

Применение адаптивного регулирования для повышения качества поточного смешения нефти

Я.А. Десятов, В.М. Спасибов

Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация: В статье рассмотрены методы смешения дорогостоящей лёгкой нефти с тяжёлой для получения нефтяных смесей, соответствующих по своим свойствам потребностям заказчика. Представлена структурная схема поточного смешения сернистой и малосернистой нефти посредством автоматического управления насосными агрегатами, закачивающих нефти в магистральный нефтепровод, посредством адаптивного ПИД-регулятора с контролем поточным анализатором параметров входных нефтей.

Ключевые слова: нефть, транспортировка, смешение, контроль, адаптивный регулятор.

Введение

Нефтегазовые компании, занимающиеся добычей нефти, осуществляют обработку скважинной продукции, получаемой из углеводородного пласта, для отделения механических примесей, обезвоживания и обессоливания, отбора попутного нефтяного газа и доведения характеристик продукции до уровня качества, соответствующего стандартам товарной нефти. На мировой арене торговли нефтью осуществляется присвоение сорта нефти, где основным фактором является плотность и процент содержание серы. Россия представляет широкий спектр марок нефти, который приведен в таблице №1, с основными характеристиками.

Таблица № 1

Марки нефти

Сорт	Содержание серы, %	Плотность, кг/м ³	Основной регион
Urals	1,3	0,86–0,87	Смесь Siberian с Приволжской
Siberian	0,6	0,84–0,85	ХМАО, ЯНАО
Article Oil	2,3	0,91	Персидский залив
Sokol	0,23	0,84	Сахалин–1
Vityaz	0,18	0,82	Сахалин–2

В соответствии с ГОСТ Р 51858–2002 «Нефть. Общие технические условия», нефть имеет в обозначении разделение на классы, типы, группы и виды. Главным потребителем нефти являются нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), конструкция которых, используемые материалы и технологические процессы перегонки нефти запроектированы на строго определенные виды сырой нефти, присущих, как правило, месторождениям конкретного региона, где учтено количество сернистых соединений. Сера присутствует в сырой нефти в виде сероводорода и полисульфидов. Эти серосодержащие молекулы частично разлагаются при перегонке. При этом, сероводород выделяется. Сера и другие кислые компоненты, содержащиеся в сырой нефти, такие как нафтеновые кислоты, обладают высокой коррозионной активностью.

В ходе разработки нефтегазовых месторождений, переходе на новые углеводородные пласты, а также при освоении месторождений на более высоких широтах происходит изменение химического состава и физических свойств нефти. К товарной нефти отсутствует требование на процентное содержание количества серы, что не позволяет многим НПЗ принять в переработку нефть с разных месторождений без её предварительной подготовки, доведения характеристик нефти до требуемых НПЗ параметров. [1].

Основным транспортом нефти на НПЗ являются трубопроводы. Нефтепроводы включают в себя нефтеперекачивающие станции (НПС), в том числе, головные, где выполняется контроль качества нефти и разделение на потоки. Повышение процентного содержания серы в нефти приводит к увеличению ее плотности и вязкости. Высокосернистая нефть имеет сложность в транспортировке по трубопроводу, а также снижает ресурс оборудования из – за химической реакции серы. Для непосредственного уменьшения избыточного содержания серы в нефти требуется оборудование

десульфурации, осуществляющее её переработку, и соответствующая инфраструктура для утилизации, что приведет к большим расходам. Вследствие этого, первостепенной задачей для компаний по доставке нефтепродуктов является использование косвенных методов снижения уровня нежелательных параметров перекачиваемой продукции, непрерывный контроль и регулирование не только технологических, но и качественных показателей сырья [2 – 4].

Способы улучшения характеристик прокачиваемой нефти

Существует несколько способов, которые позволяют упростить перекачку, к ним относятся: химический; термический и механический. В качестве химического – применяется использование поверхностно-активных веществ (ПАВ), что снижает сопротивление транспортируемой нефти. Данный метод требует постоянного контроля, изменения состава ПАВ и снижает объем перекачиваемой нефти [5]. К термическому способу относится использование путевых подогревателей, за счет которых повышают температуру нефти в нефтепроводе, что облегчает ее транспортировку, но приводит к большим энергозатратам [6]. Механический способ представляет собой смешение потоков нефти с различными характеристиками. Первым вариантом является смешение в резервуаре, где от нескольких месторождений с различным составом нефть дозируется в общую емкость и выполняется перемешивание для получения однородного продукта, который после поступает в магистральный нефтепровод (МН). Эта версия смешения требует дополнительных затрат на расширение территориальных площадей (более 10 гектаров) и увеличения числа резервуаров (от 10 резервуаров 20000 м³) с электродвигателем и гребным винтом. Второй вариант представляет собой поточное смешения путем одновременной подачи разного рода нефти в МН посредством магистральных насосных агрегатов (МНА) без серьезных экономических

