УДК 681.5

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУБЧАТЫХ
ПЕЧЕЙ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

**IMPROVEMENT INFORMATION-CONTROL SYSTEM
FOR ENSURING SAFETY OF TUBE FURNACES OIL AND GAS
PRODUCTION USING GENETIC ALGORITHMS**

А.М. Хафизов, З.Х. Павлова, М.Г. Баширов, К.А. Крышко

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

**Alik M. Khafizov, Zukhra Kh. Pavlova, Mussa G. Bashirov,
Konstantin A. Kryshko**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: eapp@yandex.ru

Аннотация. Трубчатые печи являются одним из наиболее опасных объектов нефтегазовых производств, в них протекают реакции по превращению жидких и газообразных нефтепродуктов, высокотемпературный нагрев сырья. Для обеспечения их безопасной эксплуатации применяются самые совершенные на сегодняшний день информационно-управляющей системы. В то же время анализ аварийности на предприятиях нефтегазовой отрасли показывает, что доля аварийных ситуаций на них составляет более 11 % от всех аварий в отрасли, из которых 85 % приходится на пожары и взрывы. Большинство аварий возникает в результате разгерметизации змеевиков из-за прогаров в зонах внутренних отложений. Современные информационно-управляющие

системы обеспечения пожарной и промышленной безопасности трубчатых печей срабатывают при достижении одним из контролируемых параметров значения, которое может привести к аварии, т.е. по факту возникновения аварийной ситуации. Поэтому для снижения аварийности необходимо их совершенствование, направленное на предотвращение возникновения аварийных ситуаций. В статье предлагаются способы совершенствования информационно-управляющих систем обеспечения безопасности трубчатых печей путем применения технологии APCs («усовершенствованное управление и обеспечение безопасности»), прогнозирующих моделей и генетических алгоритмов. Для количественной оценки уровня закоксованности змеевиков трубчатых печей в режиме реального времени предложен оценочный критерий – скорость коксообразования, формируемый из совокупности технологических и технических параметров с использованием эмпирических зависимостей и генетического алгоритма.

С целью повышения квалификации и тренинга персонала разработан компьютерный тренажер-имитатор, совместимый с информационно-управляющей системой трубчатой печи, позволяющий моделировать аварийные сценарии развития событий и оптимальные решения по прекращению их развития, позволяющий снизить влияние человеческого фактора на безопасность трубчатых печей.

Abstract. Tubular furnaces are one of the most dangerous objects of oil and gas production, they undergo reactions to transform liquid and gaseous petroleum products, high-temperature heating of raw materials. To ensure their safe operation, the most advanced information and control systems are used today, but the analysis of accidents at the enterprises of the oil and gas industry shows that the share of emergencies in them is more than 11 % of all accidents in the industry, of which 85 % are fires and explosions. Most accidents occur as a result of depressurization of coils due to burnouts in the areas of internal deposits. Existing information management systems of ensuring fire and

industrial safety tube furnaces are triggered upon emergency, therefore, to reduce accidents need improvement, aimed at prevention of emergency situations. The article suggests ways to improve information and control systems for ensuring the safety of tubular furnaces through the use of APCS technology («Advanced Process Control and Security»), predictive models and genetic algorithms. To quantify the level of coking of tubular furnace coils in real time, an evaluation criterion is proposed-the rate of coking, formed from a set of technological and technical parameters using empirical dependencies and genetic algorithm.

For staff development and training of the developed computer simulator-imitator that is compatible with the information control system of tube furnaces, allowing to simulate emergency scenarios of development of events and the optimal solution for the termination of their development, to reduce the influence of human factors on the safety of tubular furnaces.

