

УДК 681.5

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ И ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБЧАТЫХ
ПЕЧЕЙ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
КОКСООБРАЗОВАНИЯ**

**IMPROVEMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS
AND SAFETY INSTRUMENTED TUBE FURNACES ON THE BASIS
OF MONITORING OF THE COKING PROCESS PARAMETERS**

Баширов М. Г., Павлова З. Х., Закирничная М. М., Хафизов А. М.

**ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа, Российская Федерация**

M. G. Bashirov, Z. Kh. Pavlova, M. M. Zakirnichnaya, A. M. Khafizov

**FSBEI HE «Ufa State Petroleum Technological University»,
Ufa, Russian Federation**

e-mail: eapp@yandex.ru

Аннотация. Трубчатые нагревательные печи являются важным элементом современного нефтегазового производства, они служат для высокотемпературного нагрева и реакционных превращений жидких и газообразных нефтепродуктов. В то же время трубчатые нагревательные печи являются одним из наиболее опасных производственных объектов.

Распространенным методом обеспечения пожарной и промышленной безопасности трубчатых нагревательных печей является применение систем аварийно-предупредительной сигнализации (АПС) и противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ).

Причинами аварий и их последствий в трубчатых нагревательных печах являются:

- разгерметизация трубчатого змеевика – предшественник пожара в трубчатой печи;
- погасание горелок, которое вызывает взрыв в трубчатой печи;
- разгерметизации оборудования вне печи приводит к взрыву снаружи трубчатой печи.

В данной статье рассмотрена одна из аварийных ситуаций на установках с трубчатыми печами – пожар, вызванный прогаром змеевика трубчатой печи. Данная ситуация является наиболее часто возникающей на технологических установках с трубчатыми печами. Она потенциально улучшаема с точки зрения совершенствования систем автоматического управления и ПАЗ. Прогар змеевика очень часто связан с его закоксовыванием. В настоящее время в контурах ПАЗ не реализуется функция остановки печи из-за закоксовывания змеевика, происходит только срабатывание АПС.

В статье предлагается совершенствование систем автоматического управления ПАЗ и АПС трубчатых печей путем мониторинга параметра коксообразования – скорости коксообразования. Скорость коксообразования вычисляется с помощью виртуальных анализаторов качества с использованием следующих параметров процесса коксообразования: температура, расход, давление, плотность продукта и другие параметры. Полученное значение скорости коксообразования будет являться усредненной величиной ввиду того, что она непостоянна по длине змеевика.

Abstract. Tubular heating furnaces are an important element of modern oil and gas complex, they are used for high temperature heating and reactions of liquid and gaseous oil products. At the same time, tubular heating furnaces are one of the most hazardous production facilities.

The most common method of ensuring industrial and fire safety tubular heating furnaces is the use of emergency warning systems (EWS) and emergency automatic protection (EAP).

Causes of accidents and their consequences in tubular heating furnaces are:

- depressurization of a tubular coil – is the predecessor of the fire of the furnace;
- the extinction of the burner – which causes an explosion in a tube furnace;
- depressurization of equipment outside the furnace leads to an explosion the outside of the tube furnace.

In this article, we have considered in detail one of the emergency situations in tubular furnaces, namely a fire caused by the burnout of the tubular coil. This situation was chosen because it is most often occur in process plants with tubular furnaces. It potentially improve terms of improving systems of automatic control and EAP. Burnout of the tubular coil is very often associated with its coking. At the moment, the introduction of the contours of the EAP of the stop function of the furnace due to coking of the coil is not implemented, only the triggering of EWS.

In this paper we propose an improvement of automatic control systems, EAP and EWS tubular furnace by monitoring parameter of a coking – speed coking. The rate of coking is proposed to calculate using the virtual quality analyzers using the parameters of the coking process: temperature, flow, pressure, product density, and other parameters. The obtained value of the coking rate will be the average value due to the fact that it is not constant along the length of the tubular coil.

Ключевые слова: трубчатая печь, пожарная и промышленная безопасность, трубчатый змеевик, процесс коксообразования, аварийно-предупредительная сигнализация, система автоматического управления, противоаварийная автоматическая защита, мониторинг технологических параметров.

Kew words: tube furnace, fire and industrial safety, tubular coil, process of coking, emergency-warning alarm, automatic control system, emergency automatic protection, monitoring of process parameters.

Введение

В трубчатых нагревательных печах технологических установок происходят высокотемпературный нагрев и реакционные превращения жидких и газообразных нефтепродуктов [1]. По статистическим данным, аварийные ситуации на технологических установках с трубчатыми печами сопровождаются пожаром, взрывом и выбросом опасных веществ (рисунок 1). По данным исследований Академии государственной противопожарной службы МЧС России (таблица 1) за промежуток времени с 2007 г. по 2016 г. 11,6 % аварийных событий на предприятиях нефтегазовой отрасли приходится на трубчатые нагревательные печи [2].

Таблица 1. Статистика аварийных ситуаций на предприятиях нефтегазовой отрасли

Оборудование	Количество аварий, %
1 Технологические трубопроводы	31,2
2 Насосные станции	18,7
3 Емкостные аппараты	15
4 Трубчатые печи	11,6
5 Ректификационные, вакуумные и прочие колонны	11,2
6 Промканализация	8,5
7 Резервуарные парки	3,8

Данные о причинах аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли представлены на рисунке 2. Трубчатые нагревательные печи являются источниками образования взрывоопасных смесей. Взрывы и пожары в трубчатых печах зачастую являются причиной разрушения технологического оборудования, расположенного поблизости. Большинство аварий возникает в результате разгерметизации змеевика и попадания целевого продукта в топочное пространство трубчатой печи. Разгерметизация змеевика чаще происходит вследствие разрушения в зонах концентрации механических напряжений или прогара в области внутренних отложений. Своевременная очистка трубчатого змеевика и

прогнозирование наступления предельного напряженно-деформированного состояния предотвращают возникновение взрывов или пожаров.

