}}$  – эмпирический коэффициент.

Тогда количество высвободившихся наружу нефтепродуктов после прекращения подачи определим по формуле (4), а до остановки прокачки – по формуле (5):

$$Q_{\text{ст}} = \Pi \cdot R^2 \cdot L \quad (4)$$

$$Q_{\text{ст}} = 3,14 \cdot 0,4 \cdot 1000 = 1256 \text{ л}$$

где  $R$  – внутренний радиус поврежденного нефтепровода;

$L$  – длина участка от места аварии до предохранительных задвижек (1000 м);

$v$  – скорость распространения ударной волны м/с;

$\Delta W$  – уменьшение скорости движения при торможении струи м/с;

$d$  – внутренний диаметр трубопровода, м;

$\sigma$  – толщина стенки трубы, мм;

$E_{ж}$  – модуль упругости жидкости, Па;

$E$  – модуль упругости материала трубопровода, Па.

$$Q_T = Q_0 \cdot T_A \quad (5)$$

$$Q_T = 1,2 \cdot 3600 = 4320 \text{ л}$$

где,  $Q_0$  – максимальный расход нефтепродукта в нефтепроводе при нормальном режиме работы;

$T_A$  – время прекращения прокачки нефтепродукта (3600 с).

Находим суммарный объем разлившихся нефтепродуктов в окружающую среду по формуле (6):

$$Q_{\text{сумм}} = Q_T + Q_{\text{ст}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{сумм}} = 4320 + 1256 = 5576 \text{ л}$$

$Q_T$  – объем продуктов нефти, попавших в атмосферу до остановки прокачки;

$Q_{\text{ст}}$  – объем продуктов нефти, попавших в атмосферу после остановки прокачки.

Таким образом, максимальная площадь разлива нефти превысит 2,5 км<sup>2</sup> (при заданных условиях), а наглядная детализация зон разлива представлена на рис. 3.

