

**Прогнозирование экологических рисков при техногенных авариях
на магистральных и технологических нефтепроводах**

И. Н. Квасов¹, Е. В. Шендалева¹, О. В. Штенгауэр², М. Ю. Земенкова^{3*}

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Омское моторостроительное объединение им. П. И. Баранова, г. Омск, Россия

³Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

*e-mail: muzemenkova@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросам прогнозирования и оценки экологического риска. Актуальность темы заключается в нормативном введении требований об оценке риска во многие сферы деятельности, связанные с опасностью или неопределенностью результата. Цель работы — оценка экологических ущербов и экологических рисков в случае аварии на магистральных и технологических нефтепроводах. Задача — оценка возможности применения современных нормативных экологических требований совместно с принятыми в настоящее время методами оценки экологических рисков нефтегазовых компаний. В ходе решения поставленной задачи была разработана методика оценки экологических рисков для систем экологического менеджмента нефтегазовых компаний.

Ключевые слова: система экологического менеджмента; экологический ущерб; экологический риск

**Prognosis evaluation of environmental risks in case of accident on main
and technological oil pipelines**

**Igor N. Kvasov¹, Elena V. Shendaleva¹, Olga V. Shtengauer²,
Maria Yu. Zemenkova^{3*}**

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Omsk engine-building association of P. I. Baranov, Omsk, Russia

³Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

*e-mail: muzemenkova@mail.ru

Abstract. The article is devoted to questions of environmental risk assessment. The subject relevance consists in normative introduction of risk assessment requirements for many activity fields connected with danger or result uncertainty. The purpose of the article is ecological damages assessment and environmental risks in case of accident on main and technological oil pipelines. A task of the study is an application possibility consideration of regulatory ecological requirements together with the environmental risks valuation methods accepted now by the oil and gas companies. During a solution of an objective the environmental risks assessment technique was developed for the ecological management systems of the oil and gas companies.

Key words: ecological management system; ecological damage; environmental risk

Введение

Загрязнение природной среды нефтью и нефтепродуктами — одна из главных экологических проблем во многих регионах России. Компании, транспортирующие нефть и нефтепродукты по магистральному нефтепроводу (МН) и по технологическим трубопроводам, могут оказывать негативное воздействие на природные ресурсы: атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почвенный покров, недра, растительный и животный мир, а также жизнь и здоровье людей. Социально-экологическая ответственность нефтяных компаний представляет собой осознанную и мотивированную реализацию мероприятий по предупреждению и сокращению аварийных ситуаций и опасных воздействий на окружающую среду. Внедрение системы экологического менеджмента в деятельность компаний требует обязательного анализа экологических рисков. В документах систем экологического менеджмента^{1, 2} нефтегазовые компании [1] выделяют в качестве отрицательных экологических факторов конечные события техногенных аварий (загазованность, разливы, тепловое воздействие и т. д.), не рассматривая при этом ущербы, причиненные природной среде и населению как части этой природной среды, и риски возникновения этих ущербов.

В настоящее время разработано значительное количество методов оценки экологических ущербов^{3, 4}, вреда здоровью и жизни людей в результате влияния опасных факторов, но эти методы чаще всего не включают вероятностные характеристики развития неблагоприятных экологических ситуаций. Последнее означает, что нефтегазовые компании в рамках системы экологического менеджмента не рассматривают прогнозные оценки экологического риска.

Постановка задачи

Целью статьи является анализ методов оценки экологических ущербов и экологических рисков в случае аварии на нефтепроводе. Задачей является рассмотрение возможности применения нормативных экологических требований совместно с принятыми в настоящее время методами оценки экологических рисков нефтегазовых компаний. Решение данной задачи связано с несколькими аспектами:

- принятие конечных событий техногенных аварий в качестве исходных экологических бедствий для оценки экологического риска;
- введение оценки экологических ущербов и экологических рисков в общую оценку ущербов и рисков техногенной аварии;
- рассмотрение динамики развития экологически неблагоприятного события при техногенной аварии на нефтепроводе с учетом климатических и природных факторов;
- оценка экологического ущерба, а также оценка экологического риска.

¹ Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах и нефтепродуктопроводах. Руководящий документ ОАО «АК «Транснефть»». – Введ. 2011-12-15. – М., 2011. – 112 с.

² СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». – Введ. 2009-03-30. – М.: «Газпром ВНИИГАЗ», 2009. – 272 с.

³ Приказ Минприроды России от 08.07.2010 № 238 (ред. от 11.07.2018) «Об утверждении методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту окружающей среды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_104774/.

⁴ Постановление Госгортехнадзора РФ от 10.07.2001 № 30 «Об утверждении методических указаний по проведению анализа риска опасных производственных объектов» (вместе с РД 03-418-01). – Введ. 2001-10-01. – М., 2002. – 25 с.

При анализе последствий аварий вводят понятия прямого, косвенного и полного ущербов.

Прямой ущерб составляют невозвратные потери основных фондов и природных ресурсов, затраты на локализацию и ликвидацию последствий аварий, медицинское обслуживание, дезактивационные и спасательные работы, компенсационные выплаты, контроль окружающей среды.

К косвенному ущербу относят затраты организаций, не попавших в зону аварии, на изменения в инфраструктуре и структуре хозяйственных связей, компенсацию отрицательных социальных эффектов.

