

## Учет влияния человеческого фактора в автоматизированных системах пожаровзрывобезопасности с применением цифровых двойников объектов ТЭК

Илья Вадимович Самарин ✉, Владислав Валерьевич Кухарский

Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проведение комплексов мероприятий пожарной безопасности является одной из основных задач лиц, принимающих решения (ЛПР). Поддержка их деятельности выполняется с помощью автоматизированных систем пожаровзрывобезопасности (АСПВБ), в подсистему программного обеспечения которых в настоящее время все чаще включаются цифровые двойники. Их использование позволяет проводить моделирование различных, в том числе предожарных, ситуаций. ЛПР всегда должны учитывать влияние на их развитие действий персонала АСПВБ при выполнении соответствующей ситуации комплекса мероприятий. Однако в поставляемых версиях цифровых двойников требуемых расчетов нет, что заставляет восполнять подобные пробелы. Статья посвящена расчетам оценки влияния человеческого фактора на проведение комплексов мероприятий ПБ и обоснованным допускам по их корректировке.

**Методы.** Для решения поставленной задачи в статье проводится анализ иерархий, позволяющий более детально определить структуру принимаемых ЛПР решений в области пожарной безопасности. Выбраны два варианта структурной организации объектов, каждый из которых представляет собой дерево с различным числом листьев и ветвей. Структурные схемы объектов позволяют формулировать типы задач и направления для формирования комплексов мероприятий по обеспечению пожарной безопасности. Комплексы мероприятий для конкретных участков объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) формируются ЛПР в ходе дальнейшего уточнения их структуры.

**Расчеты.** Расчет регламентированного и реального времени выполнения комплексов мероприятий пожарной безопасности отдельного участка объекта ТЭК проводится на основе оценочных времен для каждого из мероприятий в комплексе. На основе полученных значений определяется интегральная степень их завершенности.

**Результаты.** Общее время мероприятий необходимо определять либо через данные о развитии опасных ситуаций за несколько лет, либо с помощью моделирования в цифровых двойниках.

**Выводы.** Включение в подсистемы программного, информационного и математического обеспечения АСПВБ расчетов интегральной степени завершенности комплексов мероприятий по обеспечению пожарной безопасности даст ЛПР возможность оперативнее реагировать на возникновение опасных ситуаций.

**Ключевые слова:** анализ иерархий объектов; принятие решений; планы пожарной безопасности; интегральная оценка комплексов мероприятий; степень завершенности выполнения мероприятия персоналом

**Для цитирования:** Самарин И.В., Кухарский В.В. Учет влияния человеческого фактора в автоматизированных системах пожаровзрывобезопасности с применением цифровых двойников объектов ТЭК // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 6. С. 25–35. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.25-35

✉ Самарин Илья Вадимович, e-mail: [ivs@gubkin.ru](mailto:ivs@gubkin.ru)

## Taking into account the human factor influence in automated fire and explosion safety systems using digital twins of fuel and energy facilities

Ilya V. Samarin ✉, Vladislav V. Kukharskiy

National University of Oil and Gas "Gubkin University", Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The implementation of fire safety measures is one of the main tasks of decision makers (DM). Their activities are supported by automated fire and explosion safety systems (AFES), whose software subsystems are

now increasingly incorporating digital twins. Their use allows modelling of various, including pre-fire, situations. The DM should always take into account the influence of their actions of the AFES personnel on their development when carrying out the appropriate set of measures. However, the supplied versions of digital twins do not contain the required calculations, which makes it necessary to fill in such gaps. The article is devoted to calculations of the human factor influence assessment on the implementation of the complexes of industrial safety measures and reasonable tolerances for their adjustment.

**Methods.** To solve this problem, the article analyzes hierarchies, which allows to define in more detail the structure of decisions made by the DM in the field of fire safety. Two variants of structural organization of objects are chosen, each of which represents a tree with a different number of leaves and branches. Structural schemes of objects allow to formulate types of tasks and directions for formation of complexes of measures to ensure fire safety. Complexes of measures for specific areas of fuel and energy complex facilities are formed by the DM in the course of further specification of their structure.

**Calculations.** Calculation of regulated and real time of performance of complexes of measures of fire safety of a separate site of the object of fuel and energy complex is carried out on the basis of estimated times for each of the measures in the complex. On the basis of the obtained values, the integral degree of their completion is determined.

**Results.** The total time of events should be determined either through data on the development of dangerous situations over several years, or by modelling in digital twins.

**Conclusions.** Inclusion of calculations of integral degree of completeness of complexes of measures to ensure fire safety in the subsystems of software, information and mathematical support of the AFES will give the DM the possibility to react more quickly to the occurrence of dangerous situations.

**Keywords:** analysis of hierarchies of objects; decision-making; fire safety plans; integral evaluation of complexes of measures; degree of completion of the event by the staff

**For citation:** Samarina I.V., Kukharskiy V.V. Taking into account the human factor influence in automated fire and explosion safety systems using digital twins of fuel and energy facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(6):25-35. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.06.25-35 (rus).

✉ Ilya Vadimovich Samarina, e-mail: ivs@gubkin.ru

## Введение

Характер работы объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) требует от их руководителей предельно внимательного отношения к решению проблем пожарной безопасности (ПБ). Забота о предотвращении пожароопасных ситуаций — одна из важных задач, выполняемых ими при непосредственном управлении такими объектами. Повышение объемов производимой на объектах ТЭК продукции и интенсификация всех связанных с этим процессов требует повышения качества мониторинга параметров различных видов деятельности и данных об окружающей среде. Предоставляемые лицам, принимающим решения (ЛПР), возможности в этом направлении предусматривали применение средств автоматизации и программного обеспечения (ПО), включаемых в автоматизированные системы (АС) пожаровзрывобезопасности (АСПВБ) [1]. Сами АСПВБ являются подмножествами АС управления предприятиями (АСУП) или технологическими процессами (АСУТП).

Внедрение данных возможностей в специальное ПО (СПО) АСПВБ до настоящего времени осуществлялось с помощью традиционных инструментальных средств разработки программ (сервисов или приложений). Это же касалось и интеграции АСПВБ с другими территориальными и объектовыми системами безопасности и жизнеобеспечения.

