

На правах рукописи



Агафонов Евгений Дмитриевич

**Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение систем  
мониторинга и прогноза динамических распределенных процессов  
в магистральном нефтепроводе**

05.11.13 – Приборы и методы контроля  
природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

**Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Медведев Александр Васильевич**

**Официальные оппоненты:** **Тян Владимир Константинович**  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Трубопроводный транспорт», заведующий кафедрой

**Суржиков Анатолий Петрович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение контроля и диагностики Инженерной школы неразрушающего контроля и безопасности, руководитель отделения

**Земенков Юрий Дмитриевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов», заведующий кафедрой

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ухтинский государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «19» сентября 2019 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.26, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета [www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Эксплуатация сложных технических объектов, таких как магистральный нефтепровод, тесно связана с необходимостью решения проблем мониторинга и прогноза технологических параметров с целью последующего управления, оптимизации режимов работы, обеспечения безаварийной, экологически безопасной работы и экономии затрачиваемых ресурсов. Решение этих задач требует модернизации системы контроля технологических параметров, обеспечение их достоверности с использованием усовершенствованных методов и средств сбора, обработки и анализа полученной информации.

Особенности магистрального нефтепровода как объекта мониторинга, а именно, его сложность, распределенный характер, потенциальная опасность, значимость в структуре нефтегазовой отрасли и народного хозяйства в целом, определяют актуальность исследований в рамках настоящей диссертационной работы. Существенную важность с точки зрения развития теории и удовлетворения потребностей при практической эксплуатации нефтепровода для повышения эффективности диспетчерского контроля и управления представляет расчет и планирование технологических режимов, а также мониторинг процессов, протекающих в нефтепроводе.

Принятие решений при эксплуатации магистрального нефтепровода основано на сопоставлении информации, содержащей плановые (прогнозные) и фактические (измеренные) значения таких технологических параметров, как давление, температура, показатели вибрации и так далее. Для прогноза значений технологических параметров в системах диспетчерского контроля и управления активно разрабатываются модели технологических процессов.

Известные на сегодняшний день и применяемые на практике методы и соответствующие им процедуры построения моделей технологических процессов в магистральном нефтепроводе не используют в полной мере доступную информацию об объекте, а также не учитывают её изменчивость в зависимости от неизвестных, либо неучтенных факторов. Это негативно отражается на точности прогноза протекания технологических процессов, следовательно, и на адекватности решений, принимаемых при эксплуатации оборудования нефтепровода.

Особую значимость для решения практических задач мониторинга технологических параметров представляет алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, позволяющее в режиме реального времени прогнозировать переходные (неустановившиеся) режимы работы в нефтепроводе. В существующих на сегодняшний день процедурах построения моделей и созданном на их основе специализированном программном обеспечении зачастую отсутствует компромисс между стоимостью, точностью и быстродействием, поэтому такое алгоритмическое и программное обеспечение не востребовано, или имеет во многом ограниченную применимость на предприятиях трубопроводного транспорта нефти.

Следовательно, актуальной является разработка новых методов и реализующих их алгоритмов, позволяющих использовать преимущества, в частности, адаптивного и имитационного подходов к процессу обработки сигналов в средствах контроля нефтепровода в условиях неопределенности, а также построению моделей не-

установившихся процессов, протекающих в магистральном нефтепроводе. Важным преимуществом разрабатываемых методов и алгоритмов становится более полный учет доступной информации об объекте, принятие во внимание стохастического, а также многосвязного характера объекта исследования.

**Степень разработанности темы исследования.** Решению задач контроля в системах автоматизации нефтепровода были посвящены труды В.П. Тарасенко, В.В. Трофимова, Б.И. Мисевичуса, О.Н. Рыжевского, Л.А. Зайцева, Г.С. Ясинского, Р.М. Ахметова, Я.Б. Кадымова, Р.А. Караева, А.А. Левина и других исследователей. В большинстве работ были описаны как структура и состав средств и методов контроля, проблемы диспетчеризации и учета нефти, так и особенности модельного описания процессов, протекающих в нефтепроводе. Имитационный подход к построению моделей распределенных систем, в том числе объектов трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, рассматривался в работах В.В. Трофимова, В.П. Тарасенко, В.И. Мащенко. Модели течения жидкости с учетом специфики трубопроводного транспорта нефти разрабатывались и совершенствовались научными школами Л.С. Лейбензона, И.А. Чарного, М.В. Лурье. Теоретические основы построения систем управления с распределенными параметрами занимались такие исследователи, как М.В. Мееров, В.Н. Кулибанов, А.Г. Бутковский, Е.В. Вязунов и другие.

Необходимость создания принципов и систем автоматизированного управления и принятия управленческих решений в условиях неопределенности привела к появлению во второй половине XX века теории адаптивных систем. Её становление связано с работами А.А. Фельдбаума, Я.З. Цыпкина, Л.А. Растиригина. Одним из перспективных направлений в теории адаптивных систем стала теория непараметрического оценивания. Основой теории послужили работы М. Rosenblatt и Е. Parzen. В развитии теории в нашей стране внесли вклад Ф.П. Тарасенко, А.В. Медведев, В.П. Живоглядов, Э.А. Надарая, А.И. Рубан, Ю.Г. Дмитриев, Г.М. Кошкин, А.В. Добровидов.

Впоследствии принципы адаптации активно развивались в рамках теории машинного обучения и интеллектуального анализа данных. Важными явились приложения указанных теорий к исследованию коллективов (ансамблей) моделей (L. Breiman, M. Kearns, L. Valiant, А.В. Лапко), а также комбинированных адаптивных моделей, в том числе для многосвязных систем (А.В. Медведев, А.П. Красноштанов).

В частности, в работах А.В. Медведева и А.П. Красноштанова предложены основные принципы построения статических (безынерционных) комбинированных моделей технологических процессов. Рассматривается случай, когда процессы относятся к классу многосвязных дискретно-непрерывных с запаздыванием. С точки зрения практики такие модели позволяют работать в условиях недостатка априорной информации, наиболее полно использовать имеющуюся информацию и восполнять её, используя адаптивный подход.

Задачи синтеза и исследования непараметрических моделей для линейных динамических систем, а также построенных на их основе регуляторов, рассмотрены в работах А.В. Медведева, А.А. Иванилова, С.Н. Чайки, Н.А. Медведевой, О.В. Куз-

нецовой, А.Н. Пупкова, О.А. Иконникова. Такие модели зарекомендовали себя в решении задач идентификации динамических (инерционных) технологических процессов и создания управляющих систем в теплоэнергетике, стройиндустрии и на предприятиях цветной металлургии.

На практике в качестве основного подхода к построению моделей технологических режимов перекачки нефти в компании АО «Транснефть – Западная Сибирь» в настоящее время принимается процедура создания моделей стационарного течения нефти. Модель представляет собой большую систему нелинейных алгебраических уравнений, сформированную в соответствии с законами Кирхгофа для трубопроводной сети. Уравнения описывают установившиеся процессы, происходящие в узлах и независимых контурах сети. Параметры уравнений – коэффициенты гидравлического сопротивления, показатели характера течения жидкости и действующие напоры, переменные – объемные расходы по соответствующим участкам сети. Для численного решения системы уравнений применяется модифицированный метод последовательных приближений, идея которого была предложена Р.Т. Файзуллин и развита в работах К.В. Логинова и А.М. Мызникова.

Практика эксплуатации магистрального нефтепровода показывает необходимость в построении нестационарных (динамических) моделей для описания переходных процессов в магистральном трубопроводе с учетом доступной априорной информации и преимуществ адаптивного подхода.

Диссертационная работа предусматривает дальнейшее развитие методологии, алгоритмического и программно-технического обеспечения в составе комплекса управления технологическими процессами, реализующего адаптивный и имитационный подходы к построению моделей технологических процессов в нефтепроводе. Исследования направлены на создание эффективных расчетных процедур прогноза технологических режимов в неустановившихся режимах работы нефтепровода с привлечением новых методов моделирования. Это позволит в значительной степени ускорить процесс построения моделей и уточнить прогноз ключевых технологических параметров, включая электропотребление насосных агрегатов.

**Цель и задачи.** *Цель* диссертационной работы заключается в совершенствовании средств мониторинга и прогноза технологических параметров систем магистрального нефтепровода с привлечением комплекса алгоритмических и программно-технических средств построения адаптивных и имитационных моделей, позволяющего повысить безопасность и расширить уровень автоматизации при эксплуатации нефтепровода. Для достижения поставленной цели требуется решить следующие *задачи*:

1. Проанализировать особенности магистрального нефтепровода как объекта мониторинга и управления, осуществить анализ подходов и методов построения моделей технологических процессов перекачки нефти в магистральном нефтепроводе;
2. Разработать и исследовать адаптивные непараметрические методы и алгоритмы прогнозирования состояния статических и динамических систем с применением модельного описания процессов в магистральном нефтепроводе;
3. Предложить метод исследования линейности динамических процессов с введением адаптивного критерия линейности, а также непараметрического алгорит-

ма линеаризации моделей для использования при решении задачи построения модели работы электрических нагревательных элементов в нефтепроводе в условиях недостатка априорных сведений о характеристиках процесса нагрева;

4. Синтезировать метод и реализующее его алгоритмическое обеспечение идентификации многосвязных статических систем на основе оценки решения систем нелинейных уравнений, предложить способ их применения для модельного описания нефтепроводной сети с целью повышения эффективности расчета расходов для ее участков в условиях недостатка априорных сведений;

5. Разработать алгоритм диагностирования состояния и коррекции погрешностей измерения давления на линейной части магистрального нефтепровода для использования в системах диспетчерского управления нефтепроводом;

6. Построить прогнозную имитационную модель магистрального нефтепровода и осуществить с ее помощью процедуру численного моделирования технологического участка нефтепровода;

7. Разработать практические рекомендации по использованию и адаптации пакета MATLAB/SimHydraulics при создании прогнозной модели процессов в магистральном нефтепроводе, включая настройку модели по данным измерений технологических параметров. Внедрить полученную модель в состав алгоритмических и программно-технических средств экспресс-прогноза протекания неустановившихся процессов технологического участка магистрального нефтепровода.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Разработан новый метод прогноза выбега магистральных насосных агрегатов на базе адаптивных непараметрических моделей динамических систем, отличающийся возможностью применения в условиях априорной неопределенности и наличия погрешностей в данных измерений давления и расхода, позволяющий расширить инструментарий средств контроля в нефтепроводе при отключении насосных агрегатов.

2. Предложен новый метод синтеза математического обеспечения для построения динамической модели электрического нагревательного элемента, входящего в состав системы путевого электроподогрева нефти магистрального нефтепровода, отличающийся от существующих использованием линеаризованной модели динамических процессов в классе обобщенных операторов, позволяющий прогнозировать температуру нагревателя в условиях недостатка априорных сведений.

3. Предложен новый метод прогнозирования технологических параметров трубопроводной сети на основе непараметрических моделей многосвязных систем, отличающийся от аналогичных использованием оценивания решения системы уравнений, составленной в соответствии с законами Кирхгофа, позволяющий повысить эффективность и скорость расчета технологических параметров.

4. Разработан новый интеллектуальный алгоритм диагностирования состояния датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода, отличающийся использованием в нем гибридной модели распределения давления вдоль участка нефтепровода с возможностью учета как априорных сведений о характере распределения давления, так и вновь поступающих измерений, позволяющий осуществлять контроль, диагностику неисправностей и коррекцию погрешностей дат-

чиков давления линейной части магистрального нефтепровода.

5. Предложен новый метод синтеза алгоритмического и программно-технического обеспечения для ускоренного прогнозирования распределенных технологических параметров (давление, расход, энергопотребление) в режиме реального времени при неустановившихся режимах работы магистрального нефтепровода, отличающийся составом и структурой применяемых алгоритмических и программных средств имитационного дискретного моделирования, и позволяющий усовершенствовать процесс планирования технологических режимов магистрального нефтепровода, а также обеспечить поддержку принятия решений в составе комплекса систем диспетчерского контроля и управления.

Результаты диссертационной работы получены как самостоятельно (пп. 1-3), так и в соавторстве, в частности, с Антроповым Н.Р. (п. 4) и Мироновым А.Г. (п. 5).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В диссертационной работе отражено развитие теории идентификации и теории адаптивных систем применительно к построению комбинированных адаптивных моделей многосвязных процессов. Особое внимание при этом уделялось приложению теории для синтеза моделей технологических процессов, имеющих дискретно-непрерывный характер.

Существенным теоретическим результатом можно считать разработанные методы и алгоритмы, позволяющие исследовать линейность процессов, протекающих в технологическом оборудовании. Предложен непараметрический критерий линейности и способ линеаризации моделей в терминах обобщенных моделей объектов в условиях недостатка априорной информации.

Работа содержит исследования применимости гибридных моделей при создании методов и алгоритмов выявления и компенсации погрешностей в текущей информации, поступающей с объекта.

Новые теоретические результаты получены при анализе и синтезе имитационных моделей распределенных процессов. В частности, решена задача сокращения времени вычисления с использованием средств дискретного моделирования и численной реализации расчетов моделей с распределенными параметрами.