Прямой и косвенный ущерб образуют полный ущерб, который оценивают на промежутке времени, в течение которого действуют отрицательные факторы, вызванные техногенной аварией.

Ущерб природной среде и здоровью людей можно отнести к прямому ущербу⁵, количественная оценка которого должна быть выполнена в рамках системы экологического менеджмента [2, 3].

Теория

В значительной части нормативных документов^{6,7,8} количественными показателями риска являются следующие [4–9]:

- индивидуальный риск — частота поражения отдельного индивидуума в результате воздействия факторов опасности аварий;
- коллективный риск — ожидаемое количество пострадавших в результате возможных аварий за определенный период времени;
- социальный риск — зависимость частоты возникновения событий (F), в которых пострадало на определенном уровне не менее N человек, от этого числа N;
- потенциальный территориальный риск — пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня от возможных аварий;
- технический риск — связан с отказами технических устройств, показатели определяются соответствующими методами теории надежности;
- экологический риск — вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера.

В данной трактовке экологический риск характеризуют вероятностью неблагоприятного события без оценки его вреда (ущерба).

Существует иная точка зрения, имеющая более широкое распространение, согласно которой риск — это сочетание ущерба и вероятности его возникновения.

⁵ ГОСТ Р 14.09-2005. Экологический менеджмент. Руководство по оценке риска в области экологического менеджмента. — Введ. 2007-01-01. — М.: Стандартинформ, 2010. — 35 с.

⁶ РД 13.020.40-КТН-329-06. Правила разработки планов по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти на объектах магистральных нефтепроводов ОАО «АК «Транснефть». Часть 1. — М., 2006. — 41 с.

⁷ Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (последняя редакция) «Об охране окружающей среды» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/.

⁸ Постановление Правительства РФ от 03.03.2017 № 255 (ред. от 29.06.2018) «Об исчислении и взимании платы за негативное воздействие на окружающую среду» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_213744/.

В этом случае единицей измерения ущерба^{9,10,11} и риска будут финансовые потери [10, 11], в том числе и ущерб от гибели человека.

Согласно ГОСТ Р 14.09-2005¹² под оценкой экологического риска подразумевают *качественную и/или количественную оценку реальных или потенциальных воздействий загрязняющих веществ на объекты окружающей среды*. Оценка экологического риска является частью корректирующих мероприятий по охране окружающей среды, в число которых также входит определение характеристик природных объектов и степени их загрязнения опасными веществами, оценка влияния риска загрязнений на здоровье человека.

Оценка экологического риска заключается в определении частоты возникновения инициирующих и последующих опасных экологических событий и оценке последствий трансформации инициирующих событий в экологический ущерб.

При авариях на нефтепроводе основными факторами, влияющими на природную среду, являются следующие:

- разлив нефти/нефтепродукта;
- пожар разлива нефти/нефтепродукта;
- токсичные продукты горения;
- образование взрывоопасного облака топливовоздушной смеси (ТВС) с последующим объемным взрывом и пожаром разлива;
- осколки разрушенного оборудования, обрушение зданий и конструкций, ударная волна;
- тепловое излучение.

Можно представить ситуационные модели [12–14] сценариев j с учетом экологических аспектов аварий.

Распространение пролива нефти/нефтепродукта

1. Наиболее вероятный сценарий (1РВ)

Повреждение нефтепровода → истечение нефти из поврежденного нефтепровода (~ 4 тонны) → распространение нефти на местности → испарение легких углеводородов нефти в атмосферу → рассеяние парогазового облака без последствий → насыщение почвы нефтью в зоне ее распространения → разрушение плодородного слоя → интоксикация флоры и фауны.

2. Наиболее опасный сценарий (1РО)

Разрыв нефтепровода → истечение нефти из поврежденного нефтепровода (от 20 тонн и более) → распространение нефти на местности → испарение легких углеводородов нефти в атмосферу → воспламенение (вспышка) нефти → пожар → выгорание флоры в зоне теплового воздействия пожара → попадание объектов животного мира и людей в зону влияния поражающих факторов → интоксикация и получение ожогов.

Сценарии возможных аварий на переходах МН через болота

⁹ МР 5.1.0029-11. Методические рекомендации к экономической оценке и обоснованию решений в области управления риском для здоровья населения при воздействии факторов среды обитания. – Введ. 2011-07-31. – М.: Роспотребнадзор, 2011. – 12 с.

¹⁰ Приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 12.04.2006 № 78 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке и подготовке к принятию проектов технических регламентов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/12148260/>.

¹¹ Декларация Российского научного общества анализа риска «Об экономической оценке жизни среднестатистического человека» [Электронный ресурс]. – <http://www.sra-russia.ru/docs/metodicheskie-problemy-upravleniya-riskami/deklaratsii/>.

¹² ГОСТ Р 14.09-2005. – С. 15.

1. Наиболее вероятный сценарий (2РВ)

Повреждение нефтепровода → истечение нефти из поврежденного нефтепровода (~ 4 тонны) → распространение нефти на местности (для болота III типа — всплытие и распространение нефти на поверхности воды) → испарение легких углеводородов нефти в атмосферу → рассеяние парогазового облака без последствий → насыщение почвы нефтью в зоне ее распространения (для болот III типа — эмульгирование нефти в поверхностном слое воды и осаждение) → интоксикация флоры и фауны.

