

На правах рукописи



ЛОМУХИН Игорь Анатольевич

**Многоуровневая автоматизированная система
управления эксплуатацией углеводородного
месторождения**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Оренбург, 2026

Работа выполнена в Федеральном Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет».

Научный руководитель – **Пищухин Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Затонский Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета

Андреев Сергей Михайлович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления Федерального Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г.Уфа.

Защита состоится «17» марта 2026 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.352.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», по адресу: 460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд. 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» (www.osu.ru).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Хасанов Ильгиз Халилович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время нефтегазодобывающая отрасль, в силу деградиционного характера процесса добычи углеводородов, испытывает потребность в применении высокотехнологичных методов на разрабатываемых месторождениях. Повышение качества управленческих решений в полной мере обуславливает необходимость создания систем автоматизации, основанных на всестороннем анализе производственной информации. В таких системах широкое применение получил уровневый подход. Он позволяет получить дополнительный эффект по добыче, акцентировать соблюдение баланса между экологическими, социальными и экономическими интересами предприятия. Учитывая возрастающее внимание к рациональному использованию природных ресурсов, становится актуальным построение автоматизированных систем управления эксплуатацией углеводородных месторождений, направленных на повышение эффективности при одновременном соблюдении оптимальных значений параметров технологического процесса, условий максимальной социальной полезности и безопасности, экономической выгоды, выполнении необходимых экологических требований.

Степень разработанности темы исследования. Существенную роль в понимании вопросов эксплуатации углеводородного месторождения играют результаты исследований процессов разработки нефтяных и газовых месторождений. Данному вопросу посвящены работы Минханова И. Ф., Алиева З.С. Вопросами влияния физико-химических свойств жидкости на характеристики параметров эксплуатационных скважин занимались Крайнов Э.А., Белошенко Д.П. Решению проблем по определению влияния различных методов увеличения нефтеотдачи пластов на основе применения геолого-технических мероприятий посвятили исследования Муслимов Р.Х., Каневской Р.Д., Хасанов М.М. Применение перспективных технологий моделирования при добыче углеводородов подробно представлено в работах зарубежных авторов J.L. Salager, M.I. Briceno и C.L. Bracho.

Многоуровневым системам посвящено исследование М. Месаровича, Д. Мако, И. Токахары, сложным кибернетическим системам – работы В.Н. Фомина, координирующему управлению - Л.М. Бойчука, координатно-параметрическому управлению - Б.Н. Петрова, В.Ю. Рутковского, С. Д. Землякова. Основы применения метасистемного подхода в управлении заложены в работе Дж. Клира. Решение задач оптимального управления и распределения ресурсов исследовали В.Н. Кротов, Л.В. Канторович. Обоснование необходимости внедрения единой автоматизированной системы управления разработкой крупных месторождений приводится в работах Ю.Н. Васильева.

Несмотря на имеющиеся теоретические и практические разработки в области автоматизированных систем управления (АСУ) эксплуатацией углеводородного месторождения, до настоящего времени остаются слабо разработанными вопросы применения многоуровневых систем управления. Также существует проблема выбора эффективных видов геолого-технических мероприятий на скважинах, поскольку зачастую отдельные углеводородсодержащие зоны не коррелируются с обобщёнными характеристиками пласта, что осложняет эту процедуру и существенно снижает эффект от выбранных мероприятий, а также эффективность разработки углеводородного месторождения в целом. Таким образом, разработка многоуровневой

автоматизированной системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы состоит в повышении эффективности эксплуатации углеводородного месторождения, оцениваемой величиной затрат ресурсов на единицу произведенных товарных углеводородов, за счет внедрения многоуровневого управления, основанного на применении интегрированной модели производства и метасистемного подхода к выбору геолого-технических мероприятий.

Для достижения поставленной цели в диссертации были решены следующие основные **задачи**:

1. Провести анализ структурно-функциональной организации автоматизированной системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения.
2. Разработать и исследовать цифровые модели автоматизированной системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения.
3. Выполнить синтез алгоритмов работы автоматизированной системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения.
4. Провести экспериментальную проверку предложенных моделей, методики и алгоритмов работы автоматизированной системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения.

Объектом исследования является процесс эксплуатации углеводородного месторождения.

Предметом исследования является совокупность методов, моделей и алгоритмов управления, повышающих эффективность эксплуатации углеводородного месторождения, выражаемой в затратах ресурсов на единицу произведенных товарных углеводородов.

Методы исследования. Методы численного и имитационного моделирования, теории оптимального управления и системного анализа; основы теории построения алгоритмов, программные и языковые средства современных компьютерных технологий.

Научная новизна результатов исследования:

1. Стратифицированная модель системы управления процессом эксплуатации месторождения углеводородов, отличающаяся применением: 1) многоуровневой структуры, позволяющей сформулировать уровневые оптимизационные задачи с выявлением критериев и ограничений; 2) обеспечением возможности оптимального распределения ресурсов между уровнями.
2. Интегрированная по уровням АСУП модель полного цикла производства товарных углеводородов, отличающаяся от существующих моделей комплексным учетом финансовых, материальных и трудовых затрат, а также динамики изменения экономико-эксплуатационных параметров.
3. Методика выбора геолого-технических мероприятий, отличающаяся от существующих способом группировки эксплуатационных скважин, критерием оценки скважинных показателей и критерием удаленности от наихудшей скважины в многомерном пространстве этих показателей.
4. Алгоритмы работы автоматизированной системы управления технологическими процессами добывающего предприятия, разработанные для применения на выявленных уровнях управления.

Диссертация содержит результаты исследований, соответствующие паспорту научной специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами: п. 11. Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП,

АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования, информационное сопровождение жизненного цикла изделия, п. 13. Методы планирования, оптимизации, отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации функциональных и обеспечивающих подсистем АСУП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом.

Теоретическая значимость исследования определяется предложенными новыми моделями АСУП и алгоритмами управления полным циклом производства товарных углеводородов, основанными на применении информационной интегрированной модели, направленными на повышение эффективности эксплуатации углеводородного месторождения и позволяющими оптимизировать затрачиваемые ресурсы, способствующих оптимальному выбору мероприятий на фонде добывающих скважин.

Практическая значимость работы заключается в:

- разработанной программной системе, снижающей трудозатраты на управление процессами на добывающем предприятии, сокращающей объемы документооборота и время простоя технологического оборудования;
- результатах исследования, используемых в качестве рекомендаций при реализации производственной программы добывающего предприятия.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Пятиуровневая модель системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения с оптимальным распределением ресурсов по уровням на основе разработанной методики.
- 2) Методика выбора геолого-технических мероприятий для повышения эффективности эксплуатации добывающих скважин с двумя критериями выбора.
- 3) Интегрированная модель для выбора средств эффективной эксплуатации углеводородного месторождения, позволяющая оперативно оценивать показатели альтернативных решений с целью адаптации к изменяющимся производственным условиям.
- 4) Алгоритмы функционирования системы управления, автоматизирующие производственные функции добывающего предприятия на всех выявленных уровнях.

Достоверность результатов исследования обеспечивается корректным использованием математического аппарата, компьютерным моделированием и экспериментальными исследованиями, результаты которых не противоречат известным опубликованным положениям в данной области исследования.