Ключевые слова: трубчатая печь, авария, генетический алгоритм, компьютерный тренажер, трубчатый змеевик, скорость коксообразования, виртуальные анализаторы

Kew words: tube furnace, emergency, genetic algorithm, computer simulator, the tubular coil, the rate of coking, virtual analyzers

Введение

Трубчатые печи являются одним из наиболее опасных объектов нефтегазовых производств, в них протекают реакции по превращению жидких и газообразных нефтепродуктов, высокотемпературный нагрев сырья [1]. Для обеспечения их безопасной эксплуатации применяются самые совершенные на сегодняшний день информационно-управляющей системы. Но, по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, с 2007 г. по 2017 г. доля аварийных ситуаций на

трубчатых печах составила более 11 % от всех аварий в отрасли, из них 85 % приходится на пожары и взрывы.

Анализ аварийности на трубчатых печах отрасли выявил следующие причины их возникновения:

- технические: неудовлетворительное техническое состояние сооружений, сложных технических устройств, недостатки в конструкциях трубчатых печей или неоптимальный технологический процесс;

- организационные: отсутствие надлежащей организации при проведении ремонтных работ, нарушение технологических норм во время производства работ, преднамеренное отключение систем противоаварийной автоматической защиты печи, неудовлетворительный производственный контроль, нарушение рабочими трудовой дисциплины, выполнение запрещенных действий сотрудниками, недостаточный уровень квалификации, профессиональных навыков и умений, знаний правил промышленной безопасности;

- прочие: распитие алкоголя, употребление наркотических средств работниками, намеренный вывод из строя или порча сложных технических устройств, стихийное природное явление (бедствие).

Основная часть

Обязательным условием эксплуатации трубчатых печей является наличие информационно-управляющей системы обеспечения пожарной и промышленной безопасности, позволяющей предупреждать образование взрывоопасных и пожароопасных сред в технологическом оборудовании при нарушении границ предельно допустимых значений параметров, характеризующих состояние технологического процесса, предусмотренных регламентом во всех режимах его функционирования, и обеспечивающих безопасную остановку или перевод процесса в безопасное состояние по заданной программе [2]. Но современные информационно-управляющие системы обеспечения пожарной и

промышленной безопасности трубчатых печей срабатывают при достижении одним из контролируемых параметров значения, которое может привести к аварии, т.е. по факту возникновения аварийной ситуации, поэтому для снижения аварийности необходимо их совершенствование, направленное на предотвращение возникновения аварийных ситуаций.

Одним из перспективных направлений совершенствования информационно-управляющих систем обеспечения пожарной и промышленной безопасности трубчатых печей является применение технологии «усовершенствованное управление и обеспечение безопасности» (APCS). APCS – технология автоматического управления, основой которой является прогнозирующая математическая модель управляемого процесса (Model Predictive Control), которая включается в контур управления в режиме реального времени. APCS позволяет расчетным путем на основании прогнозирующей модели определить значения технологических параметров, которые невозможно измерить напрямую. Эта задача в APCS-системах решается с помощью виртуальных анализаторов (ВА). По прогнозирующей модели можно определить момент превышения порогового значения технологического параметра и сформировать превентивные корректирующие воздействия, что позволяет предотвратить выход реальных значений технологических параметров за рамки заданных допустимых отклонений, тем самым предотвратить возникновение аварийной ситуации и срабатывание противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ). При использовании технологии APCS осуществляется инсталляция специализированного программного обеспечения (ПО) в программное обеспечение распределенной системы управления (PCU) технологической установки. Далее ПО конфигурируется и настраивается в соответствии с требованиями технологического процесса (ТП). APCS-система один раз в минуту сопоставляет значения технологических параметров, формируемых математической моделью, со значениями

технологических параметров, поступающих от датчиков, и на этой основе прогнозирует динамику технологического процесса. Взаимодействие ВА с APCS и PCY осуществляется с помощью технологий OPC (Object linking and embedding for Process Control) и URT (Unified Real Time) (рисунок 1) [3].

По статистическим данным, большинство аварий на трубчатых печах возникает в результате разгерметизации змеевиков из-за прогаров в зонах внутренних отложений. В настоящее время отсутствуют прямые методы измерения уровня закоксованности змеевиков трубчатых печей. В данной работе рассматривается способ количественной оценки уровня закоксованности змеевиков трубчатых печей в режиме реального времени с помощью ВА на основе использования одного из параметров коксообразования – скорости коксообразования.

