

# ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НЕФТЕХИМИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ

## PROCESSES AND APPARATUS OF CHEMICAL ENGINEERING, PETROLEUM CHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY

Научная статья  
УДК 66.041.45  
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-3-7-14>  
EDN BCJRAM

### Компиляция данных по оптимизации работы трубчатых печей

---

*Вера Николаевна Лысова<sup>✉</sup>, Ршад Абдулхакимович Хайбулов*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, [vnl55@yandex.ru](mailto:vnl55@yandex.ru)<sup>✉</sup>*

---

**Аннотация.** Значительное количество установок, эксплуатируемых на предприятиях по подготовке и переработке углеводородного сырья, имеют в своем составе теплообменники различных конструкций. Большую долю среди них занимают специальные теплообменники, которые используют тепло отходящих газов при сжигании жидкого и газообразного топлива – трубчатые печи. В зависимости от специфики и типа используемого топлива печи различаются как по конструкции, так и по эксплуатационным параметрам. На установках АТ, АВТ, вторичной перегонки бензина печи НФС используются для нагрева углеводородных сред и характеризуются температурами нагрева от 300 до 500 °С. В установках для технологических процессов пиролиза, конверсии углеводородных газов и т. д. одновременно с нагревом и (или) перегревом исходного сырья печи используются в качестве реакторов. Эффективное использование таких печей возможно только при наличии инженерных методов прогнозирования изменений в технологическом потоке, созданных на основе достоверных как аналитических, так и экспериментальных материалов. Имеющихся данных недостаточно для разработки мер по повышению эффективности и надежности этих установок. Рассмотрены результаты аналитического исследования по оптимизации работы трубчатых печей, выявлены основные недостатки при их эксплуатации, определены методы оценки износа элементов аппарата в зависимости от технологических режимов (температура, давление, среда) и материала исполнения в процессе технической диагностики оборудования для обеспечения промышленной безопасности. Рассмотрены вопросы влияния конструктивных особенностей и организации процесса горения форсунок на качественные показатели трубчатых печей. Определены основные направления повышения энергоэффективности лучистых и конвекционных камер трубчатых печей.

**Ключевые слова:** трубчатые печи, теплообмен, нефтехимия, нефтепереработка, износ, скорость коррозии, методика оценки, эксплуатация

**Для цитирования:** Лысова В. Н., Хайбулов Р. А. Компиляция данных по оптимизации работы трубчатых печей // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2023. № 3. С. 7–14. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-3-7-14>. EDN BCJRAM.

Original article

## Compilation of data on optimizing tubular furnaces operation

Vera N. Lysova<sup>✉</sup>, Rishad A. Khaibullov

Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, vnl55@yandex.ru<sup>✉</sup>

**Abstract.** A great number of processing hydrocarbon raw material units operated at enterprises have heat exchangers of different designs. A significant share among them comes to the special heat exchangers that use the heat of exhaust gases when burning liquid and gaseous fuels – tubular furnaces. Depending on the specifics and type of fuel used, the furnaces differ both in design and in operational parameters. At AT units, AVT units, and gasoline secondary distillation units, HFC furnaces are used to heat hydrocarbon media and are characterized by heating temperatures from 300°C to 500°C. In the units of technological processes of pyrolysis, conversion of hydrocarbon gases, etc., simultaneously with heating and/or overheating of the raw materials, furnaces are used as reactors. The effective use of such furnaces is possible only if there are used engineering methods predicting changes in the technological flow, created on the basis of reliable analytical and experimental materials. The available data is insufficient to develop measures to improve the efficiency and reliability of these units. There are discussed the results of analytical studying the optimizing the operation of tubular furnaces, identified the main disadvantages during their operation, determined methods for assessing the wear of the elements of the apparatus depending on the technological modes (temperature, pressure, medium) and the material of execution in the process of technical diagnostics of equipment to ensure industrial safety. The issues of the influence of design features and of organizing the combustion process of nozzles on the quality indicators of tubular furnaces are considered. The main directions of increasing the energy efficiency of radiant and convection chambers of tubular furnaces are defined.

**Keywords:** tubular furnaces, heat exchange, petrochemistry, oil refining, wear, corrosion rate, assessment methodology, operation

**For citation:** Lysova V. N., Khaibullov R. A. Compilation of data on optimizing tubular furnaces operation. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2023;3:7-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2023-3-7-14>. EDN BCJRAM.

### Введение

Современные установки, эксплуатируемые на нефтегазовых предприятиях, работают в сложных условиях повышенных температур, давлений и агрессивных технологических сред. К таким установкам можно отнести реакторные блоки, в состав которых входят технологические печи. Воздействие агрессивных сред, особенно при повышенных температурах, приводит к постепенному износу материалов – сталей различных групп и классов, что может привести к поломкам и несчастным случаям.

