

Ваталева Мария Владимировна

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЦЕПТУРОЙ
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТАМПОНАЖНЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ
СКВАЖИН С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пермь, 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
ШУМИХИН Александр Георгиевич

Официальные
оппоненты: **СИМОНОВА Лариса Анатольевна**
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Автоматизация и управление»
Набережночелнинского института (филиала) ФГАОУ
«Казанский (Приволжский) федеральный университет»

НАЗАРОВ Максим Александрович
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Механизация, автоматизация и
энергоснабжение строительства»
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет»

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

Защита диссертации состоится «28» июня 2019 г., в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.188.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru/>).

Автореферат разослан «30» апреля 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент

В.И. Фрейман

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для цементирования промежуточных и эксплуатационных колонн в нефтяных и газовых скважинах в настоящее время практически повсеместно применяют тампонажные материалы на основе портландцемента. Однако, их использование в большинстве случаев не приемлемо. В первую очередь это связано с тем, что цементный камень, полученный на основе традиционно используемого тампонажного портландцемента, затворенного как на пресной воде, так и на насыщенном водном растворе хлорида натрия, не может образовывать плотный герметичный контакт цементного камня с горной породой в стенках скважин. Поэтому при цементировании обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах, находящихся в осложненных горно-геологических условиях, используются многокомпонентные магнезиальные тампонажные растворы, приготавливаемые затворением смеси сухих компонентов водным раствором хлорида магния. Для каждой скважины разрабатывается своя уникальная рецептура с необходимыми показателями качества, значения которых зависят от многих факторов, таких как глубина скважины и длина колонны, технико-технологические условия, температуры сухой смеси и жидкости, температура окружающей среды, назначение скважины, характеристики жидкости для затворения магнезиальной смеси, а также от конструктивных особенностей оборудования, применяемого при приготовлении тампонажного раствора. Производство высококачественных сухих магнезиальных тампонажных смесей (СМТС) осуществляется только на специально подготовленных площадках в закрытых помещениях, оборудованных всеми необходимыми техническими средствами. В промышленных условиях возникает задача обеспечить требуемые значения показателей качества тампонажного раствора, что может быть достигнуто соответствующим управлением процессом приготовления смеси (составление рецептуры, дозирование и порядок ввода компонентов, время перемешивания). При существующей технологии производства достижение требуемых значений показателей качества получаемого тампонажного раствора можно обеспечить управлением её рецептурой. Процесс создания рецептуры является трудоемким, требующим больших затрат ресурсов, в первую очередь, людских и временных.

Таким образом, **актуальной** является разработка комплекса методов, позволяющих автоматизировать и повысить оперативность и эффективность управления операциями создания рецептуры для конкретной скважины, находящейся в осложненных горно-геологических условиях.

Степень проработанности темы.

Сухие магнезиальные тампонажные смеси, базовые составы которых разработаны Г.М. Толкачевым и А.С.Козловым [патент РФ № 2273724 от 14.04.2006 г.], с недавнего времени получили широкое применение при строительстве скважин на нефтяных и газовых месторождениях Западного Урала и Восточной Сибири.

Важным этапом в жизненном цикле (ЖЦ) сухой магнезиальной тампонажной смеси является создание рецептуры, которое на данный момент

осуществляется путем лабораторных пробных затворений сухих компонентов смеси. В литературных источниках рассматриваются методы, способствующие решению этой задачи. В частности, применение методов планирования эксперимента, математического моделирования и оптимизации состава многокомпонентных смесей описано в работах В. И. Чернякевича, А. А. Сагындыкова, Ж. Т. Наширалиева, Ф. Г. Ахмадиева., Р. М. Гильфанова, В. А. Харитонов и В. А. Шаманова. Однако эти методы относятся к производству строительных смесей, бетонов и других сыпучих материалов, которые не учитывают меняющиеся требования к качественному и количественному составу смесевых композиций. Поэтому необходима разработка комплексного подхода, основанного на сборе и хранении информации о произведенных ранее партиях продукции с учетом горно-геологических особенностей нефтегазовых месторождений, математических методах ее обработки, а также на лабораторном контроле растворов, приготовленных из сухой смеси произведенной партии.

В силу того, что СМТС применяются для цементирования нефтяных и газовых скважин недавно, нет четкого анализа зависимости показателей качества получаемых тампонажных растворов от состава и качества компонентов смеси, позволяющего выявить влияние конкретных компонентов на реологические характеристики получаемого тампонажного раствора. Поэтому для вновь создаваемых рецептов существует необходимость разработки моделей, связывающих показатели качества раствора с рецептурой и качеством компонентов, с последующей их адаптацией к условиям промышленного производства для дальнейшего использования в задачах контроля и, при необходимости, коррекции рецептуры производимых партий СМТС.