Предложенные методы позволяют усовершенствовать процесс мониторинга технологических параметров в системах автоматизированного управления, сопряженный с расчетом технологических режимов функционирования технологического оборудования магистрального нефтепровода. Построенные модели, а также реализующее их алгоритмическое и программно-техническое обеспечение, позволяют учитывать нестационарный характер процесса течения нефти, могут быть использованы для экономии электроэнергии при сохранении производительности, безопасности и экологичности функционирования магистрального нефтепровода.

Частично результаты диссертации получены в ходе выполнения НИОКР «Исследование адаптивных моделей и алгоритмов управления многомерными стохастическими системами с запаздыванием» (номер гос. регистрации в ЦИТиС 01201154216) в 2011-2013 г. в Сибирском государственном аэрокосмическом университете им. акад. М.Ф. Решетнёва. По результатам работы получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ: «Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 1.0» (№2016660260 от 09.09.2016),

«Программный модуль последовательного обучения коллектива непараметрических оценок регрессии» (№2017611325 от 01.02.2017), «Программный модуль адаптивного прогноза показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода» (№2017611650 от 07.02.2017), «Программный модуль вероятностного прогнозирования на основе параметрических, непараметрических и гибридных алгоритмов» (№2017619632 от 30.08.2017), «Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 2.0» (№2018610986 от 19.01.2018).

Разработанные в рамках диссертационного исследования алгоритмические и программно-технические средства пригодны для использования в составе комплекса средств автоматизированного контроля и управления при решении задач прогноза и анализа протекания технологических процессов как в магистральных, так и в технологических трубопроводах на предприятиях нефтегазовой отрасли России. Практическая значимость результатов работы в частности подтверждена актами о внедрении на предприятиях АО «Транснефть – Западная Сибирь» в отделе главного технолога, в ОАО «Красноярскнефтепродукт» в филиале «Центральный» для расчета технологических параметров в неустановившихся режимах и в АО «Таймырская топливная компания» на нефтебазе «Песчанка». Также, разработанное алгоритмическое и программно-техническое обеспечение мониторинга и прогноза процессов в магистральном нефтепроводе внедрено в учебный процесс кафедры «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов» Института нефти и газа ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных в работе задач применялись методы теории вероятностей и математической статистики, метрологии, теории графов, теории статистического и имитационного моделирования, теории непараметрического оценивания, интеллектуального анализа данных, теории идентификации, теории адаптивных систем, системного анализа, информатики и информационных технологий, гидравлики, гидродинамики, механики сплошных сред, проектирования автоматизированных систем. Для создания программно-технического обеспечения использовались программные среды и пакеты: Microsoft Visual Studio, Matlab совместно с инструментами Simulink, Simscape и SimHydraulics.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод прогнозного моделирования выбега магистральных насосных агрегатов на базе адаптивных непараметрических моделей динамических систем.
2. Метод синтеза математического обеспечения для построения динамической модели электрического нагревательного элемента в составе системы путевого электроподогрева нефти магистрального нефтепровода с использованием линеаризованной модели динамических процессов в классе обобщенных операторов.
3. Метод прогноза распределения потоков в разветвленной трубопроводной сети на основе непараметрических моделей многосвязных систем.
4. Алгоритм диагностирования состояния датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода, основанный на использовании гибридной модели распределения давления вдоль участка нефтепровода с возможностью учета как априорных сведений о характере распределения давления, так и вновь поступающих

измерений.

5. Метод синтеза программного обеспечения для ускоренного прогнозирования распределенных технологических параметров (давление, расход, энергопотребление) в режиме реального времени при неустановившихся режимах работы магистрального нефтепровода, реализованный с применением алгоритмических и программных средств имитационного дискретного моделирования.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций в диссертационной работе обеспечивается применением формальных математических методов, численными экспериментами с элементами созданного алгоритмического обеспечения, достижения близости результатов моделирования к экспериментальным измеренным данным с использованием достоверных критериев. Результаты измерений технологических параметров подтверждены соответствующими актами, выполнены на сертифицированном и поверенном измерительном оборудовании согласно требованиям технических регламентов и внутренней документации компании - эксплуатанта оборудования.

Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах: IV Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», Москва, 2000; IASTED International Symposium «Applied Informatics 2001», Innsbruck, 2001; V Международный симпозиум «Интеллектуальные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2002; III Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'04, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, 2004; V Межвузовская конференция по научному программному обеспечению, Санкт-Петербург, 2007; XII Международный симпозиум по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу, Красноярск, 2010; IEEE Evolving and Adaptive Intelligent Systems 2012, Universidad Carlos III de Madrid, 2012; Международная научная конференция «Решетнёвские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2013, 2014, 2015, 2016; XIV Научно-техническая конференция ОАО «Транссибнефть», Омск, 2013; Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, Москва, 2014; Международная научно-практическая конференция «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2014; VI Научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики», Тольяттинский государственный университет, 2015, 2016; III Международная конференция "Applied Methods of Statistical Analysis. Non-parametric Approach - AMSA'2015", Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Белокуриха, 2015; II Международная научная конференция «Сибирский плацдарм: проблемы и задачи экономического развития Сибири и Красноярского края», Красноярск, 2016; Международная конференция «East Siberian Oil and Gas - 2016», Красноярск, 2016; Научно-практический семинар «Моделирование и управление в условиях неполной информации, анализ и обработка данных», кафедры системного анализа и исследования операций СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2013, 2015, 2016; Международная конференция «Нефть и газ

Сибири - 2017», Сибирский федеральный университет, Красноярск, 2017; VI Международная конференция "Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Approach - AMSA'2017", Сибирский государственный университет науки и технологий, Красноярск, 2017; Международный семинар «Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» MIP: Engineering-2019, Красноярск, 2019.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 42 печатных работах, включая статьи и труды международных и всероссийских конференций, из них 1 монография, 15 статей опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 5 проиндексированы в системах SCOPUS и Web of Science. По теме диссертации получены 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы, включающего 285 наименований, и двух приложений. Основная часть работы изложена на 323 страницах машинописного текста, содержит 114 рисунков и 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, определены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** проанализированы особенности магистрального нефтепровода, как объекта мониторинга и управления. Указано, что он является динамическим с распределенными параметрами, многосвязным, стохастическим, нестационарным. Магистральный нефтепровод представляет собой сложную систему с перестраиваемой структурой и изменяющимися параметрами.

Сложность процессов, протекающих в нефтепроводе, обуславливает необходимость модернизации средств контроля, диагностики и управления, включая их алгоритмическое и программное обеспечение. В частности, особую важность представляет совершенствование средств прогноза протекания технологических процессов в нефтепроводе, включая функционирование насосных агрегатов, линейной части нефтепровода, резервуарного парка, средств подогрева, учета нефти и так далее. Формируемые в процессе построения модели используются для поддержки принятия решений диспетчерской службой, операторами и технологами. Сферы применения моделей - сбор и визуализация данных в системах мониторинга и прогноза протекания технологического процесса перекачки нефти.

Анализ источников, в том числе зарубежных, показал, что в качестве основных подходов к построению моделей течения нефти по трубопроводу используют следующие: а) модели и методы вычислительной гидродинамики; б) имитационные модели. Вследствие неопределенности объекта исследования особо отмечается сложность настройки моделей, отсутствие данных о некоторых существенных параметрах, например, о процентном содержании попутного газа в нефти, зависимости вязкости от параметров потока и так далее. Для восстановления неизвестных зави-

симостей предлагается использовать, в том числе, методы интеллектуального анализа данных: искусственные нейронные сети, генетические алгоритмы оптимизации и другие.

Множество научных работ посвящено проблемам описания переходных режимов в нефтепроводе. Авторы затрагивают вопросы применения различных программных средств моделирования и их адаптации для решения поставленных задач, а также их сопряжения с системами автоматизации технологических процессов. Следовательно, можно сделать вывод, что поставленные в диссертации задачи лежат в русле актуальных научных проблем, решаемых как в России, так и за рубежом.

**Во второй главе** обобщены известные, а также предложены новые адаптивные непараметрические методы и алгоритмы прогноза состояния статических и динамических систем, позволяющие строить модели дискретно-непрерывных систем в условиях неопределенности. Под *дискретно-непрерывной системой* будем понимать такую систему, которая описывается оператором, непрерывным по времени, при этом значения входных и выходных переменных измеряются дискретно. Идентификация (другими словами, процесс построения модели) объекта происходит в условиях действия случайных помех в каналах измерения входных  $U(t)$  и выходных  $X(t)$  процессов, а также наличия ненаблюдаемых случайных возмущений  $\varepsilon_u(t)$  и  $\varepsilon_x(t)$ , действующих на объект (рисунок 1).

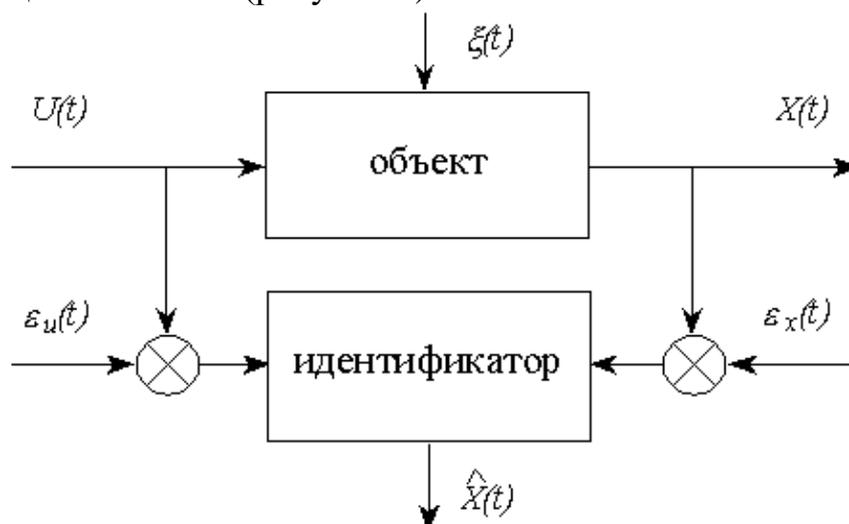


Рисунок 1 – Общая схема идентификации дискретно-непрерывного объекта

Случайные помехи принимаются несмещёнными и имеющими ограниченную дисперсию. Критерий качества идентификации предполагает минимизацию среднего квадрата отклонения выходной величины объекта от величины, прогнозируемой моделью.

Модели статических объектов с запаздыванием рассмотрим на примере регрессионных оценок ядерного типа, названных *H-аппроксимациями*.

В качестве исходной информации для построения модели выступает случайная выборка измерений «вход-выход» объекта:  $\{u_i, x_i\}$ ,  $u_{i+1} = u_i + \Delta u$ ,  $i = 1, 2, \dots, s$ . Особенностью представленного типа моделей является распределение входной величины в узлах равномерной сетки с шагом  $\Delta u$ . Модель является *непараметрической*, в ходе ее построения отсутствует необходимость идентификации структуры с

точностью до набора параметров.

Модель регрессионного типа ( $H$ -аппроксимация) имеет следующий вид:

$$x_s(u, C_s) = \frac{\Delta u}{C_s} \sum_{i=1}^s x_i H\left(\frac{u - u_i}{C_s}\right), \quad (1)$$

где  $H$  представляет собой неотрицательную ядерную функцию. Параметр  $C_s$  задает степень «размытия» ядерной функции. В условиях свойств, наложенных на этот параметр:  $C_s > 0$ ,  $\lim_{s \rightarrow \infty} sC_s = \infty$ ,  $\lim_{s \rightarrow \infty} C_s = 0$ , оценка является асимптотически несмещенной и сходится в среднеквадратическом.

В работе синтезированы алгоритмы расчета регрессионной модели (1), а также приведены численные исследования и иллюстрации результатов (рисунок 2).

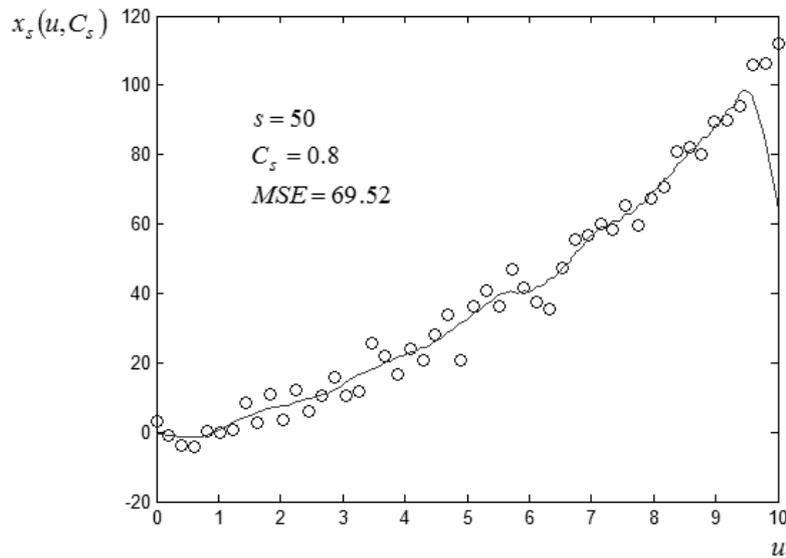


Рисунок 2 – Пример расчета регрессионной модели ядерного типа

В дальнейшем в работе приведен класс адаптивных моделей для линейных динамических систем. Исходная информация для построения моделей представляет собой выборки измерений переходной функции объекта:  $\{t_i, h_i\}, i = 1, 2, \dots, s$ ,  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ . Модель выражена в виде интеграла-свертки:

$$x_s(t, u(t), C_s, C_s^H) = h_s(0, C_s)u(t) + \int_0^t g_s(\tau, C_s^H)u(t - \tau)d\tau, \quad (2)$$

где переходная и импульсная переходная функции соответственно представлены их ядерными оценками. Оценка импульсной переходной функции реализована как ядерная оценка производной от функции регрессии. Преимущество такой модели – отсутствие необходимости иметь информацию о порядке уравнения, описывающего линейную динамическую систему, т.е. в условиях неопределенности.