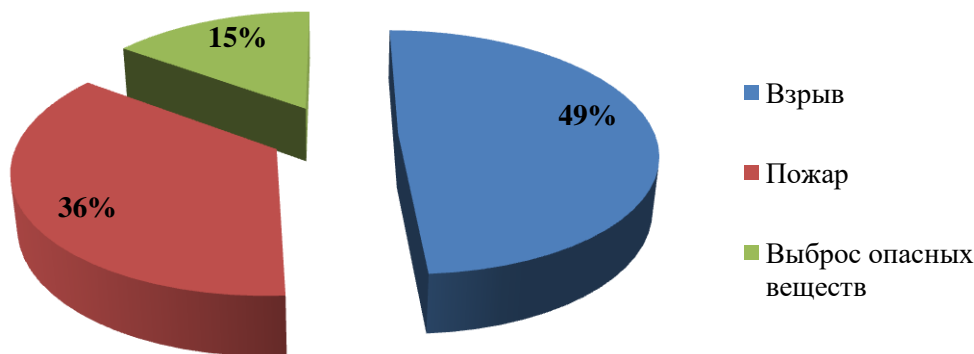


Рисунок 1. Статистика аварийных ситуаций на технологических установках с трубчатыми нагревательными печами

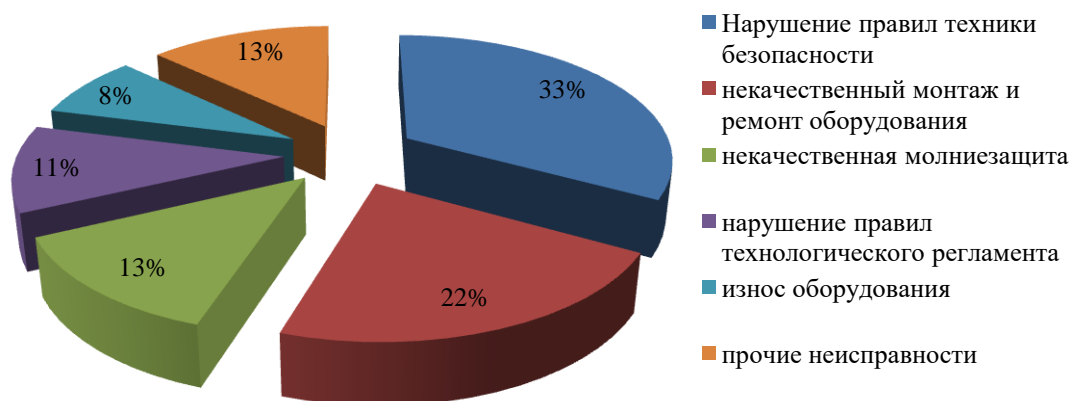


Рисунок 2. Статистические данные о причинах аварий на предприятиях нефтегазовой отрасли

Распространенным методом обеспечения пожарной и промышленной безопасности трубчатых нагревательных печей является применение систем аварийно-предупредительной сигнализации и противоаварийной автоматической защиты, предназначенных для предупреждения и предотвращения аварийных ситуаций, которые возникают в результате ошибочного действия персонала или сбоев в работе технологического

оборудования [3, 4]. В системах АПС и ПАЗ используются специальные сертифицированные датчики, исполнительные устройства, измерительные приборы и программируемые логические контроллеры (ПЛК). ПЛК имеют дублированную архитектуру, которая повышает их надежность и безопасность ведения технологического процесса. Контроллеры системы ПАЗ формируют управляющие воздействия на исполнительные устройства для устранения возникших аварийных (нештатных) ситуаций.

Необходимо обратить внимание на то, что большая часть аварий на технологических установках с трубчатыми нагревательными печами возникает вследствие неисправности конструктивных элементов, в число которых входят и технические средства автоматизации, поэтому важной является задача оценки их технического состояния и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации [2].

1 Анализ аварийных ситуаций на технологических установках с трубчатыми нагревательными печами

Известно, что аварии на объектах нефтегазовой отрасли приводят к большому материальному ущербу, страдают как самим объекты, так и окружающая среда. Наличие систем АПС и ПАЗ позволяет спрогнозировать образование взрывоопасных и пожароопасных сред в технологическом оборудовании при достижении предельно допустимых значений параметров, отображающих состояние технологического процесса, регламентированных в различных режимах работы, и обеспечивающих безопасную остановку или перевод технологического процесса в безопасное состояние по заданной «жесткой» логике.

Основная задача любой системы АПС и ПАЗ – предупреждение операторов о возможности возникновения аварийного события и перевод технологического режима в безопасное состояние при появлении различных проблем (выход параметров процесса за дозволённые пределы, отказ технологического оборудования, нештатные ситуации).

Взрыв в трубчатой нагревательной печи обусловлен следующими событиями, представленными в дереве событий (таблица 2, рисунок 3) [2]. В данной работе рассмотрена одна из аварийных ситуаций на технологических установках с трубчатыми нагревательными печами – пожар, вызванный прогаром змеевика. Пожары в основном обусловлены разгерметизацией змеевика и попаданием сырья в топочное пространство печи (рисунок 4). Наиболее часто встречающимися дефектами трубчатых змеевиков печей нефтегазовых предприятий, приводящими к разгерметизации, являются:

- изнашивание внутренней поверхности труб;
- хрупкое разрушение труб;
- местные деформации труб с возникновением отдулин из-за локальных перегревов;
- наружное обгорание труб (высокотемпературная коррозия);
- возникновение сквозных свищей и прогаров трубчатого змеевика;
- наружная коррозия трубчатого змеевика и дымовых труб печей продуктами образованными в результате сгорания топлива (низкотемпературная коррозия) [5].