Учитывая ограничения в способности человека реагировать на проблемные вызовы в случаях, когда они начинают происходить массово и одновре-

менно, а также обилие применяемых в подсистеме ПО АСПВБ разнородных сервисов и приложений, динамика изменения обстановки на объектах ТЭК потребовала появления новых средств помощи в выдаче ЛПР управляющих воздействий в сложных обстоятельствах. Связанные с человеком АС не всегда позволяли это делать. Поэтому в АСПВБ применялся механизм приоритизации в последовательности управляющих мероприятий, основанный на анализе факторов влияния на ПБ [2].

На каждом из этапов развития информационных технологий (ИТ) в подсистему ПО АСПВБ внедрялись различные платформы. Их использование базировалось на математических методах, включаемых в подсистемы информационного и математического обеспечения упомянутой АС. Долгое время с этой целью использовались процедурные и объектно-ориентированные языки программирования (ЯП).

Применение цифровых двойников (Digital Twins — DT) для обеспечения ПБ — тема последних нескольких лет. Новые средства создают виртуальную копию объекта ТЭК, достоверно воспроизводящую и задающую состояние в режиме реального времени оригинала и всех процессов в нем [3, 4]. Их появление стало результатом развития PLM-технологий (Product Lifecycle Management — процесс управления жизненным циклом любого производимого продукта (сырья, материала, детали, узла, агрегата, услуги и т.п.); включает в себя замысел, проектирование, производство (если есть), сопровождение или обслуживание, утилизацию (если есть) или развитие и процедуры прекра-

щения использования. Объединяет в себе персонал, данные, алгоритмы работы, процессы, организации и управление ими), применявшихся на протяжении последних 20 лет для управления данными о продукте, его жизненным циклом, используемыми для этого программами и проектами, его качеством, а также охраной окружающей среды и труда занятых его производством работников [5–7]. Но если PLM давала информацию о фактическом состоянии продукта (детали или сборочной единицы), то цифровые двойники «дают возможность симитировать множество вариантов полных и частичных сбоев, амортизацию работающих механизмов и деталей, функционирование устройства с учетом различных режимов, а также влияние окружающей среды» [3]. Поэтому их внедрение в АСПВБ — крайне важная и актуальная задача.

Использование данной технологии для отдельных составных элементов обеспечения ПБ уже происходит [7]. Но комплексного ее применения для моделирования процессов ПБ в АСПВБ пока не произошло. Внедрение на объектах ТЭК цифровых двойников АСПВБ — сложная и многогранная задача, требующая объединения усилий многих специалистов в различных областях. При этом важной составляющей данного процесса служит применение цифровых двойников в том числе как для оценки качества стратегического планирования, так и для оперативной корректировки планов мероприятий по предупреждению опасных ситуаций исходя их конкретных условий обстановки.

Основополагающим документом, закладывающим фундамент стратегического планирования, является закон 172-ФЗ<sup>1</sup>. Согласно ст. 7, в основу данного вида деятельности должны быть положены принципы преемственности, непрерывности, результативности и эффективности. В применении к ПБ на объектах ТЭК это означает, что ЛППР и его помощники постоянно следят за ее обеспечением. Учитывая, что вся деятельность в предотвращении опасных и предпожарных ситуаций дискретна, как разработка планов профилактических мероприятий, а обстановка на объектах развивается по многим направлениям непрерывно, в АС с применением ДТ следует разработать ряд дополнительных новых нестандартных цифровых моделей по корректировке мероприятий и планов. В этих моделях следует ввести агрегатные показатели качества и завершенности необходимых мероприятий с учетом отсутствия по ряду направлений регламентов «межведомственного взаимодействия в процессах разработки, реализации и корректировки документов» [8].

<sup>1</sup> О стратегическом планировании в Российской Федерации : Федеральный закон от 28.06.2014 № 172-ФЗ (ред. от 17.02.2023). URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_164841/91e10659398bccb0f67a7f04765cc758c682c684/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/91e10659398bccb0f67a7f04765cc758c682c684/)

Методы стратегического планирования достаточно активно изучались как в применении к производственной [9–10], так и к инвестиционной деятельности отдельных предприятий [11]. Их применение в математическом и программном обеспечении АСПВБ позволит использовать мощный аппарат технологии ДТ для более эффективного мониторинга опасных ситуаций на объектах ТЭК. Одной из основных его целей является планирование и проведение ЛППР комплексов мероприятий на отдельных участках объекта ТЭК.

Статья посвящена расчетам оценки влияния человеческого фактора на проведение комплексов мероприятий ПБ и обоснованным допускам по их корректировке. Для этого в ней проводится анализ иерархий объекта ТЭК и определяются временные характеристики для комплексов мероприятий ПБ. Выводы ЛППР предоставляется делать на основе интегрального показателя качества комплекса проводимых мероприятий по обеспечению ПБ. Исходные данные для таких расчетов могут быть получены как из статистики, так путем моделирования в ДТ.

## Методы

Основная задача ЛППР на объекте ТЭК в области ПБ — определение предпосылок к возникновению пожароопасных ситуаций. Для этого ему необходим соответствующий инструмент и инструментарий, который позволит этот инструмент доработать. Использование ДТ — новый этап применения ИТ.

Конкретный объект ТЭК всегда уникален. Поэтому внедрение инструментов, основанных на технологии ДТ, требует внимательного отношения и точной настройки. Последнюю выполняют специалисты конкретной версии данного инструмента при помощи встроенных ЯП. Ее проведение включает в себя не только детальное обследование объекта ТЭК, но также и правильного его отображения в виртуальной среде.

Стандартно поставляемые средства инструментов ДТ не решают специфических задач, связанных со многими аспектами общего обеспечения ПБ, а тем более с их конкретными особенностями в данном месте и в нужное время. Это ведет к необходимости создания помимо ПО и математических моделей, отражающих цели и задачи ЛППР в обеспечении ПБ конкретного объекта ТЭК.