2. Наиболее опасный сценарий (2РО)

Разрыв нефтепровода → истечение нефти из поврежденного нефтепровода (от 20 тонн и более) → распространение нефти на местности → испарение легких углеводородов нефти в атмосферу → воспламенение (вспышка) нефти → пожар → выгорание флоры в зоне теплового воздействия пожара → попадание объектов животного мира и людей в зону влияния поражающих факторов → интоксикация и получение ожогов.

Сценарии возможных аварий на переходах МН через малые водотоки

1. Наиболее вероятный сценарий (3РВ)

Повреждение нефтепровода → всплытие нефти на поверхность малого водотока → распространение нефти по течению малого водотока → растворение и эмульгирование нефти в поверхностном слое воды → испарение легких фракций углеводородов нефти в атмосферу → осаждение нефти на прибрежных участках малого водотока → интоксикация флоры и фауны малого водотока.

2. Наиболее опасный сценарий (3РО)

Разрыв нефтепровода → всплытие нефти на поверхность малого водотока → распространение нефти по течению малого водотока → попадание нефти в более крупную реку → распространение и эмульгирование нефти в поверхностном слое воды → испарение легких фракций углеводородов нефти в атмосферу → осаждение нефти на прибрежных участках реки → интоксикация флоры и фауны реки → интоксикация людей, попавших в зону влияния вредного воздействия разлившейся нефти.

Сценарии возможных аварий на переходах МН через автомобильные и железные дороги

1. Наиболее вероятный сценарий (4РВ)

Повреждение нефтепровода → истечение нефти из поврежденного нефтепровода → распространение нефти на местности вдоль насыпи дороги → испарение легких углеводородов нефти в атмосферу → распространение парогазового облака → попадание транспортного средства в парогазовое облако → рассеяние парогазового облака без последствий → насыщение почвы нефтью в зоне ее распространения.

2. Наиболее опасный сценарий (4РО)

Разрыв нефтепровода → истечение нефти из поврежденного нефтепровода → распространение нефти на местности → затопление дороги нефтью → испарение легких углеводородов нефти → попадание транспортного средства в зону парогазового облака → возникновение искры и воспламенение нефти → пожар → выгорание флоры в зоне теплового воздействия пожара → интоксикация и получение ожогов людьми и животными, попавшими в зону влияния поражающих факторов.

Пожар горящего пролива

1. Наиболее вероятный сценарий (1ПВ)

Пожар пролива → горение паров нефти → распространение пожара на местности → загрязнение атмосферы токсичными веществами → выгорание почвенного покрова (га) → изменение физико-химического состава почвы → влияние на биосферные процессы → термическое поражение флоры и фауны, попавшей в зону пожара.

2. Наиболее опасный сценарий (1ПО)

Пожар пролива → горение паров нефти → распространение пожара на местности → загрязнение атмосферы токсичными веществами → воздействие на озоновый слой → усиление испарения воды → выгорание почвенного покрова (га) → загрязнение почвы продуктами горения → накопление в почве токсичных продуктов горения → влияние на биосферные процессы → термическое поражение флоры и фауны, попавшей в зону пожара → потери биоразнообразия флоры и фауны.

Взрыв облака топливовоздушной смеси

1. Наиболее вероятный сценарий (1ВВ)

Взрыв ТВС → ударная волна → резкое повышение давления → тепловое воздействие → понижение концентрации кислорода → световое излучение → дрейф облака ТВС → воспламенение облака ТВС при наличии источника возгорания → получение ожогов людьми и животными, попавшими в зону влияния поражающих факторов → механические травмы людей и животных.

2. Наиболее опасный сценарий (1ВО)

Взрыв ТВС → ударная волна → резкое повышение давления → тепловое воздействие → понижение концентрации кислорода → поглощение инфракрасных лучей → световое излучение → дрейф облака ТВС → воспламенение облака ТВС при наличии источника возгорания → снижение поступления солнечной радиации → выгорание растений → получение ожогов людьми и животными, попавшими в зону влияния поражающих факторов → механические травмы людей и животных.

Взрыв ТВС представляет серьезную опасность для населения и персонала, а также для окружающей среды. Поражающие факторы взрыва¹³: воздушная ударная волна, струи газов, осколки, высокая температура пламени, световое излучение, резкий звук [15–17]. Взрыв облака ТВС не оказывает прямого воздействия на почву и воду, а влияет косвенно на загрязнение почвы продуктами горения, изменение биохимических показателей водных стоков и т. д.

Тепловое воздействие. Показателем термического воздействия является интенсивность теплового излучения. В зоне теплового воздействия происходит прямое поражение дыхательных путей пламенем, горячим воздухом, паром или токсичными продуктами горения.

Различают три стадии термоингаляционных поражений:

I стадия — ведущим механизмом является бронхоспазм, затем развивается отек слизистой оболочки трахеобронхиального дерева. При ожогах гортани появляются признаки асфиксии;

II стадия — может проявляться отек легких;

III стадия — развиваются воспалительные изменения, пневмония.

¹³ Приказ МЧС РФ от 10.07.2009 № 404 (ред. 14.12.2010) «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/196118/>.

