

УДК 502.22:004.42

**ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ
И КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ
НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

**REVIEW OF MODERN SOFTWARE COMPLEXES
AND DIGITAL TWIN CONCEPT
FOR FORECASTING EMERGENCY SITUATIONS
IN OIL AND GAS INDUSTRY**

**К.Н. Абдрахманова, А.В. Федосов, К.Р. Идрисова, И.Р. Даниева,
Р.Р. Валеева**

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

**Karina N. Abdrakhmanova, Artem V. Fedosov, Karina R. Idrisova,
Ilida R. Danieva, Regina R. Valeeva**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: fedsv-artem@rambler.ru

Аннотация. Количество и масштаб аварий в виду усложнения технологических процессов возрастает, что негативно влияет на людей, окружающую среду и не выгодно с экономической точки зрения для предприятия. В связи с этим возникает необходимость в качественном применении уже имеющихся методов управления рисками на предприятии и модернизации организации безопасной работы с учетом реального состояния опасного производственного объекта.

Одним из способов снижения уровня опасности предприятия является анализ имеющихся рисков, который состоит из идентификации рисков,

оценки величины последствий и создания превентивных мероприятий, мероприятий по снижению имеющегося уровня риска. Разработка всевозможных сценариев протекания аварии, установление последствий и вероятностей реализации негативных происшествий являются базой для управления опасностями.

В данной работе проанализировано применение метода анализа опасностей «Дерево последствий». Метод широко применяется для объектов нефтегазовой промышленности, оказывая влияние на уменьшение аварийных ситуаций и позволяя обнаружить явления, приводящие к серьезным последствиям. В процессе построения дерева используется система количественных и качественных способов определения опасностей для обнаружения вероятностных результатов начального действия.

В статье представлен обзор некоторых программных комплексов, позволяющих визуализировать этапы вычисления рисков и минимизировать процесс расчетов на основе 3D моделирования. В нефтегазовой и нефтеперерабатывающей промышленности для симулирования в наземных условиях наиболее известных сценариев воспламенения и токсического выброса используется программный инструмент FLACS. Произвести оценку влияния опасных или вредных веществ на производственный объект можно благодаря отечественному программному комплексу «TOXI+Risk». Для имитации последствий аварий с возможностью моделирования угроз, позволяющих изучить всю последовательность событий от самой аварии до ущерба, применяется Phast Lite.

Кроме того, в статье дано определение цифрового двойника. Цифровой двойник является интегрированной моделью реального объекта наблюдения, обеспечивающей постоянное взаимодействие и обмен данными с реальным объектом для моделирования поведения объекта, прогнозирования и выбора наиболее адекватного и эффективного сценария

проведения технологического процесса. Технология является перспективной для управления производством и продления безопасного эксплуатационного ресурса.

Abstract. Number and scale of accidents is increasing because of technological processes complexity, this negatively affects people, environment, and is not economically beneficial for enterprises. In this regard, there is a need for good application of existing risk management methods at enterprises and modernization of safe work organization, taking into account real state of a hazardous production facility.

One of the ways to reduce risk level of an enterprise is to analyze existing risks, which consists of risks identification, consequences assessment and creation of preventive measures, measures to reduce existing risk level. Development of various scenarios of an accident, establishment of consequences and probabilities of negative incidents implementation is the basis for hazard management.

In this paper, is analyzed application of hazard analysis method «Consequence Tree». The method is widely used for oil and gas facilities, influencing reduction of emergency situations and allowing detection of situation leading to serious consequences. In process of constructing tree, is used a system of quantitative and qualitative methods of hazards determining to define probability of the initial action.

The article provides an overview of some software systems that allow to visualize risks analyzing steps and minimize calculation process based on 3D modeling. In oil and gas and refining industries, the FLACS software tool is used to simulate most well-known ignition and toxic emission scenarios in terrestrial conditions. It is possible to assess effect of hazardous or harmful substances on production facility in domestic TOXI+Risk software package. Phast Lite is used to simulate consequences of accidents with ability to create danger that allow to study entire sequence of events from accident itself to damage.

