

На правах рукописи



**Демин Александр Михайлович**

**СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛООБМЕННОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ  
РЕЖИМНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Омск — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет»

**Научный руководитель:**

**Науменко Александр Петрович**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Куменко Александр Иванович,**  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
**Тарасов Евгений Владимирович,**  
кандидат технических наук,  
ООО «Автоматика-Сервис»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита диссертации состоится 27 мая 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте <http://omgtu.ru/>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ОмГТУ, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.178.01. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: [dissov\\_omgtu@omgtu.ru](mailto:dissov_omgtu@omgtu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
Д 212.178.01, канд. техн. наук, доцент

Завьялов С.А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Контроль и мониторинг технического состояния технологического оборудования предприятий нефтеперерабатывающего комплекса является фундаментальной основой процесса внедрения производственных исполнительных систем (MES) и, на их основе, стратегии интеграции производства и операций управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами (ERP).

Наиболее сложно решается задача мониторинга состояния в реальном времени статического механико-технологического оборудования, к которому относят технологические трубопроводы, колонно-ёмкостное оборудование, работающее под давлением, теплообменное и печное оборудование нефтеперерабатывающих предприятий. Известные системы мониторинга статического оборудования базируются на таких параметрах технического состояния, как акустическая эмиссия, вибрация, температура, при этом параметры технологических процессов используются для контроля режима работы объекта.

На нефтеперерабатывающих установках вес теплообменного оборудования (включая конденсаторы и холодильники) достигает 20 – 45 % общего веса технологической аппаратуры. В процессе гидроочистки дизельных топлив (ДТ) определяющую роль имеют теплообменные аппараты, которые рекупируют тепло, содержащееся в технологических потоках, нагревают и испаряют потоки, а также конденсируют и охлаждают пары путём теплообмена с холодной водой или другими хладагентами. Процесс гидроочистки ДТ протекает при высоких величинах давления и температуры.

Анализ имеющихся программ и методик показал, что к теплообменникам процесса гидроочистки нефтепродуктов существующие средства контроля не применимы по различным техническим и экономическим причинам, в связи с чем возникает необходимость разработки технологии диагностирования теплообменного оборудования гидроочистки на основе режимных параметров.

Поэтому, весьма актуальным является проведение исследований, направленных на разработку системы контроля технического состояния теплообменного оборудования на основе существующих систем мониторинга параметров физических процессов с минимальным вмешательством в систему управления и контроля технологическим процессом, которая обеспечивала бы проведение своевременного технического обслуживания теплообменников и поддержание эффективности процесса теплообмена.

**Объект исследования:** техническое состояние теплообменного оборудования реакторного блока процесса гидроочистки дизельных топлив.

**Предмет исследования:** процессы и параметры теплопередачи, протекающие в теплообменных аппаратах реакторного блока установки гидроочистки ДТ, способы контроля и оценки состояния теплообменных аппаратов.

### **Степень разработанности темы**

Исследования проблем контроля состояния теплообменного оборудования и связанного с ним процесса теплообмена ведутся научными коллекти-

вами Казанского государственного энергетического университета (С.Ю. Антонов, А.В. Антонова) и Казанского государственного архитектурно-строительного университета (Я.Д. Золотоносов) г. Казань; АООТ «ВНИКТИНефтехимоборудование» (Ю.К. Сафронов, Ю.А. Бадьян), г. Волгоград; ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» (В.Ю. Абрамов), г. Ангарск; Иркутский государственный университет путей сообщения (Н.П. Деканова), Иркутский государственный технический университет (А.Н. Ильин), г. Иркутск; Камчатский государственный технический университет, (П.В. Хан, В.В. Хан), г. Петропавловск-Камчатский; ООО «Гидрофлоу» (В.Е. Суворов), г. Екатеринбург; ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» (Н.И. Батура, В.В. Береговский, Г.Е. Дядченко, С.Д. Змиенко, А.Ф. Киселев, А.П. Курячий), г. Москва; Тамбовский государственный технический университет (Ю.Л. Муромцев, Е.И. Глинкин, С.И. Дворецкий, Д.Ю. Муромцев, Н.Г. Чернышов), г. Тамбов.

Имеющиеся в технической литературе и в нормативной документации рекомендации, позволяющие оценить величины термических сопротивлений некоторых видов загрязнений, во многих случаях противоречивы или недостаточно обоснованы. Расчётные формулы по определению толщины отложений рекуперативных теплообменников процессов атмосферно-вакуумной трубчатки, имеют также ограниченное применение. Поэтому для оценки загрязнённости теплообменников, определяющей коэффициент теплопередачи, необходимо прежде всего определить свойства отложений, нарушающих теплопередачу.

Контроль состояния теплообменного оборудования на предприятиях нефтеперерабатывающего комплекса осуществляется в процессе их ремонта. Именно на это и направлены усилия известных коллективов и исследователей. Функционирующих систем контроля состояния теплообменников в реальном времени сегодня не известно.

**Основная идея** работы заключается в использовании технологических режимных параметров процесса гидроочистки для контроля состояния теплообменного оборудования путём сравнения разности температур между потоками на горячей стороне теплообменника в текущий момент времени с контрольной величиной при нормальном состоянии аппарата и текущих параметрах техпроцесса, и использовании данного критерия состояния для оценки качества теплообмена и, соответственно, состояния теплообменников.

**Цель работы:** заключается в разработке системы контроля состояния теплообменного оборудования, участвующего в процессах гидроочистки ДТ нефтеперерабатывающих производств, на основе режимных параметров и критерия влияния эффективности теплообмена на экономику предприятия.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Исследовать промышленный процесс гидроочистки ДТ, его аппаратурное оформление и существующие способы контроля состояния и диагностирования теплообменного оборудования.

2. Разработать имитационную модель реакторного блока процесса гидроочистки ДТ, позволяющую оценивать коэффициенты теплопередачи теплообменного оборудования.

3. Выявить признаки и критерии оценки загрязнения теплообменного оборудования и определить их критические величины.

4. Разработать систему контроля состояния теплообменного оборудования реакторного блока установки гидроочистки, основанную на программной реализации диагностирования аппаратов и определении оптимальных сроков их чистки с использованием режимных параметров технологического процесса.

5. Провести экспериментальную верификацию системы контроля состояния теплообменного оборудования реакторного блока установки гидроочистки ДТ по критерию экономической эффективности её применения и оценить достоверность предложенного критерия состояния методами статистической обработки данных промышленной эксплуатации системы.

### **Научная новизна результатов исследований**

1. Предложена имитационная модель реакторного блока установки гидроочистки ДТ, отличающаяся от известных моделей тем, что позволяет осуществлять оценку параметров теплопередачи по данным реального процесса теплообмена (температуры и расходы входящих и выходящих потоков, и др.), что дало возможность реализовать систему контроля состояния теплообменных аппаратов и осуществлять контроль и мониторинг степени загрязнения теплообменников по результатам оценки коэффициентов теплопередачи с учётом величины экономических затрат на увеличенное энергопотребление печи.

2. Впервые установлено, что для контроля состояния теплообменника оценку эквивалентного коэффициента теплопередачи следует производить путём определения разности температур на горячей стороне сырьевых теплообменных аппаратов реакторного блока процесса гидроочистки ДТ, поскольку доказано, что эта разность имеет наибольшую чувствительность к загрязнению теплообменника, что подтверждает коэффициент Спирмена, который для разности температур на горячей стороне выше, чем на холодной стороне, как до чистки теплообменников ( $0.904 > 0.813$ ), так и после неё ( $0.738 > 0.587$ ).

3. На основе установленных взаимосвязей между режимными параметрами процесса теплообмена и степенью загрязнённости теплообменных аппаратов предложен критерий состояния, который основан на отношении разности температур на горячей стороне в текущий момент времени к контрольному показателю, и разработана система контроля состояния теплообменного оборудования реакторного блока установки гидроочистки ДТ.

### **Практическая ценность работы:**

1. Разработана система контроля состояния и программа диагностирования теплообменных аппаратов реакторного блока процесса гидроочистки ДТ в режиме реального времени, которые в отличие от известных решений используют установленные закономерности изменения режимных параметров в зависимости от степени загрязнения. Предложенные решения позволяют определять наличие отложений на поверхности теплопередачи и обоснованно выводить в ремонт теплообменное оборудование для его чистки.