затрат. Основной сложностью этого метода является необходимость создания системы автоматического регулирования производительности МНА, обеспечивающую при нестационарных объёмах перекачки, изменяющихся характеристик потоков нефти, получение нормализованной смеси нефти [7, 8]. Совокупность перечисленных факторов подтверждает перспективу поточного смешения, потому что является более экономичным и точным способом.

Автоматическое регулирование при поточном смешении нефти

В первоначальных схемах поточного смешения нефти, МНА не имели режимов управления и для обеспечения на каждом потоке сернистой нефти определенной производительности использовался эффект дросселирования, при котором применялись дроссельные заслонки, которые оказывали сопротивление на поток и снижали его пропускную способность для обеспечения требуемой концентрации серы на входе МН. Другим вариантом стало перераспределение потока с выхода на вход насоса, что приводит к двойной работе. Третье направление представляет собой дискретное управление – включение или отключение насосов на конкретном потоке сернистой нефти на определённый промежуток времени для обеспечения требуемой концентрации серы на входе в МН. Четвертым и наиболее перспективным является способ частотного управления МНА, при котором частотный преобразователь, изменяя частоту питающего напряжения насосного агрегата, осуществляет управление производительностью МНА [9]. Вопрос встал о выборе способа и качества регулирования.

Адаптивное регулирование

В производственной практике в качестве регулирующего устройства наиболее часто используется ПИ–регулятор, состоящий из пропорционального и интегрального звеньев, обладающий приемлемыми

показателями качества регулирования, что является достаточным для выполнения средней сложности процессов и устранения разбалансирования системы. Реже применяются пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) регуляторы, имеющие дополнительно к ПИ закону регулирования дифференцирующее звено. Это связано с тем, что процесс его внедрения сложен, а более высокая точность получаемой работы не всегда рациональна [10]. Оба классических ПИ и ПИД регуляторов реализуют консервативный тип регулирования, при котором регулятор реагирует уже только после отклонения регулируемого параметра от заданного значения, а при начале изменения входных параметров – бездействует. Вследствие развития высокоинтеллектуальных технологий в теории управления и вычислительной технике были осуществлены доработки существующих ПИД-регуляторов. Были реализованы регуляторы с нечеткой логикой, адаптивные и с предсказанием (Model Predictive Control, MPC). Адаптивный регулятор работает по принципу адаптации параметров в зависимости от динамики управляемой системы, тем самым актуализирует коэффициент передачи объекта, постоянные времени интегрирования и дифференцирования [11]. Регулятор с нечеткой логикой учитывает, кроме значения ложь и истина, дополнительно промежуточные значения, что повышает точность работы с нелинейными системами и с недостающей информацией [12]. Регулятор, основанный на MPC, получая от реального объекта данные, выполняет их отработку на заложенной модели системы и после выдает воздействие. Такой тип может учитывать ограничивающие условия и внешние факторы, что делает его более универсальным [13]. Оптимальным выбором с учетом всех достоинств и недостатков является адаптивный регулятор, так как при его реализации в объекте будут учитываться изменения входных параметров, устаревание всех устройств, и при замене элементов не потребуются дополнительные работы по расчёту

регулятора. Расчет регулятора выполняется на основе характеристик объекта, где осуществляется регулирование концентрации серы с учетом диапазона допустимых изменений параметров во избежание снижения ресурса работы МНА. Для этого необходимо знание о взаимодействии элементов системы в технологическом процессе и их информационный потенциал.