Раздражающее воздействие. Нефтяные газы вызывают наркотический эффект. Они вызывают возбуждение, частичную потерю слуха, сужение зрачков, замедление пульса, усиленное слюноотделение, а также накапливаются в мягких и костных тканях организма. При отравлении нефтяными газами происходят нарушения функции мозга и сердечно-сосудистой деятельности.

Влияние на кровеносную систему. Все углеводороды, входящие в состав нефти, влияют на показатели крови — происходит снижение содержания гемоглобина и эритроцитов вплоть до наступления анемии. При попадании паров нефти через дыхательные пути или в результате всасывания в кровь происходит частичное растворение жиров и липидов организма.

Нервные воздействия. Через легкие и кровь токсичные пары нефти попадают в головной мозг, действуют на все отделы нервной системы. При этом сужаются сосуды мозга, уменьшается приток крови к нервной ткани, на длительном промежутке времени возникают частые головные боли, происходит ослабление памяти.

Проникновение в кожу паров и продуктов горения нефти. Пары и продукты горения нефти, попадающие в атмосферу, вызывают острые и хронические отравления, последствия которых могут наступить через длительный промежуток времени.

При оценке экологических ущербов необходимо в отдельности рассматривать кратковременные и долговременные последствия воздействия опасных факторов на экологию и здоровье человека. На коротком промежутке времени широко применяют экологические штрафные санкции и физическое устранение негативных воздействий.

Для оценки влияния опасных факторов на здоровье человека применяют стандартные методы [18–21]. Условная вероятность поражения человека p_{Fj} от совместного независимого воздействия опасными факторами при реализации j -го сценария развития опасных ситуаций:

$$p_{Fj} = 1 - \prod_{g=1}^G (1 - p_g \cdot p_{Fjg}),$$

где G — число рассматриваемых опасных факторов; p_g — вероятность реализации g -го опасного фактора; p_{Fjg} — условная вероятность поражения g -м опасным фактором.

Условные вероятности определяют статистическими, экспертными и расчетными методами, в том числе с использованием пробит-функций Pr :

$$Pr = a + b \cdot \ln W,$$

где a , b — константы, зависящие от степени поражения и вида объекта; W — интенсивность воздействующего фактора.

Рассмотрим воздействия наиболее часто встречающихся опасных факторов.

Ударная волна. Летальный исход наступает при избыточном давлении $\Delta P = 190$ кПа. Серьезные повреждения внутренних органов вызывает $\Delta P = 55$ кПа.

Вероятность потери управляемости у людей, попавших в зону действия ударной волны, можно оценить по величине пробит-функции

$$\text{Pr}_3 = 5 - 5,74 \ln F_3,$$

где фактор опасности F_3 рассчитывают как

$$F_3 = 4,2 / \bar{p} + 1,3 / \bar{i}.$$

Безразмерное давление и безразмерный импульс задают выражениями:

$$\bar{p} = (P_0 + \Delta P) / P_0,$$

$$\bar{i} = I / (P_0^{1/2} m^{1/3}),$$

где m — масса тела живого организма, кг; I — импульс взрывной волны, $I = \Delta P \cdot T$, где T — длительность фазы сжатия взрывной волны.

Вероятность разрыва барабанных перепонок вычисляют через пробит-функцию

$$\text{Pr}_4 = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P.$$

Вероятность отброса людей воздушной волной можно оценить по величине пробит-функции

$$\text{Pr}_5 = 5 - 2,44 \ln F_5,$$

где фактор F_5 рассчитывают из соотношения

$$F_5 = 7,38 \cdot 10^3 / \Delta P + 1,3 \cdot 10^9 / (\Delta P \cdot I).$$

Связь функции Pr_i с вероятностью степени поражения находят по табличным данным.

Термическое поражение

Степень поражения человека тепловым излучением описывает пробит-функция

$$\text{Pr}_6 = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot w^{4/3}),$$

где t — эффективное время экспозиции; w — интенсивность теплового излучения.

Величина эффективного времени экспозиции t для пожара пролива

$$t = t_0 + x / v,$$

где t_0 — время обнаружения человеком пожара и принятия решения о дальнейших действиях; x — расстояние от места расположения человека до безопасной зоны; v — средняя скорость движения человека в безопасной зоне.

Ущерб, нанесенный окружающей среде при загрязнении почв U_L , водным объектам при попадании нефти/нефтепродуктов U_W , атмосфере при поступлении летучих углеводородов с поверхности разлива и продуктов сгорания нефти/нефтепродуктов U_A , рассчитывается следующим образом:

$$U_P = U_L + U_A + U_W. \quad (1)$$

Среднегодовую концентрацию загрязняющего вещества определяют как среднее арифметическое значение разовых или среднесуточных концентраций, полученных в течение года. Предельно допустимые концентрации химических веществ в почве, атмосферном воздухе, воде регламентируют согласно [22, 23].

Ущерб при загрязнении почв нефтью и нефтепродуктами¹⁴

$$U_L = P_{LCP} \cdot S \cdot k_{SCP} \cdot k_{LC} \cdot T_{CP},$$

где P_{LCP} — степень химического загрязнения поверхности земли; S — площадь загрязненного участка; k_{SCP} — показатель химического загрязнения почвы; k_{LC} — показатель категории земель; T_{CP} — ставка платы за химическое загрязнение почвы.