Следует отметить, что в условиях интенсивного развития технологии переработки углеводородного сырья одной из актуальных задач является повышение эффективности используемого в промышленности оборудования, в частности трубчатых печей, поскольку связанные с этим затраты составляют около четверти стоимости всего технологического оборудования нефтеперерабатывающего предприятия. Не смотря на то, что трубчатые печи по своей принадлежности являются лишь вспомогательным оборудованием, предназначенным для нагрева сырья перед основной технологической операцией, они относятся к числу наиболее энергоемких устройств. На их долю приходится до 50 % потребляемого газообразного и жидкого топлива из всей перерабатываемой нефти. В качестве теплоносителя

в этих аппаратах используется тепло уходящих газов при сгорании жидкого и газообразного топлива (в зависимости от продукции, вырабатываемой предприятием). Процесс сгорания топлива сопровождается высокой температурой. В связи с этим особенно важно определить влияние температуры на элементы печи, что, в свою очередь, означает повышение эффективности работы печи в целом. Для достижения высоких технико-экономических показателей эксплуатации трубчатых печей, решения вопросов обеспечения эксплуатационной безопасности и долговечности печи, обеспечения ее работоспособности в экстремальных условиях имеет большое значение организация безопасности рабочего персонала и жителей близлежащих населенных пунктов в целом.

Анализ и обобщение практической и теоретической информации о работе печей позволяет обеспечить квалифицированный ввод в эксплуатацию и стабильный контроль эксплуатационных параметров, учесть недостатки работающих печей при их проектировании, а также достичь максимального выхода целевой продукции при минимальных затратах сырья и энергии.

Для достижения высоких технических и экономических показателей трубчатых печей первостепенное значение имеет решение задач по оптими-

зации их рабочего режима, обеспечению эксплуатационной безопасности и долговечности, организации и качеству ремонта.

Не менее важной задачей при эксплуатации печных комплексов является обеспечение их работоспособности в экстремальных условиях установленной продолжительности рабочего цикла (мощности печи), поскольку в случае внезапного выхода из строя хотя бы одного агрегата возможна остановка оборудования и нарушение технологического режима всей установки. Поэтому обобщение практического опыта, анализ процессов в печах и воздействия сред на материальную часть конструкции имеет особое значение для выявления причин повреждений деталей и узлов и разработки мер по их предотвращению.

*Целью исследования* являлось рассмотрение основных направлений оптимизации работы трубчатых печей нефтеперерабатывающих заводов – основных потребителей энергоресурсов в процессе переработки нефти.

#### **Методы исследования**

Основой данной статьи по оптимизации работы трубчатых печей в основном является сравнительный анализ литературных источников, статей, книг и учебных пособий, выпущенных в 2000–2023 гг.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Анализ работы специальных теплообменников (трубчатых печей), применяемых при переработке углеводородного сырья, показывает наличие технических противоречий в их конструкции, снижающих эффективность их работы и срок службы [1–3]. По этой причине оптимизация работы трубчатых печей имеет решающее значение для экономической эффективности газоперерабатывающего комплекса. В процессе эксплуатации передовые технические решения, заложенные в процессе проектирования, постепенно теряются из-за морального старения конструкторских решений, физического износа оборудования и эффективности печей, что является одним из основных показателей их качественной работы [4–6].

При этом следует учитывать, что при небольшом износе основных конструктивных элементов печи все же возможно сохранить первоначальный КПД.

Как показывает практика эксплуатации трубчатых печей, зачастую цель производителя направлена в первую очередь на достижение конечного технологического результата, т. е. на нагрев определенного объема сырья до заданной температуры. Часто количество топлива, потребляемого для его нагрева, остается за пределами интересов операторов, поскольку топливо является продуктом их собственной переработки [5].

Однако изменения, которые происходят в процессе эксплуатации трубчатых печей, оказывают

существенное влияние не только на эффективность их работы, но и на эффективность работы установки и всего предприятия в целом. Таким образом, проблема повышения эффективности работающих технологических печей является весьма актуальной [4, 6].

На основании анализа результатов исследований трубчатых печей, работающих на нефтеперерабатывающих заводах, представленных в различных литературных источниках, было установлено, что при длительной эксплуатации происходит значительный износ внутренней теплоизоляции печи [4, 5]. Часто наружная температура печей превышает 60–70 °С. В результате происходит значительный локальный перегрев облицовки аппарата, который достигает температуры потолка от 180 до 200 °С. Все это свидетельствует об износе или нарушении целостности теплоизоляции. Потери тепла в окружающую среду из-за обмуровки достигают 15–25 % при нарушении тепловой изоляции, тогда как при проектировании они должны по расчетам составлять 5–8 %. В результате теплопотери от корпусов печей начинают превышать проектные значения [6, 7].