В работе приводятся сравнения фактического отклика системы и ее модели на различные входные сигналы (рисунок 3). Здесь, в частности, показана работоспособность построенной модели в случае идентификации системы с оператором запаздывания. Кроме этого предложены некоторые другие модификации моделей ЛДС для специальных случаев, например, в случае ограничений, наложенных на входной процесс.

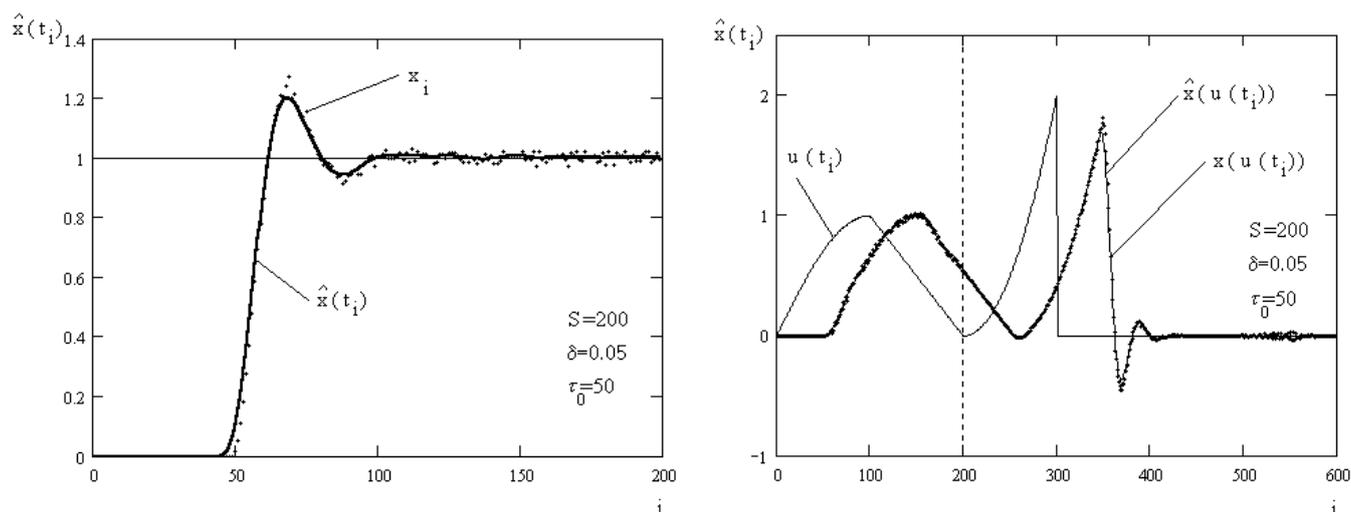


Рисунок 3 - Отклики модели и системы в случае действия 5% аддитивной помехи на выходе объекта

В качестве примера динамической системы, функционирующей в условиях неопределенности, в работе рассматривается магистральный насосный агрегат. Как объект управления насосный агрегат характеризуется высокой сложностью математического описания. Среди факторов, влияющих на работу насосного агрегата, можно выделить следующие: дифференциальный напор, объемный (или массовый) расход нефти, температура корпуса, момент инерции системы «ротор-нефть», угловая скорость вращения ротора. Некоторые из перечисленных характеристик (момент инерции, мгновенный расход) неизвестны или не доступны к измерению, другие (угловая скорость, дифференциальный напор) измеряются косвенно или с существенными случайными погрешностями. Дополнительно на работу насоса оказывает влияние контура регулирования с дросселирующей задвижкой.

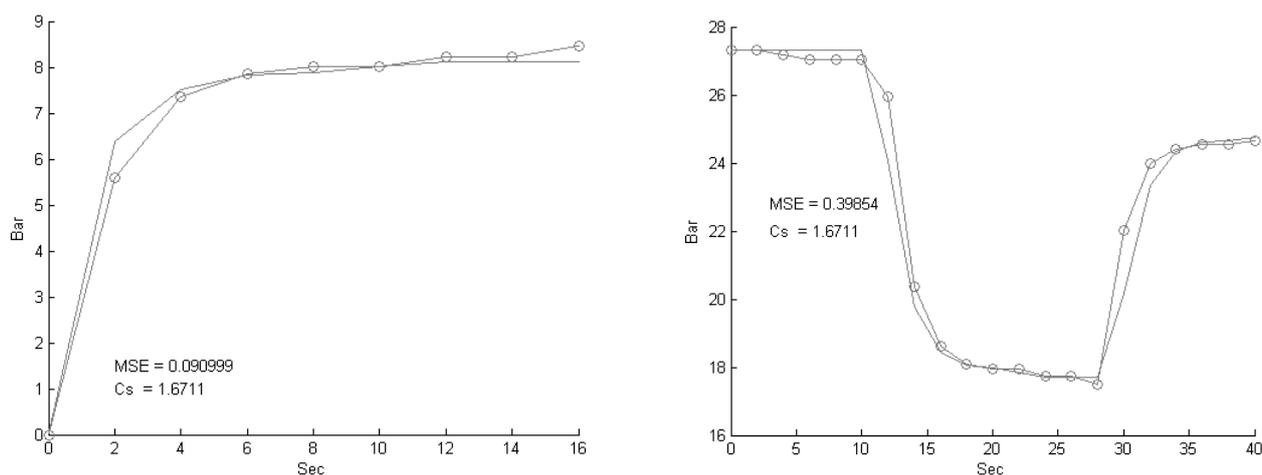


Рисунок 4 – Результаты измерений дифференциального напора центробежного насоса и отклик динамической модели напора

Аварийное или плановое отключение насосного агрегата инициирует процесс его «выбега», т.е. остановки. Кроме выбега интерес представляет переход на другой установившийся режим работы вследствие изменений условий его функционирования. Предложено описывать переходный процесс для насоса с использованием динамической модели (2), основанной на данных измерений напора в ходе испытаний

насосного агрегата. На рисунке 4 приведены данные измерений дифференциального напора центробежного насоса НМ10000-210 на Кемчугской НПС и отклик динамической модели напора с использованием соотношения (2).

В третьей главе приводятся результаты синтеза критериев линейности и способов линеаризации динамических систем с использованием адаптивных непараметрических алгоритмов. В исследованиях по дисперсионной идентификации Н.С. Райбманом был предложен критерий, названный относительной мерой нелинейности. Он представляет собой относительную величину отклонения оценки дисперсионного отношения, определяющего тесноту функциональной зависимости входной и выходной величин статического объекта через отношение дисперсий истинной регрессии и выхода объекта, а также квадрата коэффициента корреляции наилучшей линейной регрессии и выходной величины объекта.

В работе предложена модифицированная относительная мера нелинейности для случая идентификации динамических систем с использованием непараметрических методов. Пусть  $\{u(t_i), x_i\}$ ,  $x_i = x(u(t_i))$ ,  $i = 1, 2, \dots, s$  - выборка измерений «вход-выход», реакция системы на тестовый сигнал  $u(t)$  в дискретные моменты времени;  $\hat{x}_i$  - значения оценки регрессии в терминах статических моделей ( $H$ -аппроксимация);  $x_s(u(t_i))$  - реакция непараметрической модели ЛДС на тестовое воздействие;  $\bar{x} = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s x_i$ ,  $\bar{x}_s = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s x_s(u(t_i))$  - соответствующие средние величины.

Модифицированная мера нелинейности предлагается в виде:

$$\hat{\Gamma}_{x/t}^2 = \frac{\hat{N}_{x/t}^2 - \hat{R}_{x/t}^2}{\hat{N}_{x/t}^2}. \quad (3)$$

Оценка дисперсионного отношения  $\hat{N}_{x/t}^2$  определяет тесноту зависимости  $H$ -аппроксимации и выборочных значений выхода динамической системы:

$$\hat{N}_{x/t}^2 = \frac{\sum_{i=1}^s (\hat{x}_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})^2}. \quad (4)$$

Оценка коэффициента корреляции  $\hat{R}_{x/t}^2$  содержит модель динамической системы в терминах линейной динамики:

$$\hat{R}_{x/t} = \frac{\sum_{i=1}^s [(x_i - \bar{x})(x_s(u(t_i)) - \bar{x}_s)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^s (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^s (x_s(u(t_i)) - \bar{x}_s)^2}}. \quad (5)$$

Модифицированная относительная мера нелинейности представляет собой относительную величину на интервале  $[0,1]$ , характеризующую степень нелинейности динамической системы в области пространства состояний, для которой имеются выборочные значения измерений выходной величины.

Проведена серия численных экспериментов с модифицированной относитель-

ной мерой нелинейности. Для этого синтезировано несколько нелинейных систем, где объект исследования представлял собой последовательное соединение линейного динамического и нелинейного статического блоков (рисунок 5).

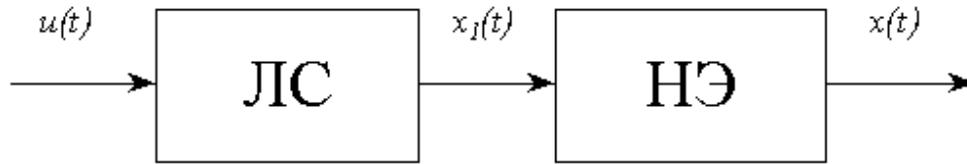


Рисунок 5 - Схема модельного представления нелинейной системы (ЛС - линейная система, НЭ - нелинейный элемент)

Алгоритм построения меры нелинейности был протестирован для трех видов нелинейностей: квадрат, а также насыщение и нечувствительность с различными пороговыми величинами. Например, зависимости значений критерия модифицированной относительной меры нелинейности от величины порога нечувствительности нелинейного элемента и объема выборки приведены ниже (рисунок 6).

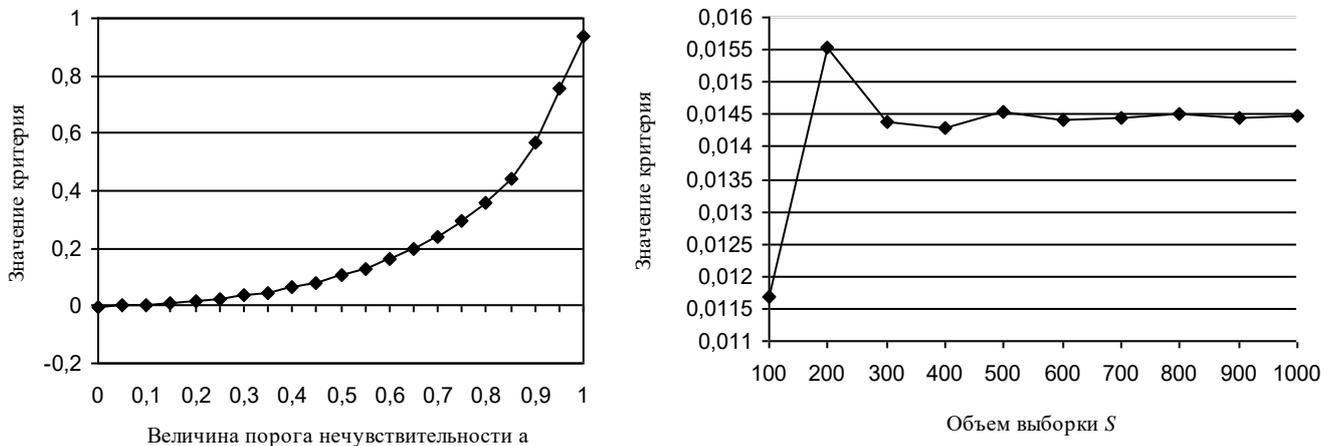


Рисунок 6 – Анализ зависимости критерия модифицированной меры нелинейности от величины порога нечувствительности нелинейного элемента (а) и объема выборки (б)

В диссертации предложен метод и реализующий его алгоритм кусочной линеаризации модели динамической системы для случая, когда локальные линейные модели представлены в форме интеграла-свертки, включающего оценку импульсной переходной функции. Каждая линейная модель должна быть построена независимо на основании выборочных значений откликов системы в определенном интервале входных или выходных величин исследуемого объекта:

$$\hat{x}_j(t) = \int_{-\infty}^t \hat{g}_j(\tau) u_j(t - \tau) d\tau, \quad j \in \{I, II, III, \dots\} \quad (6)$$

В общем случае зона линейности должна представлять собой некоторое подпространство в пространстве состояний объекта.

Модель в виде интеграла свертки выводится из предположений о нулевых начальных условиях. Следовательно, возникает проблема сопряжения локальных линейных моделей в общей линеаризованной модели, а именно учет начальных

условий при переходе между зонами линейного описания. Предложен следующий принцип, позволяющий учитывать в модели ненулевые начальные условия. Он заключается в увеличении «времени жизни» локальных линейных моделей. При этом переход между моделями предваряется управляемым движением последующей модели, так, чтобы ее траектория совпадала с траекторией предыдущей модели. Возникает задача создания эффективного алгоритма управления линейной динамической системой, описываемой интегралом-сверткой. Предложен принцип управления линейной системой с использованием оценки обратного оператора системы в соответствии с представленной схемой (рисунок 7).

