

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Исследование посвящено проблемам загрязнения теплообменного оборудования процессов гидроочистки дизельных топлив и диагностирования теплообменников. Цель работы — определение критических параметров эксплуатации теплообменников. Согласно результатам расчетов на математической модели типовой установки гидроочистки с использованием программы диагностирования в режиме реального времени, основанной на контроле режимных параметров, критерий оценки состояния теплообменника реакторного блока при увеличении коэффициента загрязнения межтрубного пространства увеличивается с 1 до 1,37. При этом происходит снижение температуры сырья на выходе из аппарата и увеличение затрат на дополнительно потребляемое топливо печами в размере более 1 млн руб./мес. Диагностирование теплообменных аппаратов в режиме реального времени позволяет оптимизировать эксплуатационные затраты, в том числе подобрать оптимальный срок чистки трубных пучков с точки зрения сопоставимости затрат на дополнительно потребляемое топливо и на чистку.

**Ключевые слова:** контроль состояния, критерий оценки состояния, мониторинг в реальном времени, теплообменное оборудование, гидроочистка дизельных топлив.

Длительные наблюдения за состоянием теплообменного оборудования процесса гидроочистки дизельных топлив (ДТ) привели к осознанию необходимости определения причин появления отложений на поверхностях теплообмена, приводящих к повышенному потреблению энергоресурсов [1, 2]. Было выявлено, что основное влияние на энергопотребление установкой гидроочистки ДТ оказывали именно теплообменники реакторного блока. В работе рассмотрены методики определения состава отложений [3], применены формулы для расчёта их толщины [4], а также изучены возможности применения существующих методик для диагностирования теплообменного оборудования процесса гидроочистки ДТ [5].

В работах [6, 7] основная роль в методиках диагностирования отложений на поверхностях теплообмена отводится солям жесткости, характерных только для холодильного оборудования, использующего воду в качестве теплоносителя. Соли жесткости обладают известными термодинамическими характеристиками, в связи с этим данная методика имеет ограниченное применение.

В исследованиях [8] приводятся расчётные формулы по определению толщины отложений рекуперативных теплообменников процессов атмосферно-вакуумной трубчатки. Данная методика также имеет ограниченное применение в связи с тем, что отложения имеют форму парафинов, которые

в значительной степени характеризуются термодинамическими свойствами самого потока.

Рассмотренные принципы построения систем комплексного мониторинга состояния технологических объектов опасных производств [9] показали, что обеспечение ресурсосберегающей безопасной эксплуатации оборудования предприятий нефтеперерабатывающего комплекса основывается на обеспечении мониторинга состояния в реальном времени. Целью мониторинга является наблюдение за техническим состоянием входящих в него технологических объектов мониторинга, с целью определения текущего технического состояния и предсказания момента их перехода в предельное состояние. Результат мониторинга представляет собой совокупность диагнозов технологических объектов, составляющих производственный комплекс, получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние объектов существенно не изменяется [9, 10].

Требования к системам мониторинга оборудования опасных производственных объектов изложены в действующих Государственных стандартах Российской Федерации и нормативных документах профессиональных общественных организаций [10].

Как развитие работ в направлении диагностирования состояния и оценки остаточного ресурса

эксплуатации теплообменного оборудования [11] следует считать исследования процесса гидроочистки [12]. Следует отметить, что для реакторного блока процесса гидроочистки характерно постоянство расходов потоков при стационарном режиме работы установки. Именно этот факт являлся базой для разработки методики, основанной на сравнении разниц температур на входах-выходах теплообменника. И поскольку измерение температур является наиболее распространённым и наименее затратным параметром для технологического процесса, то для диагностирования рабочих поверхностей теплообменных аппаратов в первую очередь были рассмотрены возможности применения измерений температур.

Задача исследования заключается в разработке технологии оценки состояния теплообменного оборудования, участвующего в технологических процессах нефтеперерабатывающих производств, в частности, на установках гидроочистки ДТ, основанной на измерении режимных параметров и определяющей оптимальные сроки чистки теплообменников с точки зрения экономической эффективности.

В настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах нет достоверной методики определения потребности проведения чистки теплообменного оборудования. Это приводит к неоправданному росту эксплуатационных затрат в связи с несвоевременным техническим обслуживанием [13]. Эти затраты могут быть вызваны как излишним потреблением топлива на печах, так и дополнительными затратами на ремонт теплообменников.