Прогар змеевика очень часто связан с его закоксовыванием.

В настоящее время в контурах ПАЗ не реализуется функция остановки печи из-за закоксовывания змеевика, происходит только срабатывание АПС. Решение об остановке работы печи принимается технологическим персоналом.

Таблица 2. Логические символы и символы событий для построения дерева отказов

Символ	Название	Причинная связь
	«И»	Выходное событие происходит, если все входные события выполняются одновременно
	«Или»	Выходное событие происходит, если выполняется любое из входных событий
	«Запрет»	Наличие входа вызывает появление выхода только в случае выполнения условного события
	Прямоугольник	Событие
	Овал	Условное событие, используется с логическим элементом «запрет»

Анализ технологических регламентов трубчатых печей действующих производств и специальной научной литературы [3, 4] показал, что применяемые системы АПС реагируют на опасное закоксовывание по следующим признакам:

- существует разница в показаниях температуры сырья между параллельными потоками на выходе из радиантных змеевиков трубчатой нагревательной печи (также это возможно при неисправностях контрольно-измерительных приборов (КИП) и при неравномерной подаче сырья);
- наблюдается значительное увеличение давления на входе сырья в печь при постоянном его расходе;
- температура топочных газов на перевале печи при одинаковом количестве сжигаемого топлива повышается (кокс, который образовался на трубах змеевика, влияет на коэффициент теплопередачи от дыма к продукту, в результате снижается количество тепла, передаваемого сырью).