Реализация результатов работы. Полученные при выполнении исследования теоретические и практические результаты использованы при разработке многоуровневой системы управления эксплуатацией Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения, что позволило оптимизировать распределение управленческих ресурсов, рационализировать выбор геолого-технических мероприятий на фонде добывающих скважин. Результаты диссертационной работы приняты к использованию в следующих организациях:

- 1) ООО «Новые интеллектуальные технологии» (Акт о внедрении результатов диссертационного исследования от 24 мая 2022г.);
- 2) АО НПФ «СИАНТ» (Справка о внедрении от 23 ноября 2022г.);
- 3) ООО «Новосибирский Научно-технический центр» (Акт об использовании результатов диссертационного исследования);

4) ООО «ОЗНА-Диджитал Солюшнс» (Акт о наличии практического интереса использования результатов диссертационной работы от 30.01.2023г.);

5) ООО «Газпромнефть-Цифровые решения» (Акт-справка о внедрении).

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях: VI, IX, XI Всероссийских научно-практических конференциях (с международным участием) «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике», (Оренбург, 2007г, 2010г, 2014г); II, III, V Молодежных научно-технических конференциях с международным участием «Основные проблемы освоения и обустройства нефтегазовых месторождений», (Оренбург 2008г, 2009г - диплом первой степени, 2011г - диплом второй степени); Областной выставке научно-технического творчества молодежи «НТТМ-2011», (Оренбург, 2011г) - лауреат; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли» (Оренбург, 2012г) - диплом первой степени; Российской нефтегазовой технической конференции SPE (SPE Russian Petroleum Technology Conference), (Москва, 2019г); 7-я Международной научно-практической конференции «Интеллектуальное месторождение: инновационные технологии от скважины до магистральной трубы», (Сочи, 2019г); Научно-практической конференции «Нефтегазовое производство - основа научно-технического прогресса и экономической стабильности», (Оренбург, 2020 г) I Международная научно-практическая конференция «Цифровизация управления в организационных системах», (Екатеринбург, 2025) – Диплом за лучший доклад.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 3 индексированы в МБЦ Scopus, 12 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, имеются другие публикации.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 196 страницах машинописного текста; содержит 91 рисунок и 6 таблиц, список литературы, включающий 105 наименований, приложения на 32 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследовательской работы, сформулированы цели и задачи, отражены основные положения, выносимые на защиту, показаны их научная новизна и практическая полезность.

В первой главе исследуется процесс управления эксплуатацией углеводородного месторождения. В связи с возрастающей сложностью современных АСУ анализируются механизмы многоуровневости, метасистемности и иерархичности, как наиболее адекватные в таких системах. Возрастающая сложность АСУ может быть преодолена декомпозицией системы с выделением уровней с независимыми объектами управления в составе стратифицированной модели управления. Такой подход выстраивается на основании исследований М. Месаровичем, Д. Мако, И. Токахарой, а также Канторовичем Л.В., Кротовым В.Ф., Яковлевым А.В. и др.

В связи со снижением объемов «легких» углеводородов наблюдается устойчивая тенденция к наращиванию количества разнообразных мероприятий, направленных на удержание уровня добычи. К примеру, исследованию процессов влияния на разработку нефтяных и газовых месторождений посвящены работы Гриценко А.И., Алиева З.С. Значительный вклад в определение влияния различных геолого-технических мероприятий на эффективность эксплуатации добывающих скважин внесли Хасанов

М.М., Хабибуллин Р.А., Рошкетаев А.Р. В тоже время вопросам повышения эффективности эксплуатации углеводородных месторождений с использованием многоуровневых систем управления уделяется значительно меньше.

Во второй главе описана пятиуровневая стратифицированная модель системы управления процессом эксплуатации месторождения углеводородов, формулируются уровневые задачи оптимизации, ставится и решается задача оптимального распределения управленческих ресурсов.

На рисунке 1 представлена пятиуровневая стратифицированная модель системы управления процессом эксплуатации месторождения углеводородов.

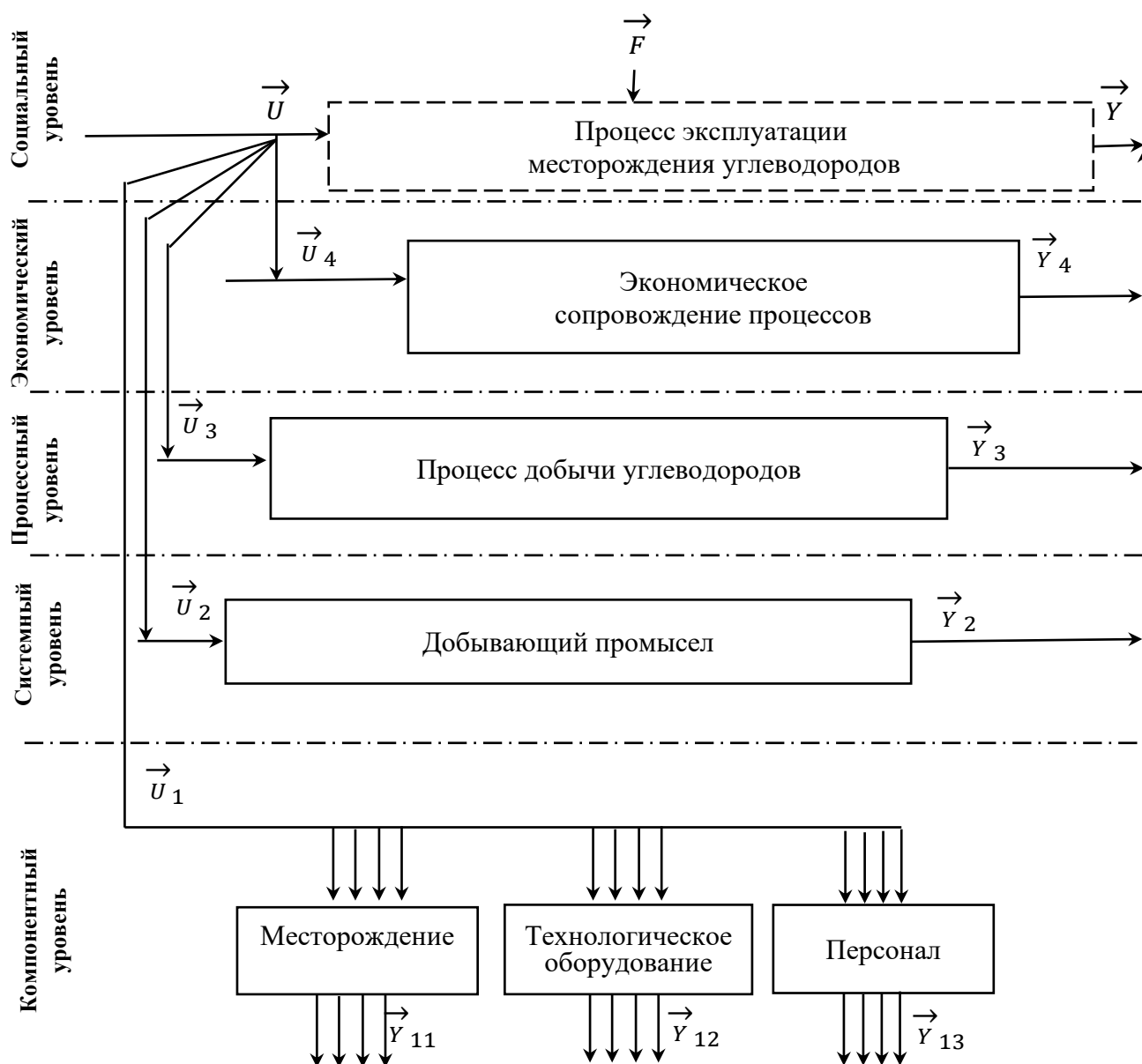


Рисунок 1 – Пятиуровневая стратифицированная модель системы управления эксплуатацией месторождения углеводородов

На верхнем уровне объектом управления является процесс эксплуатации углеводородного месторождения, имеющий результатом уровень *социальной* востребованности продукта – товарных углеводородов. Эта величина определяется значениями многих других величин и, в первую очередь, эффективностью, определяемой как себестоимость добычи единицы продукта, диктуемой рынком (и даже политикой), а

также обуславливается степенью соответствия режимов и показателей эксплуатации, соответствующих социальным, юридическим, экологическим требованиям. Вынесем последние показатели в ограничения, приняв в качестве основного критерия эффективности эксплуатации углеводородного месторождения величину затрат ресурсов на единицу получаемого продукта.