2. Предложены критерии оценки состояния теплообменного оборудования, основанные на измерении разности температур на горячей стороне теплообменника, а также определен критический параметр, равный 30 % отклонению текущих значений разности температур от первоначальных и скорректированный по результатам расчётов ошибок первого и второго рода с использованием различных методов статистической обработки данных, что позволило повысить достоверность оценки состояния теплообменников.

3. Опытная эксплуатация системы контроля показала, что мониторинг состояния теплообменного оборудования реакторного блока установки гидроочистки дизельных топлив позволяет предотвратить убытки предприятия до 600 млн. руб. в год.

Разработанная программа контроля состояния теплообменного оборудования установок гидроочистки ДТ апробирована на АО «Газпромнефть-МНПЗ» (г. Москва), ПАО АНК «Башнефть» (г. Уфа), АО «Газпромнефть-ОНПЗ» (г. Омск), что подтверждают акт и отзыв о внедрении методики диагностирования теплообменного оборудования в АО «Газпромнефть-МНПЗ» и ПАО АНК «Башнефть», а также удостоверение на рационализаторское предложение в АО «Газпромнефть-ОНПЗ» «Способ диагностирования загрязнённости теплообменников по температурным потокам».

#### **Методология и методы диссертационного исследования**

В качестве основного метода в работе применялся метод имитационного моделирования с использованием программных продуктов Microsoft Excel, Aspen HYSYS. Кроме того, в работе были использованы методы математической статистики для оценки погрешности расчётов на модели, а также определения значимости критических параметров контроля состояния теплообменного оборудования и уточнения их величин.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Имитационная модель реакторного блока процесса гидроочистки ДТ, с использованием которой система осуществляет контроль состояния теплообменников и определяет коэффициенты теплопередачи по параметрам технологического процесса, а также оценивает экономическую составляющую потребления энергоресурсов.

2. Система контроля состояния теплообменного оборудования реакторного блока процесса гидроочистки ДТ в режиме реального времени, позволяющая качественно оценить наличие загрязнений на поверхности теплообмена с целью определения сроков чистки теплообменных аппаратов.

3. Величина критерия оценки состояния теплообменных аппаратов реакторного блока процесса гидроочистки ДТ, определяющая оптимальные сроки чистки оборудования с точки зрения экономической эффективности, заключающейся в сравнении затрат на чистку и дополнительно потребляемого топлива, связанного с загрязнением теплообменников.

#### **Степень достоверности результатов**

Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, подтверждена апробацией математической модели реакторного блока

процесса гидроочистки ДТ и программы контроля состояния теплообменного оборудования с использованием большого массива экспериментальных данных на промышленных установках АО «Газпромнефть-ОНПЗ», АО «Газпромнефть-МНПЗ», ПАО АНК «Башнефть»; проверкой модели на адекватность, показывающей, что абсолютная и относительная погрешности расчётов сопоставимы с погрешностями экспериментального определения температуры и расхода и не превышает 1.4 °С и 0.8 %; обсуждением основных положений диссертационного исследования на всероссийских и международных научных конференциях и симпозиумах и их публикацией в рецензируемых научных журналах.

#### **Личный вклад автора**

Состоит в разработке компьютерной модели реакторного блока процесса гидроочистки ДТ в среде Aspen HYSYS, вычислении методами математической статистики критических параметров оценки теплообменного оборудования, определении состава отложений трубного и межтрубного пространств теплообменника, адаптированной к инженерной практике технологии контроля состояния теплообменного оборудования по режимным параметрам, проведении экспериментальных исследований, обобщении результатов экспериментальных и численных исследований, а также разработке рекомендаций по использованию выявленных зависимостей и новых научных знаний в области процесса гидроочистки ДТ.

Результаты исследований являются оригинальными и получены лично автором или при его непосредственном участии.

#### **Апробация работы**

Результаты исследований, проведённых в рамках диссертационной работы, представлены и обсуждены на научно-технических конференциях и симпозиумах всероссийского и международного уровней: V, VI, VII творческие конференции ОАО «Газпромнефть-ОНПЗ» (г. Омск, 2008, 2009, 2010 гг.); I научно-техническая конференция ОмГТУ (г. Омск, 2011 г.); VI конференция «Газпромнефть Aspen Tech» (г. Москва, 2015 г.); VI научно-техническая конференция молодых специалистов ПАО «ОМСКНЕФТЕХИМПРОЕКТ» «От проектного инжиниринга к строительному» (г. Омск, 2015 г.); VII международная научно-техническая конференция ПАО «ОМСКНЕФТЕХИМПРОЕКТ» «Инженерное дело взгляд в будущее» (г. Омск, 2016 г.); VIII международная научно-техническая конференция молодых специалистов ПАО «ОНХП» (г. Омск, 2017 г.); XII всероссийская научно-техническая конференция «РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина» «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России» (г. Москва, 2018 г.); IX международная научно-техническая конференция молодых специалистов ПАО «ОНХП» «Цифровая трансформация – драйвер инновационного развития и путь к эффективному управлению» (г. Омск, 2018 г.); IX Международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства «Oil and gas engineering 2019» (г. Омск,

2019 г.); III Международная научно-техническая конференция «Mechanical science and technology update» (Проблемы машиноведения) (г. Омск, 2019 г.).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 8 статей в журналах из списка ВАК, 2 публикации в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 167 страницах машинописного текста, содержит 85 рисунков, 15 таблиц, 7 приложений, библиография включает 94 наименования.

### **Содержание работы**

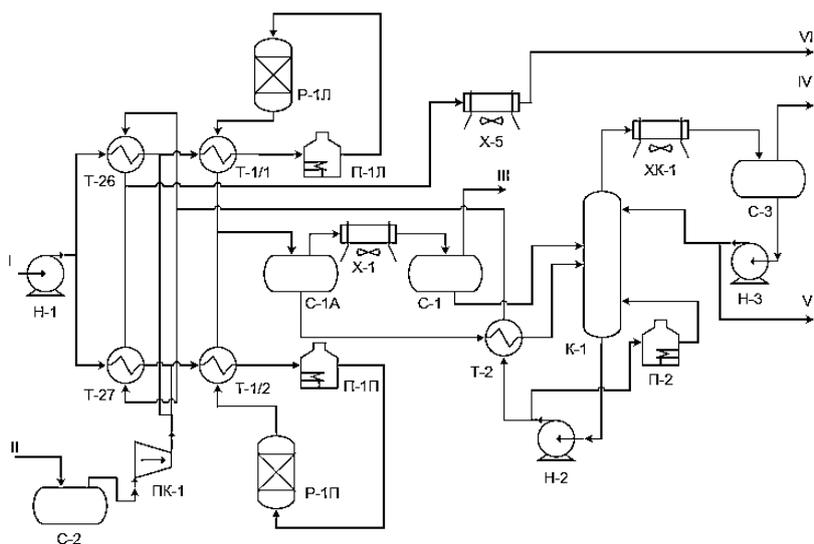
*Во введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

*В первом разделе* содержится аналитический обзор теплообменного оборудования процесса гидроочистки ДТ, конструкции теплообменного оборудования, применяемого в реакторном блоке процесса гидроочистки, схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах, а также способы контроля и диагностики аппаратов: методом математического моделирования, использования линейных сканирующих ИК-систем и параметров технологического контроля. На основе проведённого анализа литературных данных сформулирована цель и задачи работы.

*Второй раздел* посвящён характеристике объекта, описанию методов и методологии исследования, а также определению качественного состава отложений на поверхности теплообмена аппаратов реакторного блока.

Типовая установка гидроочистки ДТ предназначена для удаления органических сернистых, азотистых и кислородсодержащих соединений путём их взаимодействия с водородом при высокой температуре и давлении на катализаторе (Рис. 1). Опыт эксплуатации установок гидроочистки ДТ и мониторинг состояния теплообменников показал, что основные проблемы с отложениями возникают на теплообменниках реакторного блока.

Промышленный эксперимент, в отличие от лабораторного, проводится путём наблюдений и не предполагает активного воздействия на объект исследования. На основе экспериментальных данных, полученных в результате анализа отложений, *определено*, что термическое сопротивление по трубному пространству теплообменников реакторного блока обусловлено отложениями солей хлорида аммония, а по межтрубному пространству - полимерными соединениями и продуктами реакций поликонденсации непредельных компонентов сырья в присутствии кислорода воздуха. Максимальное количество отложений наблюдается в межтрубном пространстве теплообменника с наибольшей температурой. *Установленная закономерность* определила пути поиска параметров контроля состояния теплообменников и разработки на их основе системы контроля.