Степень химического загрязнения оценивают по нефтеемкости грунта. Показатель k_{SCP} рассчитывают по фактической глубине химического загрязнения или порчи почв. Показатель k_{LC} определяют исходя из категории земель и целевого назначения.

Ущерб за загрязнение атмосферы^{15,16}

$$U_A = \sum_{k=1}^K M_{Aik} \cdot T_{Aik} \cdot k_E \cdot k_T,$$

где M_{Aik} — масса выброса k -го загрязняющего вещества в атмосферу; T_{Aik} — ставка платы за выброс k -го загрязняющего вещества в атмосферу; k_E — показатель, учитывающий экологическое состояние атмосферного воздуха; k_T — показатель, учитывающий плотность населения на территории, подвергшейся выбросам.

Масса низкомолекулярных углеводородов, испаряющихся в атмосферный воздух:

$$M_V = S \cdot q \cdot t \cdot 10^{-6},$$

где t — время испарения; q — удельная доля испаряемых в атмосферу углеводородов с единицы площади разлива.

¹⁴ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 23.01.2006 № 1 (ред. 26.06.2017) «О введении в действие гигиенических нормативов ГН 2.1.7.2041-06. «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве»» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901966754>.

¹⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 12.07.2011 № 98 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.2897-11 “Дополнение № 9 к ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест”» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902290617>.

¹⁶ Приказ Госкомэкологии РФ от 05.03.1997 № 90 «Об утверждении методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/9039890>.

Масса выброса загрязняющих веществ при горении (CO, CO₂, SO₂, H₂S, C, SiO₂, HCON и др.) [22, 23]:

$$M_i = M \cdot k_A,$$

где M — масса сгоревшей нефти, нефтепродукта; k_A — показатель удельных выбросов в атмосферу при горении нефти, нефтепродуктов.

Размер платы за загрязнение водных объектов нефтью, нефтепродуктами^{17,18}

$$U_W = k_{NC} \cdot k_W \cdot k_I \cdot k_T \cdot \sum_{i=1}^n U_{Wi},$$

где k_{NC} — коэффициент, учитывающий природно-климатические условия; k_W — коэффициент, учитывающий состояние водных объектов; k_I — коэффициент индексации; k_T — коэффициент, учитывающий длительность негативного воздействия загрязняющих веществ; T_{CW} — ставка платы за загрязнение водных объектов.

Обсуждение результатов

Риск реализации определенного сценария загрязнения природных объектов:

$$R_{pj} = \sum_{g=1}^G (U_{Lg} \cdot p_{Ljg}) + \sum_{g=1}^G (U_{Ag} \cdot p_{A jg}) + \sum_{g=1}^G (U_{Wg} \cdot p_{W jg}), \quad (2)$$

где U_{Ld} , U_{Ad} , U_{Wd} — ущербы, нанесенные опасными факторами почвенным, атмосферным и водным ресурсам; p_{Ljd} , p_{Ajd} , p_{Wjd} — условные вероятности нанесения ущерба почвенным, атмосферным и водным ресурсам.

Предполагается, что штрафные санкции оценивают долговременный ущерб природным объектам. Долговременный экологический ущерб для здоровья населения оценивают как

$$U_M^N = \sum_{n=1}^N (U_{M1}^n + U_{M2}^n), \quad (3)$$

где U_{M1}^n , U_{M2}^n — экономические ущербы, от преждевременной смертности населения и заболеваний; N — период, в течение которого существуют последствия неблагоприятных факторов аварии.

Ущерб от заболеваний населения

$$U_{M2}^N = \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D U_{M2}^d, \quad (4)$$

где U_{M2}^d — экономический ущерб от j -го вида заболевания; D — количество видов заболеваний от неблагоприятного воздействия факторов среды обитания.

¹⁷ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2007 № 75 «Об утверждении ГН 2.1.5.2280-07 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03»» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/12157244/>.

¹⁸ Приказ Минприроды России от 13.04.2009 № 87 (ред. 26.08.2015) «Об утверждении методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_88197/.

Риск заболеваний населения от последствий техногенной аварии

$$R_{M2} = \sum_{n=1}^N \sum_{d=1}^D U_{M2}^d \cdot p_{M2}^d, \quad (5)$$

где p_{M2}^d — вероятность j -го вида заболевания в течение одного года.

Ущерб от преждевременных случаев смерти населения

$$U_{M1}^N = \sum_{n=1}^N \bar{U}_{M1}^n \cdot Q_{M1}^n, \quad (6)$$

где $\bar{U}_{M1}^n$ — усредненный ущерб от потери одной человеческой жизни;

Q_{M1}^n — число преждевременно умерших людей в течение одного года.

Риск преждевременной смертности

$$R_{M1} = \sum_{n=1}^N \bar{U}_{M1}^n \cdot p_{M1}^n \cdot Q_{M1}^n, \quad (7)$$

где p_{M1}^n — вероятность преждевременной смерти в течение одного года.

Величину экологического риска можно определить как сумму риска загрязнения природных ресурсов и риска причинения вреда здоровью людей

$$R_E = R_P + R_M, \quad (8)$$

где $R_M = R_{M1} + R_{M2}$.