При определенных сочетаниях параметров, влияющих на коксообразование, скорость коксообразования будет выше, чем при других сочетаниях. При этом даже если все параметры находятся в пределах нормы технологического режима, их возможные сочетания могут провоцировать значительное увеличение скорости коксообразования. Таким образом, определенные сочетания значений параметров являются нерациональными с точки зрения динамики коксообразования и являются причиной более быстрого закоксовывания змеевика.

Скорость коксообразования вычисляется ВА с использованием параметров процесса коксообразования (температура, расход, давление, плотность продукта и другие параметры). Полученное значение скорости коксообразования будет являться усредненной величиной ввиду того, что она не постоянна по длине змеевика.

Рисунок 1. Структура взаимодействия APCS, виртуальных анализаторов и PCS в составе информационно-управляющей системы технологической установки с трубчатой печью

Резкое возрастание и достижение критической величины скорости коксообразования говорит о неоптимальном режиме работы трубчатой печи. Учитывая лавинообразный характер изменения закоксовывания от времени, можно спрогнозировать время предельного закоксовывания змеевиков трубчатой нагревательной печи и их прогар. Резкий рост скорости коксообразования будет являться условием срабатывания системы автоматической предупредительной сигнализации (АПС), сигнализирующей о потенциально опасном режиме работы трубчатой печи. Достижение некоторой критической величины скорости коксообразования в сочетании с достигнутым предельным уровнем закоксовывания змеевика воспринимаются системой ПАЗ как потенциально опасная ситуация и приведет к реализации функции остановки работы печи, предупреждая возникновение пожара или взрыва.

Рассмотрим применение ВА в составе системы APCS для вычисления скорости коксообразования в режиме реального времени при контроле технологических параметров датчиками (перепад давления в змеевике и

температура перевала печи). ВА обрабатывает полученную информацию и рассчитывает косвенные показатели, далее с использованием прогнозирующей модели и генетического алгоритм (ГА) определяется динамика скорости коксообразования [4]. На рисунке 2 и рисунке 3 представлены графики изменения перепадов давления и температуры перевала, полученные путем измерения с помощью соответствующих датчиков, и полученные расчетным путем с помощью ВА. Максимальная погрешность определения величины параметра виртуальным анализатором, в сопоставлении с показанием датчика, не превышает 3 %.

Рисунок 2. Работа виртуальных анализаторов и генетического алгоритма при резком увеличении скорости коксообразования

Рисунок 3. Работа виртуальных анализаторов и генетического алгоритма при критической скорости коксообразования

Для контроля закоксованности змеевиков трубчатых печей в режиме реального времени разработана компьютерная программа с использованием ГА. Программа имеет интуитивно понятный графический интерфейс, вся информация представляется в доступной и простой для понимания форме. Взаимодействие пользователя с программой осуществляется посредством графических элементов (меню, значков, кнопок).

Для расчета уровня закоксованности змеевиков трубчатой печи использована эмпирическая зависимость, представляющая собой показательную функцию:

$$U = Y^{(-\frac{T_{\text{мек}}}{F-1})} - 1, \quad (1)$$

где U – уровень закоксованности змеевика, в %;

Y – основание показательной функции;

$T_{тек}$ – текущее срок работы змеевика;

F – фитнес-функция.

Расчета Y осуществляется по следующей формуле:

$$Y = 10I^{\left(-\frac{I}{T_{норм} - 1}\right)}, \quad (2)$$

где T – нормативный срок эксплуатации змеевика.

В компьютерной программе ГА решает нелинейные уравнения со многими неизвестными переменными, в данном случае ГА применяется для вычисления коэффициентов фитнес-функции.