Горелочные устройства являются неотъемлемой частью трубчатой печи, поскольку с помощью этих устройств организуется процесс нагрева сырья. Конструкция, принцип работы и организация процесса горения в соплах также оказывают влияние на производительность горения трубчатых печей [8, 9]. Было обнаружено, что рабочие характеристики горелочных устройств значительно снижаются по мере увеличения срока службы по сравнению с проектными устройствами. Анализ показывает, что это чаще всего связано с изменением функции заслонок, регулирующих подачу вторичного воздуха, что приводит к снижению способности регулировать подачу вторичного воздуха. В результате происходит значительное всасывание избыточного воздуха, что приводит к снижению эффективности печи. Не менее негативными являются высокие температуры дымовых газов из печей (до 650 °С) при низком качестве горелочных устройств [10, 11].

Если сравнивать с таким показателем для трубчатой печи, как тепловая нагрузка, то по сравнению с другими видами оборудования он не имеет четких ограничений. Например, при интенсификации процесса сгорания за счет увеличения расхода топлива тепловая нагрузка может значительно возрасти, превысив допустимое значение. В результате снижается КПД печи и происходит значительный износ узлов печи (змеевики, опоры змеевиков, обмуровки и т. д.), что, в свою очередь, приводит к сокращению времени промежуточного ремонта.

По результатам исследований различных авторов было установлено, что КПД эксплуатируемых трубчатых печей находится в пределах 50–55 %, т. е. снижается на 20–25 % от проектного уровня.

Превышение температуры уходящих газов влияет на эффективность работы теплообменных труб, выполненных в виде змеевиков. Снижение эффективности их работы от проектного уровня составляет 80–85 %, что свидетельствует о значительном снижении теплоотдачи и снижении средней тепловой нагрузки на поверхность змеевиковых трубок. Все это вызывает необходимость добавлять в топку чрезмерное количество топлива [11–13].

Эксплуатационная надежность и долговечность трубчатых печей влияют на технико-экономические показатели всей установки. В свою очередь, работоспособность печи зависит от состояния ее конструктивных элементов. Одним из основных узлов, влияющих на цикл ремонта трубных печей и, следовательно, оборудования в целом, является змеевик.

Установлено, что в процессе работы устройства происходит эрозионный износ продуктовых змеевиковых теплообменных трубок, как по ходу сырья, так и в месте поворота движения среды, что, очевидно, связано со значительным увеличением скорости сырья в точке интенсивного испарения. Это приводит к быстрому износу отводов с внутренней стороны, уменьшению их толщины и необходимости частой их замены [14].

Змеевики трубчатых печей наиболее подвержены изменению пластичности и прочностных свойств металла в процессе их эксплуатации. На практике встречаются следующие дефекты трубных змеевиков: износ труб (особенно на концах) на внутренней поверхности; хрупкое разрушение труб. Змеевики и опоры труб, обмуровка печи и горелки подвергаются наибольшему износу. Согласно статистическим данным, полученным нефтеперерабатывающими компаниями, в связи с износом в течение года заменяется от 25 до 40 % от общего числа заменяемых труб. При высоких температурах, давлениях и объемных скоростях потоков сырья, а также под действием нагретых дымовых газов, могут развиваться различные коррозионные и эрозионные процессы, которые в совокупности приводят к потере прочности, изменению формы и в конечном итоге к сбросу давления и разрушению [14, 15].

По мнению М. А. Берлина, представленному в работе [15], основной причиной ограничения срока службы трубчатых печей является длительное термическое старение, вызванное высокими температурами, что приводит к изменению их микроструктуры и снижению долговременной прочности металла. Это также способствует нарушению рабочих параметров процесса при эксплуатации оборудования со значительным перегревом труб. В конечном итоге это приводит к перебоям в производстве.

Другой причиной снижения долговечности змеевиков является воздействие технологической среды на металл трубы. Продукты конденсации и частичного коксования углеводородов, а также соли

из недостаточно опресненной нефти, откладываются на внутренних поверхностях труб. В результате образования осадка повышается локальная температура стенки змеевика, снижается теплопередача и, как следствие, ускоряются процессы коксования. Варианты устранения этих недостатков предложены в работе [16].

Аналогичным образом развивается сульфидная коррозия, вызванная химическим взаимодействием металла с серосодержащими компонентами сырья. Образование коррозии приводит к отслаиванию и утонению стенок трубы и дальнейшему локальному перегреву в местах утонения. Водород также влияет на змеевики трубчатых печей, поскольку присутствие водорода приводит к обезуглероживанию сталей – водородной коррозии.