Как комплексный, этот критерий минимизируется на четырех нижележащих уровнях. На самом нижнем, первом уровне вклад вносится в основном тремя составляющими: действиями персонала, функционированием технологического оборудования и состоянием самого месторождения углеводородов. Эти *компоненты* являются объектами управления первого уровня каждый со своей управляемой величиной, управляющими воздействиями и ресурсами.

Второй уровень соединяет эти составляющие в *систему*, управляемой величиной в которой являются показатели ее состояния, а управляющими – воздействия, изменяющие это состояние. Система же создается для реализации основного процесса – в данном случае добычи углеводородов из природного месторождения. Поэтому управляемыми величинами на третьем, *процессном уровне*, являются показатели результативности добычи углеводородов, а управляющими воздействиями – технологические режимы протекания этих процессов.

Провести же глубокую процессную рационализацию лучше всего *экономическими* инструментами. Соответственно, на четвертом уровне управляемыми величинами становятся экономические показатели, а управляющими воздействиями – экономические «рычаги».

Структуризацию критериев и ограничений уровневых оптимизационных задач, в соответствии с работой Р.Т. Абдрашитова, необходимо осуществлять сверху. Ограничения при этом обуславливаются верхними уровнями как: социальные, экономические, процессные, системные и компонентные, а критерии «спускаются» с верхнего уровня на нижний.

Социальный уровень обуславливает максимизацию социальной полезности – полноты и качества удовлетворения общества в углеводородном сырье, выражаемой в данном исследовании себестоимостью тонны углеводородов. Кроме того, социальный уровень «отсекает» социально-неприемлемые решения. Экономический уровень решает задачу минимизации затрат в соответствии с критерием вышестоящего уровня, а для этого в работе решается ключевая задача по оптимальному распределению ресурсов.

Роль процессного уровня заключена в поиске средств поддержания, а в случае позитивного сценария, увеличения уровня добычи углеводородов. Главным средством достижения данной цели является выбор оптимального набора геолого-технических мероприятий в рамках выделенных экономическим уровнем ресурсов. Этот уровень определяет критерий для системного уровня в виде максимизации направленности связей на поддержание, а в случае позитивного сценария, увеличение уровня добычи углеводородов.

На системном уровне осуществляется организация связей всех компонент добывающего промысла с использованием информационной интегрированной модели, что позволяет проводить согласование технологических процессов добычи углеводородов для повышения эффективности всей системы в целом.

Компонентный уровень отвечает за соответствие необходимым требованиям отдельных элементов добывающего промысла.

Представленная стратифицированная модель системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения позволяет упростить описание системы для понимания

происходящих в ней процессов, снизить многосвязность контуров управления, одновременно организовать простую взаимосвязь между стратами, позволяющую выявить интегрированный результат с оценкой вкладов, наконец, оптимально распределять ресурсы между стратами с максимизацией результата управления. Упрощается также постановка и решение задач оптимального управления для каждой из страт в силу их большой независимости.

На рисунке 2 представлена упрощенная структурная схема многоуровневой системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения.

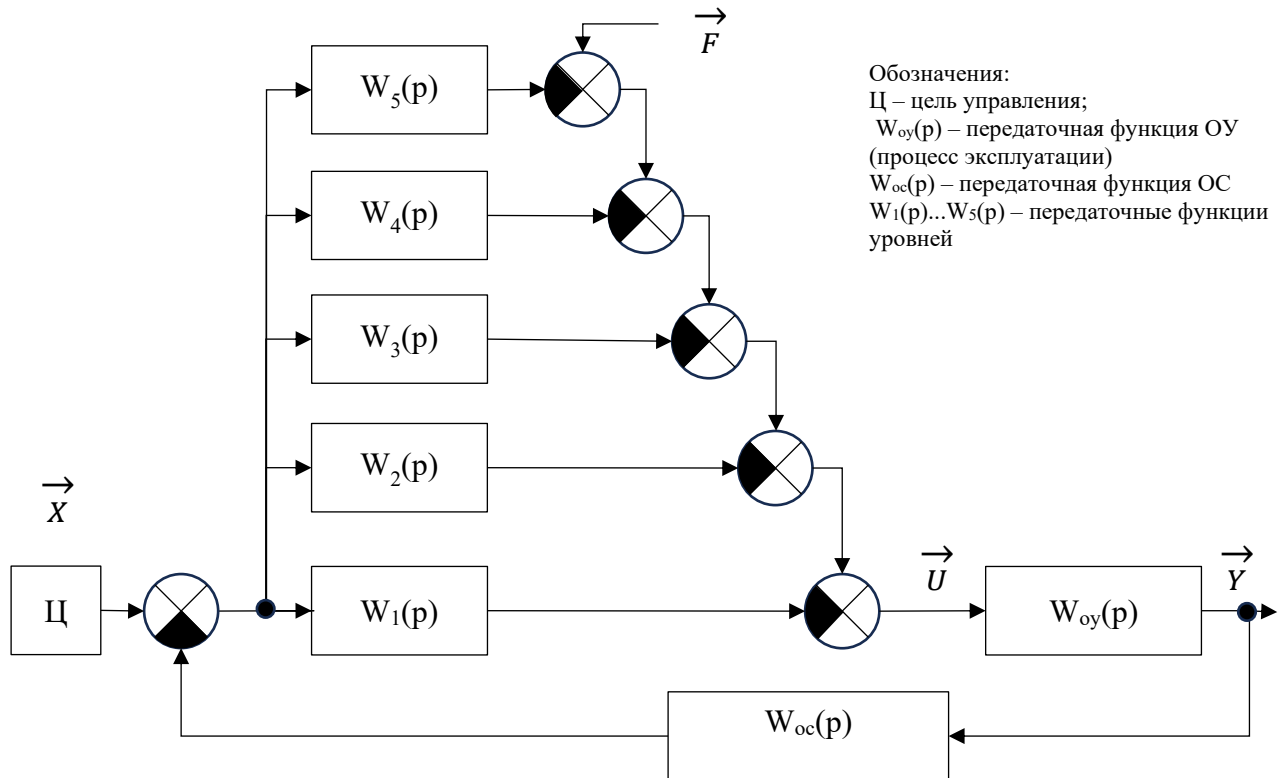


Рисунок 2 – Упрощенная структурная схема системы управления

Анализ структурной схемы показал, что результаты эксплуатации углеводородного месторождения определяются первым компонентным уровнем. Применяя принцип инвариантности для него, убеждаемся, что остальные уровни играют роль буфера внешних воздействий. Более того, их значимость, с точки зрения управления, можно оценивать по этой степени буферирования.