In addition, the article defines digital twin. The digital twin is an integrated model of a real object, providing constant interaction and data exchange with a real object, for object behavior modeling, forecasting and choosing the most appropriate and effective scenario of technological process. This technology is promising for production management and for safe operational resource extension.

Ключевые слова: анализ риска; аварии на опасном производственном объекте; дерево событий; моделирование аварийных последствий; цифровой двойники; FLACS; TOXI+Risk

Key words: risk analysis; accidents at the hazardous location; event tree; modeling of emergency consequences; digital twin; FLACS; TOXI+Risk

Промышленность находится в постоянном развитии, создаются новые технологии, усложняются процессы, позволяющие повысить качество получаемого продукта, что, в свою очередь, приводит и к повышению уровня опасности на объекте. Ранее применяемые технологии на разных этапах жизненного цикла объекта теряют свою актуальность.

За последние несколько лет в различных отраслях промышленности произошло много разрушительных техногенных катастроф. В связи с подобными ситуациями постоянно разрабатываются новые подходы в области управления безопасностью и рисками, которые способствуют повышению уровня обеспечения безопасности людей и окружающей среды. В настоящее время опасности, которые могут привести к негативным ситуациям, анализируются с помощью различных методов оценки риска.

Согласно нормативным документам риск возникновения аварии – это мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и соответствующую ей тяжесть последствия [1, 2].

При разработке проектной документации, документации на техническое перевооружение, декларации промышленной безопасности, обосновании безопасности опасного производственного объекта, плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, а также в целях разработки мероприятий по снижению количества аварий проводится анализ риска. Комплексный анализ риска позволяет обнаружить все опасные ситуации и разработать превентивные мероприятия и на объектах нефтепереработки, и на объектах транспортировки – магистральных трубопроводах [3].

Термин «риск» сочетает в себе как вероятность события, так и тяжесть его последствий. В области производственной безопасности после идентификации опасностей необходимо оценить степень их последствий в случае какой-либо негативной ситуации. С этой целью применяются различные методы качественной и количественной оценки риска. Они способствуют правильной организации мероприятий по снижению уровня опасности на производстве. Наиболее систематизированным и комплексным из этих методов на данный момент является метод вероятностной оценки риска [4].

Целью вероятностной оценки риска является выявление компонентов, образующих риск, а также установление ориентиров для разработки мероприятий по его снижению до уровня, принимаемого обществом [5–7].

Вероятностный способ анализа опасностей для технических систем способствует выявлению различных путей развития процессов, выстраивая дерево последствий или деревьев отказов технических устройств и сооружений для формирования логических цепей нежеланных результатов нарушения требований безопасности.

Результатом анализа риска являются сценарии аварий, применяемые для оценки степени опасности аварий на промышленных объектах и разработки превентивных мероприятий.

Дерево последствий (дерево событий) – это метод для определения развития аварийной ситуации. Цель этого метода состоит в изучении формирований ситуаций (начиная от аварии) с учетом результативности сопротивления устройств безопасности до заключительного состояния сооружения. В итоге изучения всех возможных вариаций протекания ситуаций обнаруживаются такие состояния, которые воспринимаются как аварийная ситуация. Например, распространенные прогнозы вероятных аварийных ситуаций на нефтепроводах возникают вследствие полной разгерметизации труб и попадания продукта в атмосферу в критическом режиме [8]. Пример дерева событий для последствий аварийных ситуаций с разгерметизацией нефтепровода приведен на рисунке 1.



Рисунок 1. Дерево событий при авариях в случае разгерметизации линейной части магистрального нефтепровода

Построение дерева событий даёт возможность предусматривать причины аварийных ситуаций и минимизировать затраты на локализацию

и ликвидацию результатов, способствуя повышению уровня промышленной безопасности.

Все фундаментальные методы оценки рисков лежат в основе моделирования негативных явлений на опасном производственном объекте.

Модель – это визуализация реального процесса, структурированное в установленном порядке знание.

С быстрым развитием новых технологий, таких как облачные технологии, интернет вещей, Big Data, искусственного интеллекта, приблизилась эра «умного» производства, ключевым элементом которого становятся «умные» математические модели и «умные» цифровые двойники.