Змеевиковые трубки реакционных печей для проведения процессов пиролиза и парового риформинга работают при температурах, на несколько сотен градусов превышающих рабочую температуру нагревательных печей. Следовательно, для них преобладающими факторами разложения являются высокотемпературная ползучесть и хрупкое разрушение в результате карбонизации металла [16, 17].

Эти факторы значительно снижают надежность трубчатых печей. Поэтому при проектировании предприятия необходимо предъявлять особые требования к используемым материалам, качеству изготовления и сборки, контролю за работой печей и их технической диагностике.

Исследования показывают, что в печах, где продукт нагревается до состояния с высоким содержанием пара, требуется увеличение и изменение расхода по длине трубы. Это приводит к увеличению скорости парожидкостной смеси и, как следствие, к увеличению гидравлического сопротивления. Результатом этих явлений является увеличение перепада давления между входом и выходом, т. е. давление на входе в змеевик увеличивается [1, 4, 5].

Снижение расхода может быть достигнуто за счет увеличения площади поперечного сечения трубы в месте испарения. В своих работах авторы [18–20] полагают, что это может быть достигнуто путем конического перехода между трубами разного диаметра или путем замены последних труб змеевика меньшего диаметра на трубы большего диаметра, что приводит к снижению скорости подачи сырья и исключению явления эрозии, скорость потока на увеличенном участке змеевика должна быть минимальной. Допускается, чтобы скорость осаждения кокса на стенках трубы не увеличивается. Кроме того, необходимо обеспечить плавное повышение температуры продукта, проходящего через змеевик, до заданных значений давления и температуры [19, 21].

Как показывает опыт работы с трубчатыми печами, змеевики работают в сложных условиях, по-

стоянно подвергаясь воздействию высоких температур и внутреннего давления. Основной причиной прогара труб является перегрев металла в местах с отложениями кокса. Высокая температура поверхности трубопровода приводит к термическому разложению прилегающих слоев жидкости с образованием кокса, который оседает на внутренней поверхности трубы. Интенсивность коксования зависит от температурного режима и скорости движения продукта по трубам. Чем выше температура и скорость потока, тем интенсивнее образование кокса и выше вероятность выгорания [22].

Для предотвращения образования кокса на поверхности труб теплообменника и, следовательно, повышения надежности работы печи в источниках [23, 24] предлагаются следующие меры: обеспечение однородности температурных полей, скоростей и интенсивности перемешивания в межтрубном пространстве радиационных камер. Во избежание образования застойных зон предлагается изменить конфигурацию газового канала камеры путем создания секции расширения для подачи газа в зоне горелки и секции сужения в зоне выхода. Что касается змеевиков, то некоторые из их витков, расположенные дальше всего от горелок, более компактны за счет расположения вертикальных ответвлений труб ближе друг к другу.

Наиболее перспективным способом повышения эффективности и надежности, снижения потребления ресурсов и энергоемкости, а также повышения технико-экономических показателей промышленных печей, является интенсификация теплообмена [12]. Решение проблемы интенсификации процесса теплообмена в трубчатых печах направлено на изучение работы как радиационной, так и конвекционной камер. В радиационной камере трубчатых печей, где основная часть тепла передается на нагретый продукт излучением (85–90 %), одним из направлений интенсификации теплообмена является нанесение покрытия с высокой степенью черноты. Искусственное повышение степени почернения открывает большие возможности для интенсификации теплообмена, экономии топлива и повышения эффективности печи [25].

Исследования показывают, что повышение температуры в диапазоне от 600 до 950 °C снижает степень черноты всех огнеупорных материалов до 0,5–0,7. В то же время степень черноты специальных керамических покрытий увеличивается с повышением температуры. Кроме того, покрытие повышает механическую прочность огнеупоров, особенно стойкость к абразивному износу, и увеличивает срок службы огнеупора в 2,5–5 раз [12, 25].

В конвекционной камере основным фактором, определяющим эффективность теплообмена за счет конвекции, является создание турбулентного движения дымовых газов. Поэтому при проектировании трубчатых печей стараются обеспечить макси-

мальную скорость движения дымовых газов. Это достигается путем выбора минимально допустимого расстояния между осями труб, уменьшения их диаметра или способа размещения. В любом случае предлагаемые варианты имеют свои плюсы и минусы. Увеличение скорости дымовых газов в конвекционной камере приводит к увеличению сопротивления потоку газа, уменьшение количества труб в горизонтальном ряду приводит к увеличению высоты конвекционной камеры. Шахматное расположение труб с точки зрения теплообмена более эффективно, чем расположение коридорное, поскольку шахматное расположение труб обеспечивает передачу тепла на 25–35 % выше, чем коридорное, при одинаковой скорости дымовых газов [25].