Вычисление фитнес-функции осуществляется по формуле:

$$F = K_{вх}^2 \cdot T_{вх} + K_{вых}^3 \cdot T_{вых} + K_{пер} \cdot T_{пер}^2 + K_{прод}^2 \cdot F_{прод} + K_{прод} \cdot v_{прод}^2 + \\ + K_p^2 \cdot \Delta P + K_{фр}^2 \cdot M_{фр} + K_{пл}^2 \cdot \rho, \quad (3)$$

где K – коэффициенты фитнес-функции, которые определяются ГА;

$T_{пер}$, $T_{вх}$, $T_{вых}$ – данные с датчиков температуры печи (на перевале, входе, выходе);

$v_{прод}$, $F_{прод}$ – данные с датчиков виртуального анализатора скорости потока и расхода соответственно;

ΔP – показания датчиков давления на входе и выходе из змеевика (перепад давления);

$M_{фр}$ – фракционный состав сырья с содержанием нафтеннов;

ρ – данные с датчика плотности.

Ограничения:

- $F_{min} > 1$;

- если сигналы с какого-либо датчика не поступают в программу, то соответствующий коэффициент $K = 0$;

- нормативный срок эксплуатации змеевика $T_{норм} \geq 2$.

Критерий:

- необходимо максимально увеличить срок работы змеевика до закоксовывания, т.е. не допустить критической скорости коксообразования.

Критерии для прекращения работы ГА: достижение ГА определенного числа поколений (1000); получение решения с требуемым качеством (с точностью 0,00001); решение, попало в глобальный максимум; достигнуто максимальное время для обучения (10 мин).

После окончания вычислений генетическим алгоритмом на экране изображается график с прогнозируемым уровнем закоксованности змеевика трубчатой печи в функции времени. Уровень закоксованности представлен в процентах (рисунок 4) [5].

Рисунок 4. Отображением уровня закоксованности змеевика в режиме реального времени

Для повышения квалификации и тренинга персонала разработан компьютерный тренажер-имитатор, совместимый с информационно-управляющей системой трубчатой печи, позволяющий с использованием

ГА моделировать развитие аварийных ситуаций и оптимальные решения по прекращению их развития, снизить влияние человеческого фактора на безопасность трубчатых печей. Изменения значений технологических параметров в процессе развития аварийной ситуации имитируются ВА. Обучающемуся предлагается по динамике отклонения технологических параметров определить тип нештатной ситуации и принять меры по предотвращению возможного сценария развития аварийной ситуации [6].

При аттестации сотрудника не требуется строго находить глобальный оптимум – достаточно за малый период времени подобрать подходящее, приемлемое решение, позволяющее предотвратить аварию. Для генерирования ГА возможных сценариев развития аварийных ситуаций и оптимальных решений по предотвращению аварии следует установить следующие начальные условия [5]:

- обучающиеся $S = \{1 \dots C\}$, C – число обучающихся (4);
- аварии $A = \{1 \dots N\}$, N – число аварий (5).

Вектор подбора: $TRENING = \{S1, S2, \dots, SC\}$, SC – номер обучающегося, который выбран для устранения A -ой аварии. Выбор вектора $TRENING$ осуществляется с учетом ограничений и критериев.

Ограничения:

- $WS \geq WA$, WS и WA – весовые коэффициенты обучающихся и аварий;
- $C \geq N$.

Критерии:

- на конкретную аварию подбирается один обучающийся.

Веса обучающегося и аварии находятся по формулам:

$$W_{Si} = \prod_{j=1}^C (S_{i,j})^{pj}, \quad (4)$$

где $S_{i,j}$ – значение j -го параметра у i -го объекта из вектора обучающихся;
 pj – относительный вес j -го параметра у i -ого объекта.

$$W_{Ai} = \prod_{j=1}^N (A_{i,j})^{pj}, \quad (5)$$

где $A_{i,j}$ – значение j -го параметра у i -го объекта из вектора аварий;
 pj – относительный вес j -го параметра у i -го объекта.

Для обеспечения качественного тренинга и обучения каждому обучающемуся представляется только одна аварийная ситуация. В хромосомах ген, отвечающий за номер обучающегося, должен встречаться только один раз («перечислимые хромосомы с уникальными генами»), поэтому необходимо применение схемы двухточечного скрещивания.