Сложным системам, к которым относятся экологические системы, присуща эмерджентность, когда свойства всей системы отличаются от суммы свойств отдельных ее элементов. Причинно-следственная связь между элементами простой системы локализована во времени и пространстве в отличие от сложной динамической системы, где элементы связаны большим числом причинно-следственных связей, причины часто отделены от следствий, как в пространстве, так и во времени. Поэтому прогнозирование влияния опасных факторов на жизнь и здоровье населения имеет высокую степень неопределенности. Для обоснования степени распространения опасных веществ необходимо рассматривать изменения природно-климатических условий как в момент аварии, так и в последующие периоды времени. Наиболее перспективным в этом направлении является использование нейросетевых и генетических технологий для прогнозирования распределения опасных веществ в окружающей среде. Несмотря на явные преимущества для использования данных методов необходимы обучающие выборки. В качестве таких обучающих выборок могут быть использованы результаты экологического мониторинга территорий при сходных природно-климатических условиях распространения опасных веществ или расчетные значения распространения концентрации опасных веществ в поле рассеивания.

Для определения зависимости «экспозиция опасных веществ — ответ» необходимо рассмотреть пути и среды, через которые опасные вещества попадают в организм людей, а также время экспозиции. Сценарии экспозиции [11] указаны в таблице.

Пути попадания опасных веществ в организм человека

Воздействующая среда	Путь поступления			
	Ингаляционный	Пероральный	Накожный	Суммарный
Атмосферный воздух	+			+
Питьевая вода	+	+	+	+
Почва	+	+	+	+
Продукты питания		+		+
Накопленный эффект	+	+	+	+

В ходе оценки риска предусматривают определения «центральной тенденции» и «верхней оценки». Первую рассчитывают на основе средних интенсивностей экспозиции, ее продолжительности, физиологических параметров (объема дыхания, потребления воды и пищи и т. д.). Вторую определяет через 95 %-й доверительный интервал интенсивности экспозиции. Экспозицию, соответствующую «центральной тенденции», используют для оценки усредненного риска, которому подвергается население. Экспозицию, соответствующую «верхней оценке», рассматривают как основу реалистичного предсказания наибольшего возможного риска для отдельных представителей населения.

Количественные закономерности, связывающие получаемую дозу опасных веществ с неблагоприятным для здоровья эффектом, имеют большую неопределенность в связи с параллельным действием комплекса факторов, также влияющих на здоровье населения. В таком случае оценка риска может базироваться только на экспериментально-токсикологических данных. Для экстраполяции найденной зависимости «доза — ответ» на существенно меньший диапазон доз используют различные математические модели (логистическую, пробитную, многоступенчатую, модель одного удара, модель Вейбулла), согласно которым могут быть получены отличные друг от друга результаты. При использовании дискриминантного, корреляционного и регрессионного анализа для определения влияния каждого из факторов необходима длительная по времени выборка данных не только по опасным факторам, возникшим в результате аварии, но и по фоновому загрязнению экологической среды, условиям жизни и работы населения.

Выводы

Анализ материалов по оценке экологических ущербов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) в ходе дифференцирования влияния каждого из опасных факторов на здоровье персонала и населения необходимо использовать статистические методы;
- 2) в документации на системы экологического менеджмента нефтегазовых компаний должны быть рассмотрены именно кратковременные и долгосрочные экологические ущербы и риски;
- 3) большая неопределенность результатов моделирования закономерностей, связывающих экспозиции опасных веществ с неблагоприятным для здоровья эффектом, требует применения новых методов исследования, в том числе с использованием искусственного интеллекта.

Действующая законодательная и нормативная база уже в настоящее время позволяет учитывать экологические риски нефтегазовых компаний без объединения их с технологическими и техническими рисками. При этом иницирующими событиями для оценки экологических ущербов и рисков являются конечные события рисков технических (разливы, высокая температура, загазо-

ванность, травмы, отравления). Поскольку эти события воздействуют на экологическую среду, здоровье персонала и населения как в кратковременном, так и в долгосрочном плане, то будет более правильным отнести их к экологическим ущербам и рискам.

Таким образом, несмотря на высокий уровень анализа рисков, с учетом тенденции развития законодательной базы промышленной безопасности [3], весьма перспективной задачей в области совершенствования методологии оценки экологических рисков является их прогнозирование на основе фактических техногенных рисков и мониторинга надежности нефтепроводов в режиме реального времени. Современные разработки позволят реализовать ноосферный подход к эксплуатации промышленных объектов магистрального трубопроводного транспорта для обеспечения чистоты окружающей среды и безопасности населения.

