



КОНОВАЛЕНКО Денис Владимирович

**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ КАЧЕСТВА
ПОДГОТОВКИ НЕФТИ К ТРАНСПОРТИРОВКЕ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель доктор технических наук, доцент
Коньгин Сергей Борисович

Официальные оппоненты **Семенов Анатолий Дмитриевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», профессор кафедры
«Информационно-измерительная техника и метрология»

Артюшкин Илья Вячеславович,
кандидат технических наук,
ЗАО «КРОК инкорпорейтед», ведущий
аналитик отдела промышленных решений

Ведущая организация федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (ФБГОУ ВО СПбГУ), г. Санкт-Петербург

Защита состоится 23 ноября 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18 и на сайте диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) <http://d21221707.samgtu.ru>.

Отзывы на автореферат просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет, Главный корпус, Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), тел.: (846) 337-05-45, факс(846) 278-44-00, e-mail.ru: 212.217.07@mail.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.377.04 (Д 212.217.07),
к.т.н., доцент



Екатерина Евгеньевна Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие современной промышленности тесно связано с интеграцией в системы автоматизации и управления технологическими процессами математических моделей. Актуальность данного направления обуславливается возможностью значительного повышения эффективности и экономических показателей производства.

Интеграция математической модели в АСУТП актуальна и для нефтяной промышленности, так как это позволит решить ряд производственных проблем. В частности, подготовка нефти на нефтедобывающих предприятиях сталкивается с проблемой обеспечения давления насыщенных паров и содержания сероводорода H_2S в товарной нефти, отправляемой на транспортировку. Это обусловлено тем, что каждая установка подготовки нефти принимает смесь нефтей, поступающих с большого количества скважин. Объем добычи каждой скважины постоянно изменяется во времени из-за нестабильности нефтеотдачи пласта и периодического выхода из строя добывающего оборудования. С учетом того, что химические составы разрабатываемых пластов различны, состав суммарной нефти, поступающей на подготовку, также постоянно меняется. Поэтому параметры технологического режима работы УПН должны постоянно корректироваться под текущий состав нефти.

Однако в настоящее время эта задача не полностью решена в силу следующих причин:

- 1) анализ нефти производится специализированными лабораториями, создание которых в промысловых условиях затруднено или невозможно;
- 2) проведение анализа нефти требует значительных временных затрат, что исключает возможность оперативного управления технологическим процессом ее подготовки;
- 3) вопрос о выборе параметров технологического режима на основе химического состава нефти решается на уровне проектных институтов, что также исключает возможность оперативного управления технологическим процессом.

Нерешенность этой задачи приводит к двум основным производственным издержкам:

- 1) в случае, когда ДНП нефти и/или содержание H_2S увеличиваются выше нормативных значений, в систему транспорта поступает нефть, не соответствующая стандарту;
- 2) в обратном случае происходят существенные потери углеводородов с попутным нефтяным газом или перерасход химического реагента, используемого для нейтрализации сероводорода.

В диссертации для решения указанной задачи предлагается дооснастить действующую АСУТП УПН дополнительной подсистемой. Она содержит в своем составе адаптивную систему поддержания качества (АСПК), которая с помощью функционально-ориентированной идентифицируемой математической модели (ИММ) прогнозирует качество подготовки нефти и при необходимости

выдает рекомендации лицу, принимающему решения (ЛПР), по корректировке управляющих воздействий.

Степень разработанности темы. Решению вопросов, связанных с обеспечением качества промысловой подготовкой нефти, уделялось большое внимание как крупными научно-исследовательскими и проектными институтами («Гипровостокнефть», «ТатНИПИнефть» и др.), так и отдельными исследователями (Тронов В.П., Лутошкин Г.С., Каспарьянц К.С., Григорян Л.Г., Лесухин С.П., Ибрагимов М.Г., Abdel-Aal, НК., Fozekosh D.I., Gong Z.Q. и др.) Однако направление их работ, в основном, связано с технологическими решениями.

В последнее время появляются работы по совершенствованию автоматизации отдельных процессов, входящих в технологию подготовки нефти, выполняемые как отдельными исследователями (Семенов А.Д., Ицкович Э.Л., Рогачев Г.Н., Якимов В.Н., Shinsky F. G., McMillan G. K., Артюшкин И.В. и др.), так и крупными зарубежными компаниями (Honeywell International Inc., Yokogawa Electric Corporation). Однако вопросы автоматизированного поддержания качества подготовки нефти в целом в настоящий момент практически не разработаны.

Целью является создание автоматизированной адаптивной системы стабилизации качества товарной нефти для установок ее подготовки, позволяющей повысить стабильность показателей качества продукции.

Поставленная цель достигается решением следующих основных **задач**:

- 1) анализ технологического процесса подготовки нефти как объекта управления;
- 2) разработка идентифицируемой, функционально-ориентированной на использование в АСПК, математической модели процесса подготовки нефти, связывающей показатели качества товарной продукции с параметрами добываемой нефти, технологического режима и оборудования установки;
- 3) разработка и опытно-промышленное использование автоматизированной адаптивной системы стабилизации качества подготовки нефти с идентифицируемой функционально-ориентированной математической моделью;

Объектом исследования является технологический процесс промысловой подготовки нефти, а предметом исследования является стабильность качества товарной нефти.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) разработана функционально-ориентированная на использование в АСПК математическая модель процесса подготовки нефти, отличающаяся от известных ориентацией на параметрическую идентификацию по контролируемым косвенным параметрам технологического процесса и эпизодической уточняющей коррекцией по результатам лабораторных анализов;
- 2) разработана новая методика определения химического состава подготавливаемой нефти по косвенным контролируемым параметрам, отличающаяся от известных использованием идентифицируемой

функционально-ориентированной на использование в АСПК математической модели смешения нефтей;

- 3) разработана автоматизированная адаптивная система управления процессом подготовки нефти, отличающаяся наличием в контуре управления по возмущающим воздействиям идентифицируемой функционально-ориентированной математической модели и реализацией контура главной обратной связи по отклонению регулируемой величины командами оператора.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что созданная адаптивная система поддержания качества подготовки нефти к транспортировке:

- 1) обеспечивает непрерывный мониторинг качества подготовки нефти в периодах между его лабораторными анализами;
- 2) снижает риск поступления некондиционной нефти в систему транспорта;
- 3) предотвращает потери углеводородов с попутным нефтяным газом и перерасход реагента на нейтрализацию сероводорода;
- 4) обеспечивает возможность оценки показателей работы сепарационного и теплообменного оборудования установки подготовки нефти.