- I – сырье; II – свежий ВСГ;
- III – ВСГ на очистку;
- IV – углеводородный газ стабилизации на очистку;
- V – бензин-отгон; VI – ОДТ;
- Р-1П, 1Л – реактор; К-1 – колонна;
- С-1, С-1А С-2, С3 – сепараторы;
- П-1П, 1Л, П-2 – печи;
- Т-26, Т-27, Т-1/1, 2, Т-2 – теплообменники; ХК-1, Х-1, 5 – холодильники; ПК-1 компрессор;
- Н-1, 2, 3 – насосы.

Рис. 1. Технологическая схема реакторного блока типовой установки гидроочистки

**В третьем разделе** представлена имитационная математическая модель, предназначенная для диагностирования теплообменных аппаратов реакторного блока установок гидроочистки ДТ, проверка её адекватности, а также представлено использование данной модели для оценки загрязнения теплообменников с помощью варьирования коэффициентов теплопередачи и выявления уровня значимости параметров диагностирования с использованием статистической обработки данных. В результате исследований определены критические параметры загрязнения теплообменного оборудования.

Имитационная математическая модель теплообмена реакторного блока установки гидроочистки ДТ выполнена в программном продукте Aspen HYSYS V10 (36.0.0.249). Принцип контроля состояния заключается в том, что для определения влияния коэффициентов загрязнения теплообменных аппаратов в текущий момент времени на энергопотребление установки в целом, в данной модели создаётся эталонная схема, включающая теплообменник, идентичный исследуемому кроме коэффициентов загрязнения, соответствующих чистой поверхности теплопередачи, при этом по разнице нагрузки основной и эталонной печей определяется отклонение потребления топлива при увеличении толщины отложений. Расчёты проводятся на основе данных реального технологического процесса.

Для расчёта теплообменных аппаратов в модели используется основное уравнение теплопередачи:

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

где  $F$  – площадь поверхности теплообмена,  $m^2$ ;  $\Delta t_{cp}$  – среднелогарифмический температурный напор,  $^{\circ}C$ ;  $Q$  – тепловая нагрузка аппарата, Вт;  $K$  – кинетический коэффициент теплопередачи,  $Вт \cdot ^{\circ}C / m^2$ .

Среднелогарифмический температурный напор ( $\Delta t_{cp}$ ,  $^{\circ}C$ ) вычисляется следующим образом:

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

где  $\Delta t_{\delta} = t'_1 - t''_2$  и  $\Delta t_m = t''_1 - t'_2$  – наибольшее и наименьшее значения разности температур.

Тепловую нагрузку  $Q$  определяют из уравнения теплового баланса:

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

где  $G_1, G_2$  – расход потока по межтрубному и трубному пространству теплообменного аппарата, кг/с;  $C_p$  – теплоёмкость продукта при средней температуре, кДж/кг·°С. Температуры входа и выхода первичного контура  $t'_1$  и  $t''_1$  и температура входа и выхода вторичного контура  $t'_2$  и  $t''_2$ , °С.

Для расчёта теплообменного оборудования при вынужденной теплоотдаче используется зависимость следующего вида:

$$Nu = f(Pr, Re) \quad \text{или} \quad Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n, \quad (4)$$

где  $A, m, n$  – коэффициенты, определяющиеся опытным путём;  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля.

При турбулентном движении теплота через пограничный слой проходит за счёт теплопроводности:

$$Q = -\lambda \cdot F \cdot \tau \cdot \frac{\partial t}{\partial \delta}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\delta$  – толщина пограничного слоя, м;  $\tau$  – время, с.

В соответствии с уравнением теплоотдачи количество теплоты, переданное стенке от потока, определяется как:

$$Q = \alpha \cdot (t_{ж} - t_{ст}) \cdot F \cdot \tau, \quad (6)$$

При установившемся процессе количество теплоты, проходящее через пограничный слой и из ядра потока к стенке уравниваются:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial \delta} = \alpha \cdot (t_{ж} - t_{ст}), \quad (7)$$

Аналитически данное уравнение решить затруднительно, в связи с тем, что толщина пограничного слоя  $\delta$  неизвестна и является функцией многих переменных.

В имитационной модели коэффициент теплопередачи, определяется следующим образом:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи потоков при температуре стенки;  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  – это сумма термических сопротивлений стенки и пограничного слоя.

В имитационной модели коэффициенты загрязнений по трубному и межтрубному пространству принимаются на основе экспериментальных данных. Т.к. площадь теплообменника остается неизменной, изменение коэффициента теплопередачи  $K$  влечет за собой изменение температурного

напора  $\Delta t_{cp}$ . Учитывая тот факт, что качество потоков не изменяется и коэффициенты теплоёмкости по трубному и межтрубному пространству остаются постоянными при рассматриваемом режиме, величина  $\Delta t_{cp}$  отражает количество отложений на поверхности теплообмена и находится в прямой зависимости от него. Таким образом, по изменению разности температур можно судить о наличии загрязнений.

Погрешность расчётов имитационной модели реакторного блока гидроочистки ДТ по основным режимным параметрам составила  $1.26\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $0.1\%$  по температуре и расходу, соответственно, что не превышает допустимой погрешности термомпары и расходомера  $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $0.8\%$ . Таким образом, можно сделать вывод о пригодности имитационной модели для проведения технологических расчётов.

Путём статистической обработки определена величина критерия Спирмена, которая для разности температур на горячей стороне выше, как до чистки теплообменников ( $0.904 > 0.813$ ), так и после неё ( $0.738 > 0.587$ ). Выявленная закономерность послужила основой для создания системы контроля состояния теплообменного оборудования.

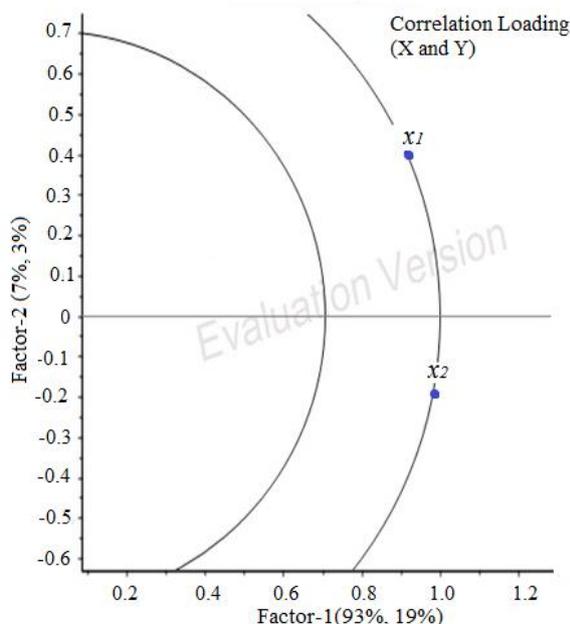


Рис. 2 График загрузки по выборке технологических данных в период с 01.01.2006 по 03.10.2009

Математический этап обработки данных проводился с помощью метода проекции на латентные структуры с использованием программы The Unscrambler 10.3. Фактор  $x_1$  (разность температур на горячей стороне группы теплообменников) и  $x_2$  (разность температур на холодной стороне группы теплообменников) расположены вдоль оси абсцисс (ГК1) примерно на одном уровне, тогда как по оси ординат фактор  $x_1$  значительно выше от начала координат (примерно в два раза) (Рис. 2). Поэтому, фактор  $x_1$  влияет более комплексно, чем фактор  $x_2$ , и он более информативен. Следовательно, по изменению разности температур на горячей стороне теплообменников можно проводить качественный контроль состояния теплообменного оборудования на предмет наличия отложений.

Таким образом, на основании двух, принципиально разных методов статистической и математической обработки данных, установлено, что разность температур на горячей стороне группы теплообменников имеет большее влияние на эквивалентный коэффициент теплопередачи, чем на их холодной стороне.

Отсутствие в регламентирующих документах достоверной методики определения необходимости проведения чистки теплообменного оборудования приводит к неоправданному росту эксплуатационных затрат, которые могут быть вызваны как излишним потреблением топлива на печах, расположенных после теплообменников, так и дополнительными затратами на ремонт теплообменников, связанных с их разборкой и чисткой в тех случаях, когда эти работы были не обоснованы. Экспериментально выявлено, что *только* по результатам мониторинга температур потоков на входах и выходах теплообменных аппаратов процесса гидроочистки ДТ нет возможности проводить оценку загрязнённости теплопередающей поверхности.