Библиографический список

1. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сборник документов. Серия 27. Выпуск 2 / Е. А. Иванов [и др.]. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследования проблем промышленной безопасности», 2010. – 208 с.
2. Земенкова М. Ю. Методы снижения технологических и экологических рисков при транспорте и хранении углеводородов: моногр. – Тюмень: ТИУ, 2019. – 397 с.
3. Штенгауэр О. В., Шендалева Е. В. Оценка экологических рисков при транспортировке, хранении нефти и нефтепродуктов // Стандартизация, метрология и управление качеством: материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Омск, 2015. – С. 273–277.
4. Кершенбаум Б. Я., Григорьев Л. И., Щербань П. С. Разработка комплексного подхода к управлению качеством сооружения сложных технических объектов с использованием риск-менеджмента // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2014. – № 2. – С. 9–12.
5. Количественная оценка риска химических аварий / В. М. Колодкин [и др.]; под ред. В. М. Колодкина. – Ижевск: ИД «Удмуртский университет», 2001. – 288 с.
6. On the Use of Hybrid Causal Logic Method in Offshore Risk Analysis / W. Roed [et al.] // Reliability Engineering & System Safety. – 2009. – Vol. 94, Issue 2. – P. 445–455. DOI: 10.1016/j.ress.2008.04.003
7. Risk, Uncertainty and Rational Action. London: Earthscan. IRGC (International Risk Governance Council), White Paper on Risk Governance: Towards an Integrative Framework / C. C. Jaeger [et al.]. – Geneva: International Risk Governance Council, 2001.
8. Lees F. P. Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment, and Control. Volume 3. – Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.
9. Тетельмин В. В., Язев В. А. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 352 с. (Нефтегазовая инженерия).
10. Хохлявин С. А. Менеджмент риска: стандарты Австрии, Великобритании и Австралии — предтеча будущего стандарта ISO 31000 // Мир стандартов. – 2007. – № 2 (13). – С. 33–38.
11. Методология оценки состояния экосистем: учеб. пособие / Под ред. О. М. Кожовой и В. В. Воробьева. – Ростов н/Д: ООО «ЦВВР», 2000. – 128 с.
12. Knight K. Chairman ISO/TMB/WG on Risk Management Terminology. Risk Management: an integral component of corporate governance and good management // ISO Bulletin. – 2003. – P. 21–24.
13. Aven T. Foundations of risk analysis. – John Wiley & Sons Ltd, 2003.
14. Горицкий В. М., Мартынюк В. Ф., Сайгина Ю. Н. Сценарии аварий при взрыве и пожаре в резервуаре // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 2. – С. 40–44.
15. Adams A. The UK experience in offshore pipeline operations // Pipes & Pipelines Int. – 1992. – P. 9–14.
16. Olender W. K. Statistical Failure Mode Analysis of Submarine Pipeline Accidents // International Oil Spill Conference Proceedings. – 1983. – Vol. 1983, Issue 1. – P. 361–365.

17. Занин А. В., Мильке А. А., Квасов И. Н. Оценка риска трубопроводного транспорта углеводородов с морских нефтедобывающих платформ на территории Арктического шельфа // Нефть и газ Западной Сибири: сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. – Тюмень, 2017. – С. 139–142.
18. Оценка экологического риска по подфакельным замерам концентраций загрязняющих веществ, выбрасываемых группой точечных источников / В. А. Долодаренко [и др.]. – Экологія і природокористування. – 2007. – Випуск 10. – С. 174–178.
19. Руководство по оценке риска для здоровья людей и защиты окружающей среды при использовании химических смесей // Мир стандартов. – 2008. – № 7 (28). – С. 69–86.
20. Marashi E., Davis J. P. An argumentation-based method for managing complex issues in design of infrastructural systems // Reliability Engineering & System Safety. – 2006. – Vol. 91, Issue 12. – P. 1535–1545. DOI: 10.1016/j.res.2006.01.013
21. Антипов В. Н., Скаков И. А. Оценка физических эффектов при взрыве топливно-воздушной смеси // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 2. – С. 39–42.
22. Варламов Д. П., Стеклов О. И. Управление рисками эксплуатации линейной части магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2013. – № 3. – С. 38–44.
23. Колесников Е. Ю. К вопросу о расчете и нормировании пожарных рисков // Проблемы анализа риска. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 48–79.

References

1. Ivanov, E. A., Agapov, A. A., Buyko, K. V., Genfal'd, B. Ye., Dadonov, Yu. A., Il'in, A. M.,... Pchel'nikov, A. V. (2010) Metodiki otsenki posledstviy avariya na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh: sbornik dokumentov. Seriya 27. Vypusk 2. 3rd edition, revised and expanded. Moscow, Nauchno-tehnicheskii tsentr issledovaniya problem promyshlennoy bezopasnosti CJSC Publ., 208 p. (In Russian).
2. Zemenkova, M. Yu. (2019). Metody snizheniya tekhnologicheskikh i ekologicheskikh riskov pri transporte i khraneni uglevodorodov. Tyumen, TIU Publ., 397 p. (In Russian).
3. Shtengauer, O. V. & Shendaleva, E. V. (2015). Otsenka ekologicheskikh riskov pri transportirovke, khraneni nefi i nefteproduktov. Standartizatsiya, metrologiya i upravleniye kachestvom: materialy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Omsk, pp. 273–277. (In Russian).
4. Kershenbaum, B. Ya., Grigoriev, L. I. & Shcherban', P. S. (2014). Razrabotka kompleksnogo podkhoda k upravleniyu kachestvom sooruzheniya slozhnykh tekhnicheskikh ob'yektov s ispol'zovaniyem risk-menedzhmenta. Quality Management in Oil and Gas Industry, (2), pp. 9–12. (In Russian).
5. Kolodkin, V. M., Murin, A. V., Petrov, A. K. & Gorsky, V. G. (2001). Kolichestvennaya otsenka riska khimicheskikh avariya. Izhevsk, Udmurtskiy Universitet Publ., 288 p. (In Russian).
6. Roed, W., Mosleh, A., Vinnem, J. E. & Aven, T. (2009). On the Use of Hybrid Causal Logic Method in Offshore Risk Analysis. Reliability Engineering & System Safety, 94(2), pp. 445–455. (In English). DOI: 10.1016/j.res.2008.04.003
7. Jaeger, C. C., Renn, O., Rosa, E. A. & Webler, Th. (2001). Risk, Uncertainty and Rational Action. London: Earthscan. (2001). IRGC (International Risk Governance Council). White Paper on Risk Governance: Towards an Integrative Framework. Geneva, International Risk Governance Council. (In English).
8. Lees, F. P. (1996). Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment, and Control. Volume 3. Oxford, Butterworth Heinemann. (In English).
9. Tetel'min, V. V. & Yazev, V. A. (2009). Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse. Dolgoprudny, Intellekt Publ., 352 p. (In Russian).
10. Khokhlyavin, S. A. (2007). Menedzhment riska: standarty Avstrii, Velikobritanii i Avstralii - predtecha budushchego standarta ISO 31000. Mir Standartov, 2(13), pp. 33–38. (In Russian).
11. Kozhova, O. M. & Vorob'yev, V. V. (Eds.) (2000). Metodologiya otsenki sostoyaniya ekosistem. Rostov-on-Don, TSVVR LLC Publ., 128 p. (In Russian).
12. Knight, K. (2003). Chairman ISO/TMB/WG on Risk Management Terminology. Risk Management: an Integral Component of Corporate Governance and Good Management. ISO Bulletin, pp. 21–24. (In English).
13. Aven, T. (2003). Foundations of risk analysis. John Wiley & Sons Ltd. (In English).