Методология и методы исследования. При решении поставленных в диссертационной работе задач использовались методы теории автоматического управления, методы математического моделирования, методы численного решения дифференциальных уравнений, методы идентификации и аппроксимации. Численное решение задач осуществлялось на основе методов математического и компьютерного моделирования в программном комплексе «МиР ПиА Процесс».

Положение, выносимые на защиту:

- 1) функционально-ориентированная на использование в АСПК математическая модель процесса подготовки нефти, отличающаяся от известных ориентаций на параметрическую идентификацию по контролируемым косвенным параметрам технологического процесса и эпизодической уточняющей коррекцией по результатам лабораторных анализов;
- 2) методика определения химического состава подготавливаемой нефти по косвенным контролируемым параметрам, отличающаяся от известных использованием идентифицируемой функционально-ориентированной на использование в АСПК математической модели смешения нефтей;
- 3) автоматизированная адаптивная система управления процессом подготовки нефти, отличающаяся наличием в контуре управления по возмущающим воздействиям идентифицируемой функционально-ориентированной математической модели и реализацией контура главной обратной связи по отклонению регулируемой величины командами оператора.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата и соответствием результатов фундаментальным физическим закономерностям, а также подтверждается результатами опытно-промышленного использования.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждались на Международной конференции «Ашировские чтения» (Туапсе, 2019), на Международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2020), Международной научно-практической конференции «EurasiaScience» (Москва, 2020).

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.»

Реализация научных исследований. Полученные в работе результаты использованы при моделировании действующих установок подготовки нефти АО «Самаранефтегаз», внедрены для обеспечения стабильности качества продукции на опытной установке ООО НПФ «Изомер», внедрены при проектировании установки подготовки нефти в ООО «ЭКО-технологии плюс», внедрены в программу повышения квалификации специалистов нефтегазового производства ЧОУ ДПО «МИПО», внедрены в учебный процесс по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 12.04.01 «Приборостроение» в ФГБОУ ВО «СамГТУ».

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 печатных публикациях (общий объем 50 стр.), 4 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 1 – в журнале, индексируемом зарубежной базой Scopus, 4 – в трудах конференций.

Личный вклад автора. В работах [1, 5, 7-9], опубликованных в соавторстве, автору принадлежат схема АСПК, математическая модель процесса подготовки нефти, результаты моделирования. В работе [3] автору принадлежит методика тестирования данных по теплофизическим свойствам веществ. В работе [4] автору принадлежит методика идентификации величины термических загрязнений теплообменного оборудования. В работе [6] автору принадлежит модель смешения нефтей. Работа [2] написана единолично.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 139 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 12 таблиц, список литературы из 103 наименований и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу современного состояния проблемы повышения стабильности качества подготовки нефти к транспортировке.

Вторая глава посвящена построению АСПК для установок подготовки нефти. Типовая схема процесса подготовки нефти представленная на рисунке 1.

В этой установке сырая нефть, поступающая со скважин, проходит три ступени сепарации С1, С2, С3, на которых последовательно снижается давление. На каждой следующей ступени остаточное газосодержание нефти уменьшается, что приводит к снижению ее ДНП и содержания H_2S в ней. Для достижения

нормативного значения ДНП (500 мм.рт.ст.) перед концевой ступенью сепарации предусмотрен нагрев нефти. Доведение остаточного содержания H_2S до нормативных требований осуществляется с помощью химического реагента (например, щелочи).

Управляющими параметрами, обеспечивающими качество подготовки нефти, являются:

$T_{печь}$ – температура теплоносителя на выходе из печи;

$G_{реаг}$ – расход реагента, поступающего на нейтрализацию H_2S .

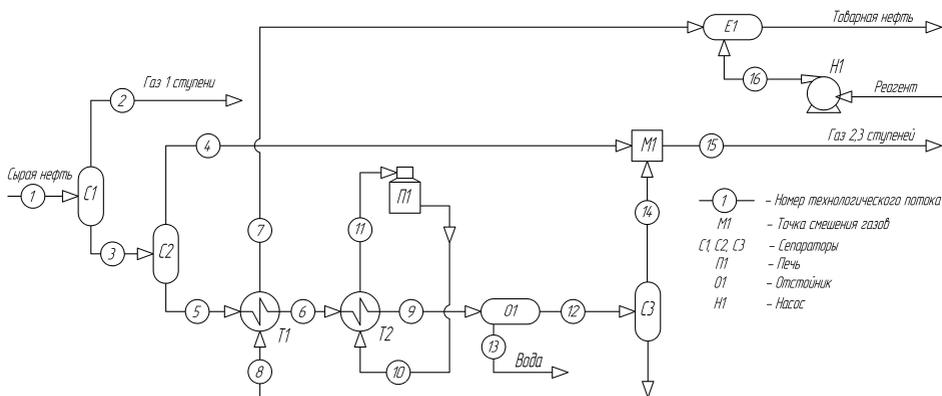


Рисунок 1 – Схема технологического процесса подготовки нефти.

Важной проблемой управления процессом подготовки нефти является невозможность построения АСУТП замкнутого типа по отклонению показателей качества от нормативных значений. Это объясняется тем, что из-за отсутствия датчиков показателей качества нефти последние определяются в лабораторных условиях, что занимает существенное время.

Поэтому функционирование большинства АСУТП на УПН заключается только в поддержании фиксированных значений управляющих параметров $T_{печь}$ и $G_{реаг}$ безотносительно к качеству товарной нефти (рисунок 2).

Однако из-за наличия возмущающих воздействий (изменения расходов добываемой нефти, смена погодных условий и т.д.) этот подход приводит к появлению брака.