Из теории пинч-анализа известно, что от величины потоковой теплоёмкости (СР) зависит угол наклона составной кривой. Так как СР холодного потока меньше, чем СР горячего потока, по причине добавления массы квенча, то при прямолинейном характере составной кривой, минимальная разность температур для реакторного блока процесса гидроочистки будет всегда находиться в верхней части графика (Рис. 3), т.е. на горячей стороне рекуперативного теплообменника. В случае увеличения количества отложений на поверхности теплопередачи температуры ГСС и ГПС после рекуперативного теплообменника изменяются, приводя к росту нагрузки на печь и холодильник, составная кривая холодного потока сдвигается по направлению стрелки. Таким образом, по изменению разности температур на горячей стороне можно оценивать экономическую составляющую процесса гидроочистки с точки зрения потребления горячих и холодных энергоносителей.

Измеряя температуры потоков на разных сторонах теплообменных аппаратов и сравнивая их разность в текущий и начальный (трубный пучок новый или тщательно очищенный) момент времени с определенной долей вероятности можно оценивать техническое состояние теплопередающей поверхности.

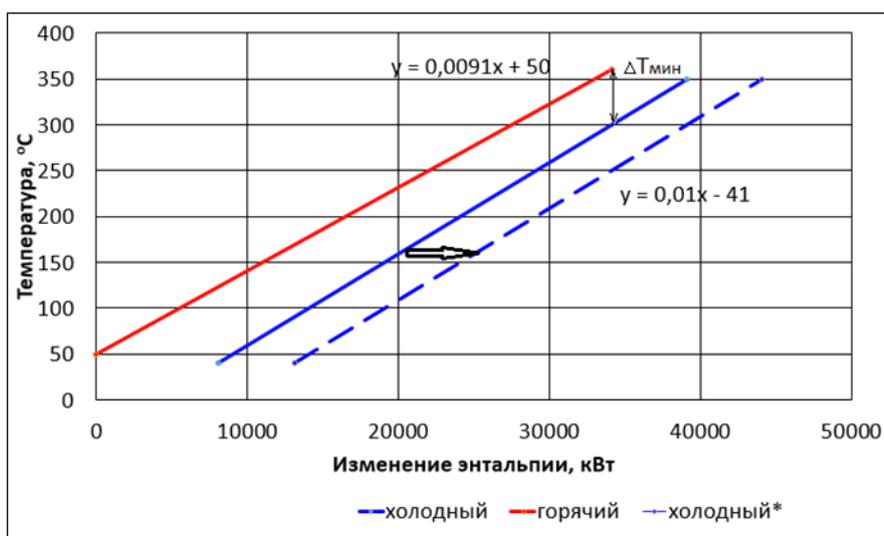


Рис. 3. Влияние загрязнений поверхности теплопередачи на процесс теплообмена

Основная задача состоит в выборе границ, по которым можно судить о необходимости чистки данного теплообменника. Согласно нормативным документам и литературным источникам в качестве первоначального приближения была определена величина критерия оценки состояния теплообменного обо-

рудования реакторного блока установок гидроочистки ДТ на уровне 30 % отклонения.

Как показывают проведённые исследования при увеличении толщины отложений свыше 2 мм эффективность процесса теплопередачи в теплообменных аппаратах снижается ниже критической отметки и растут эксплуатационные затраты на топливо (Рис. 4).

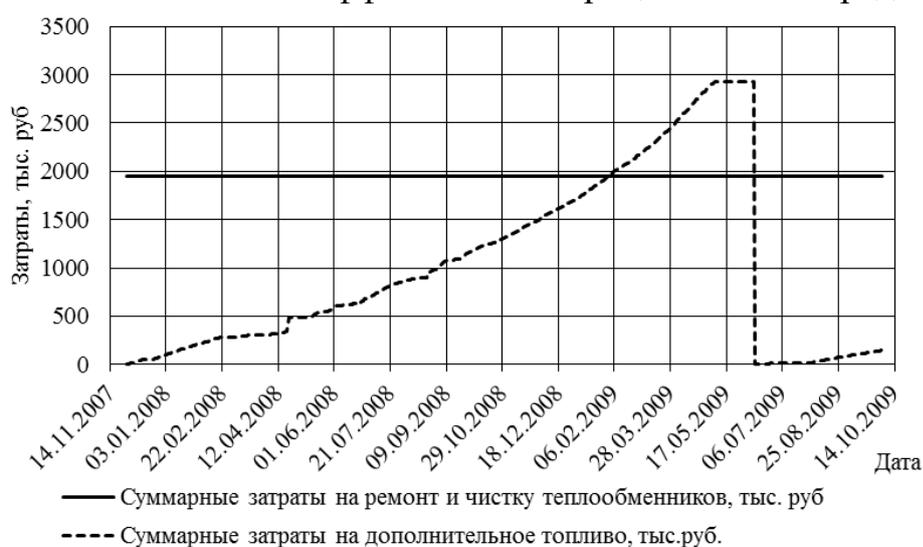


Рис. 4. Соотношение ремонтных и эксплуатационных затрат при эксплуатации теплообменников

аппаратах снижается ниже критической отметки и растут эксплуатационные затраты на топливо (Рис. 4). Стоимость ремонта теплообменника обозначает границы его эксплуатации с точки зрения экономической эффективности.

Т.е. оптимальный срок чистки аппарата определяется равенством ремонтных и дополнительных эксплуатационных затрат на энергоресурсы.

**В четвёртом разделе** разработана методика и программа системы контроля состояния теплообменного оборудования установок гидроочистки ДТ, которая в отличие от известных решений использует установленные закономерности изменения режимных параметров в зависимости от степени загрязнения, а также рассмотрены примеры применения программы, как на типовых установках гидроочистки ДТ, так и на установке по технологии UOP.

Система контроля состояния теплообменных аппаратов состоит из собственно объекта контроля – кожухотрубчатого теплообменника, датчиков контроля параметров технологического процесса (температура, расход, давление и др.), системы сбора и хранения данных, вычислительного ресурса с программой обработки и анализа данных контроля состояния.

Принцип функционирования системы контроля состояния теплообменников заключается в сравнении текущей разности температур на горячей стороне реального и эталонного аппаратов и, соответственно, определении критерия оценки состояния при реальных параметрах технологического процесса. В случае превышения граничного значения величины критерия состояния делается вывод о недопустимой степени загрязнённости теплообменника.

Для определения эффективности работы теплообменников была разработана программа контроля состояния теплообменного оборудования установок гидроочистки ДТ в режиме реального времени, представляющая собой мнемосхему в PI ProcessBook (PI PB), основанная на измерении разницы между входящей и выходящей температурами потоков на холодной и горячей стороне. Конкретная реализация программы контроля выполнена в виде экранной формы, содержащей графические примитивы, поясняющие надписи технологических параметров, их текущие значения, отношение разниц температур в

текущем времени и за прошедший период, управляющие элементы «календарь» и «счётчик» (Рис. 5).

Программа контроля состояния включает все сырьевые теплообменники реакторного блока установки гидроочистки, обозначенные прямоугольниками с вписанными в них позициями аппаратов, а также холодные и горячие потоки с направлением их движения, при этом направление холодных потоков идёт с право на лево, горячих – с лево на право. На каждом потоке снизу указаны позиции измерительных приборов, а сверху – измеряемые значения параметров. Между потоками, более крупным шрифтом зелёного или красного цвета, располагаются безразмерные коэффициенты, являющиеся критерием оценки состояния теплообменников. Цифры изменяют свой цвет с зелёного на красный, при превышении определенной, критической величины критерия оценки.



Рис. 5. Фрагмент программы системы контроля состояния сырьевых теплообменников установки гидроочистки ДТ

Результаты расчёта отображаются непосредственно на мнемосхеме с помощью встроенного в PI PV сервиса Data Sets. Формула расчёта, позволяющая оценить величину критерия состояния, представляет собой строковое выражение, содержащее имена тегов PI PV в качестве источника данных, периодов и отметок времени выборки данных из архива и собственно математических операторов.