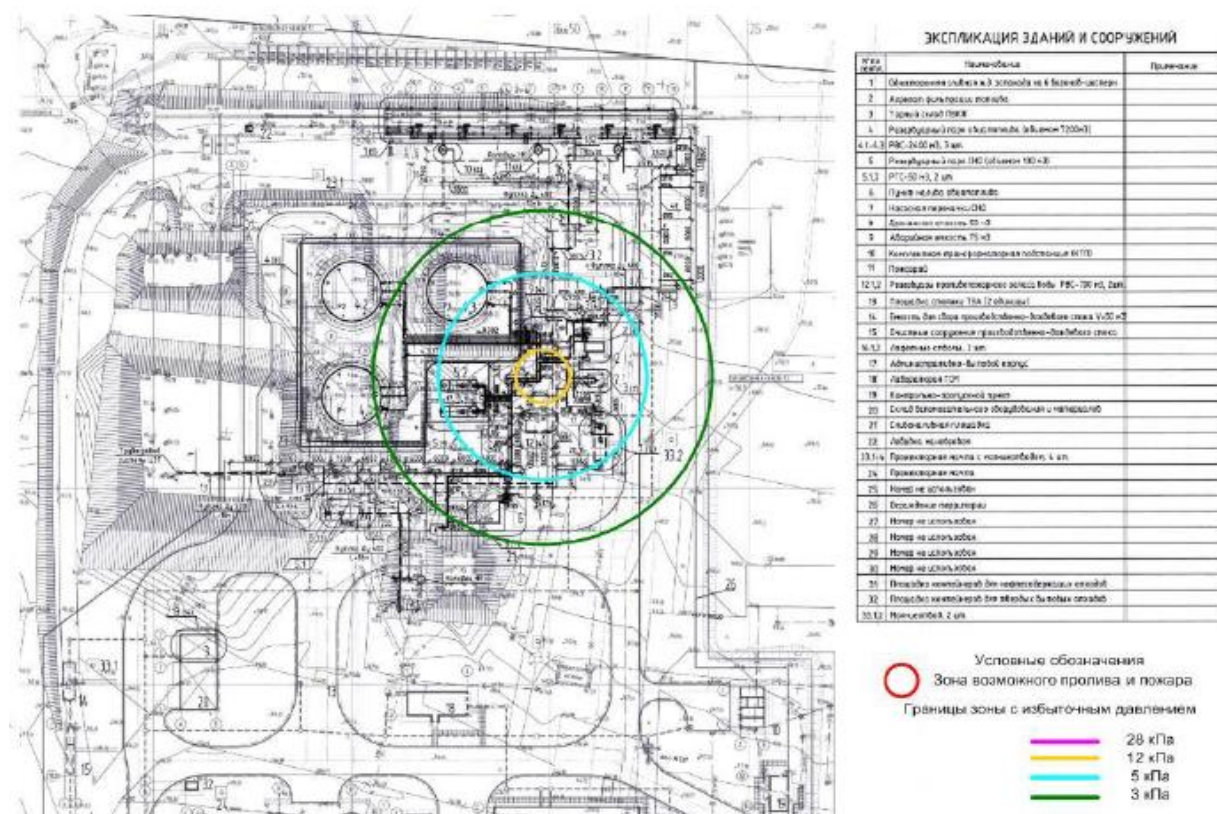


Рисунок 3. Границы зон потенциального разлива при разных сценариях

Проведем оценку возможного числа пострадавших среди рабочего персонала в результате воздействия на них: максимального избыточного давления, ударной волны, теплового излучения пожара пролива, паров нефтепродукта, основываясь на вероятностных сценариях развития аварийных ситуаций в системе нефтепроводов.

Отметим, что одна и та же мера негативного воздействия (количество вдыхаемых паров, доза термической радиации или импульс давления) оказывает последствия различной степени тяжести для различного рода людей, т.е. деструктивный эффект носит вероятностный характер и выражается формулой (7), которая показывает связь между вероятностью поражения и поглощенной дозой отравляющего вещества [9].

$$P_{пор} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{Pr-5} \exp(-\frac{t^2}{2}) dt \quad (7)$$

Pr – пробит-функция представляет собой верхний интегральный предел и может быть определена по формуле (8):

$$Pr = a + b \cdot \ln D, \quad (8)$$

где a, b – константы для каждого из веществ (процесса), характеризующие его особенности и меру опасности его воздействия;

D – доза негативного воздействия, поглощенная человеком.

Для оценки числа пострадавших на открытой местности, в административных зданиях от взрывной волны, термического воздействия принимались значения, представленные в табл. 1, табл. 2 и табл. 3 соответственно [10, 11].

Таблица 1  
 Параметры последствий на открытой местности

Максимальное избыточное давление, кПа	Степень поражения от взрывной волны
20	Разрывы барабанных перепонок. Небольшие кровоизлияния в легкие (условно – поражение 1 степени)
50	Общее сотрясение организма. Кровоизлияния в легкие, межмышечное кровоизлияние (условно – поражение 2 степени)
70	Состояние контузии (условно – поражение 3 степени)
100–150	Переломы ребер, гиперемия сосудов мягкой мозговой оболочки
300	Летальный исход

Таблица 2  
 Степень поражения в административных зданиях

Максимальное избыточное давление, кПа	Степень поражения от взрывной волны
100	Полное разрушение зданий
53	50 %-е разрушение зданий
28	Средние повреждения зданий
12	Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т. п.)
5	Нижний порог повреждения человека волной давления
3	Малые повреждения (разбита часть остекления)

Таблица 3.  
 Степень поражения от термического воздействия

Интенсивность излучения, кВт/м <sup>2</sup>	Степень поражения
1,4	Без негативных последствий в течение неограниченного времени
4,2	Безопасно для человека в брезентовой одежде
7,0	Непереносимая боль через 20 – 30 с. Ожог 1 степени через 15 – 20 с. Ожог 2 степени через 30 – 40 с.
10,5	Непереносимая боль через 3 – 5 с. Ожог 1 степени через 6 – 8 с. Ожог 2 степени через 12 – 16 с.
44,5	Летальный исход с вероятностью 50 % при длительном воздействии около 10 с