Использование труб меньшего диаметра также приводит к увеличению интенсивности теплопередачи, поскольку они могут генерировать высокую скорость дымовых газов, но сопротивление движению нагретого тока начинает возрастать. Чтобы избежать увеличения сопротивления при меньших диаметрах труб, а также в печах с высокой производительностью, предлагается, чтобы перемещение сырья осуществлялось двумя или несколькими параллельными потоками [12, 26].

Эффективность теплопередачи может быть улучшена путем оребрения внешней поверхности конвекционных труб, поскольку передача тепла по трубам в конвекционной камере в основном ограничивается теплообменом дымовых газов, и поэтому при оребрении площадь контакта дымовых газов с трубами увеличивается, что обеспечивает большую теплопередачу. Варианты интенсификации теплообмена за счет оребрения или ошпиковки поверхности теплообменных труб представлены в работах [26, 27]. Однако в процессе длительной эксплуатации трубчатой печи могут возникнуть проблемы накопления различных отложений (механические, куски разрушившейся футеровки дымохода) на поверхности труб в конвекционной камере. Результаты обследования трубчатых печей, представленных в [28], показывают, что целесообразно при ошпиковке или оребрении труб располагать их вертикально, поскольку в этом случае не нарушится симметричность движения потоков дымовых газов и исключится опасность перегрева и прогара труб конвекционных змеевиков.

Эффективность трубчатых печей значительно снижается, поскольку некоторые элементы конструкции печей морально устарели или срок их службы чрезвычайно истек [28, 29]. Эти элементы включают облицовку из жаропрочного бетона и горелочные устройства. Современные трубчатые печи оснащены футеровкой из легкоснимаемых термостойких материалов, которые обладают низкой плотностью и высоким тепловым сопротивлением. Замена футеровки печи на более эффективную позволяет значительно экономить топливо [30].

### Заключение

Анализируя результаты, полученные на основе литературных данных, можно предположить, что проблемы с трубчатыми печами, которые эксплуатировались около 20 лет, аналогичны.

На основании анализа результатов исследований различных авторов было установлено, что для повышения производительности трубчатых печей необходимо принять следующие меры:

1) для улучшения теплоотдачи поверхности змеевиков необходимо регулярно производить очистку от отложений;

2) для устранения притока избыточного воздуха регулярно проверять рабочее состояние заслонок

вторичного воздуха на форсунках и герметичность корпуса печи;

3) принять меры по восстановлению облицовки и теплоизоляции в местах износа;

4) восстановить полную работу системы рекуперации тепла дымовых газов.

Реализация предложенных мер позволит оптимизировать работу печного блока и повысить его общий КПД до проектного уровня.

Предложения по оптимизации их работы могут способствовать повышению эффективности печей и установок в целом, обеспечению эффективной работы, энергосбережению и улучшению экологических показателей нефтеперерабатывающих заводов.