Для решения этой проблемы в диссертации предлагается ввести в АСУТП дополнительный контур управления по возмущающим воздействиям (рисунок 3). Реализация дополнительного контура возможна в силу того, что часть возмущающих воздействий (расходы добываемой нефти Q_{Ng}) являются контролируруемыми в системе сбора нефти, а часть (погодные условия, состояние оборудования) могут быть идентифицированы с помощью исходной АСУТП.

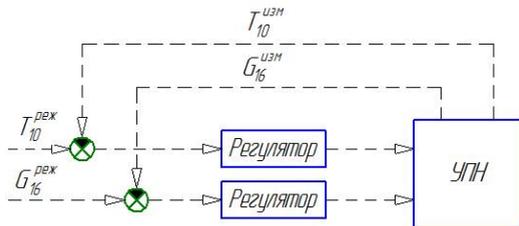


Рисунок 2 – Схема работы АСУТП на УПН.

Дополнительный контур содержит в своем составе АСПК, в которой на основании данных о возмущающих воздействиях прогнозирует качество подготовки нефти, и которая при необходимости выдает лицу, принимающему решения (ЛПР), рекомендации по корректировке управляющих воздействий.

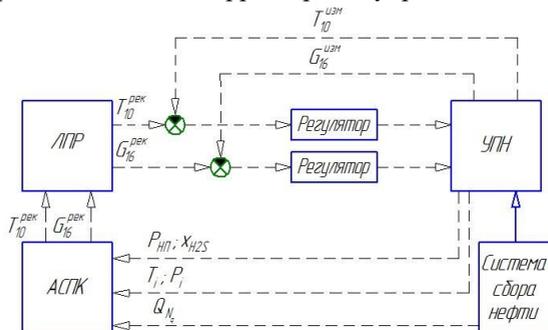


Рисунок 3 – Схема АСУТП, дооснащенная контуром управления по возмущающим воздействиям.

Работа АСПК базируется на функционально-ориентированной идентифицируемой математической модели (ИММ) технологического процесса, которая адекватно отражает технологический процесс подготовки нефти, включая:

- составы и свойства всех материальных потоков;
- параметры технологического режима;
- параметры реального оборудования.

Схема разработанной в диссертации АСПК, оснащенной ИММ, представлена на рисунке 4. Данные о расходах добываемой нефти Q_q с групповых замерных установок (ГЗУ) поступают в модуль смешения нефтей ИММ. На их основании рассчитывается мольный расход $G_{сум}^{расч}$ и состав $\bar{x}_{сум}^{расч}$ поступающей на подготовку суммарной нефти, которые передаются в расчетный модуль технологического процесса ИММ. В него же поступают данные о текущих значениях параметров технологического режима ($P_2, T_3, G_2, P_4, T_5, G_4, P_{14}, T_8, G_{14}, T_6, T_7, T_9, T_{11}$). На их основе прогнозируются показатели качества готовой продукции: давление насыщенных паров $P_{нт}^{расч}$ и содержание сероводорода $x_{H2S}^{расч}$.

Эти данные поступают в режимный модуль ИММ для сравнения с нормативными значениями $P_{нт}^{норм}$ и $x_{H_2S}^{норм}$. В случае их отклонения определяются новые значения управляющих параметров: температуры теплоносителя на выходе из печи $T_{печь}^{рек}$ и расхода реагента для нейтрализации сероводорода $G_{реаг}^{рек}$. В этом же модуле определяются времена внесения изменений в режим работы установки $t_{печь}^{рек}$ и $t_{реаг}^{рек}$. В конечном итоге вся информация передается персоналу УПН, который принимает решение и вносит необходимые изменения в технологический процесс с помощью действующей системы АСУТП.

При периодическом появлении новых результатов лабораторных анализов качества товарной нефти $P_{нт}$ и x_{H_2S} и их отклонения от расчетных значений модули идентификации осуществляют корректировку поправочных коэффициентов $\gamma_{C_1-C_4}$ и γ_{H_2S} (рисунок 4).

Третья глава посвящена разработке математического и программного обеспечения АСПК. Особенностью модуля смешения нефтей ИММ является то, что он отражает различное удаление нефтедобывающих скважин от УПН и смешение в трубопроводах системы сбора потоков добытой жидкости в различных сочетаниях. В этой связи для прогнозирования состава и расхода суммарной сырой нефти необходимо учитывать запаздывание $\tau_{сбор}$, зависящее от скорости движения жидкости по трубопроводам.

Для анализа система сбора нефти представляется в виде бинарного дерева, т.е. предполагается, что в каждый трубопровод нефть поступает из двух предыдущих трубопроводов (рисунок 5). В этом случае расчет процесса смешения для системы сбора в целом может быть сведен к рекурсивному расчету смешения потоков в элементе, представленном на рисунке 6.

Для расчетного элемента объемный расход жидкости на выходе определяется выражением