Составной и наиболее значимой частью таких объектов служит его производственная составляющая. Она же представляет собой наиболее уязвимую с точки зрения ПБ область, мониторинг которой дает ЛППР наибольшее количество информации для оценки. Несмотря на то что производственная составляющая в структуре объектов ТЭК занимает подчиненное по отношению к менеджменту и инве-

сторам компаний положение, основные угрозы ПБ возникают именно там.

Примером структурной схемы объекта ТЭК, с входящей в нее производственной составляющей в виде нефтеперерабатывающего завода (НПЗ), может служить схема, представленная на рис. 1. Для других вариантов объектов ТЭК (предприятий транспортировки, газопереработки или нефтехимии) их общая структура будет незначительно отличаться от приводимой на рис. 1 схемы. Также следует заметить, что основные структурные отличия схем таких предприятий могут быть нивелированы. Поэтому, учитывая, что рассматриваемый в данной статье материал носит обобщающий характер, будем считать, что другие варианты структурных схем объектов ТЭК будут носить сходный или приводимый к данной (см. рис. 1) характер.

В целях определения основных задач и мероприятий ЛПП для мониторинга ПБ на объекте ТЭК с приводимой структурой рассматриваемая на рис. 1 иерархия должна быть уточнена. Производственную часть следует рассмотреть в виде подобной структурной схемы. Об этом говорит также и метод анализа иерархий [12]. Поэтому следующим шагом в таком анализе должна стать схема НПЗ, непосредственно подчиненного ЛПП в плане обеспечения ПБ. Несмотря на то что остальные элементы структурной схемы объекта ТЭК (см. рис. 1) также нуждаются в противопожарной защите, значительно большее число пожароопасных составляющих и порожда-

ющих опасные события элементов структуры находятся в производственной части объекта ТЭК.

Типовая производственная структура НПЗ с рядом выделенных на ней элементов приведена на рис. 2. Ее последующий перевод в цифровую форму будет аналогичен действиям по математическому моделированию процессов изготовления деталей на производстве [13].

Схема в общем и не раскрываемом виде показывает, какие объекты внутри НПЗ следует рассматривать ЛПП для обеспечения на них ПБ. Наиболее «информативным» с точки зрения возможных инцидентов ПБ и возникновения пожароопасных ситуаций на данной схеме является блок «Основное производство». Для НПЗ «различают три основных варианта переработки нефти: 1) топливный; 2) топливно-масляный; 3) нефтехимический (комплексный)»<sup>2</sup> (с. 151). Согласно принципиальной схеме НПЗ, работающего по топливному варианту, «головной установкой НПЗ является установка первичной переработки нефти (ЭЛОУ – АВТ)»<sup>3</sup> (п. 4.2). Она соответствует блоку первичной обработки. Кроме нее в этом блоке указаны установки термического и каталитического крекирования, каталитических риформигов и гидроочистки, газопереработки, производство масел, а также серы и серной кислоты. На схеме (см. рис. 2) не указаны установки атмосферно-вакуумной перегонки, вторичной перегонки, изомеризации, гидродеалкилирования и депарафинизации<sup>4</sup>.

Для оценки итоговой нагрузки на ЛПП по обеспечению ПБ на НПЗ следует рассмотреть состав одного из выделенных в блоке «основное производство» цехов. Для примера можно рассмотреть схему расположения элементов технологического оборудования одного из вариантов ЭЛОУ – АВТ (ЭЛОУ – АВТ-6) на территории НПЗ<sup>4</sup>.

Сторона квадрата объекта на схеме равна примерно 210 м. Мелкие детали показывают основные агрегаты, работающие с пожароопасными сырьем и продуктами переработки. Другие цеха НПЗ, перечисленные выше и указанные на рис. 2, имеют не менее сложную структуру. Поэтому очевидно, что моделирование для них обеспечения ПБ в реальном времени не только требует применения аппарата и инструментов ДТ, но также и разработки



Рис. 1. Пример структурной схемы объекта ТЭК с НПЗ  
Fig. 1. An example of a block diagram of a fuel and energy complex with an oil refinery

<sup>2</sup> Гуревич И.Л. Технология переработки нефти и газа : учебник для нефт. специальностей вузов. Ч. 1: Общие свойства и первичные методы переработки нефти и газа / под ред. канд. техн. наук А.Г. Сарданашвили и д-ра техн. наук А.И. Скобло. М. : Химия, 1972. 359 с.

<sup>3</sup> Курс: Машины и аппараты нефтегазопереработки. Книга: Принципиальная схема НПЗ. URL: <https://moodle.kstu.ru/mod/book/tool/print/index.php?id=96507&ysclid=lmj3kujwuv318601801>

<sup>4</sup> Псел М.С. Безопасность технологического процесса нагрева сырья на установке ЭЛОУ АВТ-6 в ОАО «Сызранский НПЗ». URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2834>