Эффективность эксплуатации месторождения (K), в силу подчеркнутой выше независимости уровней, можно определить как сумму:

$$K = \alpha_1(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3) + \alpha_2 Y_2 + \alpha_3 Y_3 + \alpha_4 Y_4 \rightarrow \max, \quad (1)$$

где Y_2, Y_3, Y_4 – выходные управляемые величины уровней;

X_1, X_2, X_3 – выходные управляемые величины компонент первого уровня;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – весовые коэффициенты для каждого уровня;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – весовые коэффициенты компонент первого уровня.

При этом ограничения на данном уровне являются внешними: политическими, юридическими, экологическими, рыночными и т.д.

На экономическом уровне основной задачей является оптимальное распределение ресурсов (финансовых, материальных и кадровых). Рассмотрим решение данной задачи распределения ресурсов для независимых частей уровня на основе обобщенной методики оценки уровневых величин ресурсов.

Задача ставится следующим образом:

$$P(K) \rightarrow \max \text{ при } C = \text{const},$$

где $P(K)$ – вероятность повышения эффективности эксплуатации месторождения:

C – сумма затрат на мероприятия, направленные на повышение эффективности эксплуатации месторождения.

Эффективность эксплуатации, как следует из стратифицированной модели системы управления, достигается на четырех уровнях, согласно рисунку 1. Вероятность достижения цели на i -ом уровне обозначим через P_i . Тогда формула для расчета полной вероятности для системы управления с учетом независимости уровней, выразится как

$$P = \prod_{i=1}^4 P_i \quad (2)$$

Примем гипотезу о малом, независимом, дискретном изменении вероятности при последовательной реализации мероприятий в пределах каждого из уровней. Масштаб мероприятия напрямую связан с затрачиваемыми на него ресурсами. Фактически, вкладывая ресурсы мы снижаем потери эффективности. Переходя к порционности расходования ресурсов, делаем вывод, что вероятности снижения потерь будут перемножаться в количестве пропорциональном числу выделенных порций ресурсов u_i .

Удельную вероятность снижения потерь эффективности на каждом уровне от «единичных» проведенных мероприятий (выделенных порций ресурсов) обозначим как q_i . Тогда, общие потери на i -м уровне:

$$Q_i = q_i^{u_i}, u_i \geq 0, i = 1, \dots, 4 \quad (3)$$

Поскольку вероятности повышения эффективности и снижения потерь в сумме составляют единицу, получим:

$$P = \prod_{i=1}^4 (1 - q_i^{u_i}) \quad (4)$$

Раскрываем произведение:

$$(1 - q_1^{u_1}) \cdot \dots \cdot (1 - q_4^{u_4}) = 1 - q_1^{u_1} - q_2^{u_2} - \dots - q_1^{u_1} + q_1^{u_1} \cdot q_2^{u_2} + \dots \quad (5)$$

Принимая, что q_i малы, отбросим слагаемые второго и большего порядка малости. В этом случае вероятность общих потерь примет вид:

$$Q(\bar{u}) = \sum_{i=1}^4 q_i^{u_i} \quad (6)$$

Используя векторное обозначение для коэффициента пропорциональности затраченных ресурсов и принимая, что единичная стоимость каждого из проведенных мероприятий - c_i , получим

$$C = C(\bar{u}) = \sum_{i=1}^4 c_i u_i, 0 \leq u_i \leq C/c_i \quad (7)$$

При постановке задачи максимизации уровня эффективности необходимо определить значения u_i (для каждого из уровней), при условии, что стоимость мероприятий не превышает имеющейся суммы ($C(\bar{u}) \leq C_{\text{зад}}$).

Применим для решения задачи метод множителей Лагранжа. Составим лагранжиан

$$F(\bar{u}) = Q(\bar{u}) + \varepsilon(C_{\text{зад}} - C(\bar{u})) \quad (8)$$

где ε – неопределенный множитель Лагранжа

Решив данную задачу оптимизации методом множителей Лагранжа, получим:

$$u_i = \frac{1}{\ln q_i} \left[\frac{C_{\text{зад}} - \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\ln q_i} \ln(-\frac{c_i}{\ln q_i})}{\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\ln q_i}} + \ln \frac{c_i}{\ln q_i} \right] \quad (9)$$

Значения параметров были получены на основе накопленных данных по реализованным мероприятиям за 36 месяцев эксплуатации выбранного месторождения углеводородов и представлены в таблице 1. Таблица с расчетом параметров приведена в диссертационной работе. Расчет доверительного интервала производился для случая неизвестной дисперсии и объема выборки $n > 30$.

Таблица 1 – Значения параметров

Параметры	1	2	3	4
c_i	15 ($\pm 1,23$)	33 ($\pm 3,6$)	21 ($\pm 2,58$)	23 ($\pm 1,93$)
q_i	0,054 ($\pm 0,003$)	0,03 ($\pm 0,005$)	0,07 ($\pm 0,01$)	0,053 ($\pm 0,014$)

Решим задачу оптимального распределения ресурсов на мероприятия по повышению эффективности эксплуатации. Допустим, имеем 20 000 у.е. ресурсов.

Используя формулу

$$a_i = \frac{c_i}{\ln q_i} \quad (10)$$

рассчитаем для уровня управления:

$$a_1 = -5,1499; a_1 \ln(-a_1) = -8,4406$$

$$a_2 = -9,4154; a_2 \ln(-a_2) = -21,1125$$

$$a_3 = -8,0172; a_3 \ln(-a_3) = -16,6885$$

$$a_4 = -7,6929; a_4 \ln(-a_4) = -15,6957$$

$$\sum_{i=1}^4 a_i = -30,2753;$$

$$\sum_{i=1}^4 a_i \ln(-a_i) = -61,9373$$

Рассчитаем u_i по формуле (9):

$$u_1 = 226,85 \quad u_2 = 188,883 \quad u_3 = 248,523 \quad u_4 = 224,852$$

Выделяемые средства на повышение эффективности i -ого уровня рассчитаем по формуле (7). Таким образом, на первом уровне требуется выделить 3404 у.е., на 2-ом 6218, на 3-ем 5296, на 4-ом 5082. Общая сумма равна $C=3404+6218+5296+5082=20000$ у.е.

Распределение средств для решения задачи повышения эффективности эксплуатации месторождения при заданном уровне ресурсов представлено на рисунке 3.



Рисунок 3 – Распределение ресурсов по уровням

Таким образом, высота каждого столбца может определить значение весового коэффициента в формуле (1). Результаты расчета на основе данной методики получили фактическое подтверждение на пилотном добывающем предприятии: анализ распределения затрат предприятия за 2024 год показывает хорошее приближение рассчитанных параметров, что представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Фактическое распределение затрат добывающего предприятия за 2024г

№	Категории	Сумма, тыс. у.е.
1	Затраты на регламентное обслуживание оборудования (ТОИР), ревизия насосов, плановые обучения ТБ, контроль целостности	35 124 (15 %)
2	Затраты на процессы на удержание геологического темпа падения уровня добычи.	78 348 (34 %)
3	Затраты, направленные на прирост добычи (ГТМ, Бурение) для компенсации геологического падения уровня добычи	69 276 (30 %)
4	Улучшение базовых и сервисных(вспомогательных) процессов	48 180 (21 %)

Представленная методика позволяет оценивать вклад каждого из уровней и, соответственно, оптимально разделять управляющие ресурсы при организации управляющих воздействий с максимизацией общего уровня эффективности эксплуатации.