В результате применения программы контроля состояния выявлено, что повышение температуры на сырьевых теплообменниках влечёт за собой увеличение скорости реакций коксообразования, инициатором которых является растворенный кислород. Подтверждением этой гипотезы является отсутствие значительных изменений в период с ноября 2016 по март 2017 года, когда установка работала на максимальной загрузке и при минимальной температуре сырья (Рис. 6). При смене сырья с «Зимнего» на «Летнее» в период с апреля по октябрь 2017 года наблюдается рост критерия оценки состояния теплообменного аппарата, связанный с повышением температуры реакции гидрогениза-

ции и вовлечением в переработку лёгкого газойля вторичных процессов с высоким содержанием непредельных углеводородов, легко вступающих в реакции коксообразования.

С помощью разработанной системы контроля состояния теплообменного оборудования появилась возможность оценки влияния открытия или закрытия байпасных линий теплообменников на эффективность работы схемы теплообмена (Рис. 6).

С увеличением температуры сырья за счёт регулирования расходов через байпасные линии критерий оценки состояния теплообменных аппаратов за меньший промежуток времени достигает критических значений в связи с ро-

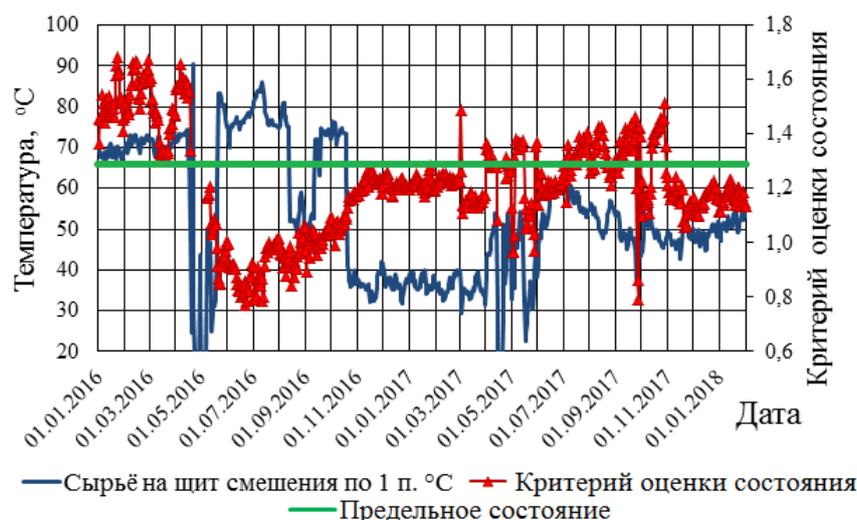


Рис. 6. Изменение температуры сырья на щит смешения и критерия оценки состояния теплообменников

стом скорости реакций коксообразования минимум в 4 раза согласно правилу Вант-Гоффа. При вовлечении в сырьё гидроочистки продуктов вторичных процессов, характеризующихся наличием непредельных углеводородов, наблюдается увеличение количества реакций коксообразования.

Поскольку, в соответствии с проведенными исследованиями критерий оценки состояния теплообменников адекватно характеризует нагрузку печи, а, следовательно, и количество потребляемого топлива, поэтому появилась возможность определять дополнительные эксплуатационные затраты, связанные с загрязнением теплообменников.

Основными отличительными особенностями технологии гидроочистки ДТ запатентованной компанией UOP являются повышенное давление в реакторе и наличие байпасных линий сырьевых теплообменных аппаратов реакторного блока. Оценка загрязнённости сырьевых теплообменников установки гидроочистки ДТ по технологии UOP, после проведения их чистки в октябре 2017 года, была проведена двумя способами:

1. С помощью программы контроля состояния в среде PI PV, разработанной для типовых установок гидроочистки ДТ;
2. Методом имитационного моделирования теплообменных аппаратов реакторного блока установки гидроочистки ДТ, с учётом их реальных геометрических размеров.

Критерий оценки состояния показывает относительную величину загрязнения теплообменника, а загрязнение имеет характер постепенного накопления, следовательно, мгновенное его изменение практически невозможно (Рис. 7).

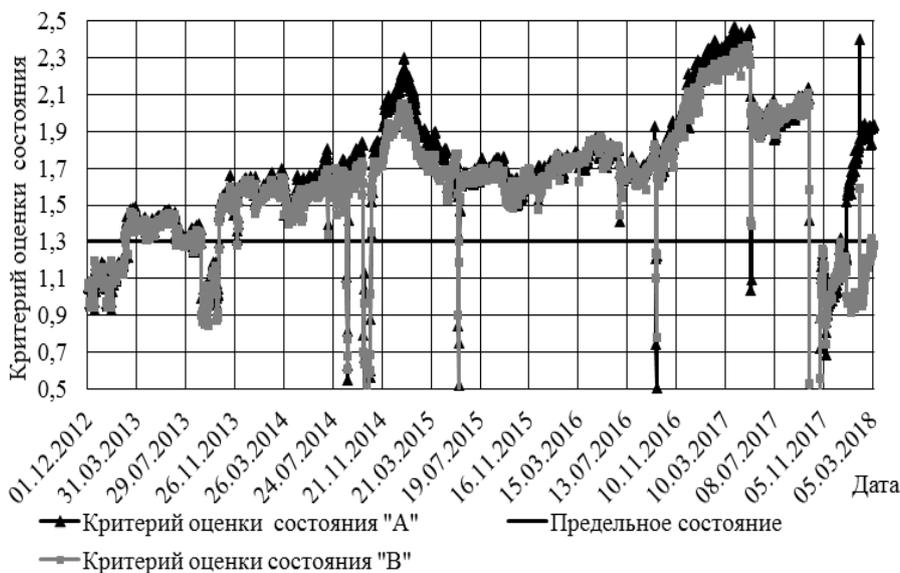


Рис. 7. Изменение критерия оценки состояния для теплообменников 100А-Е1В и 100А-Е1А потока «А» на их горячей стороне

Кроме излишнего потребления топлива регулирование расхода по байпасным линиям приводит к быстрому загрязнению теплообменника по межтрубному пространству. В итоге возникает необходимость понижения загрузки установки по сырью и дополнительным убыткам предприятия из-за невыпуска продукции высокого качества при достижении критических параметров эксплуатации оборудования.

Для количественной оценки возможных убытков была использована имитационная модель реакторного блока установки гидроочистки ДТ по технологии UOP (Рис. 8), которая позволяет вычислить годовой расход потребляемого топлива, как в натуральном, так и в стоимостном выражении сравнивая данные модели идеального техпроцесса и текущего состояния при загрязнённой поверхности теплообменников с учётом КПД печи, калорийности и стоимости топлива.

Имитационная модель реакторного блока установки гидроочистки ДТ по технологии UOP (Рис. 8), которая позволяет вычислить годовой расход потребляемого топлива, как в натуральном, так и в стоимостном выражении сравнивая данные модели идеального техпроцесса и текущего состояния при загрязнённой поверхности теплообменников с учётом КПД печи, калорийности и стоимости топлива.

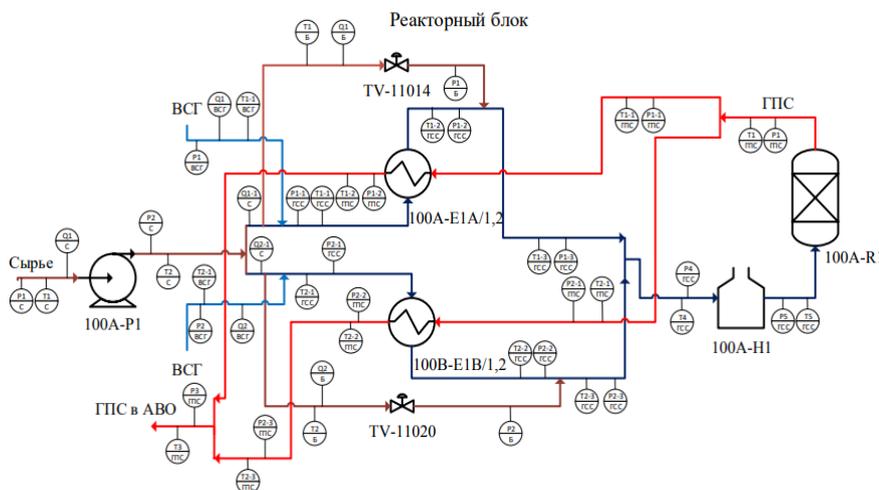


Рис. 8. Фрагмент имитационной модели реакторного блока установки гидроочистки ДТ по технологии UOP

Имитационная модель реакторного блока установки гидроочистки ДТ по технологии UOP (Рис. 8), которая позволяет вычислить годовой расход потребляемого топлива, как в натуральном, так и в стоимостном выражении сравнивая данные модели идеального техпроцесса и текущего состояния при загрязнённой поверхности теплообменников с учётом КПД печи, калорийности и стоимости топлива.