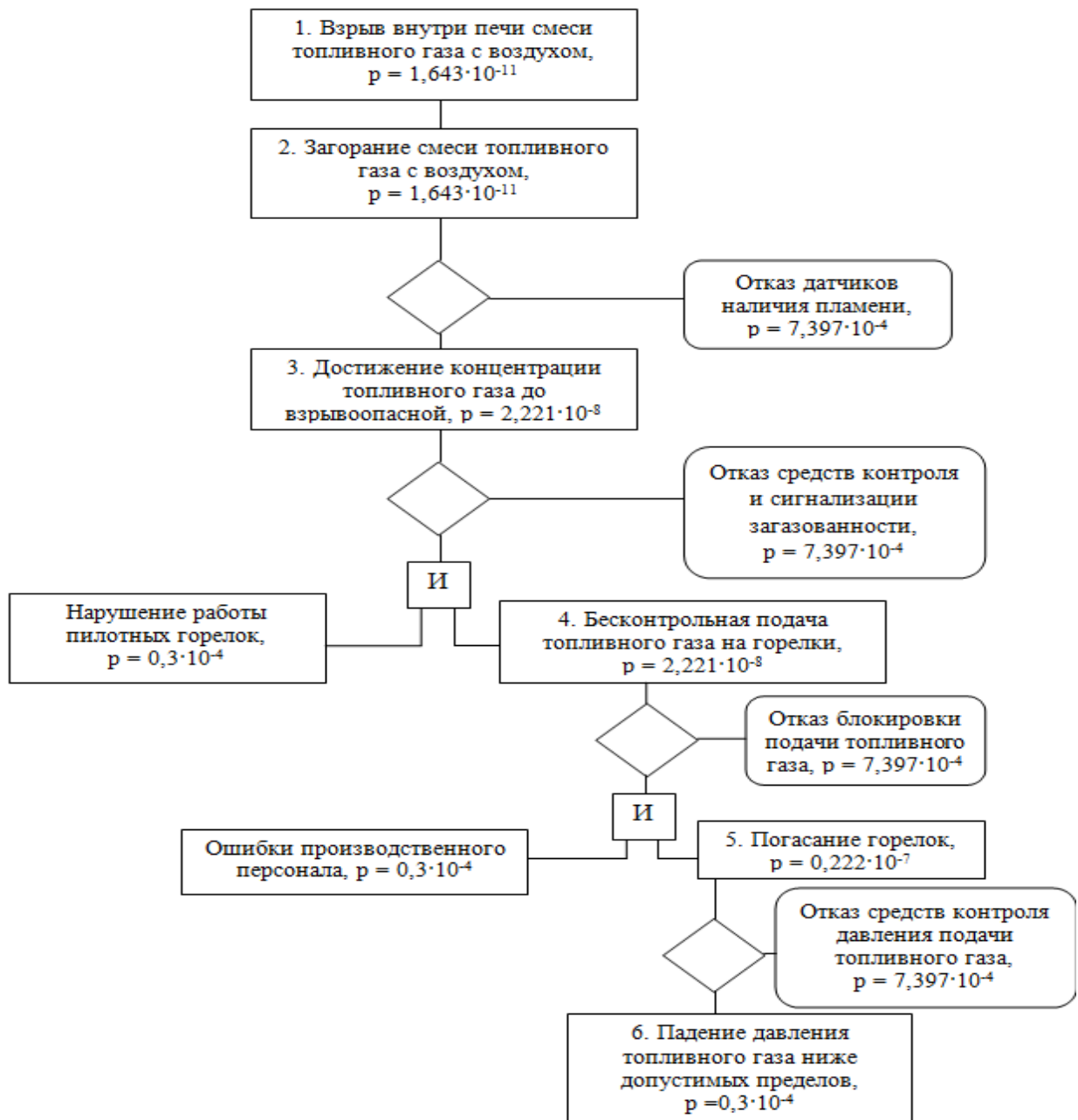


Рисунок 3. Дерево событий – взрыв внутри печи

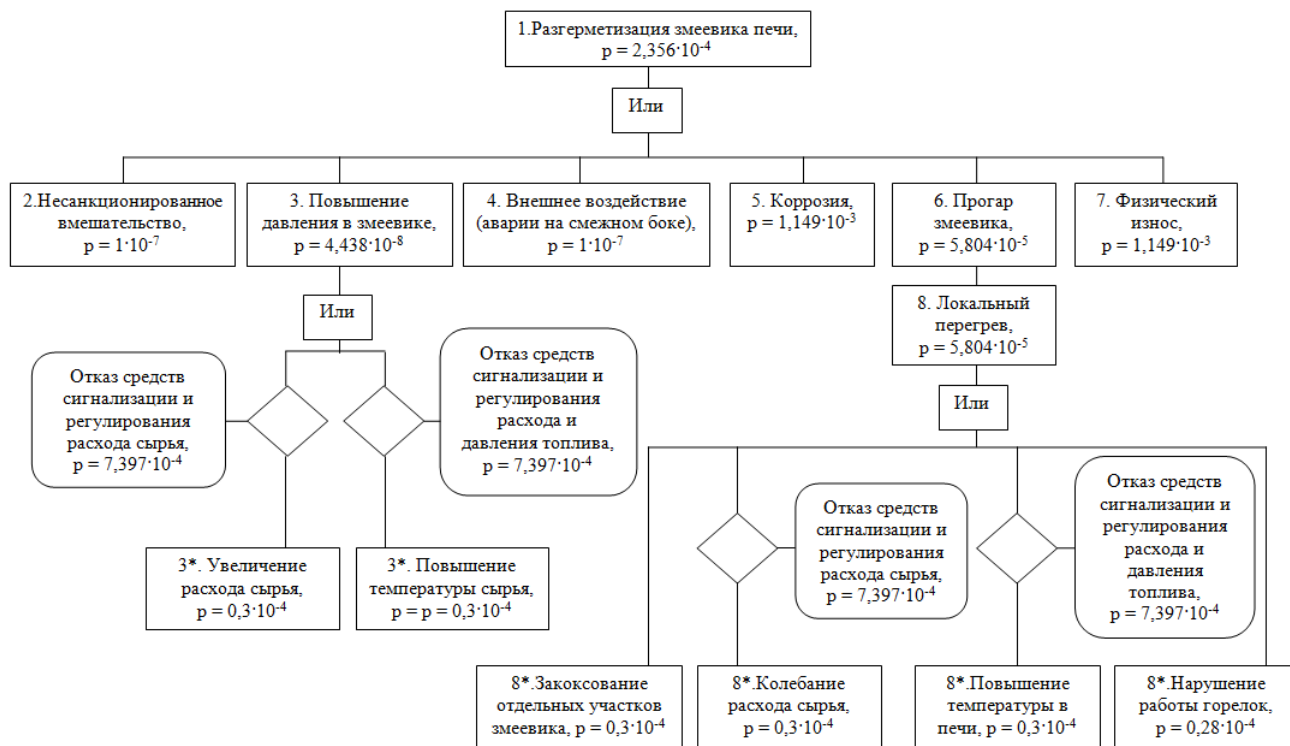


Рисунок 4. Дерево отказов – разгерметизация змеевика трубчатой нагревательной печи

В настоящее время для определения, что произошел прогар трубчатого змеевика, применяются методы, которые не дают возможности проводить оценку повреждений металла змеевика и контролировать толщину его стенки на работающей печи [6].

Существующие системы ПАЗ реагируют и останавливают работу печей в случае прогара змеевика в следующих ситуациях:

- значительное повышение температуры на перевале трубчатой нагревательной печи или дымовых газов на выходе из печи (также сопровождается падением концентрации кислорода в дымовых газах на выходе трубчатой печи и падением давления продукта после радиантных змеевиков);
- падение давления продукта на выходе из трубчатой нагревательной печи.

В настоящее время в производственных условиях преимущественно применяется первый способ реализации ПАЗ. Вопросы обеспечения

безопасности трубчатых печей с использованием различных способов рассмотрены в работах [7-11].

2 Выявление наиболее важных параметров, влияющих на коксообразование

В данной работе процесс коксообразования в трубчатых нагревательных печах рассматривается на примере печи пиролиза углеводородного сырья. Образование кокса в змеевиках печи является очень сложным процессом, скорость которого зависит от множества факторов.

Упрощенно процесс коксообразования можно представить в два этапа:

- массоперенос веществ-предшественников образования кокса к стенкам змеевика;
- химические реакции веществ-предшественников кокса у стенок змеевика (пленочный эффект) [5].

Эти процессы описываются следующими уравнениями:

$$r_m = K_m \cdot (y - y_1), \quad (1)$$

$$r_p = k \cdot \left(\frac{y \cdot p}{R \cdot T} \right), \quad (2)$$

где r_m – скорость массопередачи, кг·моль/(м²·с);

r_p – скорость химической реакции, кг·моль/(м³·с);

K_m – коэффициент массопередачи;

k – константа скорости реакции, с⁻¹;

y – мольная доля предшественников кокса в реакционном потоке;

y_1 – мольная доля предшественников кокса у стенки змеевика;

p – общее давление, МПа;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура в пристенном слое, К.