### Список источников

1. Теляков Э. Ш., Закиров М. А., Вилохин С. А. Технологические печи химических, нефтехимических и нефтегазоперерабатывающих производств: учеб. пособие. Казань: КГТУ, 2008. 108 с.
2. Скобло А. И., Молоканов Ю. К., Владимиров А. И., Щелкунов В. А. Процессы и аппараты нефтепереработки и нефтехимии: учеб. для вузов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2010. 677 с.
3. Трубочатые печи: кат. / сост.: В. Е. Бакшалов, В. Ф. Дребенцов, Т. Г. Калинина, Н. И. Сметанкина, Е. И. Ширман. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 2005. 34 с.
4. Жидков А. Б. Проблемы и перспективы развития трубчатых печей для нефтеперерабатывающей промышленности // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2001. № 12. С. 13–14.
5. Жидков А. Б., Герасимов Д. П., Денисов Д. Е. и др. Трубочатые нагревательные печи нефтепереработки и нефтехимии. СПб.: АртПроект, 2015. 102 с.
6. Ляшенок С. Ю., Дьячкова С. Г. Обзор конструктивных особенностей трубчатых печей // Вест. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 1. С. 213–219.
7. Кашеев И. Д., Никифоров Е. А. Эффективная теплоизоляция печных агрегатов // Строит. материалы. 2006. № 9. С. 70–72.
8. Жидков А. Б., Чистяков К. В. Современные тенденции развития горелочных устройств // Хим. техника. 2014. № 12. С. 27–33.
9. Садилов А. И., Лосев А. А., Селезнева А. А., Чепрасов О. А. Анализ характерных дефектов печей нагрева нефти по результатам технического диагностирования // Молодой ученый. 2015. № 22 (102). С. 181–182.
10. Шарихин В. В., Мухина Т. Н., Печников А. С. Повышение эффективности топливных систем трубчатых печей // Нефтепереработка и нефтехимия. Науч.-техн. достижения и передовой опыт. 2002. № 4. С. 15.
11. Шарихин В. В., Печников А. С., Степанчук В. В., Шарихин А. В. Модернизация трубчатых печей в нефтяной и нефтехимической промышленности // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки. 2004. № 28. С. 185.
12. Данилов О. Л., Горяев А. Б., Яковлев И. В. и др. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учеб. для вузов / под ред.: А. В. Клименко. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 220 с.
13. Гнедой Н. В., Маляренко Е. Е. Энергоэффективность и определение потенциала энергосбережения в нефтепереработке. Киев: Наукова думка, 2008. 182 с.
14. Халиков Р. А., Хазиахметов М. Ф., Оськин Ю. В. Дефекты трубчатых змеевиков печей нефтеперерабатывающих установок // Хим. техника. 2015. № 9. С. 175–178.
15. Берлин М. А. Износ основных элементов трубчатых печей. М.: Недра, 1964. 101 с.
16. Жидков А. Б., Логинов И. А., Козлов П. В. Методы очистки наружной поверхности змеевиков трубчатых печей // Хим. техника. 2012. № 12. С. 32–34.
17. Катин В. Д., Булгаков С. В. Экологические и теплотехнические испытания и исследования котельно-печного парка нефтеперерабатывающих заводов: моногр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. 234 с.
18. Ахметшин Э. Ф., Баязитов М. И. Трубный экран змеевика печи // Аллея науки. Сер.: Современная наука и ее развитие. 2017. № 9. С. 269–280.
19. Иваненко А. Ю., Яблокова М. А., Пономаренко Е. А., Грабская Н. В. Рекомендации по модернизации многокамерной трубчатой печи с целью ликвидации зон перегрева и коксообразования // Современ. наукоем. технологии. 2020. № 3. С. 49–53.
20. Каданцев М. Н., Баязитов М. И., Филиппова А. Г., Баязитов Р. М. Алгоритм оптимизации конструкции змеевиков трубчатых печей при совместном решении задач гидродинамики двухфазного потока и прочности // Нефтегаз. дело. 2014. № 5. С. 276–293.
21. Ахметов С. А., Сериков Т. П., Кузеев И. Р., Баязитов М. И. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учеб. пособие. СПб.: Недра, 2006. 868 с.
22. 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 // Нефтегаз. дело. 2018. № 1. С. 120–144.
23. Павлова И. В., Хабибрахманов А. Ф., Половняк В. К. Процессы коксообразования на поверхности некоторых материалов // Вестн. Казан. технолог. ун-та. 2008. № 3. С. 19–22.
24. Андреева М. М. Коксообразование при пиролизе углеводородного сырья // Вестн. Казан. технолог. ун-та. 2014. Т. 17. № 2. С. 279–280.
25. Гизатуллин И. Ф. Повышение энергоэффективности работы трубчатых печей с применением высокоизлучающих керамических покрытий // Хим. техника. 2014. № 11. С. 18.

26. Иванова Ю. А., Кожухова Н. Ю. Интенсификация теплообмена в конвекционной камере трубчатой печи // Решетников. чтения. 2017. Т. 2. С. 137–138.

27. Атанов Е. А. Исследование теплообмена в ошпированных поверхностях печи подогрева товарной нефти // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (Кемерово, 13–15 дек. 2017 г.). Кемерово: Изд-во Кузбас. гос. техн. ун-та им. Т. Ф. Горбачева, 2017. С. 104.

28. Бадьин Ю. А., Вершинин О. В. Предотвращение

повышенного изнашивания змеевиков трубчатых печей // Хим. техника. 2022. № 5. С. 68–79.

29. Бедеров Л. Г., Ладыгин К. В., Стомпель С. И., Коденко Б. Н., Парфеня Н. В. Трубчатые печи. Энергоэффективность на службе экологии // Neftegaz.RU. 2017. № 4. С. 116–118.

30. Буканин А. В., Клюкин Д. А. Повышение эффективности и экологии работы технологических печей предприятий нефте- и газохимии России // Хим. техника. 2020. № 10. С. 58–61.

## References

1. Teliakov E. Sh., Zakirov M. A., Vilokhin S. A. *Tekhnologicheskie pechi khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftegazopererabatyvaiushchikh proizvodstv: ucheb. posobie* [Technological furnaces of chemical, petrochemical and oil and gas processing industries: textbook]. Kazan', KGTU, 2008. 108 p.