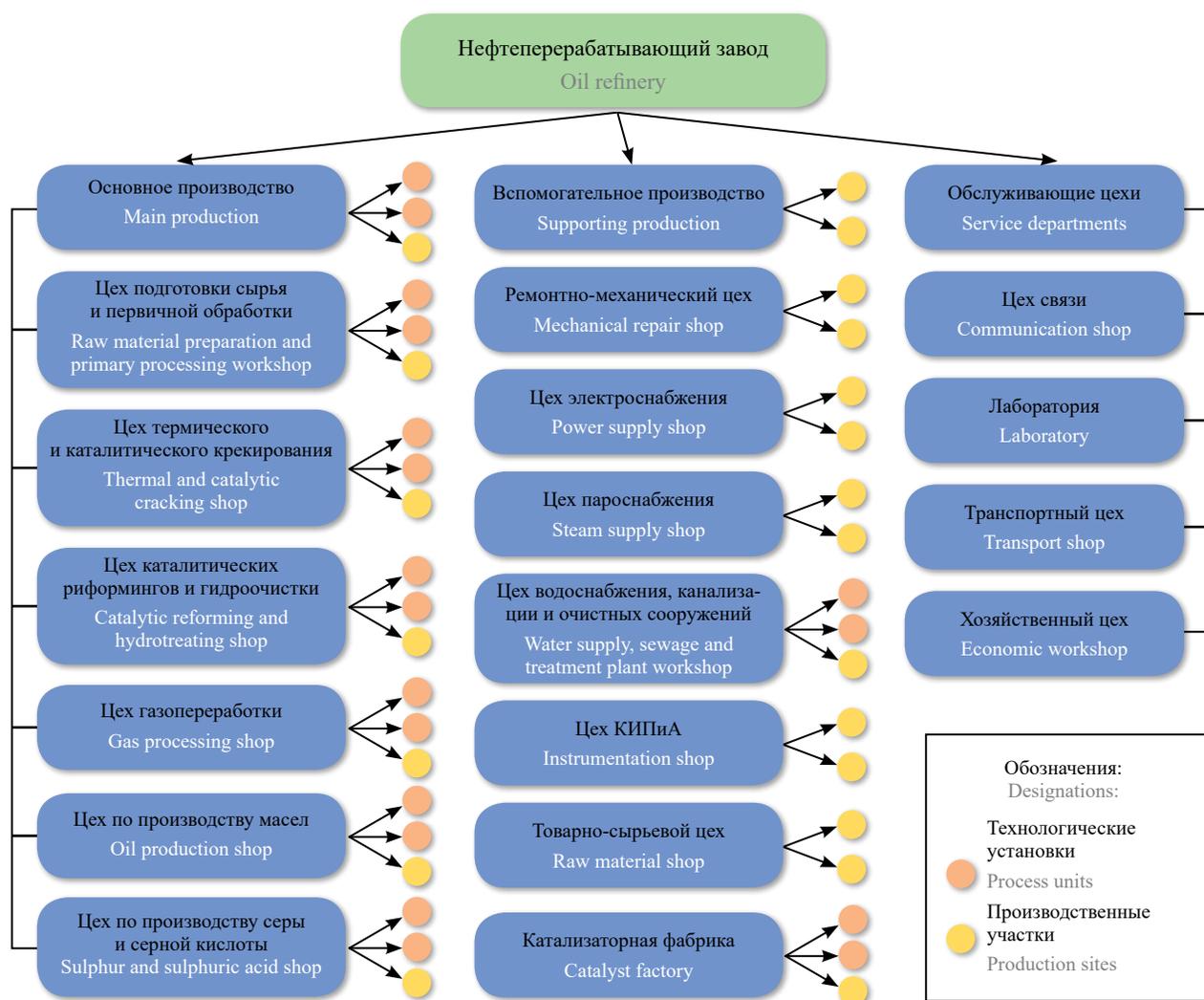


Рис. 2. Типовая производственная структура НПЗ<sup>5</sup>  
 Fig. 2. Typical production structure of an oil refinery<sup>5</sup>

дополнительных математических моделей, отсутствующих в инструментарии таких ИТ.

Дальнейшие уточнения иерархии приводить не будем, так как следующим этапом в анализе иерархий будут служить графы, относящиеся к отдельным агрегатам ЭЛОУ – АВТ. Схема данной установки имеет ряд участков. На каждом из них есть ряд больших пространственных элементов. Поэтому для отслеживания состояния среды возле и внутри них понадобятся дополнительные датчики так называемого первого уровня информирования АСУТП.

Выстраиваемая последовательность структурных схем наглядно продемонстрировала необходимость применения методов стратегического планирования для помощи ЛППР в оценке обстановки и состояния

агрегатов, среды и уровня обеспечения ПБ в различных местах объекта ТЭК. С точки зрения стратегического планирования ЛППР вынужден решать стратегическую задачу — проведение стратегического мониторинга на НПЗ для обеспечения ПБ с учетом анализа текущих показаний датчиков среды и состояния оборудования, а также допусков по показаниям этих датчиков. Кроме того, опытный ЛППР должен не только уметь оценить состояние (данные по метрологии) этих датчиков с учетом проводившихся на них мероприятий технического обслуживания (ТО) или ремонта в реальном времени, но также знать особенности моделирования работы различных производственных цехов [14, 15].

Для принятия решений о проведении мероприятий ПБ или по предупреждению опасных ситуаций ЛППР использует индикацию на средствах индивидуального или коллективного отображения. При этом его восприятие нужных показаний зависит от ряда факторов. В их числе ограниченность одновремен-

<sup>5</sup> Типовая производственная структура нефтеперерабатывающего завода. URL: [chema/47248-tipovaja-proizvodstvennaja-struktura-neftepererabatyvayuschego-zavoda.html?ysclid=lmkfer7khn440199368](http://chema/47248-tipovaja-proizvodstvennaja-struktura-neftepererabatyvayuschego-zavoda.html?ysclid=lmkfer7khn440199368)

ного реагирования человеком на множественные события, усталость, возможное отсутствие ресурсов и т.п. Применение инструментария цифровых двойников и встроенных в них ЯП внутри подсистемы ПО АСПВБ при проведении ЛПР мониторинга ПБ объекта ТЭК с использованием методов стратегического планирования позволит ему моделировать различные ситуации при управлении, в том числе в реальном масштабе времени. Это даст ЛПР возможность трансформации своего «управленческого потенциала в конкурентные преимущества» [16].

### Расчеты

Большинство цифровых двойников не используют встроенные математические модели, привязанные к конкретным условиям обстановки и предметной области. Производители ДТ выводят на рынок продукты с высокой степенью универсализации. Поэтому их необходимо настраивать на конкретные условия с помощью включаемых в их пакеты дополнительных математических моделей и специальных программ. Стратегический мониторинг, как составная часть методов стратегического планирования, требует своей проработки при включении его в математическое обеспечение АСПВБ при использовании в данной АС инструментария ДТ.

Данный разряд методов стратегического планирования используется ЛПР для определения им приоритетных мероприятий ПБ, актуальных в текущий момент времени и поддерживаемых имеющимися в его распоряжении ресурсами. Подсистемы АСПВБ с помощью датчиков информирования первого уровня помогают ему точно локализовать реализацию выбранных мероприятий. Применение ДТ относится к информационному, математическому и программному обеспечению указанной АС. Но основой для этого служат математические модели.