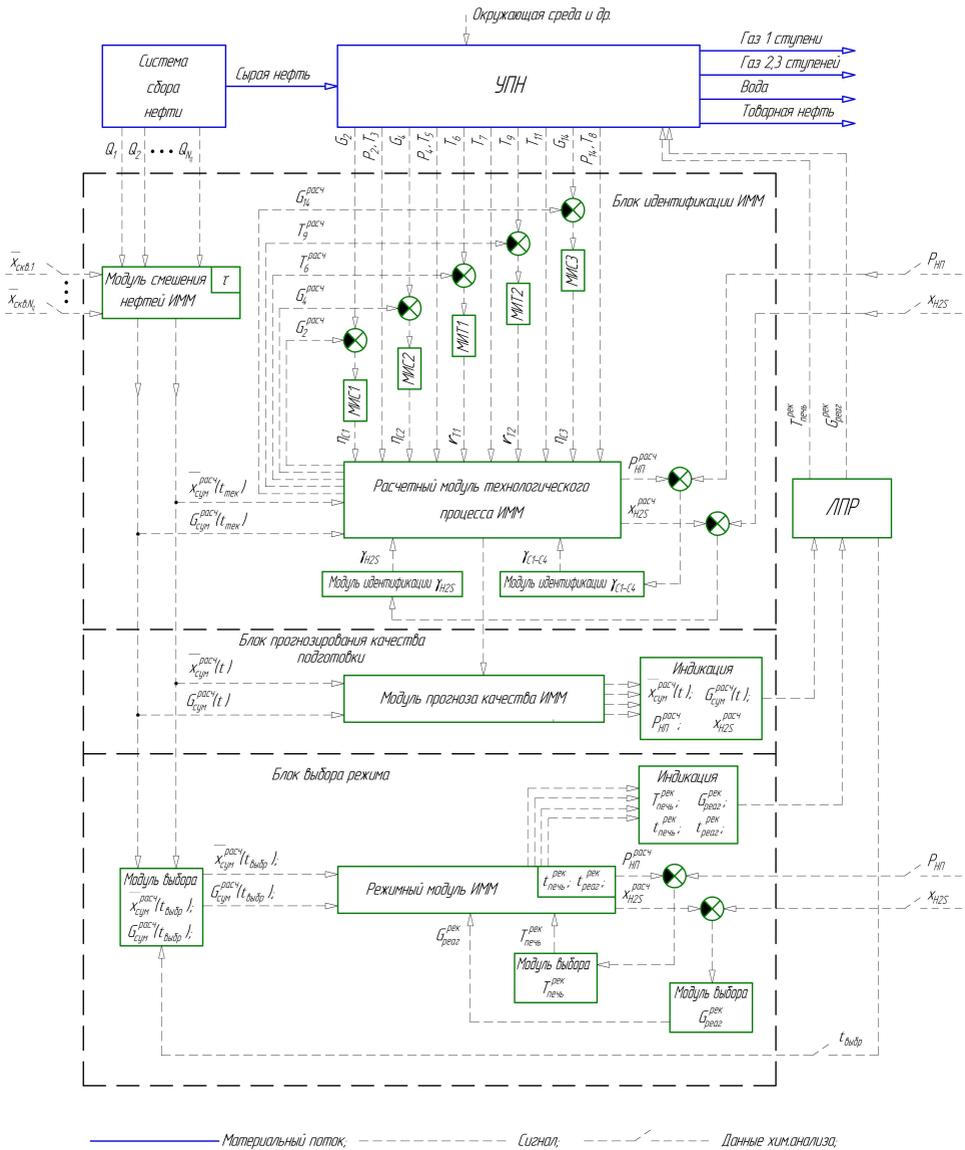
$$Q_{mp}(t) = Q_{mp1}(t) + Q_{mp2}(t). \quad (1)$$

Время запаздывания $\tau_{сбор}$, затрачиваемое на прохождение жидкости по трубопроводу, определяется из интегрального уравнения, описывающего процесс заполнения трубопровода объемом V_{mp}

$$V_{mp} = \int_{t-\tau_{сбор}}^t [Q_{mp1}(t) + Q_{mp2}(t)] dt. \quad (2)$$

Вычисленное из формулы (2) время $\tau_{сбор}$ запаздывания (для каждого трубопровода свое), используется при определении состава потока, выходящего из трубопровода в момент времени t

$$\bar{x}_{mp}(t) = \frac{Q_{mp1}(t - \tau_{сбор}) \bar{x}_{mp1}(t - \tau_{сбор}) + Q_{mp2}(t - \tau_{сбор}) \bar{x}_{mp2}(t - \tau_{сбор})}{Q_{mp1}(t - \tau_{сбор}) + Q_{mp2}(t - \tau_{сбор})}. \quad (3)$$



$t_{тек}$ – текущий момент времени; $t_{выбр}$ – выбранный ЛПР момент времени;
 МИС1, МИС2, МИС3 – модули идентификации параметров сепараторов С1, С2, С;
 МИТ1, МИТ2 – модули идентификации параметров теплообменников Т1, Т2

Рисунок 4 – Схема АСПК промышленной подготовки нефти, оснащенной ИММ.

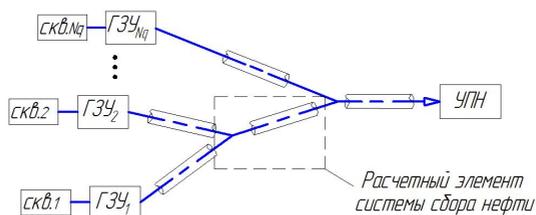


Рисунок 5 – Расчетная схема бинарного дерева системы сбора нефти.

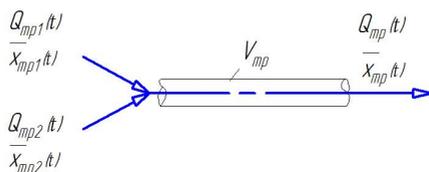


Рисунок 6 – Расчетный элемент системы сбора нефти.

Для трубопроводов, в которых не происходит смешение, а поступает нефть со скважины, для расчета принимается $Q_{mp2}(t) = 0$. Суммарные расход и состав сырой нефти будут равны расходу и составу потока, выходящего из корневого трубопровода. Так как расходы входящих потоков нефти $Q_{mp1}(t)$ и $Q_{mp2}(t)$ являются положительными величинами, то уравнение (2) имеет единственное решение.

Функционально-ориентированная ИММ технологического процесса связывает показатели качества товарной нефти с параметрами исходного сырья и режима работы технологического оборудования

$$P_{ин}^{расч} = P_{ин}^{расч} \left(G_{сум}^{расч}, \bar{x}_{сум}^{расч}, P_2, T_3, G_2, P_4, T_5, G_4, P_{14}, T_8, G_{14}, T_6, T_7, T_9, T_{11} \right), \quad (4)$$

$$x_{H2S}^{расч} = x_{H2S}^{расч} \left(G_{сум}^{расч}, \bar{x}_{сум}^{расч}, P_2, T_3, G_2, P_4, T_5, G_4, P_{14}, T_8, G_{14}, T_6, T_7, T_9, T_{11} \right). \quad (5)$$

Она базируется на расчете материальных и тепловых балансов, фазовых равновесий и процессов теплопередачи. Общая модель технологического процесса включает модели всех аппаратов, участвующих в нем.