Непосредственно у стенок змеевика образуется слой реакционной смеси, который движется медленнее, чем основная масса подогреваемого продукта. Пленочный эффект выражается заметным повышением температуры по радиальному направлению от центра к стенке трубы через пристенный слой. Из-за этого скорость протекания реакций в пристенном слое выше. Это относится и ко вторичным реакциям. Следовательно, пленочный эффект характеризует скорость коксоотложения на стенках трубчатого змеевика [5].

В результате анализа научной и технической литературы были выявлены переменные и постоянные параметры, влияющие на скорость коксообразования в змеевиках трубчатых печей [5, 12].

К *переменным* параметрам относятся параметры, которые изменяются во времени и в определенной степени контролируемы:

- температура продукта;
- парциальное давление реагирующих углеводородов;
- массовый расход сырья.

К *постоянным* относятся параметры, связанные с конструкцией печи, и малоизменяемые параметры:

- внутренний диаметр труб;
- длина труб;
- уравнивание теплового потока (разница температур труб);
- материал изготовления труб;
- состояние поверхностей реактора;
- время пребывания сырья в трубчатом змеевике;
- наличие ингибиторов коксообразования.

Увеличение температуры повышает скорость реакций коксообразования и коксоотложения. Например, при пиролизе бензиновых фракций энергия активации коксообразования составляет 240-320 МДж/моль, что показывает значительную зависимость коксообразования от температуры. Зависимости температуры стенок

змеевика и длительности рабочего пробега от температуры пиролиза прямогонного бензина показаны на рисунках 5 и 6.

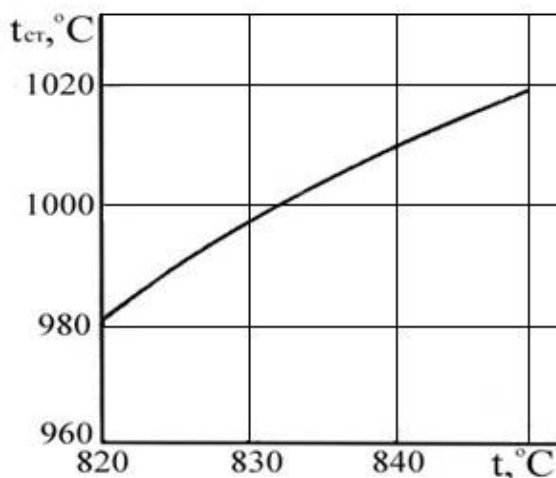


Рисунок 5. Зависимость температуры стенок змеевика от температуры пиролиза прямогонного бензина

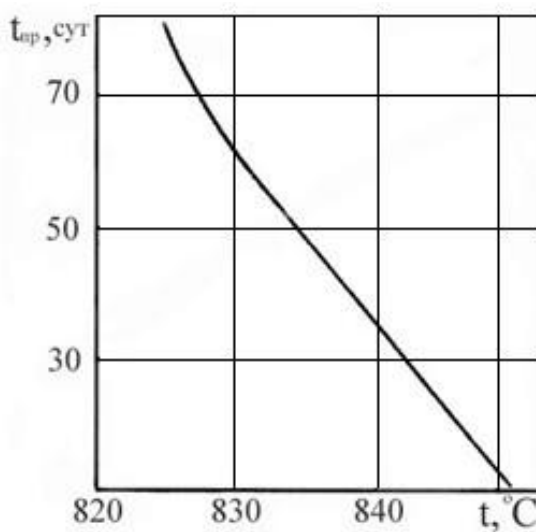


Рисунок 6. Зависимость длительности рабочего пробега трубчатой печи от температуры пиролиза прямогонного бензина

Парциальное давление углеводородов изменяют подачей водяного пара, например за счет разбавления сырья 10-15 % водяного пара скорость коксообразования пропана снижается в 4-6 раз. Однако разбавление паром снижает селективность процесса пиролиза, а соотношение пар – исходное сырье закладывается обычно в зависимости от типа сырья (чем тяжелее

сырье, тем больше количество пара подается). Также большое количество пара существенно увеличивает себестоимость продукции. Зависимости температуры стенок змеевика и длительности рабочего пробега от соотношения пар-сырье показаны на рисунках 7 и 8.

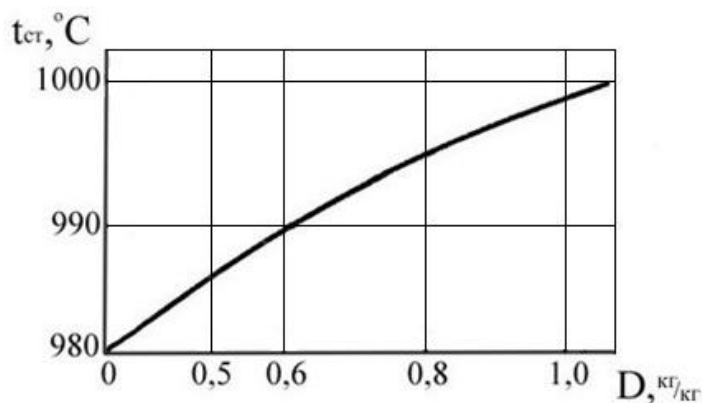


Рисунок 7. Зависимость температуры стенок змеевика трубчатой печи от соотношения пар – сырье

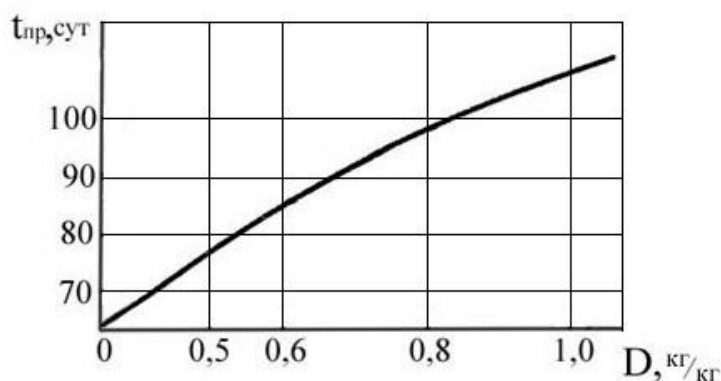


Рисунок 8. Зависимость длительности рабочего пробега трубчатой печи от соотношения пар - сырье

С увеличением массового расхода сырья скорость коксообразования тоже увеличивается. Объясняется это увеличением температуры стенок трубчатого змеевика. Однако эта зависимость не является монотонной, а включает несколько экстремумов, вызванных конкуренцией массопереноса сырья и реакций образования предшественников кокса в пристенном слое.