Концепция цифрового двойника, как виртуального представления физического объекта используется более 30 лет, преимущественно в космической отрасли. Впервые же концепция цифрового двойника была создана программой NASA Apollo, где были созданы две одинаковые модели космического аппарата, один аппарат был отправлен в космос для выполнения своей миссии, другой – остался на Земле для наблюдений, лучшего понимания возникших ситуации и принятия решений [9, 10].

В связи с тотальной цифровизацией мира и отраслей промышленности, например в нефтяной отрасли, наметились быстрые темпы в развитии и применении этой технологии.

Цифровой двойник является виртуальным прототипом реального объекта исследования, он не ограничивается сбором данных, на стадии разработки и изготовления продукта он продолжает собирать и анализировать данные во время всего жизненного цикла реального объекта, в том числе с помощью многочисленных датчиков, образуя киберфизическую систему [11, 12].

Данная технология является перспективной для управления производством и продления безопасного эксплуатационного ресурса,

анализируя накопленные данные, симулируя поведение объекта в заданных условиях, прогнозируя определение наиболее эффективного и адекватного сценария проведения технологического процесса и других мероприятий. Это особенно важно для тех предприятий, которые проводят техническое обслуживание и ремонт по фактическому состоянию оборудования.

Значимость технологий цифровых двойников в вопросах промышленной безопасности и управления производством осознают в энергетическом секторе, так планируется создание цифровых двойников АЭС. Это позволит не только собирать и эффективно применять данные о работе каждой отдельной единицы оборудования, но и создаст возможность для моделирования и прогнозирования работы объектов в различных режимах. ПАО «Газпром нефть» также проявляет интерес к данной технологии, создав цифровые двойники установки гидроочистки бензина каталитического крекинга на Московском нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) и установки первичной переработки нефти на Омском НПЗ [13].

Для построения комплексной модели двойника используются численные методы моделирования физических процессов в материалах объекта. Это помогает прогнозировать реакцию изделия на эксплуатационные нагрузки, например с помощью метода конечных элементов (FEA — Finite Element Analysis). С помощью этого метода можно моделировать поведение сложных систем путём разбиения их на множество элементов (клеток), достаточно малых для того, чтобы рассматривать их свойства как однородные. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [14].

Научно-технический прогресс вызывает необходимость в применении специальных программных продуктов для моделирования последствий

аварийных ситуаций. С появлением более мощных компьютеров возникли и новые программы.

Рассмотрим зарубежный программный комплекс FLACS.

FLACS – это программный инструмент, целью которого является моделирование в наземных условиях (рассеивания, пожара и взрыва) наиболее известных сценариев воспламенения и токсического выброса. Он широко используется в нефтегазовой и перерабатывающей промышленности, а также в большей степени в ядерной промышленности, на объектах с потенциалом взрыва пыли и во многих других областях. Моделируя с помощью CFD (Computational Fluid Dynamics), можно намного точнее прогнозировать последствия и тем самым учитывать влияние всех способствующих и смягчающих факторов [15, 16].

Применение 3D моделирования для оценки рисков дает дополнительные возможности, например, прогнозирование рассеивания дыма, проверка гипотезы при расследовании происшествия, визуализация результатов в трех измерениях, определение местоположения газа, оптимизированное разделение между оборудованием, спецификация пассивного пожара и защита, размещение оборудования для обеспечения безопасности [17].

На рисунке 2 показан пример вывода FLACS-Risk: новая трехмерная визуализация риска избыточных давлений взрыва [18].

Оценить результаты влияния опасных или вредных веществ на производственный объект можно благодаря отечественному программному комплексу «ТОХИ+Risk» (разработчик ЗАО НТЦ ПБ, г. Москва) [19]. Программа является альтернативным решением расчетов последствий частных сценариев аварий, также имеется возможность построения зоны риска и расчета показателей риска (индивидуального, коллективного, социального).