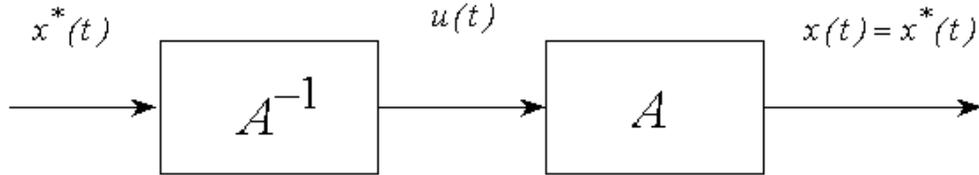


Рисунок 7 – Иллюстрация принципа разомкнутого управления с использованием оценки обратного оператора линейной системы

Оценка обратного оператора является оценкой численного решения интегрального уравнения:

$$x_s(t) = h_s(0)u(t) + \int_0^t g_s(\tau)u(t-\tau)d\tau = 1(t), \quad \forall t \in [0, T] \quad (7)$$

относительно входного воздействия  $u(t)$  в узлах равномерной временной сетки с шагом  $\Delta\tau$ :

$$\sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \sum_{i=1}^s h_i H' \left( \frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^{II}} \right) u(t - k\Delta\tau) \Delta\tau = \frac{C_s^{II}}{\Delta t} - \frac{C_s^{II}}{C_s^I} u(t) \sum_{i=1}^s h_i H \left( \frac{-t_i}{C_s^I} \right). \quad (8)$$

В случае равенства интеграла свертки единичной ступенчатой функции решение результирующего уравнения относительно входного воздействия  $u(t)$  представляет собой оценку переходной функции системы в направлении «выход-вход», т.е. переходной функции обратного оператора:

$$w(t) = \frac{\frac{C_s^{II}}{\Delta t} - \frac{C_s^{II}}{C_s^I} u(t) \sum_{i=1}^s h_i H \left( \frac{-t_i}{C_s^I} \right) - \Delta\tau \sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \sum_{i=1}^s h_i H' \left( \frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s^{II}} \right) w(t - k\Delta\tau)}{\frac{C_s^{II}}{C_s^I} \Delta\tau \sum_{i=1}^s h_i H' \left( \frac{-t_i}{C_s^I} \right)}, \quad w(0) = 0. \quad (9)$$

Управляющее воздействие для достижения желаемого выходного процесса  $x^*(t)$  формируется дискретным аналогом интеграла свертки:

$$u_s^*(t, C_s^{III}) = \frac{T}{sC_s} \sum_{k=0}^{t/\Delta\tau} \sum_{i=1}^s w_i H' \left( \frac{k\Delta\tau - t_i}{C_s} \right) x^*(t - k\Delta\tau) \Delta\tau. \quad (10)$$

В работе проведена серия численных экспериментов с алгоритмом управления линейной динамической системой с использованием оценки обратного оператора в качестве регулятора (рисунок 8).

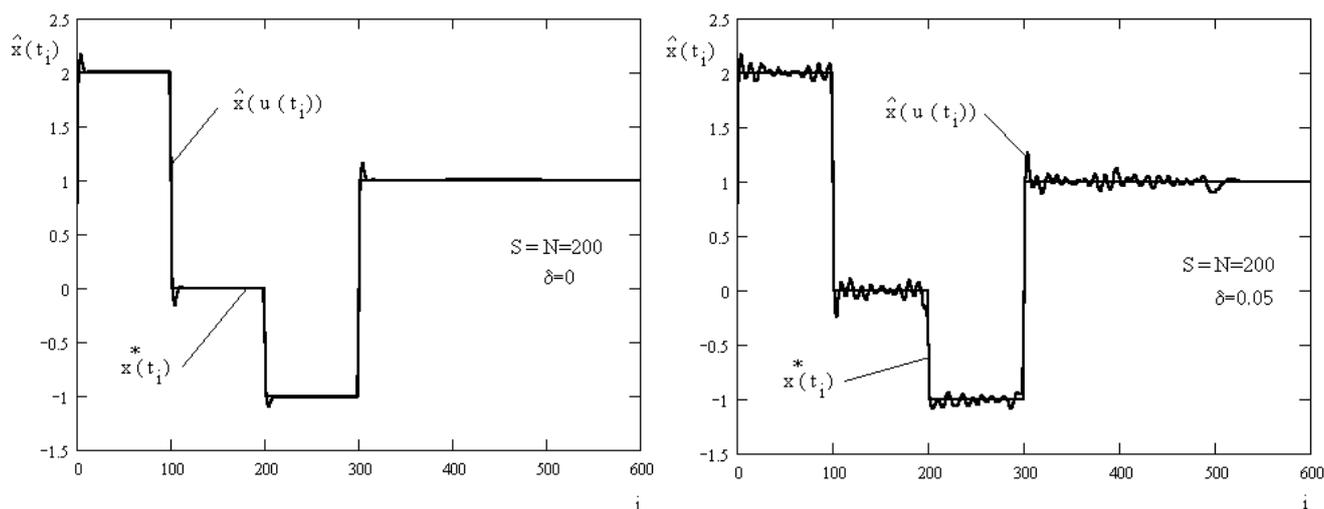


Рисунок 8 – Иллюстрация работы алгоритма управления, исходная выборка без помех и со случайной помехой 5%

Доказана асимптотическая сходимость выхода управляемой системы с использованием оценки обратного оператора. Схема построения линеаризованной модели проиллюстрирована на рисунке 9.

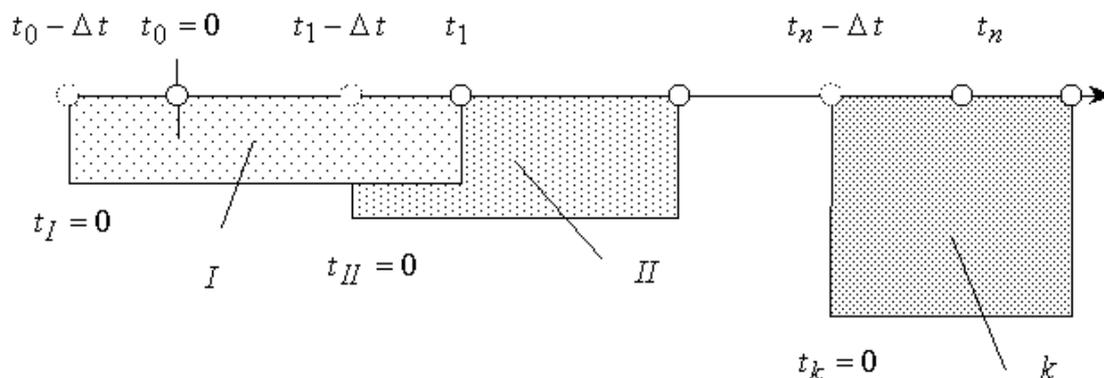


Рисунок 9 – Схема построения линеаризованной модели

В линеаризованной модели управляющее воздействие для каждой локальной линейной модели последовательно складывается из двух процессов: предварительного входного процесса, подготавливающего состояние линейной системы путем реализации управляемого движения по траектории предыдущей модели, и собственного управляющего процесса, начиная с момента переключения на текущую линейную модель. Описанная схема линеаризации опробована при построении прогнозной модели нагревательного элемента в системе путевого электроподогрева нефти.

С целью снижения гидравлического сопротивления и экономии электроэнергии при перекачке нефти, особенно в условиях низких температур, применяют различные способы понижения вязкости нефти. Один из эффективных способов понижение вязкости – применение устройств подогрева нефти. Наряду с печными нагревателями используются установки электроподогрева. Модель изменения температуры нагревательного элемента – необходимое условие эффективного управления процессом нагрева.

Следует отметить, что этот процесс является существенно нелинейным, следовательно, для его моделирования следует применять нелинейные динамические модели. В работе осуществлено построение линеаризованной модели температуры электрического путевого подогревателя нефти (пример приведен на рисунке 10).

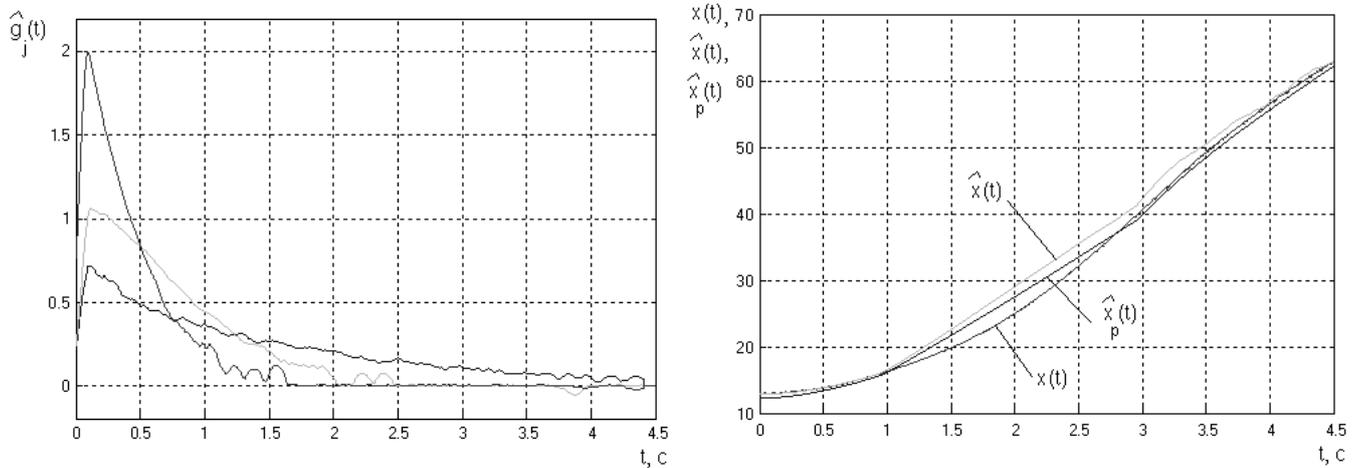


Рисунок 10 – Иллюстрация одного из экспериментов построения линеаризованной модели температуры электрического путевого подогревателя нефти: модели импульсных переходных функций, и сравнение выходных процессов для нагревательного элемента и его линеаризованной модели

**Четвертая глава** посвящена синтезу алгоритма идентификации многосвязной статической системы и применению полученного алгоритма для построения моделей гидравлических сетей. Основная отличительная особенность многосвязных систем – присутствие обратных и перекрестных потоков в технологической цепочке, что выражается в зависимости некоторых выходных переменных не только от входа объекта, но и от некоторых других выходных переменных.

*Многосвязный объект* описывается системой неявных функций, от входных и выходных переменных. *Комбинированная модель* многосвязного объекта содержит несколько групп уравнений, соответствующих связям с различными уровнями априорной информации:

$$\begin{cases} F_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{1, p} \\ F_j(X^{(j)}, Y^{(j)}, \alpha_j) = 0, j = \overline{p+1, m} \\ y_j - \varphi_j(X^{(j)}, Y^{(j)}) = 0, j = \overline{m+1, l} \end{cases} \quad (11)$$

Уравнения могут включать неявные функции известного вида  $F_j, j = \overline{1, p}$ ; функции  $F_j$ , заданные с точностью до вектора параметров  $\alpha_j, j = \overline{p+1, m}$ , а также зависимости неизвестного вида, требующие оценивания по выборочным данным:  $\varphi_j, j = \overline{m+1, l}$ . Предполагается, что переменные, входящие в уравнения, включают в себя аддитивные несмещенные помехи с ограниченной дисперсией. Законы распределения помех принимаются неизвестными.

В качестве примера описания многосвязного объекта можно привести систему уравнений для установившегося режима работы гидравлической сети, построенную в соответствии с законами Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
 c_{11}x_1 + \dots + c_{1n}x_n &= q_1, \\
 \dots \\
 c_{k-1,1}x_1 + \dots + c_{k-1,n}x_n &= q_{k-1}, \\
 c_{k1}\lambda_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{kn}\lambda_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n &= h_1, \\
 \dots \\
 c_{n1}\lambda_1|x_1|^{\beta_1-1}x_1 + \dots + c_{nn}\lambda_n|x_n|^{\beta_n-1}x_n &= h_{n-k+1}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Первая группа уравнений, входящих в систему, описывает баланс потоков в  $k$  узлах с притоками в узлах  $q_i$ ,  $i=1,2,\dots,k-1$ . Вторая группа составлена относительно  $n$  независимых контуров сети, для которых задается связь потоков  $x_j$ ,  $j=1,2,\dots,n$ , действующих напоров насосов  $h_i$ ,  $i=1,2,\dots,n-k+1$  и гидравлических сопротивлений  $\lambda_j$  входящих в контур участков. Однако, уравнения второй группы опираются на эвристические зависимости коэффициентов гидравлического сопротивления от неизвестных расходов и напоров.