В настоящее время степень однородности распределения компонентов в сухой смеси магниезиальных тампонажных материалов определяется на основании результатов лабораторных анализов проб приготавливаемой смеси. Один из способов определения степени гомогенизации гетерогенных смесей по оптолептическому методу и информации об их поверхности был разработан и описан А. Г. Шумихиным, П. Ю. Сокольчиком, С. И. Сташковым [патент РФ № 2489705 от 10.08.2013г.]. Поскольку в состав СМТС входят мелкодисперсные компоненты, то на поверхности смеси при оптическом сканировании возникают «шумы», связанные с «запыленностью» поверхности, и данный метод становится малоприменимым. Поэтому актуальной является задача разработки и внедрения метода оперативного контроля качества перемешивания приготавливаемой сухой смеси магниезиального тампонажного материала.

Объект исследования – производственные процессы, протекающие на стадиях жизненного цикла магниезиальных тампонажных материалов.

Предмет исследования – методы, модели контроля и управления процессами в производстве сухих магниезиальных тампонажных смесей.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности управления операциями составления рецептуры и контроля качества продукции

промышленного производства сухих магниезиальных тампонажных смесей для цементирования обсадных колонн скважин в различных горно-геологических условиях нефтяных и газовых месторождений за счет разработки методов и моделей как элементов автоматизированной системы управления рецептурой.

Поставленная цель определяет необходимость решения следующих **задач**:

1. Анализ особенностей производства и применения СМТС, разработка структуры автоматизированной системы управления рецептурой СМТС .

2. Разработка метода определения требуемых значений показателей качества раствора тампонажных материалов и рецептуры СМТС, основанных на использовании информации о примененных ранее тампонажных растворах на скважинах и составленных на предприятии-изготовителе рецептурах.

3. Анализ зависимости показателей качества получаемых тампонажных растворов от состава и качества компонентов смеси, построение моделей, связывающих показатели качества раствора с рецептурой и качеством компонентов для разрабатываемых рецептов нового качественного состава, разработка метода и алгоритмов адаптации моделей к условиям на производстве.

4. Разработка методов и моделей оптимизации рецептуры СМТС с целью её коррекции, при необходимости, для получения тампонажных растворов с заданными показателями качества и повышение информативности оптолептического способа контроля однородности смеси при перемешивании.

5. Оценка эффективности предложенных методов и моделей как элементов автоматизированной системы управления рецептурой сухих магниезиальных тампонажных смесей.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Впервые предложена структура автоматизированной системы управления рецептурой сухих магниезиальных тампонажных смесей с выделением элементов, требующих разработки методов и моделей управления рецептурой при производстве смесей.

2. Предложен метод определения требуемых значений показателей качества тампонажного раствора для конкретной скважины и метод определения рецептуры СМТС для получения раствора с требуемыми значениями показателей качества, отличающиеся применением метода прецедентов для их определения, а также метода экспертных оценок для формирования признакового пространства разрезов месторождений скважин. Это позволяет определить требуемые значения показателей качества раствора для рассматриваемой скважины и соответствующую им рецептуру смеси по информации о ранее примененных растворах для крепления скважин и рецептурах СМТС без проведения дополнительных экспериментов по затворению смесей, кроме контрольных.

3. Предложено применять при разработке рецептов смесей нового качественного состава метод планирования эксперимента для получения моделей, идентифицирующих зависимости показателей качества тампонажного раствора от рецептуры и качества компонентов смеси, и метод адаптации

моделей к условиям промышленного производства, отличающийся коррекцией моделей, полученных при планировании эксперимента в лабораторных условиях, введением аддитивно к каждой из них функций от тех же факторов, что и в плане эксперимента. Функции параметризуются по известной рецептуре и данным контроля показателей качества раствора из произведенной смеси, что позволяет повысить точность прогнозирования показателей качества раствора.

4. Предложен метод оптимизации рецептуры СМТС с целью минимизации отклонений получаемых значений показателей качества тампонажного раствора от заданных, включающий решение задачи с обобщенной целевой функцией, составленной из моделей, связывающих показатели качества растворов и рецептуру смеси, и поиск оптимальной рецептуры непосредственно с экспериментами по затворению смеси с учетом ошибки их воспроизводимости. Это позволяет сократить время на определение рецептуры СМТС при необходимости её коррекции. Предложен оригинальный метод повышения информативности оптолептического способа контроля однородности перемешивания смеси, отличающийся введением в нее люмогена перед перемешиванием, что позволяет повысить четкость изображения её поверхности, получаемого при фото-видео фиксации с целью оценки степени однородности.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработанной впервые структуре автоматизированной системы управления рецептурой СМТС, методах и моделях управления и оптимизации рецептуры при производстве СМТС, модернизации оптолептического метода контроля степени перемешивания, повышающих эффективность управления процессами составления рецептуры и получения смесей требуемого качества.