Математическая модель сепаратора определяет расходы G_m , G_n и составы \bar{x}_m , \bar{x}_n выходящих из него газа и жидкости в зависимости от условий в нем

$$G_k = G_m + G_n; \quad (6)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj} + G_n \cdot x_{nj}; \quad (7)$$

$$G_k \cdot H_k = G_m \cdot H_m(T_m, P_m) + G_n \cdot H_n(T_n, P_n); \quad (8)$$

$$G_m = e_i \cdot G_k; \quad (9)$$

$$G_n = (1 - e_i) \cdot G_k; \quad (10)$$

$$\frac{x_{mj}}{x_{nj}} = \gamma_j \eta_i \cdot \frac{f_{nj}(T_n, P_n)}{f_{mj}(T_m, P_m)}, \quad (11)$$

$$\sum_j \frac{x_{kj}}{1 + e_i \cdot (k_j - 1)} = 1; \quad K_j = \gamma_j \eta_i \cdot \frac{f_{nj}(T_n, P_n)}{f_{mj}(T_m, P_m)}, \quad (12)$$

где H_k, H_m, H_n – энтальпии потоков; e_i – мольная доля газа; f_{nj}, f_{mj} – фугитивности веществ; η_i – испарительный КПД; γ_j – поправочные коэффициенты; i – номер аппарата; j – номер вещества; k, m, n – номера потоков (рисунок 1).

Например, для сепаратора С1: $i=1, k=1, m=2, n=3$, для сепаратора С2: $i=2, k=3, m=4, n=5$, для сепаратора С3: $i=3, k=12, m=14, n=8$.

Математическая модель теплообменника связывает температуры T_m, T_u выходных потоков с тепловой нагрузкой W аппарата

$$G_k = G_m; \quad (13)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj}; \quad (14)$$

$$G_k \cdot H_k(T_k, P_k) + W_i = G_m \cdot H_m(T_m, P_m); \quad (15)$$

$$G_n = G_u; \quad (16)$$

$$G_n \cdot H_n(T_n, P_n) - W_i = G_u \cdot H_u(T_u, P_u); \quad (17)$$

$$G_n \cdot x_{nj} = G_u \cdot x_{uj}; \quad (18)$$

$$W_i = U_i(r_i) \cdot F_i \cdot \Delta T_i, \quad (19)$$

где U – коэффициент теплопередачи; r – термическое сопротивление загрязнений; F – поверхность теплообмена; ΔT – средняя разность температур; i – номер аппарата (см. ниже); k, m, n, u – номера потоков (см. ниже и рисунок 1).

Например, для теплообменника Т1: $i=1, k=6, m=5, n=7, u=8$, для теплообменника Т2: $i=2, k=6, m=9, n=10, u=11$.

Математическая модель отстойника определяет расходы и составы выходящих из него жидкостей

$$G_n = G_k \cdot x_{k\beta}; \quad (20)$$

$$G_m = G_k - G_n; \quad (21)$$

$$x_{nj} = \begin{cases} 1, & \text{при } j = \beta; \\ 0, & \text{при } j \neq \beta; \end{cases} \quad (22)$$

$$x_{mj} = \begin{cases} x_{kj} \cdot G_k, & \text{при } j \neq \beta; \\ 0, & \text{при } j = \beta; \end{cases} \quad (23)$$

$$G_m \cdot H_m(T_m, P_m) = G_k \cdot H_k(T_k, P_k) - G_n \cdot H_n(T_n, P_n), \quad (24)$$

где β – номер вещества H_2O . Например, для отстойника O1: $k=9, m=12, n=13$ (рисунок 1).

Математическая модель точки смешения определяет расход и состав суммарного газа

$$G_k = G_m + G_n; \quad (25)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj} + G_n \cdot x_{nj}; \quad (26)$$

$$G_k \cdot H_k(T_k, P_k) = G_m \cdot H_m(T_m, P_m) + G_n \cdot H_n(T_n, P_n); \quad (27)$$

Например, для точки смешения M: $k=15, m=4, n=14$ (рисунок 1).

Математическая модель печи связывает параметры входного и выходного потоков теплоносителя и тепловую мощность

$$G_k = G_m; \quad (28)$$

$$G_k \cdot x_{kj} = G_m \cdot x_{mj}; \quad (29)$$

$$x_{mj} = \begin{cases} 1, & \text{при } j = \beta; \\ 0, & \text{при } j \neq \beta; \end{cases} \quad (30)$$

$$W_i = G_k \cdot H_k(T_k, P_k) - G_m \cdot H_m(T_m, P_m); \quad (31)$$

Например, для печи П1: $i=1, k=10, m=11$ (рисунок 1).

Математическая модель емкости нейтрализации определяет необходимый расход реагента для очистки от сероводорода

$$G_n = \psi_i G_k \cdot x_{k\xi}, \quad (32)$$

где ψ – удельный расход реагента;

ξ – номер вещества H_2S .

Для емкости нейтрализации E1: $i=1, k=7, n=16$ (рисунок 1).

В основу расчета фазовых равновесий и теплофизических свойств материальных потоков положено кубическое уравнение состояния Пенга-Робинсона. Согласно этому уравнению зависимости фугитивностей и энтальпий от температуры определяются выражениями

$$\ln f_j(T, P) = \frac{B_j}{B} (Z - 1) - \ln(Z - B) + \frac{A}{4,828B} \left[\frac{B_j}{B} - \frac{2 \sum_{k=1}^N x_j (a\alpha_{jk})^{0,5}}{a\alpha} \right] \ln \frac{Z + 2,414B}{Z - 0,414B}, \quad (33)$$

$$H(T, P) = H_{uo}(T) + RT \left[1 - Z + \frac{A}{2,828B} \left(1 + \frac{D}{\alpha\alpha} \right) \ln \frac{Z + 2,414B}{Z - 0,414B} \right]. \quad (34)$$

В уравнениях (33) – (34) параметры $\alpha\alpha$, A , B , D определяются через температуры, давления и критические свойства веществ по известным формулам. Сжимаемость фаз Z рассчитывается путем решения кубического уравнения

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0. \quad (35)$$

Зависимость энтальпии идеального газа $H_{uo}(T)$ от температуры представляет собой аппроксимацию экспериментальных данных для химических веществ.

В силу сложности моделируемого процесса и многокомпонентности фаз, получение аналитического решения уравнений (6) – (35) затруднительно. Для численного решения используется специализированный программный продукт «МиР ПиА Процесс». Он позволяет проводить численное моделирование технологических процессов и аппаратов в различных отраслях промышленности.