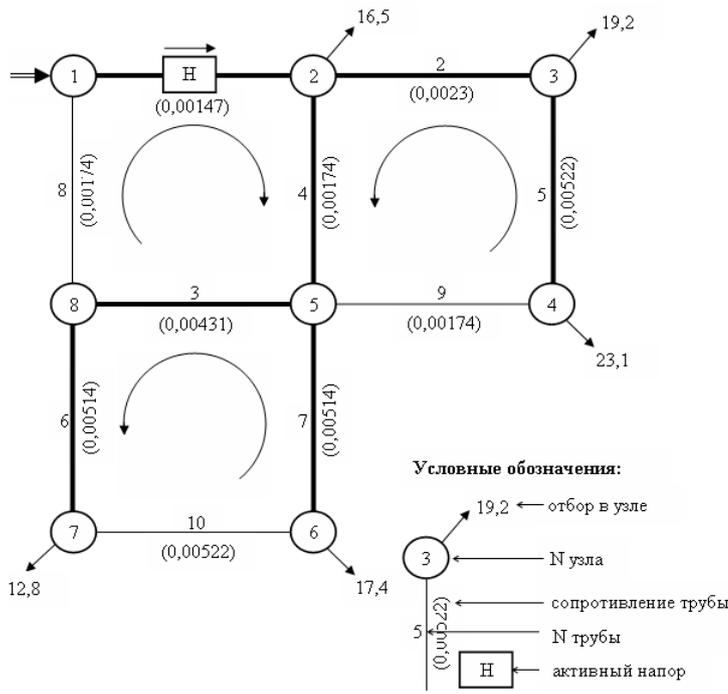
Предлагается реализовать описанный подход к построению комбинированной модели гидравлической сети. Априорная информация об объекте складывается из графа сети, информации о входных и выходных переменных, выборки наблюдений, позволяющих оценить уравнения для независимых контуров сети.

После замены второй группы уравнений их непараметрическими оценками, представленными с точностью до входных и выходных переменных, а именно, расходов и напоров, действующих в соответствующем независимом контуре гидравлической сети, получаем следующие уравнения:

$$\begin{aligned}
 x_k &= \varphi_k(X^{(k)}, H^{(k)}), \\
 \dots \\
 x_n &= \varphi_n(X^{(n)}, H^{(n)}),
 \end{aligned} \tag{13}$$

где  $H = (h_1, h_2, \dots, h_{n-k+1}) \in \Omega(H) \subset R^{n-k+1}$  - вектор активных напоров (входные переменные);  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \Omega(X) \subset R^n$  - вектор объемных расходов (выходные переменные);  $\{H[t], X[t]\}, t = \overline{1, n}$  - выборка статистически независимых наблюдений вектора состояний трубопроводной сети в дискретные моменты времени;  $H^{(j)} \subset H$ ,  $X^{(j)} \subset X$  - векторы, составленные из компонент векторов  $H$ ,  $X$ , входящих в  $j$ -ое уравнение;  $\varphi_j(x^{(j)}, H^{(j)})$ ,  $j = k, k+1, \dots, n$  непараметрические оценки уравнений для контуров, представленные с точностью до входных и выходных переменных.

С целью численного моделирования и исследования алгоритма расчета параметров гидравлической сети был принят следующий вид модели гидравлической сети и записаны соответствующие ему неявные уравнения (рисунок 11).



$$\begin{cases}
 -x_1 + x_8 = -89 \\
 x_1 + x_2 - x_4 = 16.5 \\
 -x_2 + x_5 = 19.2 \\
 -x_5 + x_9 = 23.1 \\
 -x_3 + x_4 + x_7 - x_9 = 0 \\
 -x_7 + x_{10} = 17.4 \\
 x_6 - x_{10} = 12.8 \\
 x_8 - \frac{\sum_{t=1}^n x_8[t] \prod_{i=1}^{\dim V^{(8)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(8)} - V_i^{(8)}[t]}{c_{ni}}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^{\dim V^{(8)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(8)} - V_i^{(8)}[t]}{c_{ni}}\right)} = 0 \\
 x_9 - \frac{\sum_{t=1}^n x_9[t] \prod_{i=1}^{\dim V^{(9)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(9)} - V_i^{(9)}[t]}{c_{ni}}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^{\dim V^{(9)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(9)} - V_i^{(9)}[t]}{c_{ni}}\right)} = 0 \\
 x_{10} - \frac{\sum_{t=1}^n x_{10}[t] \prod_{i=1}^{\dim V^{(10)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(10)} - V_i^{(10)}[t]}{c_{ni}}\right)}{\sum_{i=1}^N \prod_{i=1}^{\dim V^{(10)}} \Phi\left(\frac{V_i^{(10)} - V_i^{(10)}[t]}{c_{ni}}\right)} = 0
 \end{cases}$$

Рисунок 11 – Граф модельной гидравлической сети и соответствующая ему система уравнений

Решение системы (например, с использованием численного метода Ньютона или его модификаций) может быть заменено статистической оценкой этого решения по обучающей выборке вектора состояний гидравлической сети. Алгоритм оценивания решения системы уравнений состоит из следующих шагов:

- нормирование компонент вектора аргументов;
- вычисление невязок системы;
- оптимизация вектора невязок и оценка выходных переменных системы уравнений.

Проведено численное исследование процедуры оценивания решения системы уравнений модели гидравлической сети при различных уровнях помех, объемах обучающей выборки и степени разброса выборки относительно истинного решения. Показано асимптотическая сходимость полученных оценок (рисунок 12).

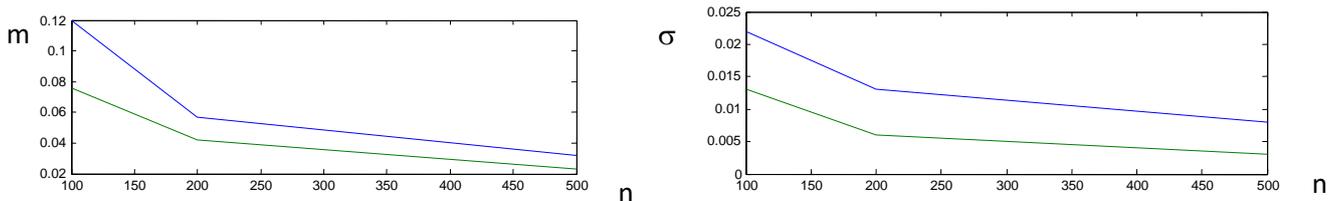


Рисунок 12 – Зависимость математического ожидания и дисперсии суммарной невязки решения системы уравнений гидравлической сети от объема обучающей выборки

При сопоставимой точности время оценивания решения системы почти в 20 раз меньше времени, затрачиваемого численным алгоритмом Ньютона при решении аналогичной системы уравнений. Это преимущество позволяет использовать предложенный алгоритм для экспресс-прогноза характеристик гидравлической сети при расчете режимов работы магистрального нефтепровода.

**В пятой главе** описаны процедуры синтеза и верификации алгоритма коррекции погрешностей измерения давления на линейной части магистрального нефтепровода.

Датчики давления на линейной части нефтепровода – необходимый элемент мониторинга и управления технологическим процессом перекачки нефти. Датчики расположены вдоль трассы нефтепровода с интервалом от 2 до 30 км. Датчик представляет собой преобразователь физической величины давления (или разности давлений) в электрический сигнал. Каждый датчик может быть подвержен влиянию случайных аддитивной  $\xi(t)$ , мультипликативной  $\theta(t)$  помех, иметь систематическую погрешность измерения  $\eta(t)$  (рисунок 13).

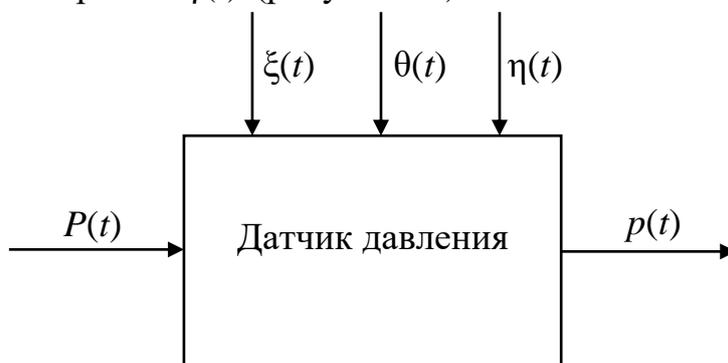


Рисунок 13 – Схема преобразований сигналов в датчике давления

Связь величин, характеризующих работу датчика, можно представить следующим оператором:  $p(t) = A(P(t)) \cdot \theta(t) + \xi(t) + \eta(t)$ . Нередки случаи выхода датчика из строя, что делает невозможным мониторинг давления и затрудняет принятие управленческих решений при эксплуатации систем магистрального нефтепровода.

Показания совокупности датчиков подчиняются определенным закономерностям, в частности, можно выделить зависимость показаний от времени и координаты. Эта связь может быть выражена через величину гидравлического напора:

$H(x) = \frac{p(x)}{\rho g} + z(x) + const$ . Константа в выражении определяется технологическим

режимом и связана со скоростью потока нефти (скоростной напор), в случае неизменности режима ею можно пренебречь. Зависимость гидравлического напора  $H(x)$  от координаты  $x$  представляет собой линию гидроуклона (рисунок 14).

Следовательно, давление, связанное с напором, также может быть выражено с точностью до набора параметров:  $\hat{P}(x, t) = \hat{A}(x, t, \alpha) = \rho g((\alpha_1 x(t) + \alpha_2) - z(x))$ .

Отклонения показаний датчиков от значений, обусловленных линией гидроуклона, объясняются влиянием геометрии трубопровода, наличием местных сопротивлений и т. д. Для учета этих отклонений предлагается использовать *гибридную*

модель датчика:  $\hat{P}(x, t) = \{\hat{A}(x, t, \alpha), \hat{q}(x, t)\}$ .

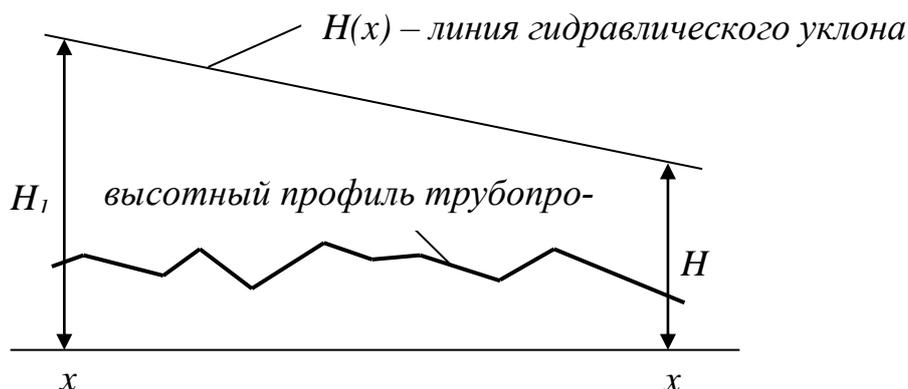


Рисунок 14 – Линия гидравлического уклона участка нефтепровода

Входящая в модель невязка (или функция рассогласования)  $\hat{q}(x, t)$ : может иметь как аддитивную, так и мультипликативную природу.

Примем  $k$  – количество датчиков давления,  $x_i, i = 1, 2 \dots k$  – координаты их расположения вдоль профиля участка нефтепровода. Для построения гибридной модели требуется выборка показаний датчиков давления  $V = \{p_i[t], x_i\}$ , где  $t = 1, 2 \dots n$  – индексы моментов времени, в которые доступны показания датчиков. Исходная выборка используется для формирования выборочных значений функции рассогласования с учетом предполагаемой параметрической зависимости. При этом применяем усреднение по времени показаний каждого датчика, например, для аддитивной помехи следующим образом:

$$q_{\Sigma}(x) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \hat{P}(x, t) - \hat{A}(x, t, \alpha).$$

Модель невязки предложено представить в виде непараметрической оценки:

$$\hat{q}(x) = \frac{\sum_{i=1}^k q(x_i) \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_k}\right)}{\sum_{i=1}^k \Phi\left(\frac{x - x_i}{c_k}\right)}. \quad (14)$$

С учетом модели невязки формируется гибридная модель датчика давления, в частности, для случая аддитивной помехи:

$$\hat{P}(x_i) = \rho g((\alpha_1 x_i + \alpha_2) - z(x_i)) + \hat{q}(x_i). \quad (15)$$

С использованием предложенного подхода решена практическая задача коррекции показаний датчиков технологического участка магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск» протяженностью более 900 км. На участке расположено 87 датчиков давления.

Коррекция показаний датчиков проводилась в соответствии со следующим алгоритмом:

– выполнялось цензурирование выборки измерений, полученных с датчиков, для выявления грубых отклонений и выбросов. Условие цензурирования имеет вид:

$$|p_{i+1} - p_i| > \varepsilon, i = 1, 2 \dots k;$$

- производилась оценка параметров модели методом МНК с использованием критерия среднеквадратического отклонения,
- рассчитывались невязки  $q(x)$  по аддитивной и мультипликативной схеме,
- проводилась оценка функции невязки  $\hat{q}(x)$  по рассчитанным значениям,
- определялись прогнозные значения давлений с учетом оценки невязки.

В работе проведен сравнительный анализ использования в задаче прогноза показания датчиков давления различных комбинированных моделей, отличающихся типом невязки, включая модели коллективного типа. Наилучший результат получен комбинированной моделью с оценкой невязки аддитивного типа (рисунок 15).