Расчет фитнес-функции осуществляется по формуле:

$$F(TRENING) = F(TRENING)_{max} - \sum_{i=1}^A (W_{Ai} \cdot W_{Si} \cdot K(x_i)), \quad (6)$$

где $TRENING$ – вектор подбора;

W_{Si} – вес обучающегося в i -м подборе;

W_{Ai} – вес аварии в i -м подборе;

$F(TRENING)_{max}$ – максимальное значение фитнес-функции;

$$K(x) = \begin{cases} 1, & \text{если на 1 аварию } x \leq 1 \\ 0, & \text{если на 1 аварию } x > 1 \end{cases}. \quad (7)$$

Популяция в разработанном ГА – совокупность нескольких векторов $TRENING$. Размер популяции – общая численность элементов в векторах $TRENING$. Численность задается перед началом работы ГА (остается постоянной). Популяция (один вектор $TRENING$) включает в себя множество разных подпопуляций. Особь – один элемент из вектора $TRENING$. Ген – элемент A или S из вектора $TRENING$.

Критерии для прекращения работы ГА: достижение числа поколений равного 100; нахождение решения с точностью 0,01; достигнуто максимальное время для обучения; получение решения, которое попало в точку перегиба искомой функции.

Интерфейс разработанного компьютерного тренажера реализован на основе мнемосхемы реальной установки с трубчатой печью [7]. Главный интерфейс тренажера представляет собой графический экран с набором элементов (трубчатые печи, виртуальные датчики, трубопроводы, клапаны) [8]. Каждый элемент выполнен в отдельном графическом редакторе (рисунок 5).

Рисунок 5. Главный интерфейс компьютерного тренажера

Для разработки тренажера-имитатора выбрана технологическая установка гидрирования, которая содержит трубчатую печь нагрева, и использован программный продукт UniSim Design корпорации Honeywell [9]. В программе UniSim Design разработана модель змеевика печи длиной 60 м из жаропрочной низколегированной стали 15X5М. Поток жидкости моделируется радиально изотропным, т.е. однородным, без массовых и энергетических градиентов. Гидрогенизат с водородсодержащим газом,

протекая по всей длине змеевика, равномерно нагревается за счет теплоты сгорания топливного газа, подводимого к змеевику из радиантной зоны печи (рисунок 6).

Рисунок 6. Модель трубчатой печи в UniSim Design с результатом расчета отложений кокса в змеевике

Для верификации точности прогнозов разработанной компьютерной программы с помощью встроенных утилит UniSim Design был произведен расчет процесса образования отложений кокса внутри змеевика трубчатой печи в зависимости от режимов работы, значений технологических параметров и длительности эксплуатации.

Результаты моделирования показывают, что при параметрах технологического процесса, заданных технологических регламентом,

толщина отложений в змеевике (10 участков по 6 м) достигает значения 1 см за 9600 ч, что соответствует данным службы эксплуатации печи. Определено значение оценочного критерия – скорости коксообразования (более 0,8 кг/сут), соответствующее предельно допустимому уровню закоксованности змеевика трубчатой печи [10]. Аналогично можно смоделировать процесс отложения кокса на внутренней поверхности змеевика при других значениях технологических параметров.

Выводы

Современные информационно-управляющие системы обеспечения пожарной и промышленной безопасности трубчатых печей срабатывают при достижении одним из контролируемых параметров значения, которое может привести к аварии, т.е. по факту возникновения аварийной ситуации. Поэтому для снижения аварийности необходимо их совершенствование, направленное на предотвращение возникновения аварийных ситуаций. Большинство аварий на трубчатых печах возникает в результате разгерметизации змеевиков из-за прогаров в зонах внутренних отложений, для их предотвращения предложен способ измерения уровня закоксованности змеевиков трубчатых печей в режиме реального времени с использованием технологии APCs («усовершенствованное управление и обеспечение безопасности»), прогнозирующей модели, генетического алгоритма и оценочного критерия – скорости коксообразования. Определено значение оценочного критерия (более 0,8 кг/сут), соответствующее предельно допустимому уровню закоксованности змеевика трубчатой печи.