В третьем разделе в русле тенденции возрастания роли вероятностных связей рассмотрены управляющие воздействия в виде специально организационных мероприятий, повышающих эффективность функционирования эксплуатационного фонда, выбор которых осуществляется после предварительной оценки на интегрированной предиктивной модели. На этой же модели решаются оптимизационные задачи, критерии и ограничения для которых сформулированы многоуровневым подходом к управлению.

Оценим эффективность эксплуатации углеводородного месторождения на основе принятого в нефтегазовой отрасли математического описания физических процессов добычи. Тогда, уравнение объекта управления примет вид:

$$Y = \frac{\sum_1^n C_i}{(\sum_{j=1}^m Q_j \cdot K_j) \cdot K_{т.т.} \cdot K_{подг.}} \quad (11)$$

где С- затраты по каждой статье расходов, руб/сут;

1..*n* – статьи расходов предприятия;

1..*m* – скважины;

K_j , $K_{т.т.}$, $K_{подг.}$ – коэффициенты эффективности эксплуатации на участках скважины, трубопроводного транспорта, подготовки.

Для расчета добычи углеводородов из пласта применяем формулу Дюпюи:

$$Q_j = K_{прод} \cdot \Delta P \quad (12)$$

где

$$K_{прод} = \frac{K \cdot h}{18.4 \cdot B_{ж} \cdot \mu_{ж} \cdot (\ln(\frac{r_e}{r_w}) - 0.75 + S)}, \quad (13)$$

следовательно

$$Q_j = Q_{пл}(K_{прод}, P_{пл}, P_{заб}, S, B_v, B_n, W_c, \mu_{ж}, r_w) \quad (14)$$

где $K_{прод}$ – коэффициент продуктивности, м³/сут/атм;

S - скин-фактор для призабойной зоны скважины;

K – проницаемость пласта, мкм²;

B_v – объемный коэффициент воды м³/м³;

B_n – объемный коэффициент нефти, м³/м³;

W_c – обводненность, %;

$\mu_{ж}$ – вязкость жидкости, сПз;

S – скин-фактор;

r_w – радиус скважины, м.

Коэффициент продуктивности $K_{пр}$ вычисляется следующим образом:

$$K_{\text{пр}} = \begin{cases} \frac{Q_{\text{ж}}}{P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}}}, & P_{\text{заб}} \geq P_{\text{нас}} \\ \frac{Q_{\text{ж}}}{P_{\text{пл}} - P_{\text{нас}} + \frac{P_{\text{нас}}}{1.8} \left(1 - 0.2 \cdot \left(\frac{P_{\text{заб}}}{P_{\text{нас}}} \right) - 0.8 \cdot \left(\frac{P_{\text{заб}}}{P_{\text{нас}}} \right)^2 \right)}, & P_{\text{заб}} < P_{\text{нас}} \end{cases} \quad (15)$$

где $K_{\text{пр}}$ – текущий коэффициент продуктивности, $\text{м}^3/\text{сут}/\text{атм.}$;

$Q_{\text{ж}}$ – дебит жидкости, $\text{м}^3/\text{сут.}$;

$P_{\text{заб}}$ – текущее забойное давление, атм. ;

$P_{\text{пл}}$ – пластовое давление на кровлю пласта, атм. ;

$P_{\text{нас}}$ – давление насыщения, атм.

В случае $P_{\text{заб}} < P_{\text{нас}}$ для расчета коэффициента продуктивности $K_{\text{пр}}$ используется поправка Вогеля, позволяющая учесть влияние выделения свободного газа в пласте на производительность скважины. Остальные параметры вычисляем аналогичным способом.

На основе представленного уравнения объекта была разработана и апробированная на выбранном добывающем предприятии интегрированная модель технологической системы углеводородного месторождения, включая модели-компоненты: геолого-гидродинамическая модель месторождения, скважины, инфраструктурные схемы сбора, подачи газлифтного газа, поддержания пластового давления, подготовки нефти и газа и финансово-экономическая модель. Состав модели представлен на рисунке 4.

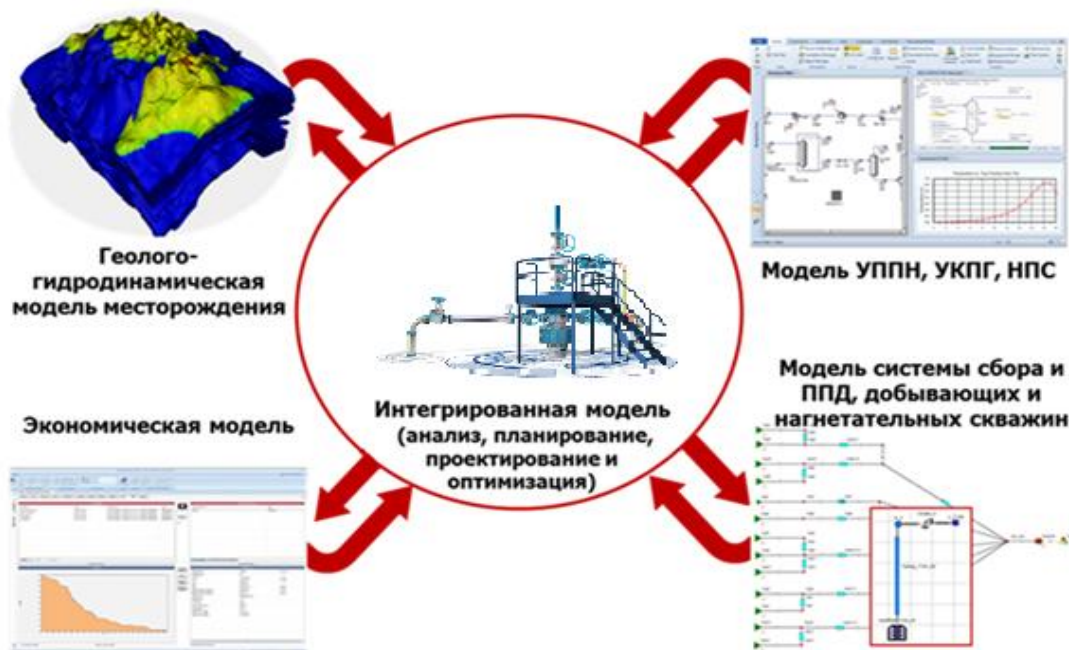


Рисунок 4 – Состав информационной интегрированной модели системы управления эксплуатацией углеводородного месторождения

Увязка отдельных элементов в единый контур всего добывающего актива происходит через итерационные расчеты по поиску оптимальных параметров на стыках отдельных компонент, например, значений забойных давлений в точке перехода флюида из пласта в скважину или устьевых давлений на стыке скважина-система транспорта, как схематично представлено на рисунке 5.