Также массовый расход может меняться при изменении плотности сырья. Ввиду отсутствия необходимости использования, постоянные параметры в данной работе подробно не рассмотрены.

Как уже было описано выше, закоксовывание диагностируется системой АПС по падению давления продукта на выходе печи или по росту давления сырья на входе печи. График перепада давления сырьё/продукт на входе и выходе трубчатой нагревательной печи от времени представлен на рисунке 9 [7].

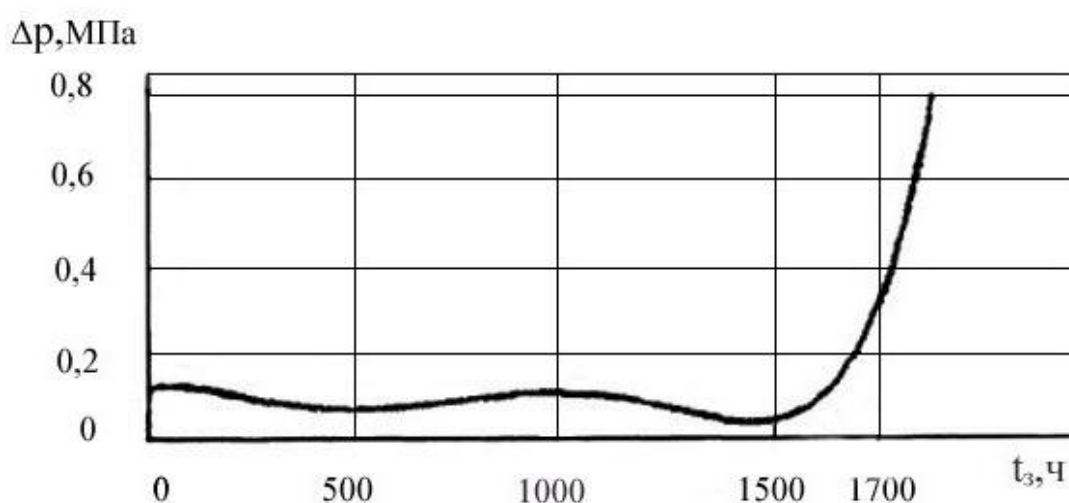


Рисунок 9. Зависимость перепада давления между входом и выходом печи от времени при давлении на входе 1 МПа

Из графика (рисунок 9) видно, что изменение давления носит лавинообразный характер. Подобная тенденция, но в несколько меньшей степени, наблюдается и у скорости коксообразования.

3 Обоснование совершенствования систем автоматического управления, АПС и ПАЗ трубчатых печей

Системы автоматического управления и ПАЗ современных трубчатых нагревательных печей не учитывают процесс коксообразования, протекающий параллельно основному технологическому процессу и влияющий как на эффективность основного технологического процесса,

так и на пожарную и промышленную безопасность технологической установки, а АПС реагируют только на степень закоксовывания змеевика. В данной работе предлагается совершенствование систем автоматического управления, ПАЗ и АПС трубчатых нагревательных печей путем мониторинга одного из параметров коксообразования – скорости коксообразования.

Очевидно, что 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, уменьшения сроков рабочего и межремонтного пробегов печи, а также срока службы змеевика. Следует также учитывать, что более частые выжиги кокса являются причиной усугубления напряженно-деформированного состояния змеевика из-за более коротких циклов нагрузки.

На рисунке 10 приведен график амплитуды механических напряжений, возникающих в змеевике (σ_{a1}^* и σ_{a2}^* – уровни напряжений). Имеет место накопление усталостных повреждений в змеевике от действия двух автономных факторов: термосилового воздействия рабочих параметров – давления и температуры (А), и от действия температуры подвижного фронта пламени в процессе выжига кокса (Б) [13].

Очевидным является то, что более стабильная работа печи при увеличившемся рабочем пробеге является выгодной для предприятия как с точки зрения экономики, так и с точки зрения обеспечения пожарной и промышленной безопасности.

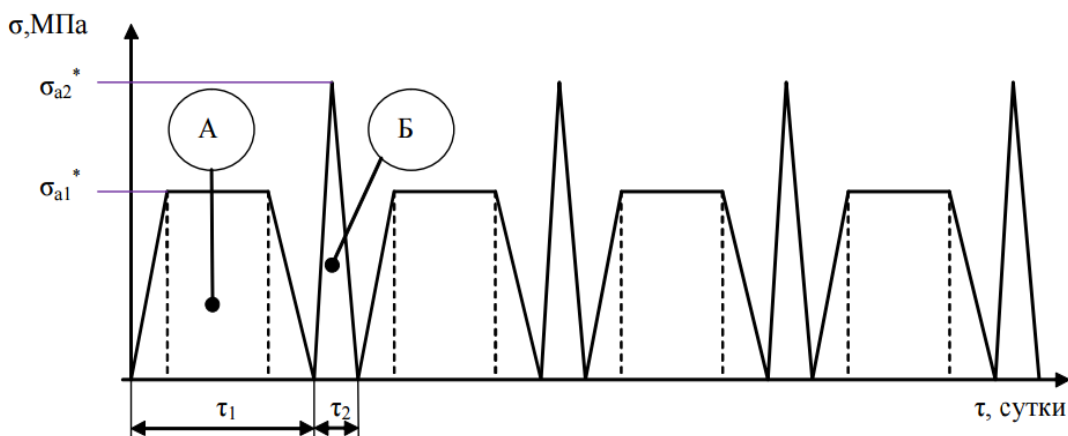


Рисунок 10. Характер зависимости амплитуды механических напряжений в змеевике трубчатой печи от времени