Применение имитационной модели на основе алгоритма контроля состояния сырьевых теплообменников в программе HYSYS (рис. 9) позволяет не только рассчитывать коэффициенты теплопередачи теплообменных аппаратов на основании режимных параметров, но также достаточно точно определять расходы потоков, проходящих через теплообменник и по байпасным линиям.

По результатам расчётов количество потока, поступающего из реактора на ветвь теплообменников «А» снизилось на 20%, а на ветвь «В» соответственно увеличилось. Рассчитанные коэффициенты загрязнения теплообменных аппаратов увеличились более, чем на порядок с 0.0007 до 0.008 К·м<sup>2</sup>·ч/ккал. При вскрытии аппаратов было выявлено, что причинами перераспределения потоков между ветвями теплообменников «А» и «В» потока «А» послужили отложения солей хлорида аммония в трубном пространстве, в результате десублимации при аварийной остановке в зимний период.

1. Ввод параметров сырья и ВСГ
2. Расчёт термодинамических параметров сырья и ВСГ
3. Расчёт мощности сырьевого насоса

По данной схеме рассчитываются:

1. Теоретические:
  - 1.1. Гидравлические и технологические параметры теплообменника;
  - 1.2. Температуры потоков и нагрузка печи при чистых ТО;
  - 1.3. Потребление топлива при чистых ТО.
2. По реальным текущим данным:
  - 2.1. Гидравлический расчёт ТО;
  - 2.2. Расход сырья по байпасным линиям в обход ТО;
  - 2.3. Коэффициента загрязнения;
  - 2.4. Температуры ГСС в точках 2 и 3 при грязных ТО;
  - 2.5. Потребление топлива и его стоимости
3. По результатам расчёта производится сравнение:
  - 3.1. Абсолютное отклонение от номинала нагрузки печи, количества потребляемого топлива и его стоимости;
  - 3.2. Относительное отклонение нагрузки печи;
  - 3.3. Стоимость дополнительного потребления топлива за выбранный промежуток времени;

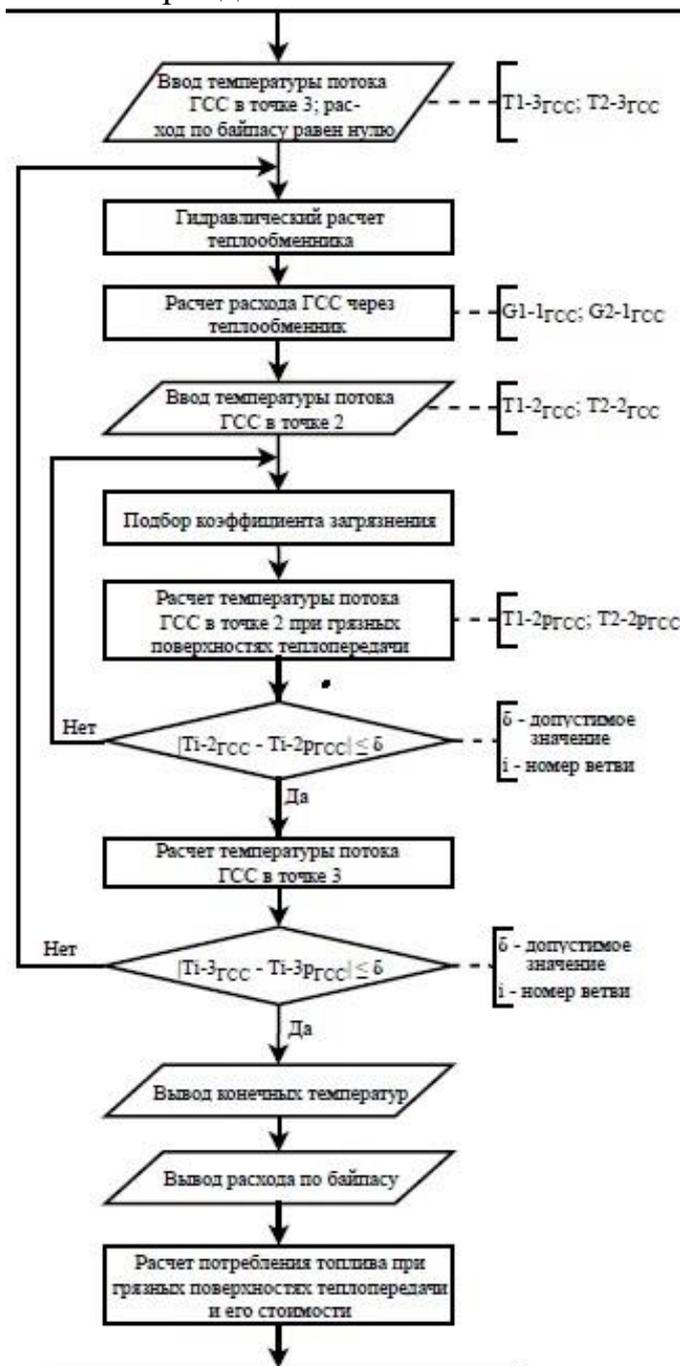


Рис. 9. Фрагмент алгоритма контроля состояния сырьевых теплообменников в программе HYSYS

В результате моделирования и анализа эксплуатационных данных выявлено, что, как на типовых установках гидроочистки ДТ, так и на установке по технологии UOP рост начальной температуры сырья и вовлечение в него продуктов вторичных процессов увеличивает скорость образования отложений на

поверхности теплообменных аппаратов реакторного блока. Возможность регулирования расхода по байпасным линиям приводит к снижению температуры потока на входе в печь и увеличению нагрузки на неё.

**В пятой главе** на основе опытной промышленной эксплуатации приводятся исследования влияния загрязнений поверхности теплообменных аппаратов на потребление установкой топливного газа (Рис. 10), а также расчёты затрат на ремонтные работы, связанные с чисткой теплообменников и определение граничных значений диагностических признаков, разделяющих состояние объекта на исправное и неисправное.

В связи с тем, что в РИ РВ для типовых установок гидроочистки ДТ невозможно оценить загрязнение теплопередающей поверхности аппаратов (отсутствуют датчики измерения температуры на входе в аппараты) была использована

имитационная мо-

дель типовой установки гидроочистки ДТ в программном продукте Aspen HYSYS. Отличие имитационной модели от программы контроля состояния в режиме реального времени состоит в том, что рассматриваются не средние значения температур за длительный период, согласно уравнению (9), а мгновенные при чистых и грязных теплопередающих поверхностях:

$$D = \frac{\Delta T_{\Gamma}^*}{\Delta T_{\Gamma}}, \quad (9)$$

где  $\Delta T_{\Gamma}^*$  - разность температур на горячей стороне теплообменника при загрязнённой поверхности теплообмена (в текущий момент времени), °С;  $\Delta T_{\Gamma}$  - разность температур на горячей стороне теплообменника при чистой поверхности теплообмена, °С.

На основании проведённых исследований определены оптимальные сроки чистки теплообменного оборудования типовой установки гидроочистки ДТ, основывающиеся на сравнении затрат на потребление дополнительного топлива и на чистку трубных пучков аппаратов.

Суммарные затраты на чистку теплообменного оборудования поз. Т-26 и Т-27 ( $Z_{\text{общ}}$ , руб.), определяемые по формуле (10) составили 900 тыс. руб.

$$Z_{\text{общ}} = Z_{\text{р}} + Z_{\text{т}} + Z_{\text{ч}}, \quad (10)$$



Рис. 10. Удельная норма потребления условного топлива на установке Л-24/9

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

Анализ технико-экономических данных показал (Рис. 11), что в октябре 2018 года наблюдался средний перерасход условного топлива на 5.86 %, в ноябре он увеличился до 12.22 % за счёт полного отключения теплообменников, а в декабре после чистки аппаратов средняя экономия топлива составила 0.38 %. Выполненный расчёт показал, что при достижении значения критерия оценки состояния теплообменника равного 1.30 работы по чистке трубных пучков теплообменных аппаратов полностью окупаются в течение 1 месяца.