Аппарат стратегического планирования предполагает использование в качестве цели агрегатного показателя. В данном случае назовем его показателем качества комплекса проводимых мероприятий по обеспечению ПБ. На рис. 3 показаны выполняемые на объекте ТЭК мероприятия по обеспечению ПБ на разном количестве уровней, что вполне соответствует приводимым выше рассуждениям. Также продемонстрировано, что агрегатный показатель качества комплекса проводимых мероприятий по обеспечению ПБ (АПКМПБ) может рассчитываться как для отдельного участка, так и для всего объекта ТЭК.

Если рассматривать составную часть объекта ТЭК (например, ЭЛОУ – АВТ), то каждая из них содержит разное число отдельных, требующих обеспечения ПБ, элементов. Для каждого из них требу-

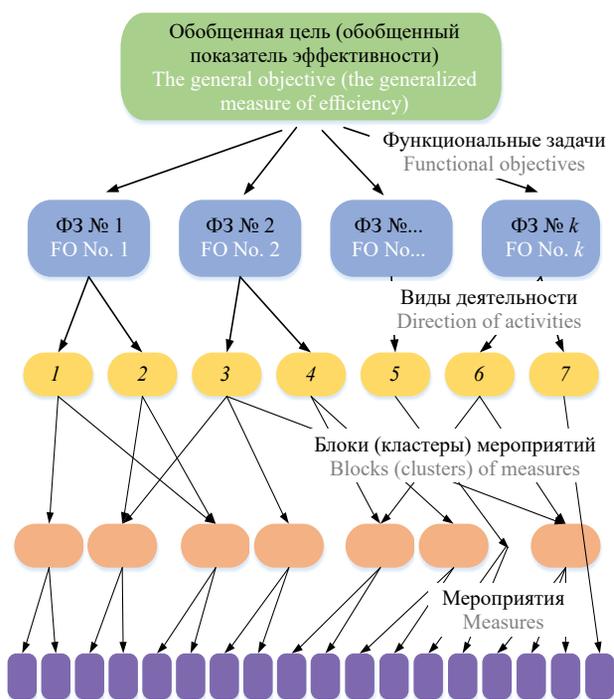


Рис. 3. Выполняемые объектом ТЭК мероприятия ПБ с разным количеством уровней [17]

Fig. 3. Fire safety measures carried out by fuel and energy complex facility with a different number of levels [17]

ется свой комплекс мероприятий по обеспечению ПБ, что вполне соответствует дереву с рис. 3. Каждому элементу ЭЛОУ – АВТ требуется свой АПКМПБ. При этом АПКМПБ всей установки будет использовать исходные данные всех ее агрегатов.

Перейдем к расчетной части. По аналогии с расчетами, приведенными в источнике [18], АПКМПБ следует рассматривать как «интегральную степень завершенности всего комплекса мероприятий». Для выбранных условий применения с учетом того, что на территории объекта ТЭК может находиться несколько участков стратегического мониторинга ПБ (объектов защиты), для каждого из них можно рассчитать АПКМБ  $\Omega_i$ , который можно записать так:

$$\Omega_i = \sum_{j=1}^{N_{\text{мер},i}} \xi_{ji} \cdot \beta_{ji}, \quad (1)$$

где  $\Omega_i$  — АПКМПБ  $i$ -го участка объекта ТЭК;  
 $N_{\text{мер},i}$  — число мероприятий по обеспечению ПБ  $i$ -го участка объекта ТЭК;  
 $\xi_{ji}$  — текущая степень выполнения  $j$ -го мероприятия ПБ для  $i$ -го участка объекта ТЭК;  
 $\beta_{ji}$  — параметр агрегатного показателя качества деятельности по обеспечению ресурсами  $j$ -го мероприятия ПБ в рассматриваемом периоде времени.

Если на объекте защиты ЛПР осуществляет мониторинг  $N_{\text{уч}}$  участков, то общее число мероприятий по обеспечению ПБ  $N_{\text{мер},\text{ОЗ}}$ :

$$N_{\text{мер.ОЗ}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{уч}}} N_{\text{мер.к}}. \quad (2)$$

Соответственно, АПКМПБ для группы участков  $\Omega_{\text{гр}}$ :

$$\Omega_{\text{гр}} = \sum_{l=1}^{N_{\text{мер.ОЗ}}} \Omega_l. \quad (3)$$

Степень выполнения  $j$ -го мероприятия ПБ для  $i$ -го участка объекта ТЭК может рассчитываться по-разному. В одних случаях — это величина случайная и нормированная. В других — детерминированная и существует в заданных рамках и единицах измерения.

Как правило, она определяется по результатам мониторинга. При расчете степени завершенности мероприятий или их комплексов следует учитывать величину, которую можно назвать долей «внимательности» ЛПР к комплексу мероприятий ПБ на  $i$ -м участке  $\gamma_i$  ( $\gamma_i < 1$ ). Ее введение объясняется тем, что при необходимости одновременного контроля выполнения комплексов мероприятий ПБ сразу на нескольких участках  $N_{\text{к.уч}}$  ( $N_{\text{к.уч}} < N_{\text{уч}}$ ) доля «внимательности» ЛПР снижается. Условно можно считать, что при  $N_{\text{к.уч}} = 2$  — это снижение вдвое, при  $N_{\text{к.уч}} = 3$  — втрое и т.д. Поэтому для каждого из одновременно контролируемых участков ЛПР выделяет для принятия решений и контроля только часть того времени, которое он выделил бы для этого при работе только с одним участком.