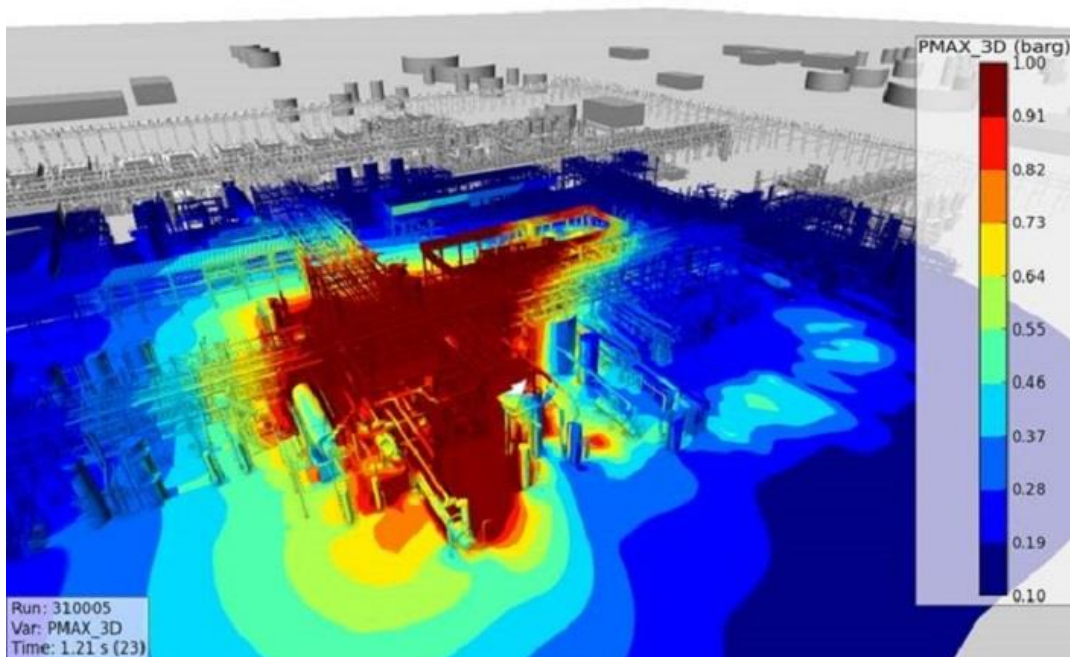


Рисунок 2. Пример трехмерной визуализации риска избыточных давлений взрыва

Особенность TOXI+Risk – это ещё один путь для учёта:

- распределения и параметров технических конструкций и объектов, подверженных опасности (люди, окружающая среда, оборудование);
- сценариев аварийных ситуаций и вероятности их образования.

Программный комплекс предоставляет возможность сформировать величину опасного вещества, проникшего в атмосферу в результате аварийной ситуации, и наглядно представить результаты расчетов на планах окрестности, осуществить оценку количества людей, оказавшихся в зонах воздействия опасностей, пострадавших для различных сценариев аварийных ситуаций.

В результате имеется возможность построения поля потенциального риска, пример которого изображен на рисунке 3 [20].

При анализе последствий аварий также применяется программный инструмент Phast Lite (разработчик Det Norske Veritas). Это программное обеспечение позволяет анализировать сценарии аварийных последствий с возможностями моделирования угроз, позволяющий изучать развития событий от первоначального (авария) до заключительного (нанесение

ущерба). Phast Lite разработана для анализа рисков возникновения аварийных ситуаций на всех этапах проектирование и эксплуатации. Основа программного инструмента – моделирование различных сценариев выбросов вредных и опасных веществ [21].