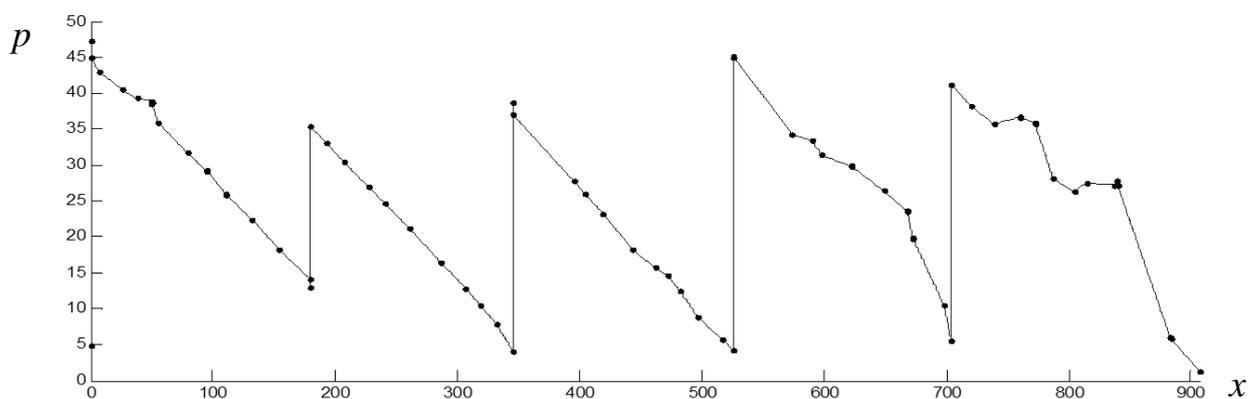


Рисунок 15 – Показания датчиков давления и их прогноз при использовании наилучшей модели (гибридная модель с аддитивной невязкой)

**В шестой главе** диссертационной работы предложена имитационная модель магистрального нефтепровода. Модель гидродинамических процессов в вязкой малосжимаемой жидкости обычно представляется в виде уравнений Навье-Стокса и включает уравнение неразрывности и уравнение движения:

$$\begin{cases} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \rho_0 \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho_0 v(x,t)}{2} - \rho_0 g \cdot \sin \alpha(x) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

Уравнения Навье-Стокса не имеют аналитического решения, поэтому, как правило, отыскивают их приближенное решение с использованием численных методов, таких как метод конечных разностей или метод конечных элементов.

Недостатком подходов, основанных на численном решении уравнений Навье-Стокса, является вынужденное упрощение, линеаризация относительно некоторых параметров и пренебрежение другими. В результате, решение системы уравнений не согласуется с измеренными величинами давления и скорости течения жидкости в трубопроводе.

В качестве альтернативы предложена эвристическая имитационная модель течения жидкости в трубопроводе (рисунок 16), имеющая дискретный характер и представляющая собой итерационную алгоритмическую процедуру.

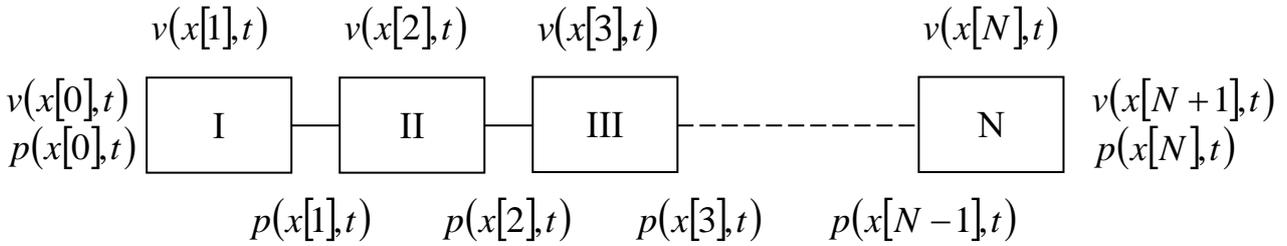


Рисунок 16 – Эвристическая дискретная модель течения жидкости в трубопроводе

Алгоритм включает в себя следующие основные этапы:

- расчет плотности жидкости в зависимости от давления:

$$\rho[t] = \rho_0 + \beta \cdot \rho_0 \cdot (p_{ex}[t]/2 + p_{ввх}[t]/2 - p_0); \quad (17)$$

- определение силы трения (из уравнения Бернулли):

$$F_{mp}[t] = \frac{\lambda(\text{Re}, \varepsilon) \cdot L \cdot S \cdot v[t] \cdot |v[t]| \cdot \rho[t]}{2d} + (h_{ввх} - h_{ex}) \cdot g \cdot \rho[t] \cdot S; \quad (18)$$

- расчет силы напора жидкости:

$$F_{нан}[t] = (p_{ex}[t] - p_{ввх}[t]) \cdot S; \quad (19)$$

- пересчет скорости потока (из закона Ньютона):

$$v[t+1] = v[t] + (F_{нан} - F_{mp}) \cdot \Delta t / \rho[t] \cdot L \cdot S; \quad (20)$$

- пересчет давлений с учетом скоростных напоров:

$$p[t+1] = p[t] + \rho_{ex}[t] v_{ex}[t+1] \cdot |v_{ex}[t+1]| - \rho_{ввх}[t] v_{ввх}[t+1] \cdot |v_{ввх}[t+1]|. \quad (21)$$

Для учета граничных (краевых) условий в модели применяются: источник давления; источник потока; модель насоса (с расходно-напорной характеристикой (рисунок 17), характеристикой КПД и т. д.).

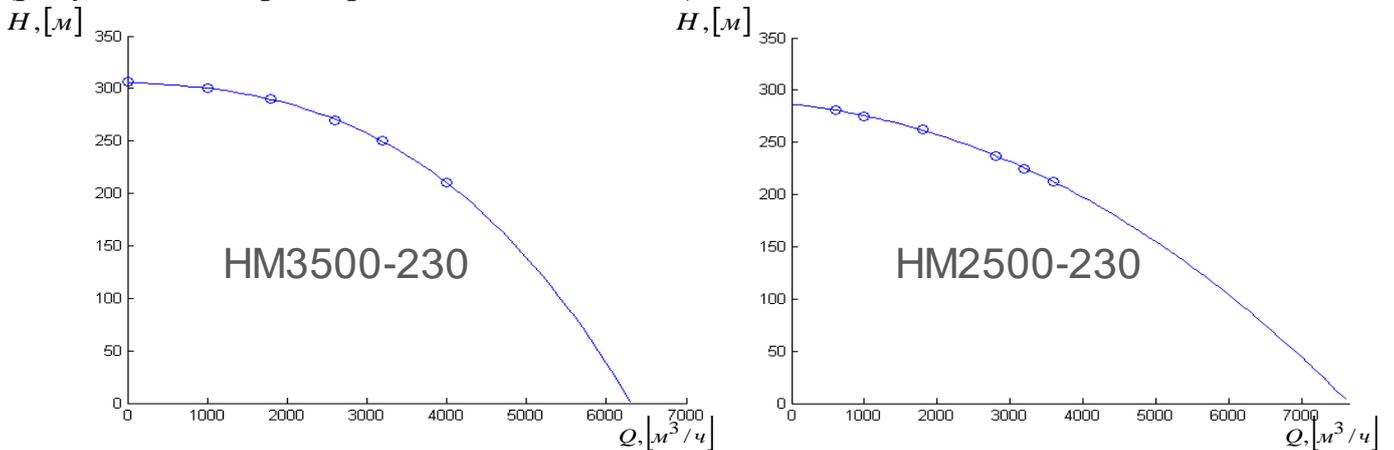


Рисунок 17 – Кубические аппроксимации расходно-напорные характеристик центробежных насосов HM3500-230 и HM2500-230

Модель может быть применена для расчета энергопотребления насосных агрегатов. Мгновенная мощность и расход электроэнергии на интервале времени  $[t_1, t_2]$  рассчитываются по формулам:

$$N_n(t) = \frac{q(t) \cdot p(t)}{\eta(t)}, \quad E_n(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{q(t) \cdot p(t)}{\eta(t)} dt \quad (22)$$

где  $\eta(t)$  - коэффициент полезного действия насоса.

В работе представлены результаты численных экспериментов с моделями переходных процессов в магистральном нефтепроводе (рисунки 18-20).

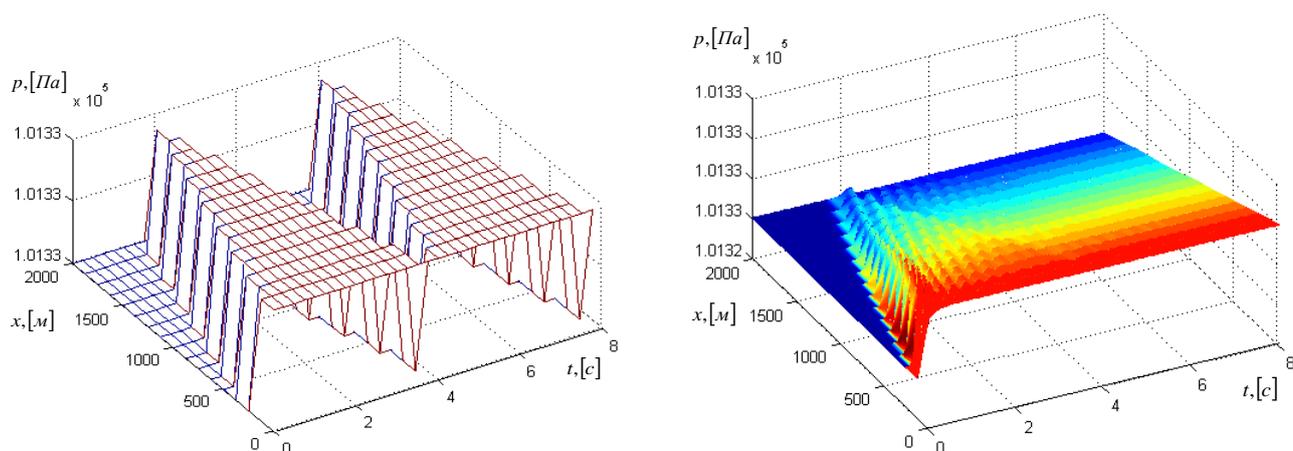


Рисунок 18 – Сравнение моделей переходного процесса (по методу характеристик и эвристической модели) – реакция на ступенчатое воздействие на одной из границ участка трубопровода (по давлению)

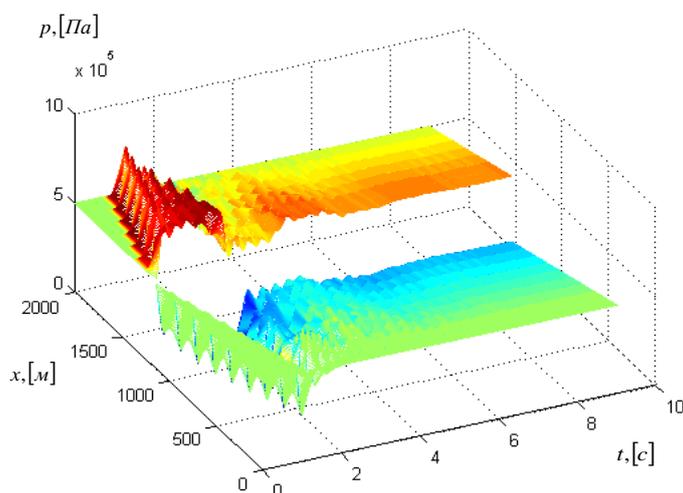


Рисунок 19 – Модель переходного процесса – имитация включения насоса, находящегося в середине участка трубопровода (эвристическая модель)

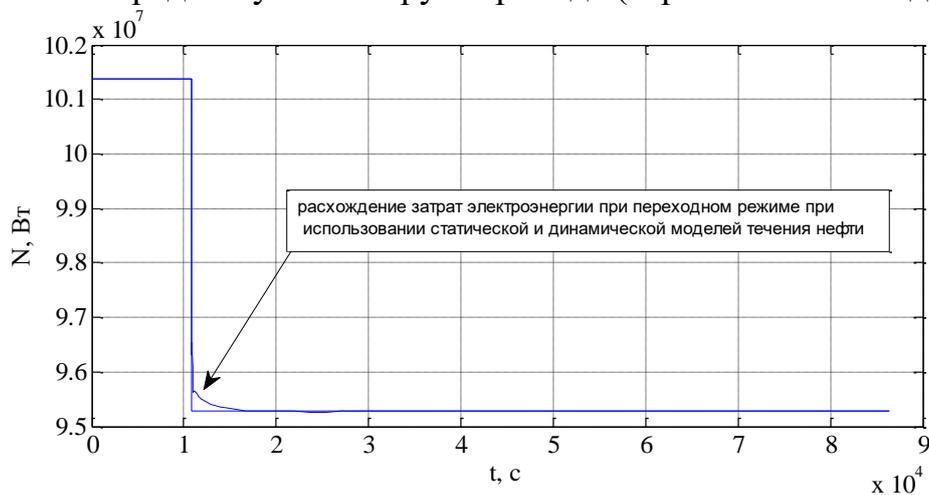


Рисунок 20 – Пример результатов расчета расхода электроэнергии при переходных режимах

Сравнение моделей, построенных с использованием метода характеристик и эвристического подхода, показывают различия в параметрах скорости затухания волн давления и характере фронта волны давления. Выбор модели будет осуществляться технологом в зависимости от его предпочтений и деталей переходного процесса, требующих описания с применением модели.