Определение критических параметров загрязнения теплообменного оборудования реакторного блока процесса гидроочистки велось по трем направлениям. Во-первых, на основе разработанной математической модели определялись коэффициенты теплопередачи и их влияние на теплообменные процессы, протекающие в технологическом оборудовании [14]. Во-вторых, выполнено сравнение потребления энергоресурсов в виде топливного газа при «грязных» и «чистых» поверхностях теплообмена. В-третьих, с использованием нормативных документов по эксплуатации оборудования определено возможное отклонение тепловой нагрузки на теплообменный аппарат от первоначального состояния.

Согласно методике [13], предложенной фирмой «Альфа Лаваль» для пластинчатых теплообменников, контроль состояния целесообразно осуществлять следующим образом:

1. Коэффициент теплопередачи ( $K$ , Вт·°С /м<sup>2</sup>) аппарата при номинальной нагрузке определяется по формуле (1):

$$K = \frac{Q}{F} \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1)$$

где  $F$  — поверхность теплообмена, определяемая из паспортных данных аппарата, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{cp}$  — среднелогарифмический температурный напор, °С;  $Q$  — тепловая нагрузка аппарата, вычисленная по тепловому балансу, Вт.

Среднелогарифмический температурный напор ( $\Delta t_{cp}$ , °С) вычисляется по формуле (2):

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \left( \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} \right)}, \quad (2)$$

где  $\Delta t_6 = t'_1 - t''_2$  и  $\Delta t_m = t''_1 - t'_2$  — большее и меньшее значения разности температур.

Температуры входа и выхода первичного контура  $t'_1$  и  $t''_1$  и температура входа и выхода вторичного контура  $t'_2$  и  $t''_2$  измеряются стандартными штатными термомпарами, установленными на теплообменных аппаратах.

Тепловая нагрузка ( $Q$ , Вт) рассчитывается по формуле (3):

$$Q = G_1 \cdot C_p \cdot (t'_1 - t''_1) = G_2 \cdot C_p \cdot (t''_2 - t'_2), \quad (3)$$

где  $G_1, G_2$  — расход потока по межтрубному и трубному пространству теплообменного аппарата, кг/с;  $C_p$  — теплоёмкость продукта, кДж/кг·°С, определяется по средней температуре продукта в теплообменном аппарате.

2. Коэффициент теплопередачи определённый из условий эксплуатации ( $K_{\text{опытный}}$ ) сравнивают с расчетным коэффициентом теплопередачи ( $K_{\text{расчётный}}$ ), полученным из паспортных данных теплообменного аппарата.

3. Если расхождение опытного и расчётного значений коэффициентов теплопередачи составляет более 33–35 %, следует произвести чистку теплообменного аппарата.

Трудность применения данной методики заключается в том, что необходимо проводить сложные математические расчеты по определению коэффициента теплопередачи, для чего не всегда имеются все необходимые исходные данные.

В соответствии с нормативной документацией [15] теплообменный аппарат отбраковывается при неисправности более 30 % трубного пучка, следовательно, тепловая нагрузка также снизится на 30 %, как и в вышеуказанном примере расчета. Это явилось основанием для установления критических параметров диагностирования в качестве предварительной оценки.

Для определения диагностических признаков теплообменного оборудования в течение длительного времени был выполнен мониторинг технологических параметров работы установок гидроочистки ДТ. В период ремонта установок при разборке теплообменников определены состояния поверхностей и проведен анализ полученной информации. Исходя из условий роста загрязненности теплообменной поверхности аппаратов, с помощью компьютерной модели, определены коэффициенты теплопередачи.

В результате исследований выявлено, что только по результатам мониторинга температур потоков на входах и выходах теплообменных аппаратов процесса гидроочистки ДТ нет возможности проводить оценку загрязненности теплопередающей поверхности. Для оценки роста отложений на теплопередающей поверхности необходимо выполнять дополнительные расчеты, в связи с этим поиски диагностических признаков были продолжены.

Основное уравнение теплопередачи определяется по формуле (4):

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (4)$$

где  $K$  — коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С, определяется по формуле (5);

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (5)$$

где  $\delta_{cm}$  — толщина стенки, м;  $\lambda_{cm}$  — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·°С);  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты теплоотдачи соответственно, от горячего теплоносителя к разделяющей стенке и от стенки к холодному теплоносителю, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

При увеличении толщины отложений наблюдается уменьшение коэффициента теплопередачи и, как следствие, рост температурного напора и разности температур на холодной и горячей сторонах теплообменника. Аналогичная картина наблюдается при уменьшении площади теплообмена в результате исключения из процесса теплообмена части трубок, т.е. разность температур на сторонах теплообменника также увеличивается по сравнению с первоначальной величиной.