В ходе исследований, проведённых на имитационной модели, было выявлено, что с ростом количества загрязнений увеличивается, как критерий оценки состояния на горячей и холодной сторонах теплообменника, так и потребление энергоносителей, основную часть стоимости которых составляет топливо, расходуемое на печах (Рис. 12). Изменение критерия оценки состояния, определенного по температуре на горячей стороне, более чувствительно к экономической составляющей, так как  $tg$  угла наклона больше в два раза.



Рис. 11. Сопоставление затрат на ремонт с чисткой и эксплуатации грязных теплообменников

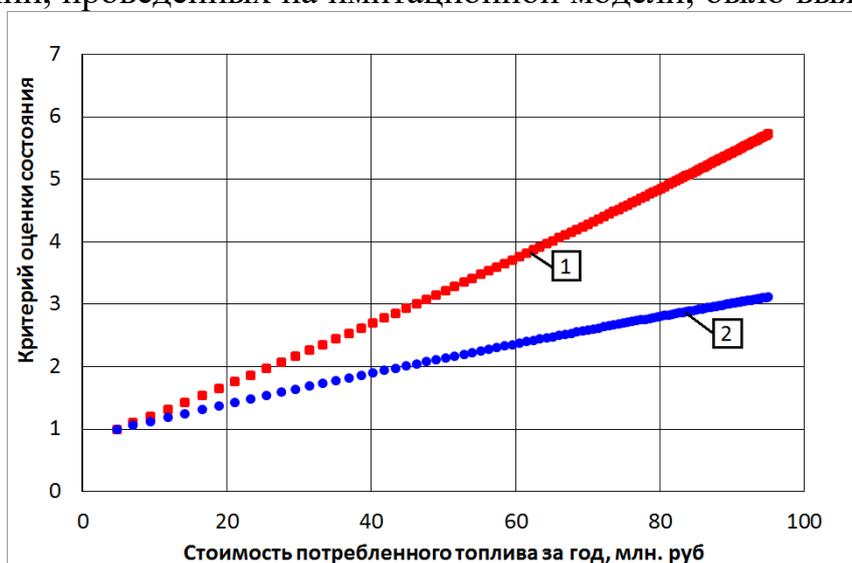


Рис. 12. Зависимость критерия оценки состояния на горячей (1) и на холодной (2) сторонах теплообменника от стоимости потребленного топлива.

Статистический анализ с помощью известных методик всех полученных данных позволил получить эмпирические и теоретические функции распределения вероятностей величин критерия оценки состояния и соответствующие им плотности распределения вероятностей критерия оценки для чистых (1) и загрязнённых (2) теплообменников, чем на его холодной стороне (Рис. 13), а также кривые риска принятия решений для различных методов (Рис. 14). Для аппроксимации распределения случайных величин использован нормальный закон распределения.

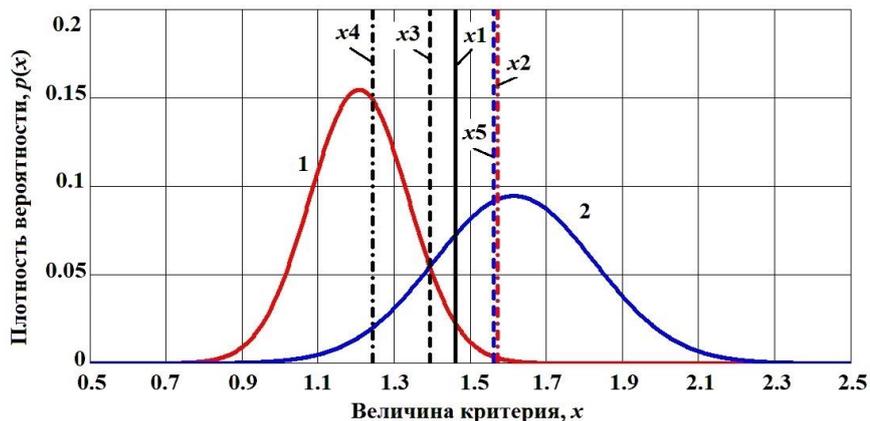


Рис. 13. Функции плотности вероятности величин критерия оценки состояния для чистых (1) и загрязнённых (2) теплообменников:  $x_1$  – метод минимального риска,  $x_2$  – минимального числа ошибочных решений,  $x_3$  – наибольшего правдоподобия,  $x_4$  – минимакса,  $x_5$  – Неймана-Пирсона

Анализ полученных данных показал, что минимальный риск ( $R=0.094$ ) принятия решения обеспечивает граничное значение ( $x_1=1.46$ ) критерия оценки состояния, полученное методом минимального риска. При этом вероятность пропуска загрязнённого состояния теплообменника составляет  $P_{\text{ПД}}=0.007$  (т.е. менее 0.7 %), а вероятность ложной тревоги –  $P_{\text{ЛТ}}=0.024$ .

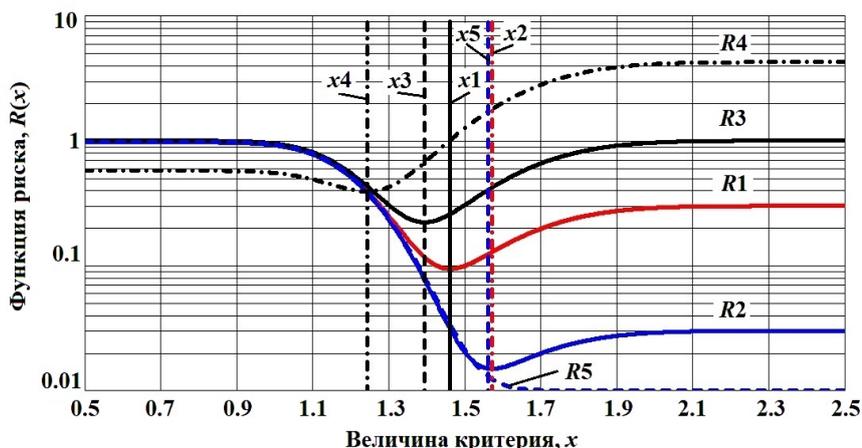


Рис. 14. Функции риска принятия решения и отметки величин критерия оценки состояния, рассчитанные методами минимального риска ( $R_1$  и  $x_1$ ), минимального числа ошибочных решений ( $R_2$  и  $x_2$ ), наибольшего правдоподобия ( $R_3$  и  $x_3$ ), минимакса ( $R_4$  и  $x_4$ ), Неймана-Пирсона ( $R_5$  и  $x_5$ )

Риск ошибочного решения, полученная методами минимального числа ошибочных решений, наибольшего правдоподобия, Неймана-Пирсона, примерно одинакова и лежит в пределах от 0.117 до 0.128, т.е. диапазон изменения значений составляет не более 1.00 %. Минимальную вероятность пропуска загрязнённого состояния ( $P_{\text{ПД}} = 0.004$ ) обеспечивает граничное значение, равное  $x_3=1.39$ , которое получено методом наибольшего правдоподобия. Минималь-

ную вероятность ложной тревоги ( $P_{ЛТ} = 0.003$ ) при вероятности пропуска загрязнённого состояния  $P_{ПД} = 0.012$  имеем при граничном значении  $x_3 = 1.56$ , рассчитанном методом Неймана-Пирсона.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые *установлено*, что для контроля состояния теплообменника оценку эквивалентного коэффициента теплопередачи *следует производить* путём определения разности температур на горячей стороне сырьевых теплообменных аппаратов реакторного блока процесса гидроочистки ДТ, поскольку именно эта разность имеет наибольшую чувствительность, что подтверждает коэффициент Спирмена, который для разности температур на горячей стороне выше, чем на холодной стороне, как до чистки теплообменников ( $0.904 > 0.813$ ), так и после неё ( $0.738 > 0.587$ )

2. Реализована система контроля состояния теплообменных аппаратов, позволяющая отслеживать степень загрязнения теплообменников по результатам оценки коэффициентов теплопередачи с учётом величины экономических затрат на увеличенное энергопотребление печи, *основанная на предложенной имитационной модели реакторного блока установки гидроочистки ДТ в программном продукте Aspen HYSYS, отличающаяся* от известных моделей тем, что позволяет осуществлять оценку параметров теплопередачи по данным реального процесса теплообмена. При этом погрешность расчётов имитационной модели по основным режимным параметрам составило  $1.26\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура) и  $0.1\%$  (расход) соответственно, что не превышает допустимой погрешности термомпары и расходомера  $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $0.8\%$ . Это позволяет считать, что данная имитационная модель является *адекватной* и приемлемой для прогнозирования нагрузки печи, определения коэффициента загрязнения и расхода топлива.