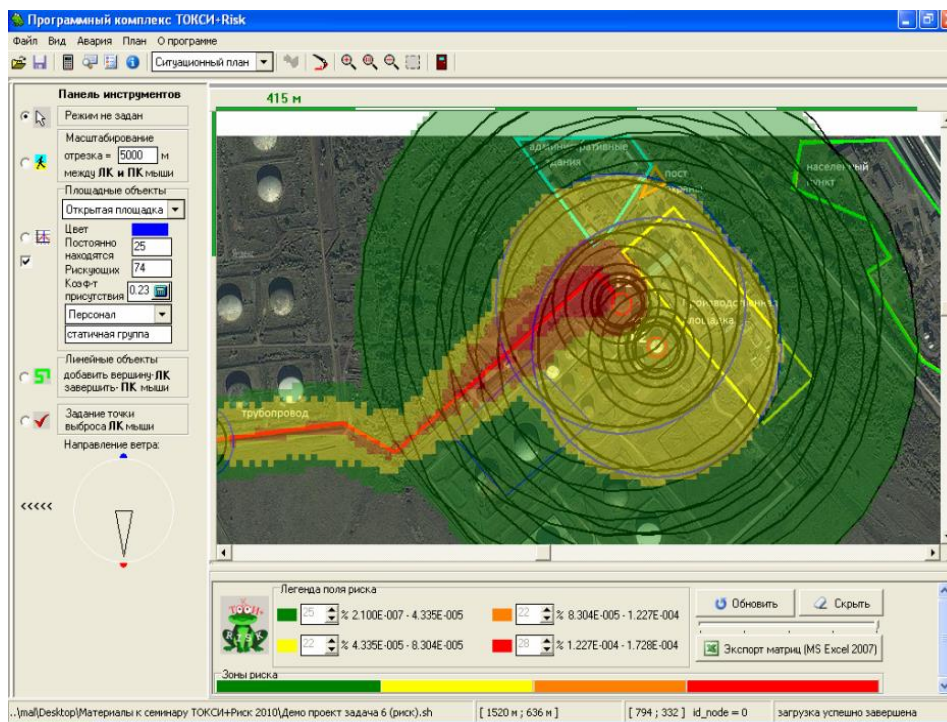


Рисунок 3. Пример поля потенциального риска

- Программное обеспечение Phast Lite позволяет получить:
- достоверные результаты анализа опасности действий;
 - широкие возможности создания подробных отчетов и диаграмм для удобного и наглядного отображения результатов;
 - широкое применение программного обеспечения анализа опасности на производстве. Имеется возможность моделировать различные источники выбросов, например, разгерметизации трубопроводов, разрывов сосудов и так далее;
 - оценку целого спектра опасностей при производстве [22].

Программа также позволяет визуализировать контуры избыточного давления при аварии. Пример визуализации представлен на рисунке 4.



Рисунок 4. Пример визуализации контуров избыточного давления

В целом рассмотренные выше программы дают возможность создания «реального пространства» в месте неконтролируемого выброса опасного или вредного вещества, установления параметров выброса, наглядного изображения результатов проделанных расчётов рисков [23].

Выводы

В статье рассмотрены современные программные комплексы, применяемые в области обеспечения промышленной безопасности на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса. Разработка оптимального набора моделей позволит сформировать четкое представление негативной ситуации, обеспечить корректный прогноз развития ситуации и визуально представить последствия аварии.

Каждый программный продукт ориентирован на симуляцию определенных ситуаций, моделирование сценариев воспламенения, оценку влияния опасных и вредных веществ на производство и так далее. Основывая свою работу на 3D моделировании, они способствуют минимизации процесса расчета и обеспечивают комплексное понимание ситуации для рассмотрения всех возможных сценариев протекания аварии.

При корректном использовании программ обеспечивается более качественное приближение модели к фактической ситуации и более глубокий учет анализируемых параметров.

Список используемых источников

1. Федосов А.В., Идрисова К.Р., Абдрахманов Н.Х., Ефимова А.В., Градобоева К.В., Расулов С.Р. Теоретические основы промышленной безопасности. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2018. 129 с.

2. Абдрахманов Н.Х. Научно-методические основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов нефтегазового комплекса на основе управления системными рисками: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2014. 266 с.

3. Karasan A., Ilbahar E., Cebi S., Kahraman C. A New Risk Assessment Approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and Its Extension with Pythagorean Fuzzy Sets // Safety Science. 2018. Vol. 108. P. 173-187. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.04.031.

4. Федосов А.В., Бадртдинова И.И., Абдрахманова К.Н., Валекжанин Д.Ю. Количественная оценка неопределенности результатов анализа риска техногенных аварий // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2019. № 3. С. 46-66. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2019/ogbus_3_2019_p46-66.pdf (дата обращения: 19.04.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-3-46-66.