Для определения состояния теплообменного оборудования разработана программа диагностирования [16]. Эффективность работы теплообменника можно оценить как разницу между входящей и выходящей температурами потоков на холодной и горячей сторонах. Изменение эффективности работы теплообменника во времени определяется как соотношение разниц температур в текущий момент и за прошедший период.

Типовая установка гидроочистки ДТ (рис. 1) предназначена для удаления органических сернистых, азотистых и кислородсодержащих соединений путем их деструктивной гидрогенизации. Опыт эксплуатации установок гидроочистки ДТ показал, что основные проблемы с отложениями возникают на теплообменниках реакторного блока. В отличие от лабораторных экспериментов, которые проводятся с применением активных воздействий на объект, в данном исследовании использована промышленная установка гидроочистки ДТ, в связи с чем эксперимент проводится пассивно путем наблюдений.

Теплообменные аппараты поз. Т-3/1 и Т-3/2, установленные до смешения сырья с водородсодержащим газом (ВСГ), имеют арматуру, позволяющую отключать их в любой момент времени, что не противоречит правилам взрывопожаробезопасности. За время своей работы начиная с 2015 года данные теплообменники не подвергались чистке, в результате чего их эффективность заметно снизилась.

В системе PI ProcessBook (PI PB) имеется программа контроля состояния сырьевых теплообменников реакторного блока типовой установки гидроочистки ДТ Л-24/9 в режиме реального времени, работающая на сравнении разности температур на горячей стороне аппарата в текущий момент времени и в момент, когда теплопередающая поверхность была чистой. Однако из-за отсутствия отдельных датчиков измерения температуры применение этой программы не представляется возможным. В связи с этим была использована имитационная модель типовой установки гидроочистки ДТ Л-24/9 в программном продукте Aspen HYSYS. Отличие математической модели от программы контроля состояния в PI PB состоит в том, что рассматриваются не средние значения температур за длительный период, а мгновенные при чистых и грязных теплопередающих поверхностях:

$$D = \frac{\Delta T'_g}{\Delta T_g}, \quad (6)$$

где  $\Delta T'_g$  — разность температур на горячей стороне теплообменника при загрязненной поверхности теплообмена (в текущий момент времени), °С;  $\Delta T_g$  — разность температур на горячей стороне теплообменника при чистой поверхности теплообмена, °С.

Следующим этапом было формирование расчетных исследований, целью которых является выявление зависимостей различных параметров от изменения коэффициентов загрязнения теплообменников поз. Т-3/1 и Т-3/2. При этом все остальные параметры в модели оставались без изменения.

В соответствии с результатами проведенных исследований на математической модели типовой установки гидроочистки ДТ Л-24/9 критерий оценки состояния теплообменника поз. Т-3/1 при увеличении коэффициента загрязнения межтрубного пространства с 0,00003 до 0,00150 (°С·ч·м<sup>2</sup>)/кДж увеличивается с 1 до 1,37. При этом коэффициент загрязнения по трубному пространству оставался неизменным и равным 0,00003 (°С·ч·м<sup>2</sup>)/кДж, что соответствует состоянию чистой поверхности теплообмена. В соответствии с расчетами, проведенными