2. Skoblo A. I., Molokanov Iu. K., Vladimirov A. I., Shchelkunov V. A. *Protsessy i apparaty neftepererabotki i neftekhimii: ucheb. dlia vuzov* [Processes and apparatuses of oil refining and petrochemistry: textbook for universities]. Moscow, Nedra-Biznestsentr Publ., 2010. 677 p.

3. *Trubchatye pechi*: katalog [Tube furnaces: categories] / sostaviteli: V. E. Bakshalov, V. F. Drebenstov, T. G. Kalinina, N. I. Smetankina, E. I. Shirman. Moscow, TsINTIkh-imneftemash Publ., 2005. 34 p.

4. Zhidkov A. B. Problemy i perspektivy razvitiia trubchatykh pechei dlia neftepererabatyvaiushchei promyshlennosti [Problems and prospects for development of tubular furnaces for oil refining industry]. *Khimiia i neftegazovoe mashinostroenie*, 2001, no. 12, pp. 13-14.

5. Zhidkov A. B., Gerasimov D. P., Denisov D. E. i dr. *Trubchatye nagrevatel'nye pechi neftepererabotki i neftekhimii* [Tubular heating furnaces for oil refining and petrochemistry]. Saint-Petersburg, ArtProekt Publ., 2015. 102 p.

6. Liashonok S. Iu., D'iachkova S. G. Obzor konstruktivnykh osobennosti trubchatykh pechei [Review of design features of tube furnaces]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1, pp. 213-219.

7. Kashcheev I. D., Nikiforov E. A. Effektivnaia teploizoliatsiia pechnykh agregatov [Efficient thermal insulation of furnace units]. *Stroitel'nye materialy*, 2006, no. 9, pp. 70-72.

8. Zhidkov A. B., Chistiakov K. V. Sovremennye tendentsii razvitiia gorelochnykh ustroystv [Modern trends in development of burner devices]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2014, no. 12, pp. 27-33.

9. Sadilov A. I., Losev A. A., Selezneva A. A., Cheprasov O. A. Analiz kharakternykh defektov pechei nagreva nefti po rezul'tatam tekhnicheskogo diagnostirovaniia [Analysis of characteristic defects in oil heating furnaces based on results of technical diagnostics]. *Molodoi uchenyi*, 2015, no. 22(102), pp. 181-182.

10. Sharikhin V. V., Mukhina T. N., Pechnikov A. S. Povyshenie effektivnosti toplivnykh sistem trubchatykh pechei [Improving efficiency of fuel systems of tubular furnaces]. *Neftepererabotka i neftekhimiia. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniia i peredovoi opyt*, 2002, no. 4, pp. 15.

11. Sharikhin V. V., Pechnikov A. S., Stepanchuk V. V., Sharikhin A. V. Modernizatsiia trubchatykh pechei v neftianoi i neftekhimicheskoi promyshlennosti [Modernization

of tube furnaces in oil and petrochemical industry]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriia: Tekhnicheskie nauki*, 2004, no. 28, pp. 185.

12. Danilov O. L., Gariaev A. B., Iakovlev I. V. i dr. *Energosberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiakh: ucheb. dlia vuzov* [Energy saving in heat power engineering and heat technologies: textbook for universities]. Moscow, MEI Publ., 2010. 220 p.

13. Gnedei N. V., Maliarenko E. E. *Energoeffektivnost' i opredelenie potentsiala energosberezheniia v neftepererabotke* [Energy efficiency and determination of energy saving potential in oil refining]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2008. 182 p.

14. Khalikov R. A., Khaziakhmetov M. F., Os'kin Iu. V. Defekty trubchatykh zmeevikov pechei neftepererabatyvaiushchikh ustanovok [Defects in tubular coils of oil refinery furnaces]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2015, no. 9, pp. 175-178.

15. Berlin M. A. *Iznos osnovnykh elementov trubchatykh pechei* [Wear of main elements of tubular furnaces]. Moscow, Nedra Publ., 1964. 101 p.

16. Zhidkov A. B., Loginov I. A., Kozlov P. V. Metody ochestki naruzhnoi poverkhnosti zmeevikov trubchatykh pechei [Methods of cleaning outer surface of tube furnace coils]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2012, no. 12, pp. 32-34.

17. Katin V. D., Bulgakov S. V. *Ekologicheskie i teplotekhnicheskie ispytaniia i issledovaniia kotel'no-pechnogo parka neftepererabatyvaiushchikh zavodov: monogr.* [Ecological and thermal testing and research of boiler and furnace park of oil refineries: monograph]. Khabarovsk, Izd-vo Tikhookanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2020. 234 p.

18. Akhmetshin E. F., Baiazitov M. I. Trubnyi ekran zmeevika pechi [Pipe screen of furnace coil]. *Alleia nauki. Seriia: Sovremennaia nauka i ee razvitie*, 2017, no. 9, pp. 269-280.