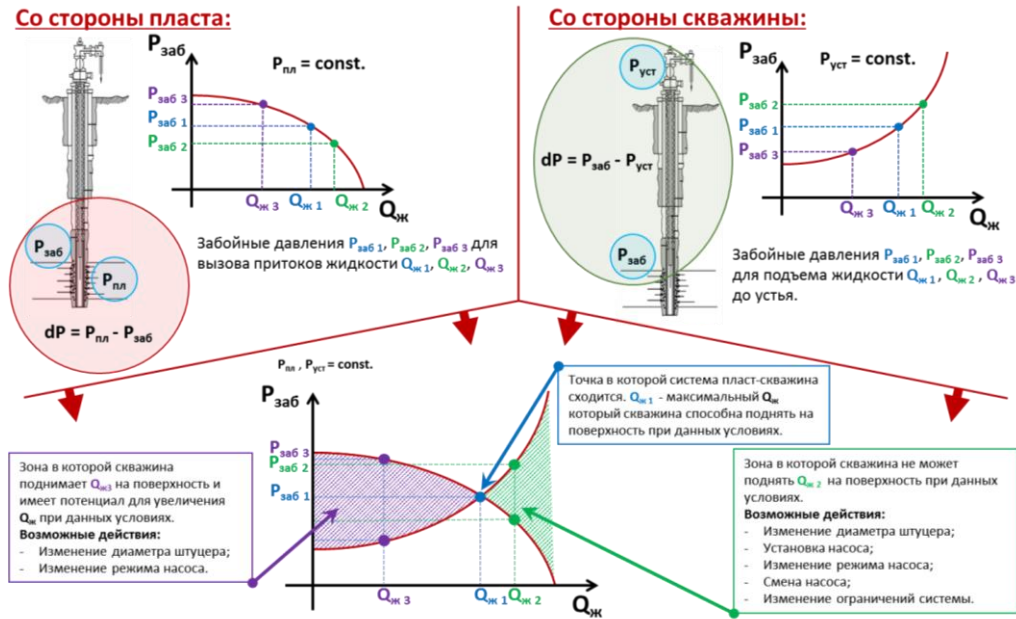


Рисунок 5 – Принцип работы интеграционного решения для информационной интегрированной модели

С учетом широкого спектра задач по управлению эксплуатацией месторождения, а также для обеспечения эффективного применения информационной интегрированной модели при выборе и оценке геолого-технических мероприятий на добывающем фонде скважин был разработан программный комплекс автоматизации управленческих процессов «Промысел», состав которого, примеры экранных форм и схема одного из алгоритмов работы представлены на рисунке 6 соответственно. Для интегрированных объектов управления, таких как эффективность эксплуатации месторождения, лучше подходят вероятностные оценки. Управление же вероятностными процессами осуществляется с помощью специально организованных мероприятий. При эксплуатации месторождения в качестве таковых выступают геолого-технические мероприятия.

В исследовательской работе предложена авторская методика выбора геолого-технических мероприятий для добывающих скважин с двумя критериями выбора. Аналитически были выявлены координаты многомерного пространства признаков, в котором определяются области эффективного применения классов мероприятий. Для проведения границ классов ГТМ в этом многомерном пространстве необходимы базовые критерии. Ввиду затратности реализации мероприятий и большой сложности процедуры, выбор становится многокритериальным. Самый простой из критериев подразумевает комплексный учет параметров, отражающий свойства пласта (тип коллектора, пористость, проницаемость, и др.), стоимостные и технические характеристики геолого-технического мероприятия (давление, температура и др.) и изменение параметров эксплуатации скважины до и после мероприятий (буферное, забойное давления и др.), на основе которого в многомерном пространстве параметров скважин и большого статистического материала проведен выбор геолого-технических мероприятий с гарантированно максимальной эффективностью, произведенных ими изменений:

$$K_{\text{комп}}^j = \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta P_i \rightarrow \max \quad (16)$$

где $K_{\text{комп}}^j$ – критерий комплексного учета параметров для j -ого мероприятия для повышения эффективности эксплуатации ($j = 1, \dots, M$);

P_i – i -й параметр, отражающий свойства пласта, текущий дебит, стоимостные и технические характеристики скважины ($i = 1, \dots, N$);

α_i – коэффициент, уравнивающий размерности показателей.

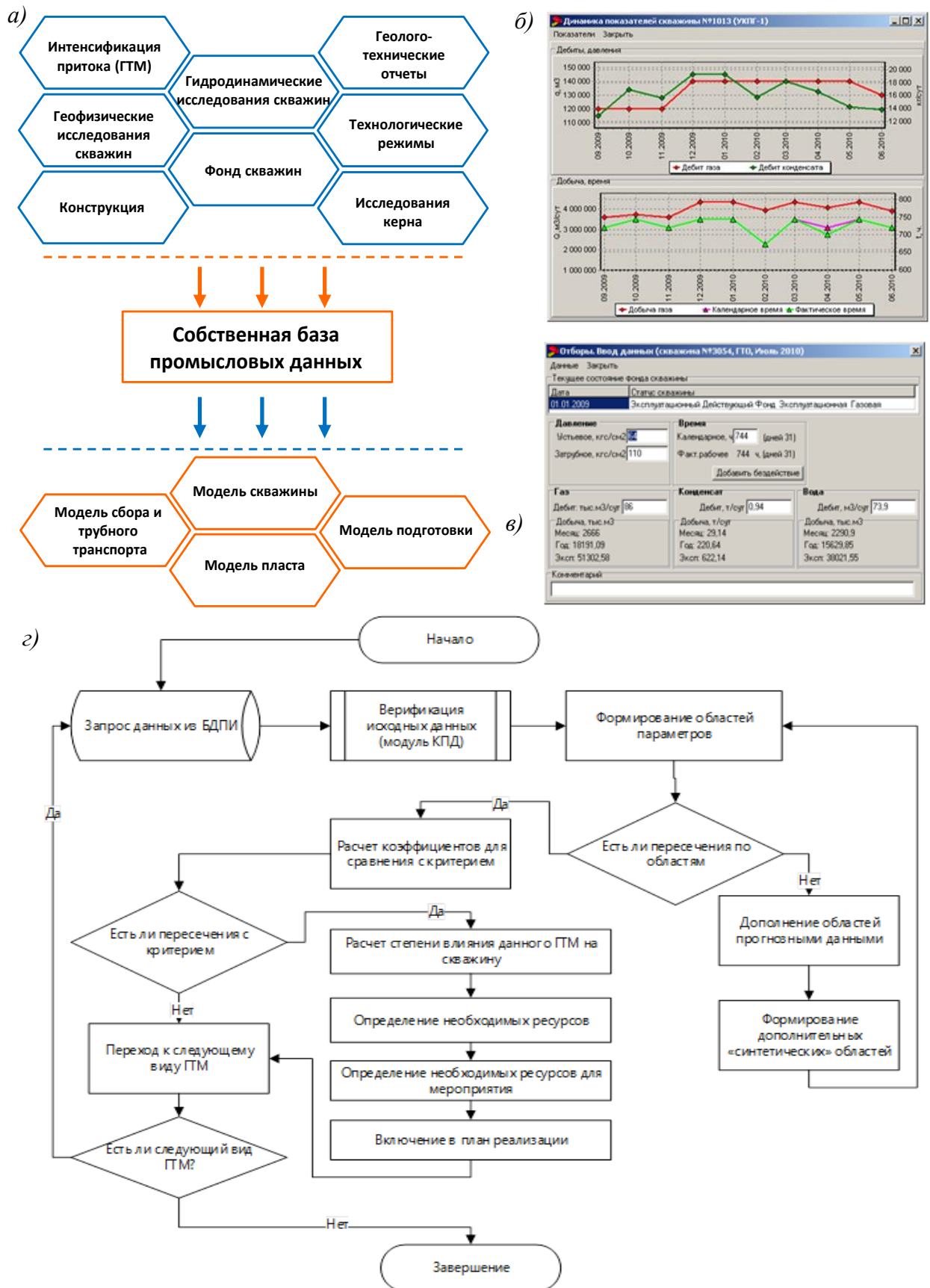


Рисунок 6 – Состав программного комплекса автоматизации управленческих процессов(а), экранные формы графического отображения динамики показателей(б), внесения параметров геолого-технических мероприятий (в), схема алгоритма управления выбором геолого-технического мероприятия (г).