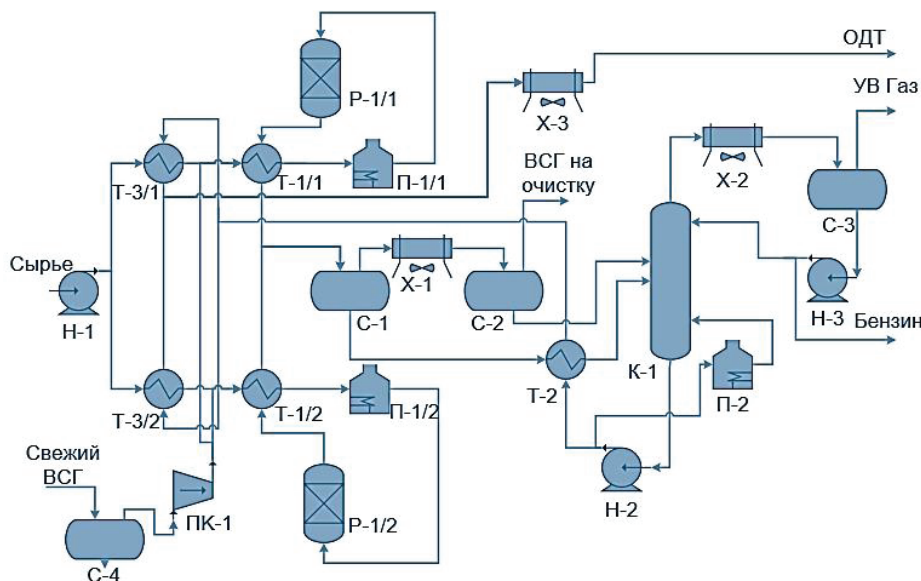


Рис. 1. Технологическая схема реакторного блока типовой установки гидроочистки ДТ

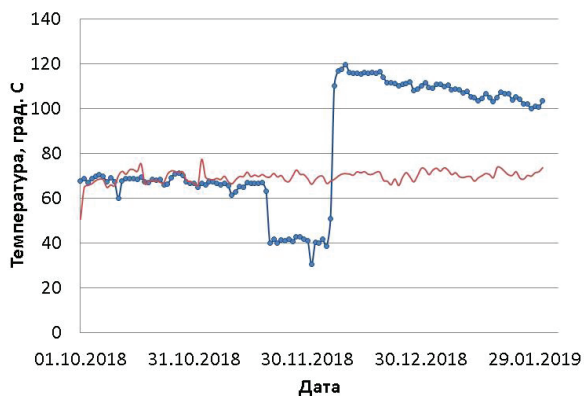


Рис. 2. Изменение температуры ВСГ и сырья перед теплообменниками поз. Т 1/1: — температура сырья после теплообменников поз. Т 3/1 и Т 3/2 (смесевая), °С; — температура ВСГ после компрессора, °С

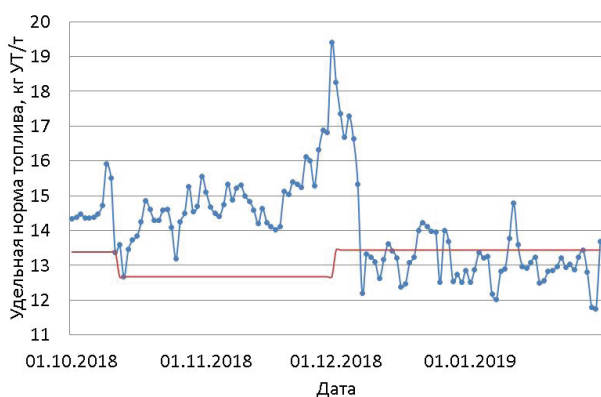


Рис. 3. Удельная норма потребления условного топлива на установке Л 24/9:

— удельная норма фактическая, кг УТ/т;  
— удельная норма плановая, кг УТ/т

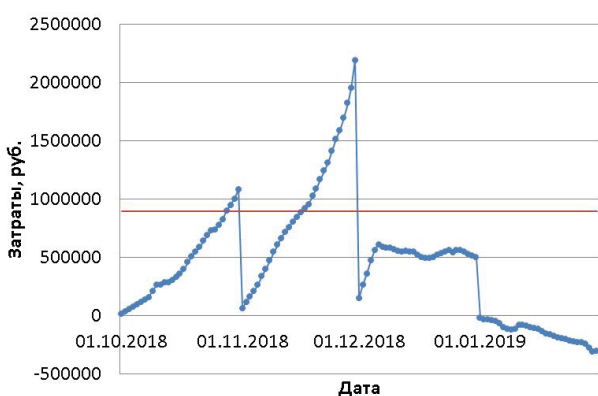


Рис. 4. Сопоставление затрат на ремонт с чисткой и эксплуатацией грязных теплообменников:

— суммарные затраты на дополнительное топливо, руб.;  
— затраты на ремонт и чистку теплообменников поз. Т 3/1 и Т 3/2

на математической модели, значение критерия оценки состояния теплообменников поз. Т-3/1 и Т-3/2 в ноябре 2018 превысили 1,3, при этом затраты на дополнительно потребляемое топливо печами поз. П-1 и П-2 составили более 1 млн руб./мес.