Для корректного прогнозирования показателей качества готовой продукции параметры математической модели (6) – (35) необходимо идентифицировать в режиме реального времени по данным о текущем режиме работы технологического оборудования.

Для идентификации моделей каждого из сепараторов С1, С2, С3 (модули МИС1 – МИС3 на рисунках 2 и 3) используются измеренные данные о температуре T_3 , T_5 , T_8 , давлении P_2 , P_4 , P_{14} и расходе газа на выходе G_2 , G_4 , G_{14} . При этом значения температур T_3 , T_5 , T_8 и давлений P_2 , P_4 , P_{14} напрямую вносятся в математическую модель (6) – (35). Затем определяется значение испарительного КПД ступени сепарации η_i , при котором расчетный расход газа $G_m^{расч}$ равен измеренному G_m . Это равенство обеспечивается за счет изменения констант фазового равновесия K_j на величину испарительного КПД

$$K_j = \gamma_j \eta_i \frac{f_{nj}}{f_{mj}}. \quad (35)$$

Типовая зависимость расчетного расхода газа от величины КПД приведена на рисунке 7а. Монотонный характер этой зависимости позволяет найти единственное решение задачи (6) – (12) для параметрической идентификации модели сепаратора.

Аналогично проводится параметрическая идентификация модели (13) – (19) теплообменников (модули МИТ1 – МИТ2, рисунок 3). При этом для каждого из них используются измеренные значения температур выходных потоков. Здесь варьируемой величиной выступает коэффициент термических сопротивлений загрязнений r , влияющий на общий коэффициент теплопередачи аппарата. Величина коэффициента r находится из условия равенства расчетной выходной температуры потока реальному значению.

Типовая зависимость выходной температуры от коэффициента r также носит монотонный характер (рисунок 7б), что позволяет найти единственное решение задачи (13) – (19).

Для апробации методики параметрической идентификации модели теплообменного оборудования исследовался процесс загрязнения теплообменного оборудования в действующей системе двухконтурного водоснабжения. Установлено, что величина термического сопротивления загрязнений может быть использована в качестве идентифицируемого параметра r модели теплообменного оборудования (13) – (19).

Результатом решения уравнений (6) – (35) являются значения показателей качества товарных потоков. Эти данные поступают в блок выбора режима для сравнения с нормативными значениями (рисунок 3). В случае отклонения вычисленных значений от нормативных режимный модуль ИММ определяет температуру теплоносителя на выходе из печи $T_{печь}^{рек}$ и расход реагента для нейтрализации сероводорода $G_{реаг}^{рек}$. Эта задача имеет единственное решение и не требует применения многомерных методов поиска, так как $P_{ин}^{расч}$ зависит только от $T_{печь}^{рек}$, а $G_{реаг}^{рек}$ рассчитывается, исходя из остаточного содержания сероводорода при температуре $T_{печь}^{рек}$.

Поэтому в первую очередь определяется температура $T_{печь}$ теплоносителя на выходе из печи, обеспечивающая требуемое значение давления насыщенных паров $P_{ин}^{норм}$. Решение этой обратной задачи осуществляется в режимном модуле ИММ методом многократного решения прямой задачи (6) – (35).

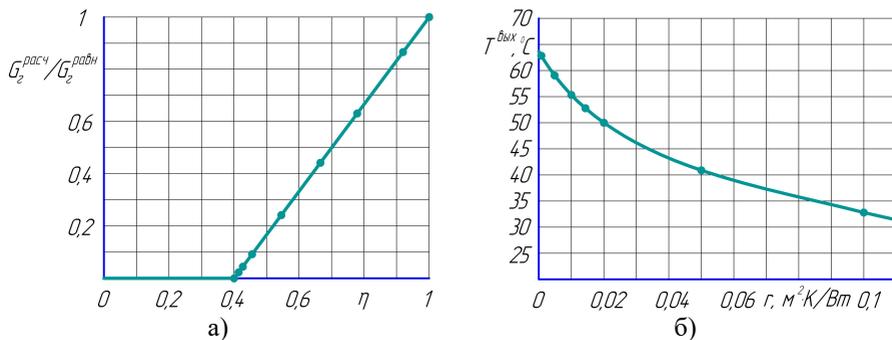


Рисунок 7 – Типовые зависимости, получаемые и используемые в ходе идентификации моделей сепаратора (а) и теплообменника (б).

На рисунке 8 показан типовой график зависимости давления насыщенных паров от температуры теплоносителя. Монотонный характер представленной зависимости позволяет легко определить $T_{печь}$, например методом половинного деления.

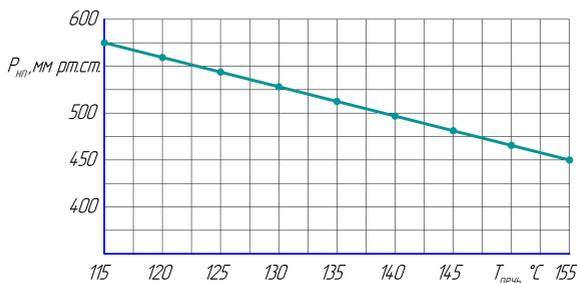


Рисунок 8 – Зависимость давления насыщенных паров от температуры теплоносителя.

После определения температуры теплоносителя $T_{печь}^{рек}$ рассчитывается количество реагента необходимого для нейтрализации сероводорода $G_{реаг}^{рек}$ по формуле (31).

Представленная выше математическая модель (6) – (35) описывает стационарный режим работы УПН, хотя корректировки технологического режима вносятся в разных точках технологической схемы. Время их внесения определяется с учетом транспортного запаздывания. Это время определяется на основе модели идеального вытеснения и индивидуально для каждой конкретной УПН. На рисунке 10 показаны типовые временные диаграммы изменения потоков УПН и транспортных задержек управляющих воздействий. Эти временные диаграммы относятся к простейшему случаю скачкообразного изменения состава $\bar{x}_{СУМ}^{расч}$ исходной нефти (график а). При этом изменение давления насыщенных паров товарной нефти $P_{нп}$ и содержания сероводорода x_{H_2S} в ней происходит синхронно в конце цикла подготовки (графики б и в). График г отражает время внесения корректировки расхода реагента $t_{реаг}^{рек}$. Изменение температуры нагрева нефти $T_{печь}$ осуществляется с учетом инерции контура нагрева (график д).