5. Абдрахманов Н.Х., Шутов Н.В., Абдрахманова К.Н., Ворохобко В.В., Шайбаков Р.А. Исследование и анализ нестационарности возникновения и развития потенциально опасных ситуаций при эксплуатации опасных производственных объектов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. № 1. С. 292–306. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p292-306_AbdrahmanovNKH_ru.pdf (дата обращения: 19.04.2020).

6. Павлова Ю.А., Проскура В.С., Федосов А.В. Анализ риска и методические аспекты оценки ущерба при авариях на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Вып. 2 (108). С. 138-146.

7. Гаскарова Г.Ф., Шарафутдинова Г.М. Проблемы оценки профессиональных рисков // Актуальные проблемы науки и техники – 2017: матер. X Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: В 2 т. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2017. Т. 2. С. 133-135.

8. Гарипов Р.Ф., Шарафутдинова Г.М., Барахнина В.Б. Анализ рисков на основе результатов оценки культуры безопасности // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 9. С. 82-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-82-88.

9. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // Apriso. URL: http://www.aprison.com/library/video/dr_grieves_digital_twin_webcast_en.php (дата обращения: 20.04.2020).

10. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles // Structures, Structural Dynamics and Materials: Proceeding of 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Conference. Honolulu, Hawaii, USA. 2012. P. 1-14. DOI: 10.2514/6.2012-1818.

11. Rajkumar R.R., Lee I., Sha L., Stankovic J. Cyber-Physical Systems: the Next Computing Revolution // Proceeding of the 47th Design Automation Conference. Anaheim, California, USA. 2010. P. 731-736. DOI: 10.1145/1837274.1837461.

12. Grieves M. Product Lifecycle Management: the New Paradigm for Enterprises // International Journal of Product Development. 2005. Vol. 2. No. 1-2. P. 71-84. DOI: 10.1504/IJPD.2005.006669.

13. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения // Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ. 08.04.2018. URL: [http://fea.ru/news/6721\(12.06.2018\)](http://fea.ru/news/6721(12.06.2018)). (дата обращения: 21.04.2020).

14. Абдрахманова К.Н. Применение цифрового двойника в целях обеспечения промышленной безопасности в нефтегазовой отрасли // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2019. С. 152-153.

15. Соловьев С. Цифровые двойники в промышленности: сегодня и завтра // ИнформКурьер-Связь (ИКС). 2019. № 2. С. 81-83. URL: <http://www.iksmedia.ru/articles/5585041-Czifrovye-dvojniki-v-promyshlennost.html#ixzz65XrvkZi1> (дата обращения: 21.04.2020).

16. Банников В.В., Савицкая Т.В. Моделирование последствий аварий на опасных производственных объектах с использованием программного комплекса FLACS // Успехи в химии и химической технологии. 2016. № 4. С. 24-26.

17. Марухленко А.Л., Агапов А.А. Учебные курсы по 3D-моделированию последствий аварий с использованием программного комплекса FLACS // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 2. С. 78-79.

18. Success Factors for Computational Fluid Dynamics (CFD) based Fire and Explosion Studies // Bell Energy. URL: <https://bell-energy.com/business-analytics/cfd-success-factor> (дата обращения: 22.04.2020).

19. Официальный сайт ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. URL: <https://www.safety.ru/org-zao> (дата обращения: 22.04.2020).

20. Программные средства по промышленной безопасности Toxi+. Официальный сайт. URL: <https://toxi.ru> (дата обращения: 22.04.2020).

21. Consequence Analysis Software – Phast Lite // Det Norske Veritas (DNV). URL: <https://www.dnvgl.com/services/consequence-analysis-software-phast-lite-1695> (дата обращения: 23.04.2020).

22. Gul M., Guven B., Guneri A.F. A New Fine-Kinney-Based Risk Assessment Framework Using FAHP-FVIKOR Incorporation // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 53. P. 3-16. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.08.014.

23. Oilfield Technology: Официальный сайт. URL: <https://www.oilfieldtechnology.com> (дата обращения: 24.04.2020).

References

1. Fedosov A.V., Idrisova K.R., Abdrakhmanov N.Kh., Efimova A.V., Gradoboeva K.V., Rasulov S.R. *Teoreticheskie osnovy promyshlennoi bezopasnosti* [Theoretical Foundations of Industrial Safety]. Ufa, UGNTU Publ., 2018. 129 p. [in Russian].