3. На основе *установленных взаимосвязей* между режимными параметрами процесса теплообмена и степенью загрязнённости теплообменных аппаратов *предложен критерий оценки состояния* теплообменника, который основан на отношении разности температур на горячей стороне в текущий момент времени к контрольному показателю, и разработана система контроля состояния теплообменного оборудования реакторного блока установки гидроочистки ДТ

4. Разработана методика и программа системы контроля состояния теплообменного оборудования, *основанные на определении разности температур на горячей стороне теплообменника и предложенном критерии оценки состояния*, которые обеспечивают контроль состояния теплообменных аппаратов по параметрам технологического процесса в режиме реального времени.

5. *Установлено*, что при достижении значения *критерия оценки состояния* теплообменника равного  $1.30$  происходит увеличение нагрузок на печи, а затраты на дополнительно потребляемое топливо в месяц составляют одну треть от затрат на чистку трубного пучка. Таким образом, работы по чистке трубных пучков теплообменных аппаратов полностью окупаются в течение 1 месяца.

6. *Установлено*, что граничное значение  $x_1 = 1.46$  *критерия оценки состояния*, полученное методом минимального риска, обеспечивает минимальную

вероятность пропуска загрязнённого состояния теплообменника  $P_{\text{ПД}}=0.007$  при вероятности ложной тревоги –  $P_{\text{ЛТ}}=0.024$ , что позволяет применить эту величину критерия при высокой стоимости ремонта аппарата.

7. Установлено, что граничное значение  $\chi^2=1.56$ , рассчитанное методом Неймана-Пирсона обеспечивает минимальную вероятность ложной тревоги ( $P_{\text{ЛТ}}=0.003$ ) при вероятности пропуска загрязнённого состояния  $P_{\text{ПД}}=0.012$ , что позволяет применить эту величину критерия при высокой стоимости остановки теплообменника на ремонт.

8. В процессе верификации систем на установках гидроочистки по показаниям системы и анализу отложений *выявлено*, что термическое сопротивление по трубному пространству теплообменников реакторного блока процесса гидроочистки ДТ обусловлено отложениями солей хлорида аммония, а по межтрубному пространству полимерными соединениями и продуктами реакций поликонденсации непредельных компонентов сырья в присутствии кислорода воздуха.

9. С помощью внедрённых систем контроля состояния теплообменников *определены зависимости* скорости реакций коксообразования от начальной температуры сырья и вовлечения в сырьё гидроочистки продуктов вторичных процессов.

Полученные результаты являются хорошим примером использования потенциальных возможностей технологических параметров и имитационных моделей процессов нефтепереработки и нефтехимии, а также оборудования для построения систем контроля состояния сложных технических устройств, зависящих от многих факторов. Дальнейшее направление развития данной тематики можно определить как расширение возможностей контроля состояния теплообменного оборудования других технологических процессов, контроль состояния новых объектов с использованием именно «цифровых» моделей процессов и технических устройств.

Выполненные исследования позволили предложить *новые научно обоснованные технические решения* в виде системы контроля состояния теплообменного оборудования, участвующего в процессах гидроочистки дизельных топлив нефтеперерабатывающих производств на основе режимных параметров и критерия влияния эффективности теплообмена на экономику предприятия, что имеет *существенное значение для развития теории и практики* повышения энергоэффективности предприятий нефтепереработки и нефтехимии.

### **Основные результаты опубликованы в работах:**

#### **Статьи в центральной печати (перечень ВАК)**

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

2. Демин, А. М. Критерии оценки вибросостояния объектов по параметрам характеристической функции сигнала / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. М. Демин // Омский научный вестник. – 2019. – № 4 (166). – С. 97-104.

3. Демин, А. М. Исследование энергоэффективности процесса гидроконверсии на стадии проектирования / Н. А. Тимофеева [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2018. – № 4. – С. 35-39.

4. Демин, А. М. Способы борьбы с отложениями в сырьевых теплообменниках установок гидроочистки дизельных топлив / А. М. Демин [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2015. – № 8. – С. 32-37.

5. Демин, А. М. Параметрическая диагностика теплообменного оборудования / В. С. Маленьких [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2015. – № 5. – С. 35-43.

6. Демин, А. М. Надёжность теплообменного оборудования / С. В. Корнеев, Ю. А. Пиляева, А. М. Демин // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2014. – № 5. – С. 30-32.

7. Демин, А. М. Тестирование сырьевых теплообменников установок гидроочистки дизельных топлив с помощью моделирующих программ / С. В. Корнеев [и др.] // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2013. – № 12. – С. 25-29.

8. Демин, А. М. Повышение эффективности работы теплообменников компрессорного и технологического оборудования / А. М. Демин [и др.] // Вестник СибАДИ. – 2012. – № 3 (25). – С. 18-21

### **Статьи в Scopus**

9. A. M. Demin, A. A. Gorchakova, A. P. Naumenko, and A. I. Odinets Condition monitoring of heat-exchange equipment of the diesel fuel hydrotreatment processes / AIP Conference Proceedings 2141 (2019), 050002; doi:10.1063/1.5122145.

10. A. M. Demin, A. P. Naumenko, O. A. Reutova and A. I. Odinets Economic evaluation of use of heat exchange equipment diagnostic software at diesel hydrotreating unit / Journal of Physics: Conf. Series 1260 (2019), 032009; doi:0.1088/1742-6596/1260/3/032009.

### **Другие публикации**

11. Демин, А. М. Разработка мероприятий по снижению количества отложений в сырьевых теплообменниках установок гидроочистки дизельных топлив / Ю. В. Ковтонюк, А. М. Демин // Материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф. ПАО «Омскнефтехимпроект» (Омск, 27-28 октября 2017 года). – Омск : –2017. – С. 42-44.

12. Демин, А. М. Применение пинч-анализа для увеличения энергоэффективности процессов нефтепереработки / О. А. Реутова, А. М. Демин, А. А. Дюсембаева // Омские научные чтения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. –2017. – С. 1127-1129.

13. Демин, А. М. Разработка программного продукта для пинч-анализа химико-технологических систем / М. И. Бабидорич, А. М. Демин, О. А. Реутова // Омские научные чтения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 869-871.

14. Демин, А. М. Диагностика загрязнений сырьевых теплообменников гидропроцессов с использованием моделирования / А. М. Демин // Материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», М. : РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2018 - С. 374

15. Демин, А. М. Моделирование химико-технологических систем в процессе выполнения пинч-анализа / М. И. Бабидорич, О. А. Реутова, А. М. Демин // Математическое и компьютерное моделирование: сб. материалов VI Междунар. науч. конф. посвящ. памяти Б. А. Рогозина – 2018. – С. 118-120.

16. Демин, А. М. Мониторинг состояния теплообменного оборудования процессов гидроочистки дизельных топлив / А. М. Демин, [и др.] // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 26-28 февраля 2019 года). – Омск : ОмГТУ, 2019. – С. 192.

17. Демин, А. М. Диагностика сырьевых теплообменников установок гидроочистки дизельных топлив с помощью моделирующих программ / А. М. Демин [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 2. – С. 96-103.

18. Демин, А. М. Оценка вероятностных ошибок контроля состояния теплообменного оборудования / А. М. Демин [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т.7, № 2. – С. 95-103.

19. Демин, А.М. Экономия по модели // А.М. Демин, В.С. Маленьких, В.А. Фролов // Сибирская нефть. – 2014. – №10/117. – С.44–47

### **Благодарности**

Автор выражает глубочайшую благодарность первому научному руководителю д.т.н., профессору Корнееву Сергею Васильевичу за чуткое руководство, веру в мои возможности и стимулирование к работе.

Автор выражает искреннюю благодарность второму научному руководителю д.т.н., профессору Науменко Александру Петровичу за обеспечение научного подхода и существенную помощь в подготовке диссертации, а также к.т.н., старшему преподавателю кафедры химической технологии ОмГУ им. Ф.М. Достоевского Горчаковой Алене Анатольевне за поддержку в работе над диссертацией.

Печатается в авторской редакции  
Подписано в печать 11.03.2021 г. Формат 60x84/16.  
Отпечатано на дубликаторе. Усл.печ.л. 1,4.  
Тираж 100 экз. Заказ № 16

---

Типография: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08  
Омский государственный технический университет,  
отдел научной информации