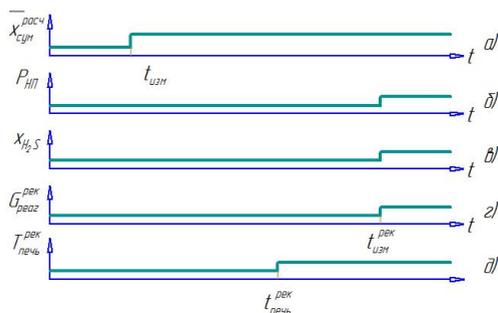


Рисунок 9 – Временные диаграммы изменения потоков УПН и транспортных задержек управляющих воздействий.

Если, инерционность подачи реагента в модели (6) – (35) не учитывается, то изменение расхода реагента происходит в момент поступления потока новой нефти в емкость Е1. Однако в силу инерционности контура нагрева теплоносителя регулировка режимов работы печи должна происходить заблаговременно. Для определения времени упреждения используется эмпирическая формула, предполагающая изменение во времени температуры потока 9, выходящего из теплообменника Т2, как реакцию аperiodического звена с запаздыванием (рисунок 10)

$$T_9(t) = T_9^{кон} - (T_9^{кон} - T_9^{нач}) \exp\left(-\frac{t - t_{печь}^{рек}}{\tau_{цирк}}\right), \quad (36)$$

где $T_9^{нач}$, $T_9^{кон}$ – начальное и конечное значение температуры, соответствующие старому и новому технологическому режиму;

$\tau_{цирк}$ – постоянная времени контура циркуляции теплоносителя, определяемая экспериментально для конкретной УПН

Тогда время упреждения $\tau_{печь}$ для печи (при допустимом отклонении температуры на 0,1 °С)

$$\tau_{печь} = \tau_{цирк} \ln \frac{T_9^{кон} - T_9^{нач}}{0,1}. \quad (37)$$

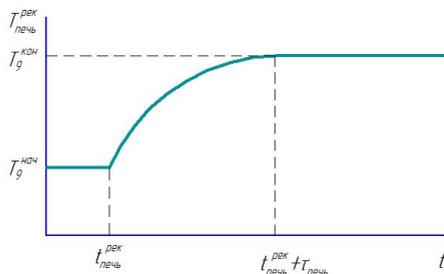


Рисунок 10 – График переходного процесса в теплообменнике Т2.

Внедрение АСПК не исключает необходимости периодического проведения лабораторных анализов для уточнения параметров γ_j математической модели (6) – (35). Необходимость проведения периодической корректировки обусловлена тем, что в ходе эксплуатации меняются параметры технологического оборудования, что влияет на интенсивность испарения отдельных веществ. В случае отклонения расчетного давления $P_{ин}^{расч}$ от действительного $P_{ин}$ проводится корректировка значения $\gamma_{C_1-C_4}$ для легких компонентов от метана (C_1) до бутана (C_4) включительно. В случае отклонения расчетного содержания сероводорода $x_{H_2S}^{расч}$ от действительного x_{H_2S} проводится корректировка значения γ_{H_2S} для сероводорода. Решение этих обратных задач проводится

аналогично решению обратной задачи по определению температуры теплоносителя на выходе из печи.

В четвертой главе рассмотрен пример применения АСПК для одного из типовых случаев, изучаемых в процессе обучения специалистов по подготовке нефти. В этом случае установка осуществляет подготовку нефти с трех нефтяных пластов, существенно различающихся по содержанию сероводорода.

Смесь добытых нефтей поступает на установку подготовки с целью доведения параметров до товарных значений: ДНП – 66 кПа, содержание H_2S – до 20 ppm. На рисунке 11 представлена типичная ситуация, когда добыча одного из пластов (наиболее сернистого) временно прекращается из-за остановки скважины на ремонт.

Реализованная в программном продукте «МиР ПиА Процесс» расчетная модель УПН позволяет определить показатели качества подготовленной нефти в условиях динамически меняющегося состава сырья. В результате моделирования установлено, что предложенная схема подготовки нефти обеспечивает поддержание ДНП на достаточно стабильном уровне даже при постоянном температурном режиме на концевой ступени сепарации. Таким образом, в данном случае корректировка технологического режима по температуре не требуется

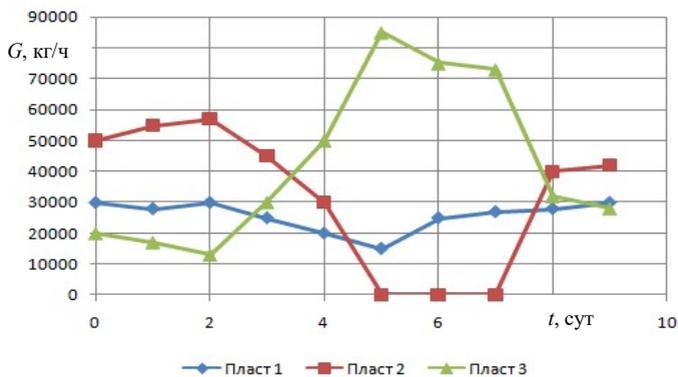


Рисунок 11 – Зависимость расходов нефти с различных пластов, поступающих на УПН, от времени.

Существенно более сложной является проблема очистки от сероводорода. Его количество в исходной смеси постоянно меняется вследствие смешения высокосернистых и малосернистых нефтей. Поэтому непрерывно меняется его остаточное содержание в разгазированной нефти и получаемом после сжатия газа газовом конденсате. Пример динамики изменения содержания сероводорода представлена на рисунке 12.

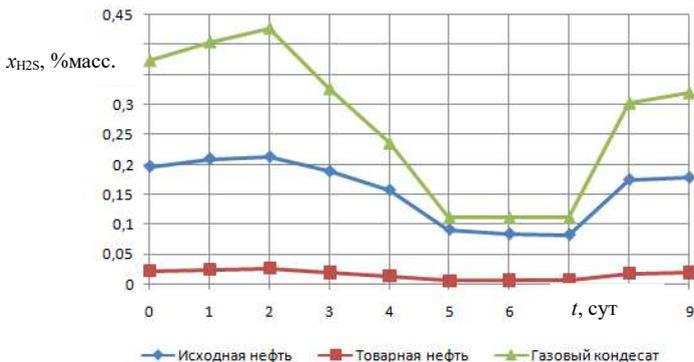


Рисунок 12 – Зависимость содержания сероводорода в потоках УПН от времени.