Проведение эксперимента

На головной НПС потоки нефти с месторождений делятся на две ветки – малосернистая нефть (МСН) и сернистая нефть (СН). На каждом входном потоке нефти выполняется поточный контроль параметров продукции в блоке измерения качества нефти (БИК), информация от которого: о концентрации серы, плотности, содержании воды, расходе, давлении и температуре, поступает на адаптивный регулятор. На каждом потоке установлены МНА, осуществляющие прокачку нефти, оборудованные станцией управления с частотным преобразователем, частота напряжения питания которого регулируется сигналами с адаптивного ПИД-регулятора. Сам процесс смешения осуществляется путем управления – дозированного регулирования производительностью МНА, установленных на потоках малосернистой и сернистой нефти. Адаптивный ПИД-регулятор по установленным алгоритмам и программе управления в соответствии с показаниями блока качества вырабатывает управляющие сигналы на преобразователи частоты МНА сернистой и малосернистой нефти, регулируя их производительность до уровня, обеспечивающего требуемую концентрацию серы в смеси магистрального нефтепровода. Контроль конечной концентрации серы осуществляется на установившемся потоке нефтяной смеси посредством поточного анализатора, информация с которого поступает на адаптивный регулятор (на рисунке не показано). При отклонении количества серы в смеси нефти от заданного значения в управляющие сигналы для преобразователей частоты МНА на потоках МСН

и СН вносится корректирующий коэффициент, с целью устранения рассогласования. Изображение схематичного решения приведено на рис. 1.

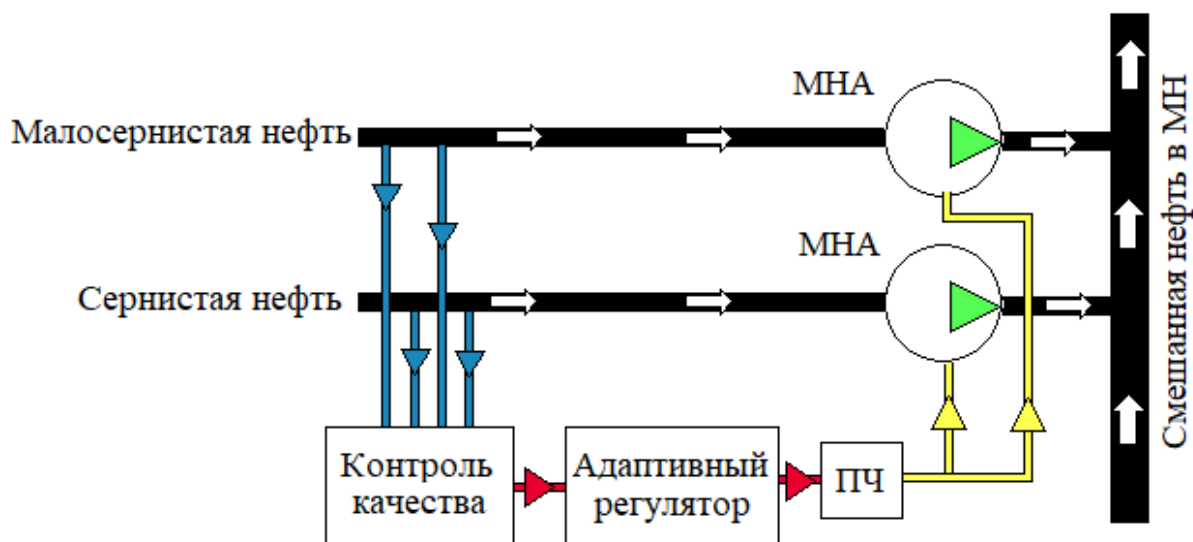


Рис. 1. – Структурная схема

Для выполнения плана годовой производительности в МН требуется подавать нефти в среднем 12000 м³/час с концентрацией серы не выше 0,6%. В оснащении используются МНА с производительность 10000 м³/час. В стационарном режиме поступает МСН с концентрацией 0,38 %, а СН с концентрацией 1,13 %. Анализ потенциальных поставщиков нефти показывает возможный диапазон изменения концентраций серы: МСН до 0,46%, а СН до 1,35 %, что потребует выполнения регулирования мощности МНА. Насосный агрегат, подающий сернистую нефть снижает производительность, а насос с малосернистой нефтью повышает производительность, что выполняется посредством изменения подающей энергии за счёт изменения частоты питающего напряжения. Наиболее длительным процессом является разгон МНА, на основе которого рассчитываются дальнейшие параметры регулятора. Для чего проводится определение математической модели объекта, представляющую собой

зависимость производительности МНА от изменения частоты питающего напряжения. График изменения управляющего воздействия показан на рис. 2. График изменения производительности насоса является реакцией, отражающей изменение выходной величины, представлен на рис. 3. Расшифровка обозначений на графике:

- U_0 – исходное управляющее воздействие;
- U_1 – новое управляющее воздействие;
- X_0 – исходное значение производительности;
- X_1 – новое установившееся значение производительности.