**Седьмая глава** посвящена синтезу программного модуля для экспресс-прогноза распределенных технологических параметров при осуществлении переходных технологических режимов перекачки нефти. В качестве базового средства моделирования выбран пакет MATLAB. Пакет математических вычислений MATLAB – признанный в среде инженеров и ученых программный продукт, предоставляющий гибкие возможности для построения моделей всевозможной природы. В работе проведены исследования возможностей пакета MATLAB/SimHydraulics для решения задач моделирования процессов в магистральном нефтепроводе. Предложена библиотека инструментов, позволяющих строить модели установившихся и неустановившихся процессов, а также средств настройки моделей по данным измерений давлений.

Среди прочих инструментов построения моделей он включает в своем составе SimHydraulics – средство визуального моделирования гидравлических процессов. Сборка модели осуществляется соединением стандартных и пользовательских блоков (трубы с настраиваемыми характеристиками, насосы, резервуары, тройники, дроссели, запорная арматура и др.) (рисунок 21).

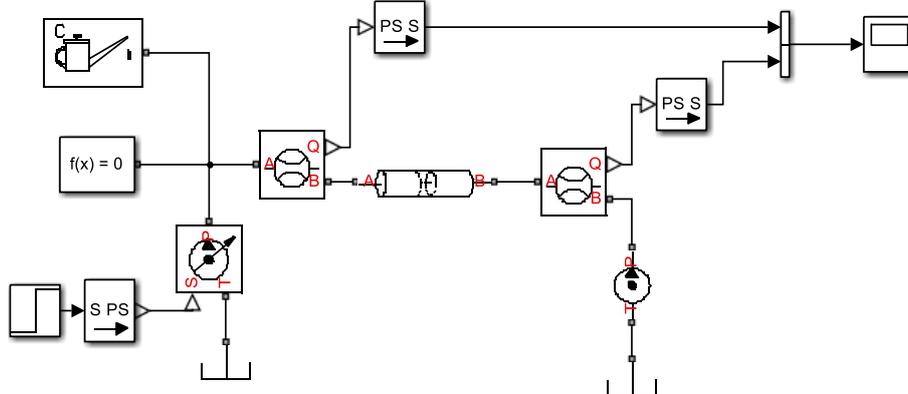


Рисунок 21 – Модель участка нефтепровода в инструменте SimHydraulics пакета MATLAB

В работе произведен анализ возможностей и свойств пакета и выделены следующие его особенности применения в задаче моделирования неустановившихся процессов в нефтепроводе:

- отсутствует возможность учета скорости распространения волн давления (возмущений) в трубопроводе;
- не предоставлена возможность контролировать распределение основных гидравлических параметров вдоль профиля трубы;
- отсутствует возможность отображения гидравлических и энергетических характеристик насосов.

Модификация стандартных библиотек MATLAB /SimHydraulics призвана устранить перечисленные недостатки. В работе выделяются два основных способа

модификации:

Способ I. Создание подсистем, собранных из стандартных блоков SimHydraulics (рисунок 22).

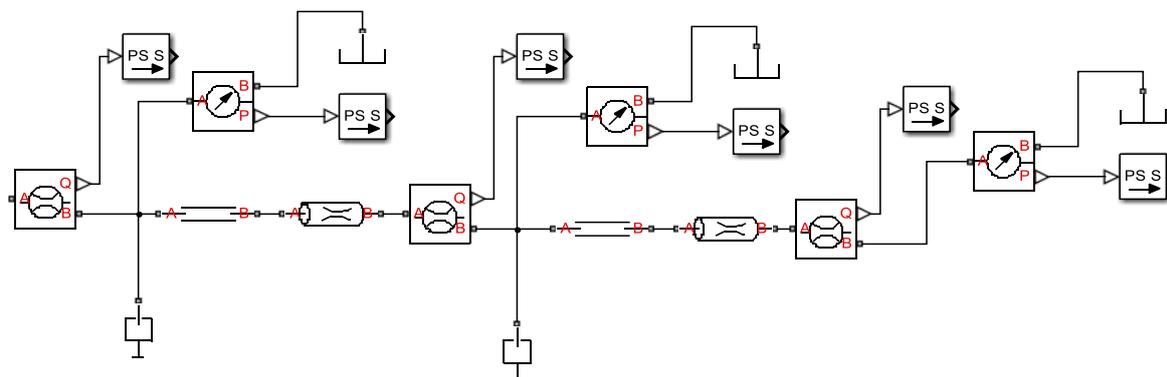


Рисунок 22 – Сборка дискретной модели участка нефтепровода из стандартных блоков SimHydraulics

Способ II. Программирование новых блоков SimHydraulics на языке Simscape Language.

Результаты модификации заключаются в следующих положениях:

1. Расчет коэффициента гидравлического сопротивления по российской методике.
2. Достигнута возможность визуализации распределенных процессов.
3. В модель трубопровода введена возможность настройки параметра – скорости распространения волн давления.

С использованием обоих перечисленных способов была построена модель технологического участка магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск» (рисунок 23).

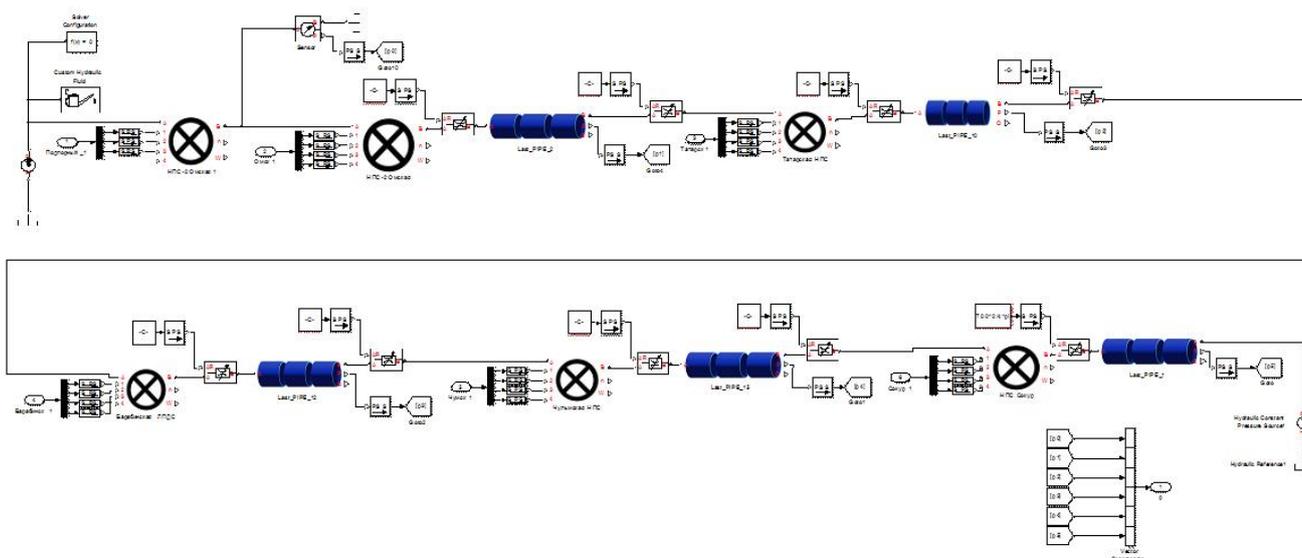


Рисунок 23 – Модель магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск», построенная в *Matlab/SimHydraulics*

В модели нефтепровода параметры блоков задавались с учетом доступных

сведений о параметрах и характеристиках входящего в систему оборудования. Для настройки модели использовались данные испытаний по опробованию переходных режимов с указанием действий по запуску магистральных насосных агрегатов (МНА) и измеренными значениями давлений в зависимости от времени и координаты установки датчиков.

Для процедуры настройки в модель были введены дополнительные настроечные параметры. Одним из параметров, подвергшихся настройке, стал коэффициент сжимаемости жидкости. Базовый (табличный) коэффициент сжимаемости был скорректирован путем умножения на коэффициент, значение которого определялось путем оптимизации. Процедура оптимизации осуществлялась с применением поисковых методов, в том числе генетическим алгоритмом в соответствии со следующим критерием качества:

$$\xi_p = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \left| \frac{p_{ij} - \hat{p}_{ij}}{p_{\max}} \right| \cdot 100\%, \quad (23)$$

где  $\hat{p}_{ij}$  – расчетное давление, соответствующее  $j$ -ому участку в  $i$ -ый момент времени;  $p_{ij}$  – измеренное давление;  $p_{\max}$  – максимальная амплитуда измеренных давлений;  $M$  – количество датчиков на линейных участках трубопровода;  $N$  – количество временных интервалов в течение периода, описываемого моделью.

Таким образом, в модели было учтено сложное взаимодействие малосжимаемой жидкости, которой является нефть, с трубой и растворенным в нефти газом.

С использованием оптимальной модели была решена задача прогноза неустановившихся процессов, возникающих при пуске и останове технологического участка магистрального нефтепровода «Омск – Анжеро-Судженск» (рисунок 24).

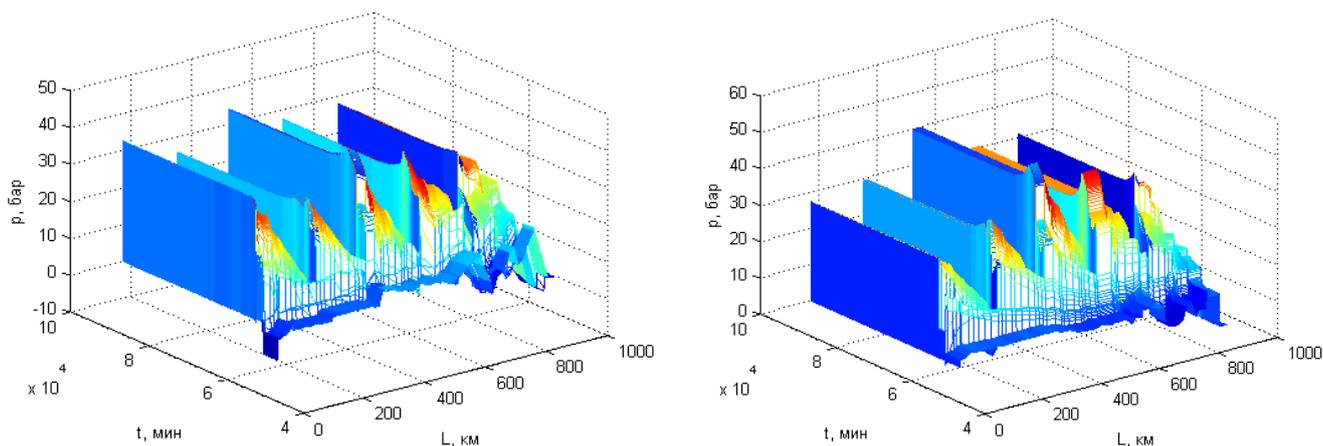


Рисунок 24 – Измеренный и расчетный профили давлений участка нефтепровода в зависимости от времени

Отклонение выхода модели от измеренных значений давления составило 6,79%, что является допустимым для компании-эксплуатанта магистрального нефтепровода.

**В заключении** сформулированы выводы и перечислены результаты диссертационного исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью в диссертации разработаны теоретические основы, методы и алгоритмы автоматизации процессов мониторинга и прогнозирования технологических параметров систем магистрального нефтепровода. Для этого разработаны и исследованы соответствующие алгоритмические и программно-технические средства. По совокупности полученных в работе результатов можно сделать вывод о решении важной проблемы, имеющей как научное, так и практическое значение.

В качестве **итогов выполненного исследования** можно считать достижение следующих основных результатов:

1. Представлена характеристика и отличительные особенности магистрального нефтепровода как объекта мониторинга и прогноза, осуществлен анализ подходов и методов построения моделей технологических процессов перекачки нефти в магистральном нефтепроводе, выявлена необходимость совершенствования средств моделирования с привлечением интеллектуальных и адаптивных методов в условиях неопределенности с целью повышения эффективности контроля и управления перекачкой нефти.

2. Разработаны новые адаптивные непараметрические методы и алгоритмы прогноза состояния статических и динамических систем, позволяющие строить модели перечисленных систем в условиях неопределенности. Рассмотрен случай идентификации динамических систем с запаздыванием. Показана асимптотическая сходимость моделей, представлены результаты численного моделирования. На основе разработанных алгоритмов предложен метод прогнозного моделирования выбега магистральных насосных агрегатов.

3. Предложен и проанализирован новый метод исследования линейности динамических систем с введением адаптивного критерия линейности – относительной меры нелинейности, а также алгоритма кусочной линеаризации моделей динамических систем с учетом начальных условий. Настройка начальных условий осуществляется регулятором с использованием процедуры оценивания обратного оператора динамической системы. С использованием предложенного метода выработан алгоритм решения задачи построения модели работы электрических нагревательных элементов в нефтепроводе в условиях недостатка априорных сведений о характеристиках процесса нагрева.

4. Предложен новый метод и реализующее его алгоритмическое обеспечение идентификации многосвязных статических систем на основе оценки решения систем нелинейных уравнений. На примере показана применимость предложенного метода идентификации нефтепроводной сети с оценкой уравнений Кирхгофа для гидравлической сети в условиях недостатка априорных сведений. В результате на порядок увеличена скорость расчета расходов для участков сети и надежность нахождения решения по сравнению с алгоритмами ньютоновского типа.