2. Abdrakhmanov N.Kh. *Nauchno-metodicheskie osnovy obespecheniya bezopasnoi ekspluatatsii opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov neftegazovogo kompleksa na osnove upravleniya sistemnymi riskami: dis. d-ra tekhn. Nauk* [Scientific and Methodological Foundations for Ensuring the Safe Operation of Hazardous Production Facilities of the Oil and Gas Complex Based on Systemic Risk Management: Doct. Engin. Sci. Diss.]. Ufa, 2014. 266 p. [in Russian].

3. Karasan A., Ilbahar E., Cebi S., Kahraman C. A New Risk Assessment Approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and Its Extension with Pythagorean Fuzzy Sets. *Safety Science*, 2018, Vol. 108, pp. 173-187. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.04.031.

4. Fedosov A.V., Badrtdinova I.I., Abdrakhmanova K.N., Valekzhanin D.Yu. *Kolichestvennaya otsenka neopredelennosti rezul'tatov analiza riska tekhnogennykh avarii* [Quantitative Assessment of Uncertainty of Technogenic Accidents Risk Analysis]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2019, No. 3, pp. 46-66. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2019/ogbus_3_2019_p46-66.pdf (accessed 19.04.2020). DOI: 10.17122/ogbus-2019-3-46-66. [in Russian].

5. Abdrakhmanov N.Kh., Shutov N.V., Abdrakhmanova K.N., Vorokhobko V.V., Shaibakov R.A. Issledovanie i analiz nestatsionarnosti vozniknoveniya i razvitiya potentsial'no opasnykh situatsii pri ekspluatatsii opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [Research and the Analysis of Not Stationarity of Emergence and Development of Potentially Dangerous Situations at Operation of Hazardous Production Facilities]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2015, No. 1, pp. 292-306. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2015/ogbus_1_2015_p292-306_AbdrakhmanovNKH_ru.pdf (accessed 19.04.2020). [in Russian].

6. Pavlova Yu.A., Proskura V.S., Fedosov A.V. Analiz riska i metodicheskie aspekty otsenki ushcherba pri avariyaх na predpriyatiyakh neftepererabatyvayushchego kompleksa [Risk Analysis and Methodological Aspects of Accidents Damage Evaluation at Oil Refining Complex]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov – Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2017, Issue 2 (108), pp. 138-146. [in Russian].

7. Gaskarova G.F., Sharafutdinova G.M. Problemy otsenki professional'nykh riskov [Professional Risk Assessment Issues]. *Materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsiya molodykh uchenykh «Aktual'nye problemy nauki i tekhniki – 2017»: V 2 t.* [Materials of the X International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «Actual Problems of Science and Technology – 2017»: in 2 Volumes]. Ufa, UGNTU Publ., 2017, Vol. 2, pp. 133-135. [in Russian].

8. Garipov R.F., Sharafutdinova G.M., Barakhnina V.B. Analiz riskov na osnove rezul'tatov otsenki kul'tury bezopasnosti [Risk Analysis Based on Safety Culture Assessment Results]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2019, No. 9, pp. 82-88. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-82-88. [in Russian].

9. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication. *Apriso*. Available at: http://www.aprison.com/library/video/dr_grieves_digital_twin_webcast_en.php (accessed 20.04.2020).

10. Glaessgen E.H., Stargel D.S. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *Proceeding of 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Conference «Structures, Structural Dynamics and Materials»*. Honolulu, Hawaii, USA, 2012, pp. 1-14. DOI: 10.2514/6.2012-1818.

11. Rajkumar R.R., Lee I., Sha L., Stankovic J. Cyber-Physical Systems: the Next Computing Revolution. *Proceeding of the 47th Design Automation Conference*. Anaheim, California, USA, 2010, pp. 731-736. DOI: 10.1145/1837274.1837461.

12. Grieves M. Product Lifecycle Management: the New Paradigm for Enterprises. *International Journal of Product Development*, 2005, Vol. 2, No. 1-2, pp. 71-84. DOI: 10.1504/IJPD.2005.006669.

13. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Maruseva V.M. Novaya paradigma tsifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoi produktsii novogo pokoleniya [The New Paradigm of Digital Design and Modeling of Globally Competitive Next-Generation Products]. *Tsentr komp'yuternogo inzhiniringa SPbPU*. 08.04.2018. Available at: <http://fea.ru/news/6721>(12.06.2018. (accessed 21.04.2020). [in Russian].

14. Abdrakhmanova K.N. Primenenie tsifrovogo dvoynika v tselyakh obespecheniya promyshlennoi bezopasnosti v neftegazovoi otrasli [The Use of the Digital Double to Ensure Industrial Safety in the Oil and Gas Industry]. *Materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy i tendentsii razvitiya tekhnosfernoi bezopasnosti v neftegazovoi otrasli»* [Materials of the II International Scientific-Practical Conference «Actual Problems and Development Trends of Technosphere Safety in the Oil and Gas Industry»]. Ufa, UGNTU Publ., 2019, pp. 152-153. [in Russian].

15. Solovev S. Tsifrovye dvoyniki v promyshlennosti: segodnya i zavtra [Digital Doubles in the Industry: Today and Tomorrow]. *InformKur'er-Svyaz' (IKS) – InformCourier-Communication (IKS)*, 2019, No. 2, pp. 81-83. Available at: <http://www.iksmedia.ru/articles/5585041-Czifrovye-dvoyniki-v-promyshlennost.html#ixzz65XrvkZi1> (accessed 21.04.2020). [in Russian].

16. Bannikov V.V., Savitskaya T.V. Modelirovanie posledstviy avarii na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh s ispol'zovaniem programmnoy kompleksa FLACS [Modeling Consequences of Accidents on Especially Dangerous Industrial Objects by Using Flacs Software System]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii – Success in Chemistry and Chemical Technology*, 2016, No. 4, pp. 24-26. [in Russian].

17. Marukhlenko A.L., Agapov A.A. Uchebnye kursy po 3D-modelirovaniyu posledstviy avarii s ispol'zovaniem programmnoy kompleksa FLACS [Training Courses on 3D Modeling of Accident Consequences Using the FLACS Software Package]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2014, No. 2, pp. 78-79. [in Russian].

18. Success Factors for Computational Fluid Dynamics (CFD) Based Fire and Explosion Studies. *Bell Energy*. Available at: <https://bell-energy.com/business-analytics/cfd-success-factors> (accessed 22.04.2020).

19. Official Website of Scientific and Technical Center of Industrial Safety Problems Research CJSC. Available at: <https://www.safety.ru/org-zao> (accessed 22.04.2020).

20. Industrial Safety Software Toxi+: Official Website. Available at: <https://toxi.ru> (accessed 22.04.2020). [in Russian].

21. Consequence Analysis Software – Phast Lite. *Det Norske Veritas (DNV)*. Available at: <https://www.dnvgl.com/services/consequence-analysis-software-phast-lite-1695> (accessed 23.04.2020).

22. Gul M., Guven B., Guneri A.F. A New Fine-Kinney-Based Risk Assessment Framework Using FAHP-FVIKOR Incorporation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, Vol. 53, pp. 3-16. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.08.014.

23. Oilfield Technology: Official Website. Available at: <https://www.oilfieldtechnology.com> (accessed 24.04.2020).

Сведения об авторах

About the authors

Абдрахманова Карина Наилевна, аспирант кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Karina N. Abdrakhmanova, Post-graduate Student of Fire and Industrial Safety Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: akarinan@mail.ru

Федосов Артём Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Artem V. Fedosov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: fedsv-artem@rambler.ru

Идрисова Карина Робертовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Karina R. Idrisova, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: pbot@mail.ru

Даниева Илида Рустамовна, студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ilida R. Danieva, Student of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ilida.danieva@yandex.ru

Валеева Регина Рустэмовна, студент кафедры «Промышленная безопасность и охрана труда», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Regina R. Valeeva, Student of Industrial Safety and Labor Protection Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Lyalya.val@mail.ru