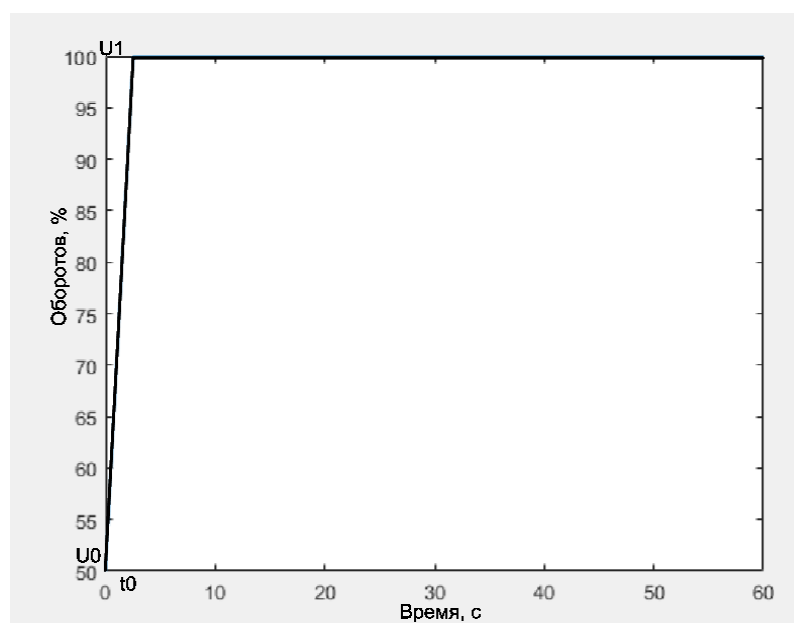


Рис. 2. – График изменения управляющего воздействия

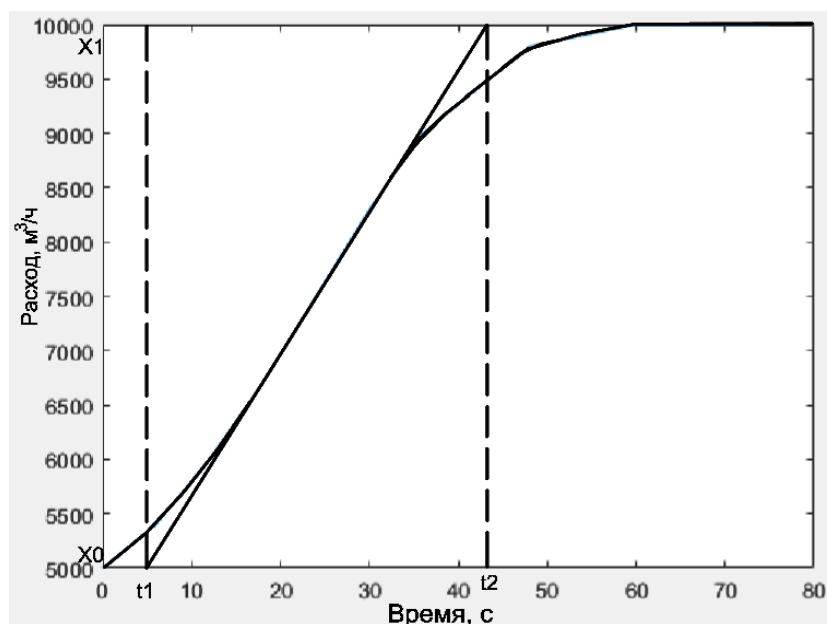


Рис. 3. – График кривой отклика, изменения производительности

По касательной, проведённой в точке перегиба кривой отклика, и изменениям выходной и входной величинам определяются параметры объекта:

- постоянная времени запаздывания $0 - t_1 - 5$ секунд;
- постоянная времени объекта $t_1 - t_2 - 38$ секунд;
- коэффициент передачи объекта – представляющий отношение относительного изменения выходной величины к относительному изменению входной величины, равен – 1.

Расчёт параметров настройки регулятора осуществляется на основании передаточных функций объекта и регулятора, являющихся отношением изображения по Лапласу выходной величины к отношению по Лапласу входной величины при нулевых начальных условиях.