5. На основе принципов построения гибридных адаптивных моделей разработан новый алгоритм коррекции погрешностей измерения давления на линейной части магистрального нефтепровода, обладающий возможностью учета как априорных

сведений о характере распределения давления, так и вновь поступающих измерений, и может использоваться для автоматизации контроля, диагностики неисправностей и коррекции погрешностей датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода.

6. Предложена новая имитационная модель магистрального нефтепровода, представляющая собой альтернативу моделям, основанным на численном решении уравнений Навье-Стокса. Разработанная модель адаптирована для решения задачи ускоренного прогноза неустановившихся режимов работы магистрального нефтепровода для функционирования в составе средств диспетчерского контроля и управления. Работоспособность модели проиллюстрирована серией численных экспериментов.

7. Проанализированы возможности программного продукта MATLAB/SimHydraulics в качестве инструмента контроля за протеканием неустановившихся процессов в магистральном нефтепроводе. Создана новая библиотека инструментов MATLAB/SimHydraulics, в которой устранены недостатки, препятствующие решению задачи моделирования процессов в магистральном нефтепроводе. С помощью созданных инструментов решена задача прогноза распределенных технологических параметров (давление, расход, энергопотребление) в режиме реального времени при переходе между технологическими режимами участка нефтепровода АО «Транснефть – Западная Сибирь».

В результате выполнения работы можно дать следующие **рекомендации**:

1. В процессе построения систем мониторинга и прогноза технологических процессов в нефтепроводе, учитывая степень их сложности и неопределенности, рекомендуется широко использовать алгоритмы моделирования, комбинирующие фундаментальные принципы гидравлики, гидродинамики, теории упругости, термодинамики и т. д. с процедурами, основанными на анализе измеренных данных с применением имитационных, адаптивных и интеллектуальных методов. Синтез двух подходов позволит достичь эффекта, выраженного в повышенной скорости, точности и устойчивости прогнозных моделей и, как следствие, принимаемых решений в ходе автоматизированного управления оборудованием нефтепровода.

2. Модели неустановившихся процессов в нефтепроводе, в том числе предложенные в работе, рекомендуется использовать для решения комплекса задач мониторинга и прогноза технологических параметров, включая прогноз и планирование расхода электроэнергии, что позволит повысить уровень безопасности и энергоэффективности.

**Перспективы дальнейшей разработки темы исследования** предусматривают, в том числе, основываясь на предложенных подходах, создание средств поддержки принятия решений для технологов и диспетчеров с учетом анализа ретроспективной информации в форме т.н. «больших данных», позволяющих снизить влияние «человеческого фактора» при управлении процессами перекачки нефти по магистральному нефтепроводу.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS*

1. Agafonov, E. Application of Non-Parametric Approach to the Rapid Thermal Processing Systems Modeling [Text] / E. Agafonov // Proceedings Of The 6th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists: Modern Techniques and Technology, MTT 2000, Tomsk, (2000). Pp. 65-67.
2. Mangalova, E. Time Series Forecasting using Ensemble of AR models with Time-Varying Structure [Text] / E. Mangalova, E. Agafonov // Proceedings of IEEE Evolving and Adaptive Intelligent Systems 2012, Universidad Carlos III de Madrid, 2012. Pp. 198-203.
3. Mangalova, E. Wind Power Forecasting Using  $K$ -nearest Neighbors Algorithm [Text] / E. Mangalova, E. Agafonov // International Journal of Forecasting, 30 (2014). Pp. 402–406.
4. Agafonov E. Oil Pipeline Pressure Measurements Forecasting and Correction [Text] / E. Agafonov, N. Antropov // Applied Methods of Statistical Analysis. Nonparametric Methods in Cybernetics and System Analysis - AMSA'2017, Krasnoyarsk, Russia: Proceedings of the International Workshop, 2017. Pp. 270-278.
5. Bukhtoyarov, V. [et al.] Identification of hydraulic resistance parameters in hydraulic network model [Text] / V. Bukhtoyarov, E. Agafonov, N. Antropov, V. Tynchenko, V. Tynchenko // Journal of Applied Engineering Science, 2018, 16 (2). Pp. 267-273.

### *Публикации в журналах, рекомендованных ВАК*

6. Агафонов, Е.Д. Об одной модификации непараметрического алгоритма управления линейными динамическими системами [Текст] / Е.Д. Агафонов // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. Вып. 2. 2001. С. 145-152.
7. Агафонов, Е.Д. Непараметрический алгоритм управления нелинейными динамическими системами с использованием скользящих режимов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева: Материалы XII Международного симпозиума по непараметрическим методам в кибернетике и системному анализу. – Вып. 5(31). – Красноярск, 2010. С. 26-30.
8. Агафонов, Е.Д. Непараметрическая оценка условной плотности распределения вероятности в задаче управления статическим объектом [Текст] / Е.Д. Агафонов, Ю.В. Смешко // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. – Вып. 3 (36). – Красноярск, 2011. С. 11-15.
9. Агафонов, Е.Д. Об одном алгоритме классификации с использование коллективов непараметрических моделей / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. – Вып. 2 (42). – Красноярск, 2012. С. 4-7.
10. Мангалова, Е.С. О проблеме выделения информативных признаков в задаче классификации текстовых документов [Текст] / Е.С. Мангалова, Е.Д. Агафонов // Вестник Томского гос. ун-та. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. №1 (22). С. 96-103.
11. Агафонов, Е.Д. Непараметрическая модель в задаче прогнозирования

мощности ветряных электрических установок [Текст] / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова, О.В. Шестернева // Вестник Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнёва. № 2(48). – Красноярск, 2013. С. 4-9.

12. Агафонов, Е.Д. Об оценке решения системы уравнений в задаче построения модели гидравлической сети [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 3. С. 110-117.

13. Агафонов, Е.Д. Об особенностях использования системы MATLAB/SimHydraulics в задаче построения моделей магистральных нефтепроводов [Текст] / Е.Д. Агафонов, Ю.Н. Безбородов, А.Г. Миронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3 (103). С. 76-82.

14. Агафонов, Е.Д. Об учете скорости распространения волн давления при моделировании неустановившихся процессов с помощью Matlab/SimHydraulics [Текст] / Е.Д. Агафонов, А.Г. Миронов, Ю.Н. Безбородов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №8 (103). С.12-19.

15. Агафонов, Е.Д. Имитационная эвристическая модель магистрального нефтепровода [Текст] / Е.Д. Агафонов, Г.В. Ващенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 3. С. 195-203.

16. Агафонов, Е.Д. Алгоритм коррекции ошибок измерений датчиков давления на линейной части магистрального нефтепровода [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Контроль. Диагностика. 2016. № 7. С. 43-48.

17. Агафонов, Е.Д. Современные тенденции информатизации и автоматизации нефтегазовой отрасли [Текст] / Е.Д. Агафонов, Г.В. Ващенко // Научный журнал Сибирского федерального университета: техника и технология. 2016. №9 (8). С. 1340-1348.

18. Агафонов, Е.Д. Идентификация параметров гидравлического сопротивления модели гидравлической сети [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 3. С. 492-498.

19. Agafonov, E.D. On Nonparametric Control of a Dynamic System [Text] / E.D. Agafonov, A.V. Shishkina // Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18, № 4. С. 711-718.

20. Агафонов, Е.Д. Прогнозная модель процесса каталитической гидродепарафинизации в условиях недостатка априорных сведений [Текст] / Е.Д. Агафонов, А.В. Медведев, Н.Ф. Орловская, В.Р. Синюта, Д.И. Ярещенко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 9. С. 456-468.

#### *Монография*

21. Орловская, Н.Ф. Совершенствование переработки нефтей севера Красноярского края на малых нефтеперерабатывающих заводах: монография / Н.Ф. Орловская, И.В. Надежкин, Е.Д. Агафонов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2013. – 135 с.

#### *Свидетельства о регистрации программных продуктов*

22. Миронов, А.Г. Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 1.0. / А.Г. Миронов, Е.Д. Агафонов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660260 от 09.09.2016.

23. Агафонов, Е.Д. Программный модуль последовательного обучения кол-

лектива непараметрических оценок регрессии / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова, О.В. Шестернева // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611325 от 01.02.2017.

24. Агафонов, Е.Д. Программный модуль адаптивного прогноза показаний датчиков давления линейной части магистрального нефтепровода / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017611650 от 07.02.2017.

25. Агафонов, Е.Д. Программный модуль вероятностного прогнозирования на основе параметрических, непараметрических и гибридных алгоритмов / Е.Д. Агафонов, Е.С. Мангалова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017619632 от 30.08.2017.

26. Миронов, А.Г. Программный модуль – симулятор магистрального нефтепровода, версия 2.0. / А.Г. Миронов, Е.Д. Агафонов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018610986 от 19.01.2018.

*Публикации в других изданиях*

27. Agafonov, E.D. Non-parametric Models of Multiply Connected Systems in Conditions of Uncertainty [Текст] / E.D. Agafonov, A.P. Krasnoshtanov, I.A. Krasnoshtanova, V.V. Sinelnikov // Труды Пятого международного симпозиума «Интеллектуальные системы». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. С. 176-178.

28. Агафонов, Е.Д. Об учете начальных условий в задаче непараметрической идентификации нелинейных динамических процессов с использованием метода линеаризации [Текст] / Е.Д. Агафонов, Е.С. Кирик // Труды III Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'04, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2004. С. 845-855.

29. Агафонов, Е.Д. Непараметрический критерий линейности в задачах идентификации динамических процессов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Труды VI Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'07, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2007.

30. Агафонов, Е.Д. Использование среды Matlab/Simulink для анализа непараметрических моделей динамических систем [Текст] / Е.Д. Агафонов, В.П. Граблевский // Практика применения научного программного обеспечения: Труды V Межвузовской конференции по научному программному обеспечению, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 54-63.

31. Агафонов, Е.Д. Непараметрическая модель инфракрасной лампы в системах быстрого нагрева для изготовления полупроводниковых материалов [Текст] / Е.Д. Агафонов // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации». – Курск: КурскГТУ, 2009. С. 25-29.

32. Агафонов, Е.Д. Применение непараметрических алгоритмов идентификации в построении динамической модели инфракрасной лампы для системы быстрого нагрева [Текст] / Е.Д. Агафонов // Интеллектуальные системы (INTELS'2010): Труды IX Международного симпозиума. – М.: РУСАКИ, 2010. С. 157-161.

33. Агафонов, Е.Д. К вопросу синтеза адаптивных алгоритмов идентификации технологического процесса перекачки нефти по магистральным нефтепроводам

[Текст] / Е.Д. Агафонов // Материалы XVII Международной научной конференции «Решетневские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2013, Т.2. С. 5-7.

34. Агафонов, Е.Д. К вопросу синтеза адаптивных алгоритмов идентификации технологического процесса перекачки нефти по магистральным нефтепроводам [Текст] / Е.Д. Агафонов // XIV Научно-техническая конференция ОАО «Транссиб-нефть»: тезисы конкурсных работ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. С. 67.

35. Агафонов, Е.Д. Адаптивные комбинированные модели в задаче идентификации процессов в магистральном нефтепроводе [Текст] / Е.Д. Агафонов // Труды Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, М., ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 2014. С. 3029-3037.

36. Мангалова, Е.С. О проблеме генерации разнообразия индивидуальных моделей в задачах идентификации [Текст] / Е.С. Мангалова, Е.Д. Агафонов // Труды Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014, М., ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова, 2014. С. 3214-3223.

37. Агафонов, Е.Д. Идентификация и управление технологическими параметрами гидравлических сетей [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Материалы XVIII Международной научной конференции «Решетневские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2014, Т.2. С. 7-8.

38. Агафонов, Е.Д. Идентификация неустановившихся режимов магистрального нефтепровода с использованием MATLAB/SIMSCAPE [Текст] / Е.Д. Агафонов, А.Г. Миронов // Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы. ФИТМ-2014: материалы международной науч.-практ. конф., Красноярск, Сиб. федер. ун-т, 2014. С. 4-10.

39. Миронов, А.Г. О проблеме имитационного моделирования процессов в магистральном трубопроводе с применением MATLAB/SIMHYDRAULICS [Текст] / А.Г. Миронов, Е.Д. Агафонов // Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики. Материалы 6-й научно-практической Internet-конференции. отв. редактор Ю.С. Нагорнов. 2015. С. 228-234.

40. Антропов, Н.Р. Адаптивные модели коррекции показаний датчиков давления магистрального нефтепровода [Текст] / Н.Р. Антропов, Е.Д. Агафонов // Материалы XIX Международной научной конференции «Решетневские чтения», СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, 2015, Т.2. С. 8-10.

41. Antropov, N.R. A Nonparametric Identification and Control Algorithm of Multi Connected Systems [Текст] / A.N. Antropov, E.D. Agafonov, A.I. Kuklina // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2015. № 14. С. 191-193.

42. Агафонов, Е.Д. Оценка параметров гидравлического сопротивления модели многосвязной трубопроводной сети [Текст] / Е.Д. Агафонов, Н.Р. Антропов // Материалы Международной научной конференции «Решетневские чтения», 2016. Т. 2. № 20. С. 8-9.