14. Goritskiy, V. M., Martynyuk, V. F. & Saygina, Yu. N. (2012). Accident Scenarios During Explosion and Fire in the Tank. *Quality Management in Oil and Gas Industry*, (2), pp. 40-43. (In Russian).
15. Adams, A. (1992). The UK experience in offshore pipeline operations. *Pipes & Pipelines Int.*, pp. 9-14. (In English).
16. Olender, W. K. (1983). Statistical Failure Mode Analysis of Submarine Pipeline Accidents. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1983(1), pp. 361-365. (In English).
17. Zarin, A. V., Mil'ke, A. A. & Kvasov, I. N. (2017). Otsenka riska truboprovodnogo transporta uglevodorodov s morskikh nefte dobyvayushchikh platform na territorii Arkticheskogo shel'fa. *Nef't' i gaz Zapadnoy Sibiri: sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Tyumen, pp. 139-142. (In Russian).
18. Dolodarenko, V. A., Poltoratskaya, V. N., Kaspijceva, V. Yu., & Falko, V. V. (2007). Estimation of ecological risk on under-plume to gaugings of concentration of polluting substances, which are thrown out by group of dot sources. *Ecology and nature management*, (10), pp. 174-178. (In Ukrainian).
19. Rukovodstvo po otsenke riska dlya zdorov'ya lyudey i zashchity okruzhayushchey sredy pri ispol'zovanii khimicheskikh smesey. (2008). *Mir Standartov*, (7(28)), pp. 69-86. (In Russian).
20. Marashi, E., & Davis, J. P. (2016). An argumentation-based method for managing complex issues in design of infrastructural systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(12), pp. 1535-1545. (In English). DOI: 10.1016/j.res.2006.01.013
21. Antip'yev, V. N., & Skakov, I. A. (2013). Otsenka fizicheskikh effektov pri vzryve toplivno-vozdushnoy smesi. *Quality Management in Oil and Gas Industry*, (2), pp. 39-42. (In Russian).
22. Varlamov, D. P. & Steklov, O. I. (2013). Upravleniye riskami ekspluatatsii lineynoy chasti magistral'nykh gazoprovodov, podverzhennykh korrozionnomu rastreskivaniyu pod napryazheniyem. *Quality Management in Oil and Gas Industry*, (3), pp. 38-44. (In Russian).
23. Kolesnikov, E. Yu. (2010). K voprosu o raschete i normirovanii pozharnykh riskov. *Issues of risk analysis*, 7(3), pp. 48-79. (In Russian).

Сведения об авторах

Квасов Игорь Николаевич, к. э. н., профессор, декан факультета транспорта, нефти и газа, профессор кафедры нефтегазового дела, стандартизации и метрологии, Омский государственный технический университет, г. Омск

Шендалева Елена Владимировна, к. т. н., доцент кафедры нефтегазового дела, стандартизации и метрологии, Омский государственный технический университет, г. Омск

Штенгауэр Ольга Викторовна, инженер-метролог Омского моторостроительного объединения им. П. И. Баранова филиала научно-производственного центра газотурбостроения «Салют», г. Омск

Земенкова Мария Юрьевна, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: muzemenkova@mail.ru

Information about the authors

Igor N. Kvasov, Candidate of Economics, Professor, Dean of the Faculty of Transport, Oil and Gas, Professor at the Department of Oil and Gas Business, Standardization and Metrology, Omsk State Technical University

Elena V. Shendaleva, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Oil and Gas Business, Standardization and Metrology, Omsk State Technical University

Olga V. Shtengauer, Engineer-metrologist, Omsk engine-building association of P. I. Baranov branch of the Salute gas turbine engineering research and production center, Omsk

Maria Yu. Zemenkova, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: muzemenkova@mail.ru