Регулирование осуществляется дискретно с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), поэтому объект и регулятор будут иметь в окончательном расчете передаточные функции в дискретной форме (1,2):

$$W_{oo}(z) = \frac{z-1}{z} \cdot Z\left(\frac{W_{oo}(p)}{p}\right), \quad (1)$$

$$W_p(z) = P + I * T_s \frac{1}{z-1} + D \left(\frac{N}{1 + N * T_s \frac{1}{z-1}} \right) \quad (2)$$

Для оценки качества регулирования проводится имитационное моделирование, которое выполняется в среде Matlab Simulink с использованием библиотек блоков [14]. Строится модель контура регулирования для классического ПИД – регулятора, представленная на рис. 4, и адаптивного, представленная на рис. 5. В первом опыте, описывающем классическую модель регулирования, применяются элементы:

- входного (управляющего) ступенчатого воздействия;
- сумматора;
- регулятора (ПИД);
- объекта управления;
- обратной связи;
- осциллографа.

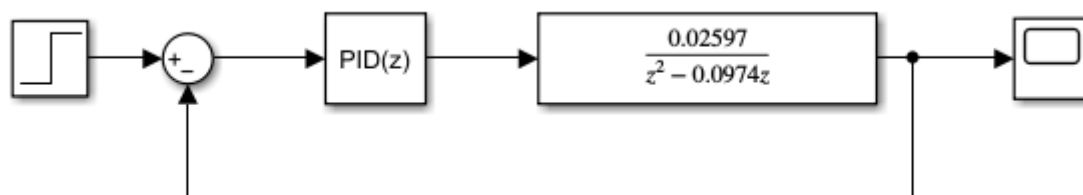


Рис. 4. – Первый опыт

Второй опыт включает в себя дополнительные блоки, с целью осуществления адаптивного регулирования, а именно:

- блока, хранящего и вносящего результаты прошлой работы из МАТ-файла (используется дополнительно для второго опыта в качестве вспомогательного элемента для адаптивного ПИД-регулятора);

- элемента связи информации настоящей и прошлой – шина данных;
- блока считывания данных результата работы системы в МАТ-файл.

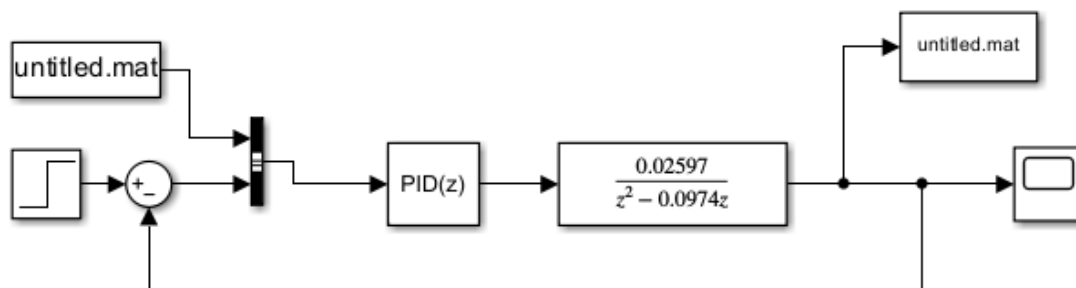


Рис. 5. – Второй опыт

В системе цифрового адаптивного регулятора, учитываются характеристики изменяемого процесса, а также циклическая работа контроллера. МАТ-файл хранит информацию всей системы, за счет чего возможно опережающее регулирование.

В результате опытов выполнено построение переходных характеристик, представленных на рис. 6. Пунктирные линии – классический ПИД – регулятор, сплошная линия – адаптивный регулятор. Динамика процессов, полученных при имитационном моделировании, показывает о качественном улучшении регулирования, осуществляемого адаптивным регулятором.