Резонно предположить, что при равномерном распределении внимания ЛПР доля «внимательности» ЛПР к комплексу мероприятий ПБ на  $i$ -м участке  $\gamma_i$  следует рассчитывать так:

$$\gamma_i = \frac{1}{N_{\text{к.уч}}}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N_{\text{к.уч}}\}. \quad (4)$$

При неравномерном распределении внимания ЛПР следует ввести ряд коэффициентов по приоритетам  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_{\text{уч}}}\}$ , где

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{к.уч}}} \alpha_i = 1. \quad (5)$$

При этом не обязательно, что

$$\alpha_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{\text{к.уч}}} \alpha_i}.$$

Тогда доля «внимательности» ЛПР к комплексу мероприятий ПБ на  $i$ -м участке с учетом приоритета:

$$\gamma_i = \alpha_i \left( \frac{1}{N_{\text{к.уч}}} \right). \quad (6)$$

Аналогичным образом следует рассматривать и отдельные мероприятия в их комплексе для  $i$ -го участка объекта ТЭК. Выполнение каждого из них в последовательности мероприятий комплекса будет обусловлено своей долей «внимательности» ЛПР. Применение коэффициентов  $\gamma_{ji}$  при выполнении  $j$ -го мероприятия ПБ для  $i$ -го участка объекта ТЭК точнее покажет затруднения в достижении нужных значений АПКМПБ.

Ввиду большой вариативности единиц измерения, применяемых для оценки качества мероприятий, для количественной оценки текущей степени выполнения  $j$ -го мероприятия ПБ для  $i$ -го участка объекта ТЭК воспользуемся временем проведения каждого из них. Известно, что опасные ситуации развиваются достаточно быстро, и каждый из комплексов мероприятий следует «уложить» в необходимые временные рамки. Примем за максимально допустимое время развития опасной ситуации независимо от этапа ее развития, в течение которого ЛПР должен ее проанализировать, подготовить и запустить комплекс мероприятий по обеспечению ПБ за  $t_{\text{ОПС кр}}$ . Тогда временной вариант оценки интегральной степени завершенности комплекса мероприятий для  $i$ -го участка объекта ТЭК (соответствие АПКМПБ требованиям ПБ):

$$t(\Omega_i) \leq t_{\text{ОПС кр}}, \quad (7)$$

где  $t(\Omega_i)$  — регламентированное время комплекса мероприятий для  $i$ -го участка объекта ТЭК.

Регламентированное время выполнения комплекса мероприятий для каждого из участков определяется в соответствии с планом мероприятий по обеспечению ПБ и особенностями выполнения каждого мероприятия в текущей обстановке. Если количество мероприятий для каждого участка  $N_{\text{мер.}i}$  то

$$t(\Omega_i) = \sum_{j=1}^{N_{\text{мер.}i}} t_{ji}, \quad (8)$$

где  $t_{ji}$  — регламентированное время выполнения  $j$ -го мероприятия ПБ для  $i$ -го участка объекта ТЭК.

Соответственно, при одновременном контроле ЛПР выполнения комплексов мероприятий ПБ сразу на нескольких участках  $N_{\text{к.уч}}$  АПКМПБ как регламентированное время их выполнения следует рассчитывать:

$$t(\Omega_{\text{гр}})_{\text{пер}} = \sum_{k=1}^{N_{\text{к.уч}}} t(\Omega_k). \quad (9)$$

Реальное же время выполнения  $j$ -го мероприятия ПБ и комплекса мероприятий для  $i$ -го участка объекта ТЭК при одновременном контроле ЛПП нескольких комплексов мероприятий ПБ на участках  $N_{к.уч}$  увеличится с учетом рассчитанного выше коэффициента (см. (6)):

$$t(\Omega_{\text{агр}})_{\text{реал}} = \sum_{k=1}^{N_{к.уч}} \frac{t(\Omega_k)}{\gamma_k}. \quad (10)$$

Соответственно:

$$\sum_{k=1}^{N_{к.уч}} \frac{t(\Omega_k)}{\gamma_k} \leq t_{\text{ОПС кр}}. \quad (11)$$

Формула (11) представляет собой временную модель АПКМПБ с учетом влияния человеческого фактора при выполнении ЛПП мониторинга объекта ТЭК для контролируемых ЛПП  $N_{к.уч}$  участков объекта ТЭК, на которые распространяются последствия возникшей опасной с точки зрения ПБ ситуации. Общее для  $N_{к.уч}$  время  $t_{\text{ОПС кр}}$  показывает, что возникшая опасная ситуация одна для нескольких участков. При возникновении нескольких опасных с точки зрения ПБ ситуаций на объекте ТЭК формулу (11) следует заменить системой неравенств, в левой части которой будет временная характеристика действий ЛПП по мониторингу и реагированию на них. А в правой части — ограничения по времени, показывающие допуск по времени при их развитии. При этом в общем случае число развивающихся опасных ситуаций  $N_{\text{ОПС}}$  не совпадает с числом участков объекта ТЭК  $N_{к.уч}$ , на которые будет распространяться их воздействие. Вероятнее всего  $N_{к.уч} \leq N_{\text{ОПС}}$ .

### Результаты

Регламентированное время выполнения комплексов мероприятий ПБ  $i$ -го участка объекта ТЭК  $t(\Omega_i)$  должно выбираться исходя из статистики наблюдений за проявлениями признаков пожароопасных ситуаций в течение нескольких лет. Оно должно корректироваться на случай возникновения ситуации, развитие которой будет происходить за потенциально меньшее время, чем то, которое даст статистический анализ. Аналогичным образом следует определять и реальное время выполнения мероприятий в комплексе (на основе статистических данных реально измеренных времен за несколько лет).

Корректировка расчета временных характеристик комплекса мероприятий ПБ выполняется

путем уменьшения указанного времени на разность между среднестатистическими регламентированным и реально требуемым временами. Статистические данные могут быть получены не только на основе реальных наблюдений, но и с применением возможностей ДТ. Использование временной модели АПКМПБ с учетом влияния человеческого фактора при выполнении ЛПП мониторинга объекта в текущих условиях обстановки — дополнительный мощный инструмент контроля ПБ на различных участках объекта ТЭК. Зная ограничения по времени, он может оперативно внести изменения в план или изменить комплекс мероприятий так, чтобы развитие предпожарной ситуации не привело к катастрофическим последствиям или ее влияние на объект было максимально сокращено.