На основании анализа статистики проведенных ранее мероприятий на текущем добывающем предприятии в многомерном пространстве параметров формируются области $D_{ГТМ}$, одному из которых должен принадлежать $K_{комп}$. Визуализация многомерного пространства параметров и сформированных областей $D_{ГТМj}$ представлена на рисунке 7.

Другим критерием выбора ГТМ может быть удаленность заданной скважины от скважины с наихудшими показателями от реализованного мероприятия:

$$K_j^{удал} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \alpha_i (\Pi_i - \Pi_i^{худ})^2} \rightarrow \max \quad (17)$$

где $K_j^{удал}$ – критерий удаленности от худшего результата j -ого ГТМ ($j = 1, \dots, M$);

Π_i – параметр, отражающий свойства пласта, параметры добычи, стоимостные и технические характеристики рассматриваемой скважины-кандидата по выбранному виду ГТМ;

$\Pi_i^{худ}$ – параметр, отражающий свойства пласта, параметры добычи, стоимостные и технические характеристики скважины с наихудшим результатом по выбранному виду ГТМ;

α_i – коэффициент, уравнивающий размерности показателей.

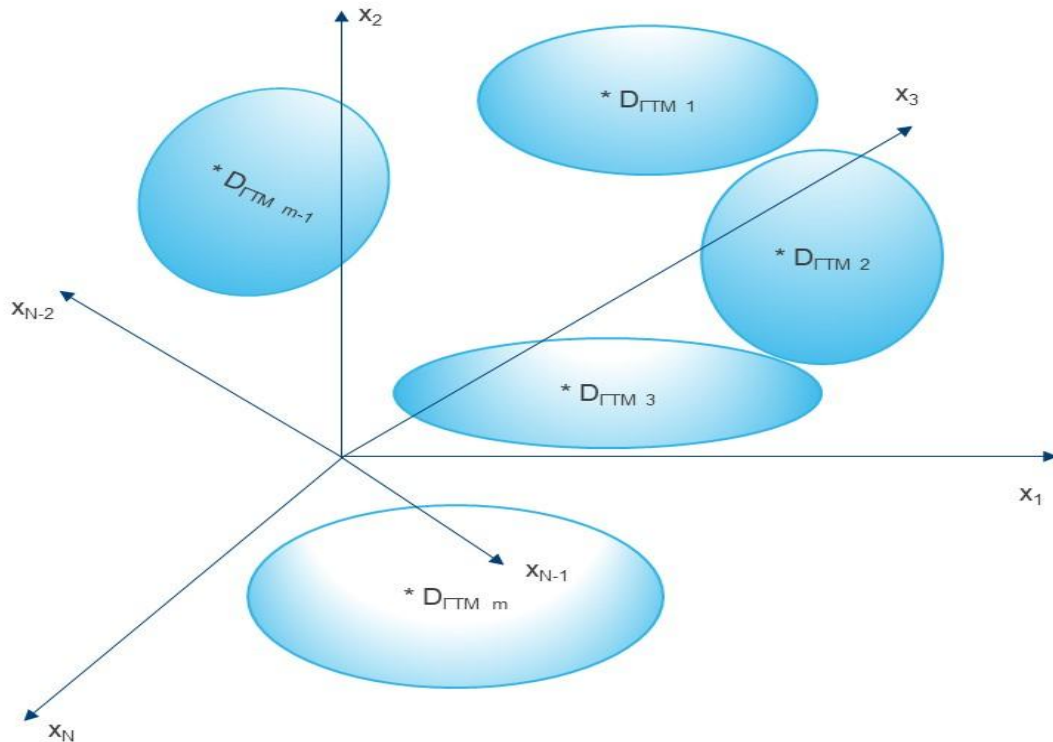


Рисунок 7 – Визуализация многомерного пространства параметров и сформированных областей $D_{ГТМj}$

Выбор осуществляется в том же многомерном пространстве, однако, сначала определяются эталоны наихудших реализаций мероприятий по интенсификации. Это позволяет выбрать геолого-техническое мероприятие, максимально далеко уводящее скважину в этом многомерном пространстве от наихудшего результата.

Такой подход использует проведенное ранее разбиение многомерного пространства технологических параметров скважин на области с назначенным геолого-техническим мероприятием, выбранным на статистическом материале с гарантированно лучшим результатом.

Окончательная оценка эффективности геолого-технических мероприятий осуществляется с помощью формирования итоговых таблиц со списками скважин-кандидатов под ГТМ с рассчитанным коэффициентом актуальности для добывающего предприятия:

$$C_T = \frac{c}{Q}, \text{ где } Q = q_2 - q_1, \quad (19)$$

где C_T – себестоимость тонны нефти; q_2 – дебит скважины после применения выбранного ГТМ, q_1 – дебит скважины до ГТМ, C – стоимость мероприятия.

Пересечение итоговых таблиц по двум критериям дает набор скважин с максимально эффективным соотношением ресурсных затрат на мероприятия к приростам добычи скважин. К тому же, представленная методика выбора геолого-технических мероприятий позволяет применить принцип дублирования скважин-кандидатов под ГТМ.

В четвертой главе рассмотрены практические аспекты работы. Применение информационной интегрированной модели позволило повысить эффективность производственных процессов: определение планируемых параметров работы скважины после проведения геолого-технических процессов; расчет изменения добычи при изменении способа эксплуатации скважин; оптимизация расхода активного газа с сохранением/увеличением добычи; оптимизация подключения кустов к нефтесборным коллекторам и др.

Повышение эффективности обусловлено возможностью апробации большого количества управленческих решений на этой модели и, следовательно, более адекватного выбора лучшего.

В качестве успешного примера применения интегрированной модели представлены результаты расчета оптимизации (перераспределения) расхода газлифтного газа для увеличения уровня добычи пилотного участка углеводородного месторождения. При проведении тестовых выборов геолого-технических мероприятий для нефтяных скважин был выполнен ряд экспериментов на нефтяном добывающем фонде. На 35 скважинах был зафиксирован прирост добычи нефти более 15 % от первоначального значения.

На основе представленных теоретических и экспериментальных исследований получено повышение эффективности эксплуатации углеводородного месторождения, выраженного в уменьшении доли низкоэффективных мероприятий на добывающем фонде скважин на 7 %, повышении уровня добычи углеводородов на 5,6 % при минимальном негативном влиянии на окружающую среду.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, представлены акты о внедрении результатов работы в ООО «Газпромнефть-Оренбург», а также представлены алгоритмы работы автоматизированной системы управления производственными процессами:

1. Главным обобщенным показателем эффективного освоения природных подземных ресурсов является эффективность эксплуатации углеводородного месторождения, выражающаяся через себестоимость одной тонны добытых углеводородов.