Температура сырья на выходе из аппаратов поз. Т-3/1 и Т-3/2, работающих параллельно, имела тен-

денцию постоянного снижения и коррелировала с температурой ВСГ, что говорит об адекватности данных значений (рис. 2). При выполнении ремонтных работ, связанных с чисткой трубных пучков теплообменников поз. Т-3/1 и Т-3/2, температура на входе в аппарат поз. Т-1/1 была минимальной и соответствовала параметрам сырья на входе на установку. После чистки теплообменников поз. Т-3/1 и Т-3/2 температура возросла до максимальных значений в 118 °С.

За счёт роста температуры газосырьевой смеси на входе в теплообменник поз. Т-1/1 поднялась и температура потока газопродуктовой смеси перед горячим сепаратором, что оказало влияние на температурный режим блока стабилизации, а также на потребление топлива печью поз. П-2. Характер изменения температур на входе в колонну поз. К-1 полностью соответствует тепловому балансу, т.е. при повышении температуры гидрогенизата количество вносимого тепла в колонну увеличивается, что приводит к снижению нагрузки на печь. Изменение температурных параметров потоков на входе в печи реакторного блока и колонну стабилизации привело к снижению удельной нормы потребления условного топлива (рис. 3).

На основании проведенных исследований на математической модели определены оптимальные сроки чистки теплообменного оборудования типовой установки гидроочистки ДТ Л-24/9, основывающиеся на сравнении затрат на потребление дополнительного топлива и на чистку трубных пучков аппаратов.

Суммарные затраты на чистку теплообменного оборудования поз. Т-3/1 и Т-3/2 ( $Z_{\text{общ}}$ , руб.) определяются по формуле (7) и составили 900 тыс руб.:

$$Z_{\text{общ}} = Z_p + Z_m + Z_q, \quad (7)$$

где  $Z_p$  — затраты на разборку и сборку теплообменного аппарата, руб.;  $Z_m$  — затраты на транспортировку трубного пучка к месту чистки и обратно, руб.;  $Z_q$  — затраты непосредственно на чистку трубного пучка, руб.

В обозреваемый период времени суммарные затраты на чистку теплообменного оборудования поз. Т-3/1 и Т-3/2 принимаются как постоянная величина, определяющаяся конструктивными параметрами аппаратов и расстоянием до ремонтного участка.

Расход дополнительного топлива, сжигаемого на печах поз. П-1 и П-2, значительно превышал установленные нормы потребления до чистки теплообменного оборудования (рис. 3). Затраты на потребление дополнительного топлива определялись разницей между расчетными значениями в текущий момент времени и при начале эксплуатации теплообменного аппарата. Значения нагрузок на печи поз. П-1 и П-2 при чистых и грязных теплопередающих поверхностях аппаратов рассчитаны с помощью математической модели (рис. 4).

В октябре 2018 года средний перерасход условного топлива составил 5,86 %, в ноябре он увеличился до 12,22 % за счет полного отключения теплообменников поз. Т-3/1 и Т-3/2.

После чистки трубных пучков теплообменных аппаратов средняя экономия топлива составила 0,38 % в месяц.

Выполненный расчет стоимости дополнительно потребляемого топлива печами поз. П-1 и П-2 типовой установки гидроочистки ДТ Л-24/9 показал, что работы по чистке трубных пучков теплообменных

аппаратов поз. Т-3/1 и Т-3/2 полностью окупаются в течение месяца.

Осмотр трубных пучков теплообменных аппаратов поз. Т-3/1 и Т-3/2 показал наличие значительных отложений в виде коксообразований по всей длине труб по межтрубному пространству.

Таким образом, при достижении значения критерия оценки состояния теплообменника, равного 1,3, затраты на дополнительно потребляемое топливо в месяц превышают затраты на чистку трубного пучка. Следовательно, при достижении значения критерия оценки состояния теплообменника, равного 1,3, необходимо планировать чистку трубного пучка, если имеется отключающая арматура. В случае отсутствия запорной арматуры на теплообменном аппарате чистку необходимо планировать в ближайший капитальный ремонт установки.

Для мониторинга состояния теплообменной поверхности на предмет загрязнения и определения оптимального периода чистки трубных пучков от отложений необходимо оснастить аппараты датчиками измерения температуры всех входящих и выходящих потоков. По данным измерительных приборов настраивается алгоритм расчета критерия оценки состояния, основанный на сравнении разностей температур потоков на горячей стороне теплообменника в текущий момент времени и в момент, когда поверхность теплообмена была чистой. Применение программы мониторинга теплообменных аппаратов в режиме реального времени позволяет подбирать оптимальный срок чистки трубных пучков с точки зрения сопоставимости затрат на дополнительно потребляемое топливо и на чистку.