Разработан компьютерный тренажер-имитатор, совместимый с информационно-управляющей системой трубчатой печи, позволяющий моделировать развитие аварийных ситуаций и оптимальные решения по прекращению их развития, снизить влияние человеческого фактора на безопасность трубчатых печей.

Список используемых источников

1. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учеб. пособие / С.А. Ахметов, Т.П. Сериков, И.Р. Кузеев, М.И. Баязитов. СПб.: Недра, 2006. 868 с.
2. Баширов М.Г., Павлова З.Х., Закирничная М.М., Хафизов А.М. Совершенствование систем автоматического управления и противоаварийной защиты трубчатых печей на основе мониторинга параметров процесса коксообразования // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2018. № 1. С. 120-144. Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2018/ogbus_1_2018_p120-144_BashirovMG_ru.pdf.
3. Веревкин А.П., Слетнёв М.С. Усовершенствованное управление (АРС) нефтехимическим производством на основе многоуровневой нейросетевой системы поддержки принятия решений // Нефтегазовое дело. 2012. № 10, № 2. С. 61-64.
4. Веревкин А.П., Матвеев Д.С., Галеев Т.Х., Андреев К.В., Ахмадов Э.А., Максименко А.А. Задачи и методы разработки продвинутых систем обеспечения промышленной безопасности // Территория Нефтегаз. 2016. № 4. С. 78-85.
5. Генетические алгоритмы: учеб. пособие / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. М.: Изд-во ФИЗМАЛИТ, 2006. 320 с.
6. Баширов М.Г., Павлова З.Х., Хафизов А.М. Разработка виртуального тренажера-имитатора для отработки навыков действия персонала при нештатных и аварийных режимах работы трубчатой печи // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2018. № 4. С. 161-181. Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/4_2018/ogbus_4_2018_p161-181_BashirovMG_ru.pdf.
7. Хафизов Ф.Ш., Шевченко Д.И., Кофанов А.В., Николаев И.А. Оптимизация использования тренажеров для специалистов нефтегазового комплекса // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 6.

С. 488-500. Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KhafizovFSh/KhafizovFSh_7.pdf.

8. Веревкин А.П., Матвеев Д.С., Хуснияров М.Х., Чикуров А.В. Построение математической модели трубчатой печи пиролиза для целей оптимизации режимов и диагностики прогаров змеевика // Нефтегазовое дело. 2010. Т. 8, № 1. С. 70-73.

9. Матвеев Д.С. Диагностирование состояния элементов автоматизированных технологических комплексов на примере трубчатой печи: автореф. ... канд. тех. наук. Уфа, 2011. 165 с.

10. Хафизов А.М., Баширов М.Г., Чурагулов Д.Г., Аслаев Р.Р. Разработка системы «усовершенствованное управление» для оценки ресурса трубчатой печи и повышения эффективности противоаварийной автоматической защиты // Фундаментальные исследования. 2015. № 12-3. С. 536-539.

References

1. Akhmetov S.A., Serikov T.P., Kuzeev I.R., Bayazitov M.I. *Tekhnologiya i oborudovanie protsessov pererabotki nefti i gaza* [Technology and Equipment for Oil and Gas Processing]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2006. 868 p. [in Russian].

2. Bashirov M.G., Pavlova Z.Kh., Zakirnichnaya M.M., Khafizov A.M. Sovershenstvovanie sistem avtomaticheskogo upravleniya i protivovariynoy zashchity trubchatykh pechey na osnove monitoringa parametrov protsessa koksoobrazovaniya [Improvement of Automatic Control Systems and Safety Tube Furnaces on the Basis of Monitoring the Process Parameters of the Coking]. *Setevoe izdanie «Neftgazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2018, No. 1, pp. 120-144. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2018/ogbus_1_2018_p120-144_BashirovMG_ru.pdf. [in Russian].

3. Verevkin A.P., Sletnev M.S. Usovershenstvovannoe upravlenie (APC) neftekhimicheskim proizvodstvom na osnove mnogourovnevoi neirosetevoi sistemy podderzhki prinyatiya reshenii [Advanced Management (APC) of Petrochemical Production Based on a Multilevel Neural Network Decision Support System]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2012, Vol. 10, No. 2, pp. 61-64. [in Russian].