Для определения вероятности негативного воздействия на людей необходимо использовать пробит-функции:

– Прямое воздействие на людей избыточного давления на местности:

$$Pr = 5 - 5,74 \cdot \ln\left(\frac{4,2 \cdot 10^5}{P} + \frac{1,3 \cdot 317,8 \cdot 4,121}{I}\right),$$

– Для случая полного разрушения зданий при взрыве:

$$Pr = 5 - 0,22 \cdot \ln\left(\frac{40000}{P}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11,3},$$

– Для случая сильного повреждения стен промышленных зданий, при которых возможно исключить полный снос здания:

$$Pr = 5 - 0,26 \cdot \ln\left(\frac{175000}{P}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9,3},$$

– Вероятности разрыва барабанных перепонок имеет вид:

$$Pr = -12,6 + 1,524 \cdot \ln(P),$$

– Вероятность отброса людей ударной волной:

$$Pr = 5 - 2,44 \ln\left(\frac{7380}{P} + \frac{1300}{\frac{P}{I}}\right)$$

– Вероятность смертельного поражения при термическом воздействии определяется:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t),$$

– Вероятность ожога первой степени:

$$Pr = -39,83 + 3,0186 \cdot \ln(q^{4/3} \cdot t),$$

где  $P$  – величина максимального избыточного давления, кПа (поражение людей может наступить в случае механического воздействия за счет разрушения зданий при давлении 30 – 50 кПа);

$I$  – импульс давления волны, Па·с;

$q$  – действующий на человека тепловой поток, кВт/м<sup>2</sup>;

$\tau$  – длительность воздействия, с;

$t$  – время нахождения человека во взрывоопасной зоне, с, определяется по формуле (9):

$$t = t_0 + \frac{X}{V} \quad (9)$$

где  $t_0$  – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает дальнейшее решение;

$X$  – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (где плотность теплового потока менее 4 кВт/м<sup>2</sup>);

$V$  – скорость движения человека (принята равной 5 м/с).

Результаты расчетов интенсивности и зон поражающих факторов каждого сценария, представленного на рис. 2, использовались для оценки потенциального числа пострадавших путем определения произведения плотности распределения рабочего персонала на площадь зоны поражающего фактора.

Плотность распределения рабочего персонала определялась следующим образом:

– принималось допущение, что люди равномерно распределены на территории объекта защиты;

– существовало исключение некоторых мест, где согласно технологическому процессу четко определено количество людей;

– при этом общее число людей на объекте защиты принято 29 человек;

– наибольшая работающая смена – 14 человек;

– режим работы – круглосуточный.

Использование пробит-функций по каждому вероятному неблагоприятному сценарию развития событий в результате возникновения нештатной ситуации (гидроудар в технологическом нефтепроводе) определили максимальное количество погибших и раненых среди рабочего персонала (табл. 5).

Таблица 5  
Вероятное количество погибших и раненых среди рабочих объекта защиты

Технологический нефтепровод	Сценарий	$P_{\text{усл.}}$ , ЧС/год	Кол-во погиб- ших	$P_{\text{усл.}}$	Вероят- ность гибели, 1/год	Кол-во раненых	Услов., $P_{\text{ранения}}$	Услов. $P_{\text{ранения}}$ , 1/год
	C1	$2,4 \cdot 10^7$	0	–	–	0	0,6	$4,80 \cdot 10^{-8}$
	C3	$3,1 \cdot 10^{-6}$	0	–	–	0	0,6	$6,20 \cdot 10^{-7}$
	C2	$3,4 \cdot 10^{-7}$	0	–	–	1	0,2	$6,80 \cdot 10^{-8}$
	C0, C4	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0	–	–	1	0,15	$6,00 \cdot 10^{-7}$