#### Библиографический список

1. Демин А. М., Демин М. А., Сорокин В. Н., Кабаков А. Н., Корнеев С. В. Повышение эффективности работы теплообменников компрессорного и технологического оборудования // Вестник СибАДИ. 2012. № 3 (25). С. 18–21.
2. Ünverdi M., Küçük H., Yılmaz M. S. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a mini-channel shell and tube heat exchanger // Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 55, Issue 5. P. 1271–1286. DOI: 10.1007/s00231-018-2514-0.
3. Awad M. M. Fouling of heat transfer surfaces // Heat Transfer – Theoretical Analysis, Experimental Investigation and Industrial Systems. 2011. P. 506–544. DOI: 10.5772/13696.
4. Nakao A., Valdman A., Costa A. L. H. [et. al.]. Incorporating Fouling Modeling into Shell-and-Tube Heat Exchangers Design // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2017. Vol. 56, Issue 15. P. 4377–4385. DOI: 10.1021/acs.iecr.6b03564.
5. Rifert V., Sereda V., Solomakha A. Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of theoretical research // Heat and Mass Transfer. 2019. P. 1–11. DOI: 10.1007/S00231-019-02636-8.
6. Lemos J. C., Costa A. L. H., Bagajewicz M. J. Linear method for the design of shell and tube heat exchangers including fouling modeling // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 125. P. 1345–1353. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.066.
7. Бударин П. А., Бубликов И. А., Кравец С. Б. Основные концепции в параметрическом диагностировании теплообменных аппаратов на наличие в них загрязнений // Вестник АГТУ. 2007. № 6 (41). С. 79–82.

8. Сафронов Ю. К., Бадьин Ю. А. Методика определения толщины отложений в теплообменных аппаратах по результатам обследования // Нефтепереработка и нефтехимия. 1996. № 9. С. 36–40.

9. Костюков В. Н., Науменко А. П., Костюков А. В., Бойченко С. Н. Стандарты в области мониторинга технического состояния оборудования опасных производств // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 7. С. 30–36.

10. Костюков В. Н., Бойченко С. Н., Науменко А. П., Тарасов Е. В. Комплексный мониторинг технологических объектов опасных производств // Контроль. Диагностика. 2008. № 12. С. 8–19.

11. Казаков В. С., Алексеев А. С. Диагностирование и оценка остаточного ресурса эксплуатации теплоэнергетического оборудования // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 2 (46). С. 32–39.

12. Демин А. М., Демин М. А., Маленьких В. С., Корнеев С. В. Способы борьбы с отложениями в сырьевых теплообменниках установок гидроочистки дизельных топлив // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2015. № 8. С. 32–37.

13. Alfa Laval – Russia. URL: <https://www.alfalaval.ru/> (дата обращения: 09.04.2019).

14. Корнеев С. В., Реутова О. А., Демин А. М., Демин М. А., Пиляева Ю. А. Тестирование сырьевых теплообменников установок гидроочистки дизельных топлив с помощью моделирующих программ // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2013. № 12. С. 25–29.

15. СТО СА 03 004 2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техническому надзору, ревизии и отбраковке. Волгоград: Перемена, 2010. 155 с. ISBN 978-5-9935-0179-6.

16. Маленьких В. С., Демин А. М., Демин М. А., Корнеев С. В. Параметрическая диагностика теплообменного оборудования // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2015. № 5. С. 35–43.

**ДЕМИН Александр Михайлович**, старший преподаватель кафедры «Химическая технология».

SPIN-код: 9138-7429

AuthorID (РИНЦ): 1035222

Адрес для переписки: [demin\\_a\\_m@mail.ru](mailto:demin_a_m@mail.ru)

**НАУМЕНКО Александр Петрович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

SPIN-код: 2568-5406

AuthorID (РИНЦ): 243994

ORCID: 0000-0002-0583-7809

AuthorID (SCOPUS): 24071616500

ResearcherID: P-4589-2015

Адрес для переписки: [alexpn61@mail.ru](mailto:alexpn61@mail.ru)

#### Для цитирования

Демин А. М., Науменко А. П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установок гидроочистки дизельных топлив // Омский научный вестник. 2019. № 4 (166). С. 84–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-166-84-88.

Статья поступила в редакцию 31.05.2019 г.

© А. М. Демин, А. П. Науменко