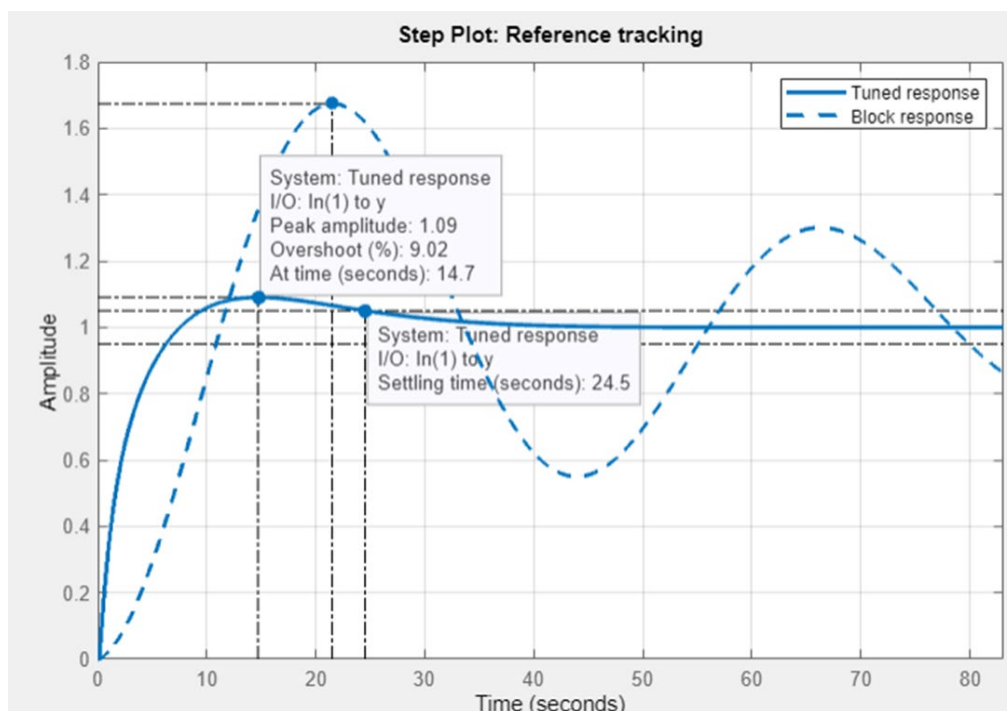


Рис. 6. – Графики переходных характеристик

В результате, определены прямые основные показатели качества регулирования, которые приведены в таблице №2: t_p – время регулирования – время за которое выходная величина входит и остаётся в коридоре $\pm 5\%$ от нового установившегося значения; σ – перерегулирование – максимальное отклонение выходной величины от нового установившегося значения, выраженное в процентах; ε – статическая ошибка – отклонение нового установившегося значения выходной величины от заданного, выраженное в процентах.

Таблица № 2

Показатели качества регулирования

Тип регулятора	σ , %	t_p , с	ε , %
Классический ПИД-регулятор	67	98	0
Адаптивный ПИД-регулятор	9	24.5	0

Заключение

Полученные результаты показывают, что поточное смешение нефти с использованием адаптивного регулирования повышает качество смешения за

счет уменьшения времени регулирования, снижения пиковых нагрузок, устранения статических погрешностей. Кроме того, адаптивный регулятор учитывает изменение параметров объекта от старения и износа оборудования, что позволяет достичь экономичности, энергоэффективности и безопасности на всем периоде эксплуатации системы.

Литература

1. Абдулкадыров А.С., Хачатурян А.А. Анализ модернизационных процессов в нефтеперерабатывающей отрасли России в 2018-2021 гг. // Журнал прикладных исследований. 2022. № 2-1. С. 21-25.
2. Грушецкий М.Б. История развития механического способа очистки нефтепроводов // Молодежь. Наука. Инновация. 2023. Т. 2. С. 85-88.
3. Абишева Л.С. Анализ расчета эффективности магистральных насосных агрегатов // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2023. Т. 8. № 7 (33). С. 81-85.
4. Яртиева А.Ф. Высоковязкие нефти и природные битумы: государственное участие в повышении эффективности разработки // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2012. № 10 (10). С. 40-44.
5. Куц А. А. Использование ПАВ при добыче тяжелой нефти и битумов // XLIV International scientific conference. 2020. С. 31-33.
6. Пестова А.А., Головань Е.В., Коршакова Р. В. Модернизация пунктов подогрева на межпромсловых трубопроводах // StudNet. 2021. № 4. С. 1-7.
7. Яглашев Э.Я., Салихова О.А., Умарова М.Б. Способы улучшения вязкости высокопарафинистых нефтей для обеспечения их транспортировки // Universum: химия и биология. 2020. № 6 (72). С. 78-80.
8. Герасименко Е.Ю., Нуженко С.А., Трофименко А.Д. Смещение сырой нефти (резервуарная ферма Кюрасао) // Прорывные научные

исследования: проблемы, закономерности, перспективы. Пенза: Наука и Просвещение, 2020. С. 61-64.