### Выводы

Оценка степени завершенности комплекса мероприятий ПБ на каждом отдельном участке объекта ТЭК является важной характеристикой, позволяющей ЛПП совершать более обоснованные управленческие действия. Цифровые двойники помогают ему делать это с использованием виртуального моделирования обстановки, являясь новой платформой информационных технологий, потенциально используемой в АСПБ для стратегического мониторинга объектов ТЭК. Вместе с тем доступные в настоящее время программные системы ДТ, используемые для практической реализации эксплуатационных моделей предприятий (SMART Factory), а также другие их виды («цифровые двойники-прототипы (Digital Twin Prototype, DTP), цифровые двойники-экземпляры (Digital Twin Instance, DTI) и агрегированные двойники (Digital Twin Aggregate, DTA)») [19] не содержат математических моделей, учитывающих особенности действий ЛПП при мониторинге опасных ситуаций, связанных с обеспечением ПБ на объектах ТЭК.

Таким образом, их включение в аппарат подсистем программного, информационного и математического обеспечения АСПБ позволит точнее определять интегральную степень завершенности комплексов мероприятий по обеспечению ПБ на различных участках объектов ТЭК, а использование ПО на основе ДТ поможет сделать принятие решений ЛПП более обоснованным. Это позволит улучшить системы поддержки принятия решений при предотвращении и при тушении пожаров, в том числе описанные в [20].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Абросимов А.А., Топольский Н.Г., Федоров А.В.* Автоматизированные системы пожаровзрывобезопасности нефтеперерабатывающих производств. М. : МИПБ МВД России, 1999. 244 с.
2. *Топольский Н.Г., Самарин И.В., Строгонов А.Ю., Кйеу Туан Ань.* Модель оценки влияния мероприятий пожарной безопасности на агрегатную цель для цифровых двойников объектов ТЭК // Пожаровзрывобезопасность/Fire and explosion safety. 2019. Т. 28. № 3. С. 50–58. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.50-58
3. *Габидуллин И.Р., Федоров С.Н.* Применение цифровых двойников в нефтегазовой отрасли // Актуальные исследования. 2023. № 25 (155). Ч. I. С. 56–60.
4. *Grievess M., Vickers J.* Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Kahlen F.J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). Springer, 2017. Pp. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4
5. *Menshenin Y., Moreno C., Brovar Y., Fortin C.* Integration of MBSE and PLM: complexity and uncertainty, International // *Journal of Product Lifecycle Management*. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 66–88. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.10037270
6. *Vieira D., Schmoller E., Bravo A., Chang Chain M.* Functionality roadmap to define a configuration scope for implementing a PLM system // *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2021. Vol. 13. Issue 3. Pp. 224–243. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.118038
7. *Батура А.Н., Ничепорчук В.В., Бутузов С.Ю.* Применение цифровых двойников для оценки и управления рисками // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2021. № 4. С. 109–120. URL: [http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v4/N23\\_109-120.pdf](http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v4/N23_109-120.pdf). DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.85.25.014
8. *Смирнова О.О., Беляевская-Плотник Л.А., Бочарова Л.К.* Методологические подходы к реализации принципов формирования системы стратегического планирования в РФ // *Инновации*. 2020. № 2 (256). С. 37–42. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.256.2.005
9. *Ибрагимова Р.С., Головкин Д.С.* Методическое обоснование оценки экономического потенциала предприятия // *Современные наукоемкие технологии // Региональное приложение*. 2016. Т. 3. № 47. С. 64–74.
10. *Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu., Pustovoyt K.S.* Improving the quality of the industrial enterprise management based on the network-centric approach // *R-Economy*. 2015. Vol. 4. Pp. 608–617. DOI: 10.15826/recon.2015.4.023
11. *Лобова Е.С., Мамаева Л.Н., Сафарова Н.А.К.* Особенности стратегического планирования на предприятиях нефтегазового комплекса // *Вестник СГСЭУ*. 2020. № 1(80). С. 53–56.
12. *Саати Т.* Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М. : Радио и связь, 1993. 278 с.
13. *Bogodukhova E., Britvina V., Pitelinskiy K., Gavriilyuk A., Nurgazina G.* Digital process simulation twins using statistics and information technologies // *E3S Web of Conferences*. 2023. No. 431. P. 05033. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105033
14. *Kohnehsahri R.K., Salimi M., Seyed Reza Seif Mohaddecy Saeed Shirazian.* Modeling and numerical simulation of catalytic reforming reactors // *Oriental Journal of Chemistry*. 2011. Vol. 27. Issue 4. Pp. 1351–1355.
15. *Wanasinghe Th.R., Wroblewski L., Petersen B.K., Gosine R.G., James L.A., Silva O.D. et al.* Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges // *IEEE Access*. 2020. Vol. 99. Pp. 1–1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
16. *Азиева Р.Х., Таймасханов Х.Э., Ахмадов М.И., Хлебников К.В.* Современное состояние процессов планирования и прогнозирования на предприятиях нефтегазового комплекса // *Вестник БГУ. Экономика и менеджмент*. 2023. № 2. С. 3–13. DOI: 10.18101/2304-4446-2023-2-3-13
17. *Самарин И.В., Фомин А.Н.* Стратегическое планирование на предприятии: применение метода анализа иерархий для стратегического мониторинга деятельности // *Статистика и экономика*. 2014. № 5. С. 84–89.
18. *Самарин И.В., Строгонов А.Ю.* Модель оценки пожарной безопасности на объектах топливно-энергетического комплекса с помощью их временных характеристик на графах стратегического планирования в составе автоматизированной системы поддержки управления // *Труды РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина*. 2018. № 4 (293). С. 143–154.
19. *Фролов Е.Б., Климов А.С., Зин Мин Хтун.* Цифровой двойник производственной системы на основе программного обеспечения категории MES // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2018. № 12 (73). С. 66–73. DOI: 10.30987/article\_5c0f808e9b29f7.40393956
20. *Тетерин И.М., Топольский Н.Г., Прус Ю.В., Климовцов В.М.* Системы поддержки принятия управленческих решений при тушении пожаров / под общ. ред. Н.Г. Топольского. М. : Академия ГПС МЧС России, 2008. 102 с.