2. Устраняющая многосвязность системы управления стратифицированная модель, включающая пять уровней: на первом уровне располагаются реальные составляющие, второй уровень объединяет их в систему, третий уровень – процессный – отражает динамику системы, четвертый уровень выделяется для оптимального определения соотношения эффект/затраты – экономический, последним пятым уровнем

является социальный уровень. Такой подход позволил проводить поаспектный анализ и выбирать эффективные мероприятия при эксплуатации месторождения углеводородов.

3. Введенный контур адаптации с информационной интегрированной по стратам моделью процесса эксплуатации месторождения позволил выявлять адекватные текущей ситуации управленческие решения, обеспечивающие повышение эффективности эксплуатации месторождения.

4. Разработанные алгоритмы управления с применением информационной интегрированной модели и методика выбора ГТМ позволили снизить долю низкоэффективных мероприятий на добывающем фонде скважин на 7 % и повысить уровень добычи углеводородов на 5,6 % при минимальном негативном влиянии на окружающую среду.

5. Разработанная автоматизированная система управления эксплуатацией углеводородного месторождения введена в промышленную эксплуатацию в ООО «Газпромнефть-Оренбург» (приказ о вводе в ПЭ, заключение Экспертной комиссии ООО «Газпромнефть-Оренбург», г.Оренбург). Алгоритмы автоматизированной системы управления производственными процессами добывающего предприятия (Программный комплекс «Промысел») в настоящее время используются в ООО «Сиант» (Справка о внедрении, г.Новосибирск), ООО «Новосибирском Научно-Техническом Центре» (Акт об использовании результатов диссертационного исследования, г.Новосибирск), в ООО «Новые интеллектуальные технологии» (Акт о внедрении, г.Оренбург), в ООО «Озна диджитал солюшн» (Акт о наличии практического интереса, г.Уфа), в ООО «Газпромнефть-Цифровые решения» (Акт-справка о внедрении).

Основные результаты диссертации представлены в работах:

Публикации в рецензируемых научных изданиях из «Перечня...» ВАК РФ

1. **Ломухин, И.А.** Выявление независимых частей страт в модели системы управления производством / И.А. Ломухин, А.М. Пищухин, Г.Ф. Ахмедьянова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2025. – №3. – С. 23-25.

2. **Ломухин, И.А.** АСУ эксплуатацией месторождения углеводорода / И.А. Ломухин, А.М. Пищухин, Г.Ф. Ахмедьянова, А.И. Киян // Автоматизация. Современные технологии. – 2023. – №3. – С. 99-103.

3. **Ломухин, И.А.** Система автоматизированного управления комплексом геолого-технических мероприятий / И.А. Ломухин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2022. – №10. – С. 34-38.

Публикации в наукометрических базах Scopus и Web of Science

4. **Ломухин, И.А.** Многоуровневое управление разработкой месторождения углеводородов / И.А. Ломухин, Г.Ф. Ахмедьянова, А.М. Пищухин // Нефтяное хозяйство. – 2023. – № – С. 80-85.1.

5. **Lomukhin I.** Modelling an Integrated Control Object; G. Akhmedyanova, I. Lomukhin, A. Pishchukhin // В сборнике: 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 988 022075.

6. **Lomukhin I.** Моделирование работы газлифтной скважины с автоматизированной системой управления подачи газлифтного газа / E. Yudin, R. Khabibullin, I. Galyautdinov, I. Lomukhin, Y. Murzaev. В сборнике: SPE Russian Petroleum Technology Conference 2020.

В других изданиях:

7. **Ломухин, И.А.** Цифровые двойники нефтедобывающего предприятия/ И.А. Ломухин, А.М. Пищухин, Г.Ф. Ахмедьянова // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления. Сборник научных трудов. – 2024. – С. 2617-2621.

8. **Ломухин, И.А.** Верификация геолого-промысловых параметров работы скважин оренбургского НГКМ /И.А. Ломухин, А.М. Пищухин / В сб.: Университетский комплекс как

региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбург. гос. ун-т. – Электрон. дан. – Оренбург : ОГУ, 2022.

9. **Ломухин, И.А.** Автоматизация системы управления и контроля газлифтного газа при бескомпрессорной газлифтной эксплуатации скважины /И.А. Ломухин, В.В. Полтавченко, С.А. Ломухин /В сб.: Нефтегазовое производство - основа научно-технического прогресса и экономической стабильности. Материалы научно-практической конференции, посвященной 35-летию Оренбургского филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Под общей редакцией С.Г. Горшенина. – 2020. – С. 440-443.

10. **Ломухин, И.А.** Создание цифрового двойника месторождения с помощью использования интегрированного моделирования /И.А. Ломухин, А.И. Киян / В сб.: Нефтегазовое производство - основа научно-технического прогресса и экономической стабильности. Материалы научно-практической конференции, посвященной 35-летию Оренбургского филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Под общей редакцией С.Г. Горшенина. – 2020. – С. 435-439.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и баз данных:

11. **Ломухин И.А., Пищухин А.М.** Программа выбора геолого-технического мероприятия в многомерном пространстве Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021680737, 11 RU 2.2021. Заявка № 2021680212 от 10.12.2021.

12. **Ломухин И.А., Пищухин А.М.** Программа выбора геолого-технического мероприятия на основе комплексного критерия Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021681054, 17.12.2021. Заявка № 2021680263 от 10.12.2021.

13. **Ломухин И.А.** Темп падения базовой добычи нефти. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020666817, 16.12.2020. Заявка № 2020664258 от 13.11.2020.

14. **Ломухин И.А.** Программный модуль прогнозирования добычи нефти после интенсификации притока Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020666818, 16.12.2020. Заявка № 2020664256 от 13.11.2020.

15. **Ломухин И.А.** Расчетный модуль сопоставления совместных замеров расхода активного газа, забойного давления, дебита жидкости Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664167, 01.11.2019. Заявка № 2019662793 от 16.10.2019

16. **Ломухин И.А.** Верификация исходных данных для построения им Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664179, 01.11.2019. Заявка № 2019662796 от 16.10.2019.

17. **Ломухин И.А.** Программный модуль для автоматического формирования графика гидродинамических исследований Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019664251, 01.11.2019. Заявка № 2019662791 от 16.10.2019.

18. **Ломухин И.А.** Программа для поиска и сравнения пользовательских файлов Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018662810, 16.10.2018. Заявка № 2018660503 от 01.10.2018.

19. **Ломухин И.А.** Проверка ежемесячного отчета технологический режим работы скважин Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018662811, 16.10.2018. Заявка № 2018660498 от 01.10.2018.

20. **Ломухин И.А.** Программа навигации по файловому архиву гипи Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018663685, 01.11.2018. Заявка № 2018660506 от 01.10.2018.

21. **Ломухин И.А.** База данных геолого-промысловой информации для интеллектуальной СППР о выборе геолого-технических мероприятий для всех типов скважин Свидетельство о регистрации базы данных RU 2018620445, 15.03.2018. Заявка № 2016621633 от 09.12.2016.

22. **Ломухин И.А.** Интеллектуальная СППР о выборе геолого-технических мероприятий для всех типов скважин Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017611590, 06.02.2017. Заявка № 2016663539 от 09.12.2016.

ЛОМУХИН Игорь Анатольевич

**Многоуровневая автоматизированная система
управления эксплуатацией углеводородного
месторождения**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.01.2026 г.
Формат 60х90/16. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии «Цифра» 460018,
г. Оренбург, пр. Победы 11, офис 1