Скорость коксообразования предлагается вычислять с помощью виртуальных анализаторов качества с использованием параметров процесса коксообразования (температура, расход, давление, плотность продукта и другие параметры) [14]. Полученное значение скорости коксообразования будет являться усредненной величиной ввиду того, что она не постоянна по длине змеевика. 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. Значение скорости коксообразования используется интеллектуальной системой автоматического управления трубчатой печи для формирования управляющих воздействий на технологический процесс, направленных на снижение этого параметра. Резкий рост скорости коксообразования будет являться условием срабатывания системы 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.

В идеале, уравнение скорости коксообразования должно основываться на физико-химической теории коксообразования с учетом специфики работы конкретной печи (в частности, на основе анализа работы печи в течение продолжительного времени, а также на экспертных данных). В данной работе были использованы приближенные формулы расчета скорости коксообразования, которые демонстрируют основную идею улучшения систем автоматического управления, АПС и ПАЗ. По мере накопления базы данных формулы будут корректироваться и уточняться для использования в системах автоматического управления, АПС и ПАЗ реальных трубчатых печей [15].

Вывод

На основе мониторинга параметров процесса коксообразования в змеевиках трубчатых печей, в частности скорости коксообразования, определяемой расчетным путем, предложено совершенствование систем автоматического управления и противоаварийной защиты трубчатых печей, позволяющее с учетом степени закоксовывания змеевика оптимизировать их работу, повысить пожарную и промышленную безопасность, реализовать переход на систему обслуживания и ремонта трубчатых печей по фактическому техническому состоянию.

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

3. 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.

4. Хафизов А.М., Юхин Е.Г., Аслаев Р.Р. Разработка имитатора работы трубчатой печи для повышения безопасности технологического процесса и экономии энергоресурсов // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: сб. тр. IV Всеросс. науч.-техн. конф. студентов, магистров, аспирантов (Тольятти, 12-14 апреля 2016 года) / Отв. за вып. В.В. Вахнина. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2016. С. 343-346.*

5. Мухина Т.Л., Барабанов Н.Л., Бабаш С.Е. Пиролиз углеводородного сырья. М.: Химия, 2011. 240 с.

6. 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.

7. Веревкин А.П., Матвеев Д.С., Хуснияров М.Х. Обеспечение безопасности трубчатых печей на основе оперативной диагностики аварийных состояний // *Территория Нефтегаз*. 2010. № 4. С. 14-17.

8. Матвеев Д.С., Чикуров А.В., Хуснияров М.Х., Веревкин А.П., Бахтизин Р.Н. Система оперативного диагностирования автоматизированного технологического комплекса трубчатой печи на основе производственных правил // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2011. № 4. С. 4-13. Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Matveev/Matveev_1.pdf.

9. 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.

10. Веревкин А.П. Когнитивные модели в системах искусственного интеллекта: цели и методы построения // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля-2016: матер. Междунар. науч.-метод. конф., посвящ. 60-летию филиала УГНТУ в г. Салавате. 2016. С. 167-170.

11. 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.

12. Жидков А.Б., Ванслов А.В., Егоренко Б.М. Мероприятия по безопасной работе трубчатых нагревательных печей на нефтеперерабатывающих заводах // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 4. С. 35-38.

13. Баязитов М.И. Повышение долговечности змеевиков трубчатых печей: автореф. ... канд. тех. наук. Уфа, 1998. 189 с.

14. Хафизов А.М., Кильсинбаев Т.Н., Хакимов Т.И. Разработка системы «улучшенное управление» для оценки технического состояния электрооборудования с применением виртуальных анализаторов для предприятий нефтегазовой отрасли // Материалы докладов X Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. С. 11-12.

15. Хафизов А.М., Баширов М.Г. Разработка системы «улучшенного управления» техническим состоянием оборудования и промышленной безопасностью предприятий нефтехимии и нефтепереработки // Наука. Технология. Производство – 2014: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Редкол.: Евдокимова Н.Г. и др. Уфа: РИЦ УГНТУ, 2014. С. 55-57.

References

1. Akhmetov C.A., Serikov T.P., Kuzeev I.R., Bayazitov M.I. *Tekhnologiya i oborudovanie protsessov pererabotki nefiti i gaza: ucheb. posobie* [Technology and Equipment for Oil and Gas Processing: Tutorial]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2006. 868 p. [in Russian].
2. Matveev D.S. *Diagnostirovanie sostoyaniya elementov avtomatizirovannykh tekhnologicheskikh kompleksov na primere trubchatoi pechi: avtoref. kand. tekh. nauk* [Diagnosis of Automated Technological Complexes Elements State on the Example of a Tube Furnace. Kand. Techn. Sci. Avtoref.]. Ufa, 2011. 165 p. [in Russian].
3. 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].
4. Khafizov A.M., Yukhin E.G., Aslaev R.R. Razrabotka imitatora raboty trubchatoi pechi dlya povysheniya bezopasnosti tekhnologicheskogo protsessa i ekonomii energoresursov [Development of Tube Furnace Operation Simulator for Safety Increasing of Technological Process and Energy Resources Saving]. *Sbornik trudov IV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov «Energoeffektivnost' i energobezopasnost' proizvodstvennykh protsessov» (Tol'yatti, 12-14 aprelya 2016 goda)*. [Collection of Works of IV All-Russian Scientific-Technical Conference of Students, Undergraduate and Post-graduate Students «Energy Efficiency and Energy Security of Production Processes» (Togliatti, April 12-14, 2016)]. Tol'yatti, TGU Publ., 2016, pp. 343-346. [in Russian].