Соответствующее изменение расхода химического реагента для нейтрализации демонстрирует рисунок 13. На нем видны зоны, исключающие проскок некондиционной нефти, и перерасхода реагента.

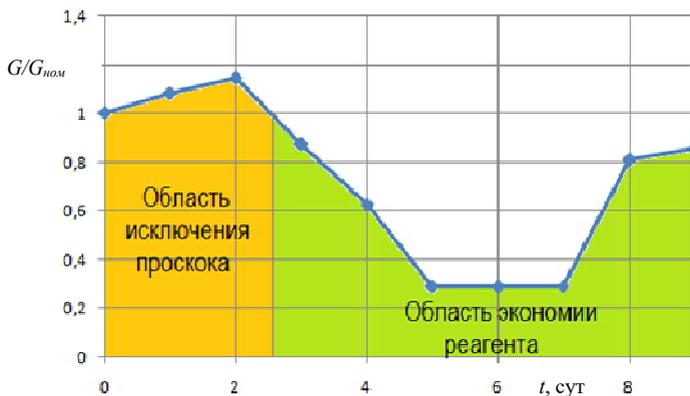


Рисунок 13 – Зависимость расхода щелочи, подаваемой для нейтрализации сероводорода, от времени.

Из рассмотрения рисунков 12 и 13 видно, что в описанном учебном случае АСПК предотвратила проскок 6540 тонн некондиционной нефти в течении 63 часов, а также позволила сэкономить 45% реагента за 153 часа.

Погрешностей измерения влияют на качество прогнозирования показателей качества товарной нефти с помощью ИММ.

Для исследования влияния этих погрешностей на качество прогноза было принято, что погрешность замерных установок, регламентируемая ГОСТ Р 8.615-2005, равна 2,5%, погрешность газовых расходомеров равна 1%, а погрешность измерения температуры равна 2,5 °С. Установлено, что для повышения точности

прогноза достаточно повышать точность измерения температуры и расхода газа на концевой ступени сепарации установки подготовки нефти.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ технологического процесса подготовки нефти как объекта управления. В качестве управляющих параметров, обеспечивающих качество подготовки нефти, выбраны температура теплоносителя на выходе из печи и расход реагента, поступающего на нейтрализацию сероводорода.

2. Разработана идентифицируемая, функционально-ориентированная на использование в АСПК, математическая модель процесса подготовки нефти, связывающая показатели качества товарной продукции с характеристиками добываемой нефти, параметрами технологического режима и оборудования с учетом транспортного запаздывания, обусловленного движением потоков в системе сбора нефти, по трубопроводам и аппаратам установки подготовки нефти.

3. Разработана АСПК подготовки нефти с идентифицируемой функционально-ориентированной математической моделью в контуре.

4. Разработанная АСПК эффективна и удовлетворяет заданным требованиям. В рассмотренном типовом примере АСПК предотвратила пропуск 6540 тонн некондиционной нефти в течение 63 часов, а также позволила сэкономить 45% реагента за 153 часа.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛАХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК РОССИИ

1. Кобыгин, С.Б. Автоматизированная система поддержания качества подготовки нефти с идентифицируемой моделью / С.Б. Кобыгин, Д.В. Коноваленко, Д.А. Крючков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки, 2020. – №4(28). – с.32-49.
2. Коноваленко, Д.В. Система поддержки принятия решений при подготовке нефти с использованием цифрового двойника технологической установки / Д.В. Коноваленко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2020 – №1(28). – с.23-30.
3. Кобыгин, С.Б. Система автоматизированного тестирования базы данных по теплофизическим свойствам веществ / С.Б. Кобыгин, Д.В. Коноваленко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки, 2018. – №1(57). – с.177-180.
4. Иваняков, С.В. Моделирование работы пластинчатых теплообменников в системе двухконтурного водоснабжения / Ю.И. Игнатенков, Д.В. Коноваленко // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки, 2017. – №2(54). – с.196-199.

СТАТЬИ В ИЗДАНИЯХ, ИНДЕКСИРОВАННЫХ В SCOPUS

5. S B Konygin. Estimating the effect of instrument accuracy on the accuracy of mathematical modeling of quality indicators of oil treatment for transportation/ S B Konygin, D V Konovalenko, D A Kryuchkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. Volume 862, Issue 3. – Pp. 32068.

ПУБЛИКАЦИИ В ДРУГИХ ЖУРНАЛАХ И СБОРНИКАХ НАУЧНЫХ ТРУДОВ

6. Коноваленко, Д.В. Модель смешение нефти с учетом транспортной задержкой / Д.В. Коноваленко, С.Б. Кобыгин // Сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». – Казань, 2020. – с.93-95.
7. Коноваленко, Д.В. Система поддержания качества подготовки нефти с использованием математической модели в системе управления / Д.В. Коноваленко, С.Б. Кобыгин // Сборник статей XXX международной научно-практической конференции «EurasiaScience». – Москва: «Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2020. – с.60-62.
8. Кобыгин, С.Б. Использование программного комплекса «Мир ПиА» для моделирования работы установки стабилизации нефти / С.Б. Кобыгин, Д.В. Коноваленко // Сборник трудов конференции «Ашировские чтения», Туапсе, 2019. – т.1. – №1 (11). – с.348-349.
9. Кобыгин, С.Б. Использование программного комплекса «Мир ПиА» для моделирования работа установки низкотемпературной конденсации / С.Б. Кобыгин, Д.В. Коноваленко // Сборник трудов конференции «Ашировские чтения», Туапсе, 2019. – т.1. – №1 (11). – с.360-362.

Формат 60x84 1/16. Уч.изд.л. 1,0. Тираж 60 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, корпус 8.

e-mail: polygraph@samgtu.ru.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

(протокол №3 от 20.09.2021 г.)