4. Verevkin A.P., Matveev D.S., Galeev T.Kh., Andreev K.V., Akhmadov E.A., Maksimenko A.A. Zadachi i metody razrabotki prodvinutykh sistem obespecheniya promyshlennoi bezopasnosti [Tasks and Methods for the Development of Advanced Systems for Industrial Safety]. *Territoriya Neftegaz – Oil and Gas Territory*, 2016, No. 4, pp. 78-85. [in Russian].

5. Gladkov L.A., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic Algorithms]. Moscow, FIZMALIT Publ., 2006. 320 p. [in Russian].

6. Bashirov M.G., Pavlova Z.Kh., Khafizov A.M. Razrabotka virtual'nogo trenazhera-imitatora dlya otrabotki navykov deystviya personala pri neshtatnykh i avariynykh rezhimakh raboty trubchatoy pechi [Development of a Virtual Simulator-imitator for Working Out the Skills of Personnel Action in Abnormal and Emergency Modes Work of the Tubular Furnace] *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Online Edition «Oil and Gas Business»*, 2018. No. 4, pp. 161-181. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/4_2018/ogbus_4_2018_p161-181_BashirovMG_ru.pdf. [in Russian].

7. Khafizov F.Sh., Shevchenko D.I., Kofanov A.V., Nikolaev I.A. Optimizatsiya ispol'zovaniya trenazherov dlya specialistov neftegazovogo kompleksa [Optimizing the Use of Simulators for Oil and Gas Industry Specialists]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011. No. 6, pp. 488-500. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/KhafizovFSh/KhafizovFSh_7.pdf. [in Russian].

8. Verevkin A.P., Matveev D.S., Khusniyarov M.Kh., Chikurov A.V. Postroenie matematicheskoi modeli trubchatoi pechi piroliza dlya tselei optimizatsii rezhimov i diagnostiki progarov zmeevika [Construction of Mathematical Model of the Pyrolysis Tubular Furnace for Optimization of Modes and Blowhole of the Coil Diagnostics]. *Neftegazovoe delo – Petroleum Engineering*, 2010, Vol. 8, No. 1, pp. 70-73. [in Russian].

9. Matveev D.S. *Diagnostirovanie sostoyaniya elementov avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov na primere trubchatoi pechi: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Diagnosis of Automated Technological Complexes Elements State on the Example of a Tube Furnace. Cand. Engin. Sci. Avtoref.]. Ufa, 2011. 165 p. [in Russian].

10. Khafizov A.M., Bashirov M.G., Churagulov D.G., Aslaev R.R. Razrabotka sistemy «usovershenstvovannoe upravlenie» dlya otsenki resursa trubchatoi pechi i povysheniya effektivnosti protivopavariinoi avtomaticheskoi zashchity [Development of «Improved Management» to Assess Resource Tube Furnace and Increase the Efficiency of Emergency Automatic Protection]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2015, No. 12-3, pp. 536-539. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Хафизов Алик Мусаевич, старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», УГНТУ, филиал в г. Салавате, Российская Федерация

Alik M. Khafizov, Senior lecturer of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: alik_hafizov@mail.ru

Павлова Зухра Хасановна, д-р техн. наук, профессор, декан факультета автоматизации производственных процессов, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Zukhra Kh. Pavlova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean of Automation of Industrial Facilities Faculty, USPTU, Ufa, Russian Federation
e-mail: zpavlova@mail.ru

Баширов Мусса Гумерович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» УГНТУ, филиал в г. Салавате, Российская Федерация

Mussa G. Bashirov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation
e-mail: eapp@yandex.ru

Крышко Константин Алексеевич, магистрант кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», УГНТУ, филиал в г. Салавате, Российская Федерация

Konstantin A. Kryshko, Undergraduate Student of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, USPTU, Branch, Salavat, Russian Federation
e-mail: naix2804@gmail.com