19. Ivanenko A. Iu., Iablokova M. A., Ponomarenko E. A., Grabskaia N. V. Rekomendatsii po modernizatsii mnogokamernoi trubchatoi pechi s tsel'iu likvidatsii zon peregreva i koksoobrazovaniia [Recommendations for modernization of multi-chamber tubular furnace to eliminate overheating and coke formation zones]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2020, no. 3, pp. 49-53.

20. Kadantsev M. N., Baiazitov M. I., Filippova A. G., Baiazitov R. M. Algoritm optimizatsii konstruktssii zmeevikov trubchatykh pechei pri sovместnom reshenii zadach gidrodinamiki dvukhfaznogo potoka i prochnosti [Algorithm for optimizing design of tube furnace coils in joint solution of two-phase flow and strength hydrodynamic problems]. *Neftegazovoe delo*, 2014, no. 5, pp. 276-293.

21. Akhmetov C. A., Serikov T. P., Kuzeev I. R., Baiazitov M. I. *Tekhnologiia i oborudovanie protsessov pere-*

*rabotki nefii i gaza* [Technology and equipment for oil and gas processing processes: textbook]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2006. 868 p.

22. Bashirov M. G., Pavlova Z. Kh., Zakirnichnaia M. M., Khafizov A. M. Sovershenstvovanie sistem avtomaticheskogo upravleniia i protivoovariinoi zashchity trubchatykh pechei na osnove monitoringa parametrov protsessa koksoobrazovaniia [Improvement of automatic control systems and emergency protection of tube furnaces based on monitoring of parameters of coking process]. *Neftegazovoe delo*, 2018, no. 1, pp. 120-144.

23. Pavlova I. V., Khabibrakhmanov A. F., Polovniak V. K. Protsessy koksoobrazovaniia na poverkhnosti nekotorykh materialov [Processes of coke formation on surface of some materials]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2008, no. 3, pp. 19-22.

24. Andreeva M. M. Koksoobrazovanie pri pirolize ugledovodorodnogo syr'ia [Coke formation during the pyrolysis of hydrocarbon raw materials]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 279-280.

25. Gizatullin I. F. Povyshenie energoeffektivnosti raboty trubchatykh pechei s primeneniem vysokoizluchaiushchikh keramicheskikh pokrytii [Increasing energy efficiency of tube furnaces using highly radiant ceramic coatings]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2014, no. 11, pp. 18.

26. Ivanova Iu. A., Kozhukhova N. Iu. Intensifikatsiia teploobmena v konveksionnoi kamere trubchatoi pechi [Intensification of heat transfer in convection chamber of tubular furnace]. *Reshetnekovskie chteniia*, 2017, vol. 2, pp. 137-138.

27. Atanov E. A. Issledovanie teploobmena v oshipovannykh poverkhnostiakh pechi podogreva tovarnoi nefii [Investigation of heat transfer in studded surfaces of commercial oil heating furnace]. *Energetika i energosberezhenie: teoriia i praktika: materialy III Vseros. nauch.-prakt. konf. (Kemerovo, 13–15 dekabria 2017 goda)*. Kemerovo, Izd-vo Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni T. F. Gorbacheva, 2017, pp. 104.

28. Bad'in Iu. A., Vershinin O. V. Predotvrashchenie povyshennogo iznashivaniia zmeevikov trubchatykh pechei [Prevention of increased wear of tube furnace coils]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2022, no. 5, pp. 68-79.

29. Bederov L. G., Ladygin K. V., Stoppel' S. I., Kodenko B. N., Parfenia N. V. Trubchatye pechi. Energoeffektivnost' na sluzhbe ekologii [Tube furnaces. Energy efficiency in service of environment]. *Neftegaz.RU*, 2017, no. 4, pp. 116-118.

30. Bukanin A. V., Kliukin D. A. Povyshenie effektivnosti i ekologii raboty tekhnologicheskikh pechei predpriatii nefte- i gazokhimii Rossii [Improving efficiency and ecology of operation of technological furnaces of oil and gas chemistry enterprises in Russia]. *Khimicheskaiia tekhnika*, 2020, no. 10, pp. 58-61.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023; одобрена после рецензирования 25.08.2023; принята к публикации 06.09.2023  
The article is submitted 17.07.2023; approved after reviewing 25.08.2023; accepted for publication 06.09.2023

### Информация об авторах / Information about the authors

**Вера Николаевна Лысова** – кандидат технических наук; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; vnl55@yandex.ru

**Vera N. Lysova** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; vnl55@yandex.ru

**Ришад Абдулхакимович Хайбулов** – кандидат технических наук; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; vnl55@yandex.ru

**Rishad A. Khaibulov** – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; vnl55@yandex.ru