9. Савчук И.В., Халина Т.М. Анализ решений частотного регулирования привода насосов // E-Scio. 2022. № 9 (72). С. 287-302.

10. Юшков И.С., Костин С.Д., Зюзина Т.М. Сравнительные характеристики П-, ПИ-, ПИД-регуляторов // Modern science научно-информационный издательский центр "Институт стратегических исследований". 2023. № 1(40). 284 – 295 с.

11. Шукирова А., Ускенбаева Г., Рзаева Л., Абдугулова Ж., Наурызбаева А. Адаптивный нечёткий ПИД-регулятор системы управления углом наклона лопасти ветрогенератора // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2022. № 2 (121). С. 580-590.

12. Желтухина Ю. А., Кускашов П. Н., Будьков В. А. Применение нечеткой логики и искусственных нейронных сетей в ПИД-регуляторах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2022. Т. (1.) С. 19-21.

13. Белодурин А.Д., Харлашкин К.Е., Гартлиб Е.А., Лицин К.В. Анализ системы автоматического управления на основе линейных регуляторов и МРС-регуляторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №7. С. 377-381.

14. Кудинов Ю. И., Пащенко Ф. Ф. Теория автоматического управления (с использованием matlab-simulink): учеб. пособие. — 3-е изд., стер. — СПб: Лань, 2019. — 312 с.

References

1. Abdulkadyrov A.S., Xachaturyan A.A. Zhurnal prikladnykh issledovaniy. 2022. № 2-1. pp. 21-25.

2. Grusheczkij M.B. Istoriya razvitiya mexanicheskogo sposoba ochistki nefteprovodov [History of the development of mechanical methods for cleaning oil pipelines] Molodezh'. Nauka. Innovaciya. 2023. T. 2. pp. 85-88.
 3. Abisheva L.S. Mezhdunarodnyj zhurnal informacionnyx texnologij i energoeffektivnosti. 2023. T. 8. № 7 (33). pp. 81-85.
 4. Yartiev A.F. Delovoj zhurnal Neftegaz.RU. 2012. № 10 (10). pp. 40-44.
 5. Kucz A. A. Ispol'zovanie PAV pri dobyche tyazhelej nefti i bitumov [Use of surfactants in the production of heavy oil and bitumen] XLIV International scientific conference. 2020. pp. 31-33.
 6. Pestova A.A., Golovan' E.V., Korshakova R. V. StudNet. 2021. № 4. pp. 1-7.
 7. Yaglashev E.Ya., Salixova O.A., Umarova M.B. Universum ximii i biologii. 2020. № 6 (72). pp. 78-80.
 8. Gerasimenko E.Yu, Nuzhenko S.A., Trofimenko A.D. Proryvnye nauchnye issledovaniya problemy, zakonomernosti, perspektivy. Penza. Nauka i Prosveshhenie, 2020. pp. 61-64.
 9. Savchuk I.V., Xalina T.M. E-Scio. 2022. № 9 (72). pp. 287-302.
 10. Yushkov I.S., Kostin S.D., Zyuzina T.M. Modern science nauchno-informacionnyj izdatel'skij centr Institut strategicheskix issledovanij. 2023. № 1(40). pp. 284-295.
 11. Shukirova A., Uskenbaeva G., Rzaeva L., Abdugulova Zh., Nauryzbaeva A. Vestnik Kazaxskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva. 2022. № 2 (121). pp. 580-590.
 12. Zheltuxina Yu. A., Kuskashov P. N., Bud'kov V. A. Primenenie nechetkoj logiki i iskusstvennyx nejronnyx setej v PID-regulyatorax. Aktual'nye problemy aviacii i kosmonavтики. 2022. Tom 1. pp. 19-21.
-



13. Belodurin A.D., Harlashkin K.E., Gartlib E.A., Licin K.V. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. 2023. №7. pp. 377-381.

14. Kudinov Yu. I., Pashhenko F. F. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (s ispol'zovaniem matlab-simulink) [Automatic control theory (using matlab-simulink)] ucheb. posobie. 3-e izd., ster. SPb. Lan', 2019. 312 p.

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 12.12.2025

Дата публикации: 7.02.2026