5. Mukhina T.L., Barabanov N.L., Babash S.E. *Piroliz uglevodorodnogo syr'ya* [Pyrolysis of Hydrocarbons]. Moscow, Khimiya Publ., 2011. 240 p. [in Russian].

6. 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].

7. Verevkin A.P., Matveev D.S., Khusniyarov M.Kh. Obespechenie bezopasnosti trubchatykh pechei na osnove operativnoi diagnostiki avariinykh sostoyanii [Tube Furnaces Safety Maintenance on the Basis of Emergency Conditions Operative Diagnostics]. *Territoriya Neftegaz – Oil and Gas Territory*, 2010, No. 4, pp. 14-17. [in Russian].

8. Matveev D.S., Chikurov A.V., Khusniyarov M.Kh., Verevkin A.P., Bakhtizin R.N. *Sistema operativnogo diagnostirovaniya avtomatizirovannogo tekhnologicheskogo kompleksa trubchatoi pechi na osnove produktsionnykh pravil* [The On-Line Diagnostics System of Automated Technological Complex of a Tubular Furnace Based on a System of Production Rules]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» – Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2011, No. 4, pp. 4-13. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Matveev/Matveev_1.pdf. [in Russian].

9. 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].

10. Verevkin A.P. Kognitivnye modeli v sistemakh iskusstvennogo intellekta: tseli i metody postroeniya [Cognitive Models in Artificial Intelligence Systems: Goals and Methods of Construction]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-metodicheskoi konferentsii «Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya – 2016», posvyashch. 60-letiyu filiala UGNTU v g. Salavate.* [Materials of International Scientific-Methodic Conference «Integration of Science and Education in Universities of Oil and Gas Profile – 2016», Dedicated to 60th Anniversary of UGNTU Branch in Salavat]. 2016, pp. 167-170. [in Russian].

11. Verevkin A.P., Matveev D.S., Galeev T.Kh., Andreev K.V., Akhmadov E.A., Maksimenko A.A. Zadachi i metody razrabotki prodvinytykh 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].

12. Zhidkov A.B., Vanslov A.V., Egorenko B.M. Meropriyatiya po bezopasnoi rabote trubchatykh nagrevatel'nykh pechei na neftepererabatyvayushchikh zavodakh [Measures for Safe Operation of Tubular Heating Furnaces at Oil Refineries]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Industrial Safety in Industry*, 2002, No. 4, pp. 35-38. [in Russian].

13. Bayazitov M.I. *Povyshenie dolgovechnosti zmeevikov trubchatykh pechei: avtoref. kand. tekhn. nauk* [Increasing the Durability of Tubular Ovens. Kand. Techn. Sci. Avtoref.]. Ufa, 1998. 189 p. [in Russian].

14. Khafizov A.M., Kil'sinbaev T.N., Khakimov T.I. Razrabotka sistemy «uluchshennoe upravlenie» dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya s primeneniem virtual'nykh analizatorov dlya predpriyatii neftegazovoi otrasli [Development of the «Improved Management» System for Assessing the Technical Condition of Electrical Equipment with the Use of Virtual Analyzers for Oil and Gas Industry Enterprises]. *Materialy dokladov X Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii «Tinchurinskie chteniya».* [Proceedings of the X International Youth Scientific Conference «Tinchurin Readings»]. Kazan', Kazan. gos. energ. un-t, 2015, pp. 11-12. [in Russian].

15. Khafizov A.M., Bashirov M.G. Razrabotka sistemy «uluchshennogo upravleniya» tekhnicheskim sostoyaniem oborudovaniya i promyshlennoi bezopasnost'yu predpriyatii neftekhimii i neftepererabotki [Development of a System of «Improved Management» of the Technical Condition of Equipment and Industrial Safety of the Enterprises of Petrochemistry and Oil Refining]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Nauka. Tekhnologiya. Proizvodstvo – 2014»*. [Abstracts of the International Scientific and Technical Conference of Students, Post-graduate Students and Young Scientists «Science. Technology. Production – 2014»]. Ufa, RITs UGNTU, 2014, pp. 55-57. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

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

M. G. Bashirov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: eapp@yandex.ru

Павлова З. Х., д-р техн. наук, профессор, декан факультета автоматизации производственных процессов, ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация

Z. Kh. Pavlova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Automation of Industrial Processes, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: zpavlova@mail.ru

Закирничная М. М., д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», ФГБОУ ВО «УГНТУ», г. Уфа, Российская Федерация.

M. M. Zakirnichnaya, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Automation of Technological Processes and Production Department, FSBEI HE «USPTU», Ufa, Russian Federation

e-mail: zakmarina@mail.ru

Хафизов А. М., старший преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», ФГБОУ ВО «УГНТУ», филиал в г. Салавате, Российская Федерация

A. M. Khafizov, Senior lecturer of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises Department, FSBEI HE «USPTU», Branch, Salavat, Russian Federation

e-mail: alik_hafizov@mail.ru