## REFERENCES

1. Abrosimov A.A., Topolsky N.G., Fedorov A.V. *Automated systems of fire and explosion safety of oil refineries*. Moscow, MIPB of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 1999; 244 (rus).
2. Topolsky N.G., Samarin I.V., Stroganov A.Yu., Keu Tuan An. A model for assessing the impact of fire safety measures on the aggregate target for digital counterparts of fuel and energy facilities. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and explosion safety*. 2019; 28(3):50-58. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.50-58 (rus).
3. Gabidullin I.R., Fedorov S.N. The use of digital doubles in the oil and gas industry. *Actual research*. 2023; 25(155):56-60. (rus).
4. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Kahlen F.J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). Springer. August 2017; 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4
5. Menshenin Y., Moreno C., Brovar Y., Fortin C. Integration of MBSE and PLM: complexity and uncertainty. *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2021; 13(1):66-88. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.10037270
6. Vieira D., Schmoller E., Bravo A., Chang Chain M. Functionality roadmap to define a configuration scope for implementing a PLM system. *International Journal of Product Lifecycle Management*. 2021; 13(3):224-243. DOI: 10.1504/IJPLM.2021.118038
7. Batur A.N., Nicheporchuk V.V., Butuzov S.Yu. The use of digital doubles for risk assessment and management. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2021; 4:109-120. URL: [http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v4/N23\\_109-120.pdf](http://vestnik.sibpsa.ru/wp-content/uploads/2021/v4/N23_109-120.pdf). DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.85.25.014 (rus).
8. Smirnova O.O., Belyaevskaya-Plotnik L.A., Bocharova L.K. Methodological approaches to the implementation of the principles of formation of the strategic planning system in the Russian Federation. *Innovations*. 2020; 2(256): 37-42. DOI: 10.26310/2071-3010.2020.256.2.005 (rus).
9. Ibragimova R., Golovkin D. Methodological substantiation of the estimation of economic potential of the enterprise. *Modern High Technologies. Regional Application*. 2016; 3(47):64-74. (rus).
10. Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Yu., Pustovoyt K.S. Improving the quality of the industrial enterprise management based on the network-centric approach. *R-Economy*. 2015; 608-617. DOI: 10.15826/recon.2015.4.023
11. Lobo E.S., Mamaeva L.N., Safarova N.A.K. Features of strategic planning at oil and gas complex enterprises. *Bulletin of the SSEU*. 2020; 1(80):53-56. (rus).
12. Saati T. *Decision-making. Method of hierarchy analysis*. Translated from the English by R.G. Vachnadze. Moscow, Radio and Communications Publ., 1993; 278.
13. Bogodukhova E., Britvina V., Pitelinskiy K., Gavriluyuk A., Nurgazina G. Digital process simulation twins using statistics and information technologies. *E3S Web of Conferences*. 2023; 431:05033. DOI: 10.1051/e3sconf/202343105033
14. Kohnehshahri R.K., Salimi M., Seyed Reza Seif Mohaddecy Saeed Shirazian. Modeling and numerical simulation of catalytic reforming reactors. *Oriental Journal of Chemistry*. 2011; 27(4):1351-1355.
15. Wanasinghe Th.R., Wroblewski L., Petersen B.K., Gosine R.G., James L.A., Silva O.D. et al. Digital twin for the oil and gas industry: overview, research trends, opportunities, and challenges. *IEEE Access*. June, 2020; 99:1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998723
16. Azieva R.H., Taimaskhanov H.E., Akhmadov M.I., Khlebnikov K.V. The current state of planning and forecasting processes at oil and gas complex enterprises. *Bulletin of BSU. Economics and Management*. 2023; 2:3-13. DOI: 10.18101/2304-4446-2023-2-3-13 (rus).
17. Samarin I.V., Fomin A.N. Strategic planning at the enterprise: application of the hierarchy analysis method for strategic monitoring of activities. *Statistics and Economics*. 2014; 5:84-89. (rus).
18. Samarin I.V., Stroganov A.Yu. A model for assessing fire safety at fuel and energy complex facilities using their time characteristics on strategic planning graphs in the automated management support system. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NIU)*. 2018; 4(293):143-154. (rus).
19. Frolov E.B., Klimov A.S., Zin Min Khtun. Digital twin of a production system based on the MES category software. *Bulletin of the Bryansk State Technical University*. 2018; 12(73):66-73. DOI: 10.30987/article\_5c0f808e9b29f7.40393956 (rus).
20. Teterin I.M., Topolsky N.G., Prus Yu.V., Klimovtsov V.M. Under the general editorship of N.G. Topolsky. *Management decision support systems for fire extinguishing*. Moscow, Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2008; 102.

Поступила 23.10.2023, после доработки 06.11.2023;

принята к публикации 15.11.2023

Received October 23, 2023; Received in revised form November 6, 2023;

Accepted November 15, 2023

**Информация об авторах**

**САМАРИН Илья Вадимович**, д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; Scopus AuthorID: 24725751900; РИНЦ ID: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311; e-mail: ivs@gubkin.ru

**КУХАРСКИЙ Владислав Валерьевич**, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 65, корп. 1; РИНЦ ID: 1155514; ORCID: 0009-0006-5780-6488; e-mail: kvv@gubkin.pro

**Вклад авторов:**

**Самарин И.В.** — *научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.*

**Кухарский В.В.** — *концепция исследования; проведение экспериментов и расчетов; написание исходного текста.*  
*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors**

**Ilya V. SAMARIN**, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of Department of Automation of Technological Processes, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; Scopus AuthorID: 24725751900; ID RISC: 867674; ORCID: 0000-0003-2430-5311, e-mail: ivs@gubkin.ru

**Vladislav V. KUKHARSKIY**, Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Leninskiy Avenue, 65, Bldg. 1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 1155514; ORCID: 0009-0006-5780-6488; e-mail: kvv@gubkin.pro

**Contribution of the authors:**

**Samarin I.V.** — *scientific guidance; revision of the text; final conclusions.*

**Kukharskiy V.V.** — *the concept of the study; conducting experiments and calculations; writing the source text.*  
*The authors declare no conflicts of interests.*