По результатам расчетов было установлено, что в случае возникновения нештатной ситуации, например, гидроудара в сети нефтепровода, вероятность поражения рабочего персонала на объекте защиты составит  $6,80 \cdot 10^{-7}$ , что эквивалентно одному погибшему человеку. Столь низкий показатель характеризует не степень опасности ситуации, а малую вероятность возникновения взрыва при разливе нефти. Однако ситуация кардинально изменится,

если в качестве транспортируемого вещества будет выступать взрывоопасный состав. Кроме того, быстрыми темпами разрабатываются и внедряются в топливно-энергетический комплекс цифровые технологии (интернет вещей, 3D-моделирование и прогнозирование на основе анализа «больших данных» и т.д.), т.е. инструмент, при помощи которого возможно предусмотреть деструктивные события, разрабатывая комплекс превентивных мероприятий.

#### Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года».
2. О рынке нефти. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oil-may.pdf> (дата обращения: 17.08.2022).
3. Нефтепровод Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО). URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/141847-vostochnyy-nefteprovod-vsto/> (дата обращения: 17.08.2022).
4. Королев Д. С., Вытовтов А. В., Сушко Е. А. Анализ возможных рисков пожарной опасности на действующем объекте защиты нефтегазовой отрасли // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2021. № 2. С. 44–51.
5. Королев Д. С. Концептуальная методология обеспечения пожарной безопасности в нефтегазовой отрасли // Техносферная безопасность. 2020. № 2 (27). С. 3–10.
6. Королев Д. С., Шмырева М. Б., Русских Е. А. Методика оценки материального ущерба в случае возникновения и развития чрезвычайной ситуации на объекте нефтегазовой отрасли // Техносферная безопасность. 2021. № 3 (32). С. 67–76.
7. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. М., 2006. 100 с.
8. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в трубах. М., 2021. 104 с.
9. Приказ МЧС от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
10. Федеральный закон от 24.07.1998 (в ред. от 05.04.2021) № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».
11. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».

#### References

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06.2020 № 1523-r «Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda».
2. O rynke nefiti. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oil-may.pdf> (data obrashcheniya: 17.08.2022).



3. Nefteprovod Vostochnaya Sibir' – Tihij okean (VSTO). URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/transportirovka-i-khranenie/141847-vostochnyy-nefteprovod-vsto/> (data obrashcheniya: 17.08.2022).
4. Korolev D. S., Vytovtov A. V., Sushko E. A. Analiz vozmozhnyh riskov pozharnoj opasnosti na dejstvuyushchem ob"ekte zashchity neftegazovoj otrasli // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2021. № 2. S. 44–51.
5. Korolev D. S. Konceptual'naya metodologiya obespecheniya pozharnoj bezopasnosti v neftegazovoj otrasli // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2020. № 2 (27). S. 3–10.
6. Korolev D. S., Shmyreva M. B., Russkih E. A. Metodika ocenki material'nogo ushcherba v sluchae vozniknoveniya i razvitiya chrezvychajnoj situacii na ob"ekte neftegazovoj otrasli // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 3 (32). S. 67–76.
7. GOST 12.1.004–91. Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya. M., 2006. 100 s.
8. Zhukovskij N. E. O gidravlicheskom udare v trubah. M., 2021. 104 s.
9. Prikaz MCHS ot 10.07.2009 № 404 «Ob utverzhenii metodiki opredeleniya raschetnyh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennyh ob"ektah».
10. Federal'nyj zakon ot 24.07.1998 (v red. ot 05.04.2021) № 125-FZ «Ob obyazatel'nom social'nom strahovanii ot neschatnyh sluchaev na proizvodstve i professional'nyh zabolevanij».
11. Federal'nyj zakon ot 10.01.2002 № 7-FZ «Ob ohrane okruzhayushchej sredy».