Практическая значимость заключается в следующем:

- на основе анализа производства и применения СМТС для крепления скважин разработаны схемы, отражающие структуру автоматизированной системы управления рецептурой СМТС с применением PDM-технологии управления продукцией;
- разработан способ определения качества гомогенизации гетерогенных смесей, отличающийся введением в смесь перед перемешиванием контрастного вещества – люмогена;
- разработана PLM/PDM-система на базе ЛОЦМАН:PLM, внедренная в опытную эксплуатацию, позволяющая «пользователям» работать с базами данных и знаний о рецептуре, производстве смесей и применении их растворов для крепления скважин, о методах и моделях управления.

Методологическую основу исследований составляют: методы математического планирования эксперимента и статистической обработки информации, методы моделирования, методы экспертных оценок и прецедентов, методы исследования операций, в том числе многоцелевой оптимизации, натурного эксперимента.

Внедрение результатов работы. Предложенные методы и модели, как элементы автоматизированной системы управления рецептурой сухих магниезиальных тампонажных смесей, внедрены в ООО «НПФ «Монолит»

(г. Пермь), что привело к сокращению времени, затрачиваемого на разработку рецептуры смеси за счет уменьшения числа контрольных затворений в среднем на 9%, снижению количества исправляемого брака готовой продукции в среднем на 14%. Внедрение в опытную эксплуатацию ЛОЦМАН:PLM-системы позволяет сократить время, затрачиваемое на поиск информации при обработке заявки Заказчика и определение требуемых значений показателей качества тампонажного раствора для скважины на 42%, учет информации о текущих запасах сырья на складах при их оперативном планировании дает возможность сокращать и текущий избыток запасов в среднем на 19%. Внедрение результатов подтверждено соответствующими актами, выданными ООО «НПФ «Монолит».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура автоматизированной системы управления рецептурой сухих магниезиальных тампонажных смесей (п. 3 паспорта специальности).

2. Метод определения требуемых значений показателей качества тампонажных растворов для крепления конкретной скважины и рецептуры СМТС, основанный на методе прецедентов (п. 16 паспорта специальности).

3. Модели, идентифицирующие зависимости показателей качества тампонажных растворов от рецептуры и качества компонентов смеси. Метод оперативной адаптации моделей по данным контроля показателей качества тампонажных растворов, полученных при производстве СМТС (п. 6 паспорта специальности).

4. Метод оптимизации рецептуры СМТС для получения тампонажных растворов с заданными показателями качества, сочетающий вычислительный и натурный эксперимент с учетом воспроизводимости операций по затворению смеси. Метод повышения информативности оптолептического способа оценки равномерности распределения компонентов в смеси путем введения в нее люмогена перед перемешиванием (п.п. 8, 2 паспорта специальности).

5. Результаты апробации методов и моделей как элементов автоматизированного управления рецептурой сухих магниезиальных тампонажных смесей в производственной деятельности ООО «НПФ «Монолит» (п. 9 паспорта специальности).

Достоверность результатов подтверждается сравнением и совпадением теоретических и практических результатов исследований, непротиворечивостью результатам, полученным другими авторами.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники – 2015» (г. Уфа, 2014), XVI Международной научно-практической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века (С&Т*2015)» (г. Воронеж, 2015), XXIX Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29» (г. Санкт-Петербург, 2016), Всероссийской научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов, студентов и

школьников (с международным участием) «Химия. Экология. Урбанистика» (г. Пермь, 2017).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 18 печатных работах, в том числе 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК России для публикации результатов кандидатских диссертаций, из них 1 статья – в издании, индексируемом в Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, списка используемой литературы, заключения и 9 приложений. Содержит 192 страницы машинописного текста, 26 рисунков и 34 таблицы, список литературы из 108 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость результатов диссертации, отмечены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведено описание технологического процесса получения СМТС. Производство сухих смесей является периодическим, многотоннажным и его можно считать гибким, так как практически на одном и том же технологическом оборудовании выпускаются смеси с различным компонентным составом. Компонентный состав смеси зависит от условий обустройства скважин и нефтегазового месторождения.

Рассмотрен жизненный цикл СМТС, включающий, помимо технологического процесса приготовления смеси, операции составления рецептуры, контроля качества продукции, коррекции рецептуры при несоответствии качества требованиям заказа на выпуск партии смеси. На основании требуемых значений показателей качества тампонажного раствора для скважины, с определения которых начинается ЖЦ производства и применения смеси, решается задача разработки рецептуры смеси с минимизацией отклонений фактических значений показателей качества тампонажного раствора от заданных. Решением этой задачи является рецептура сухой смеси, которая передается на производство. Здесь на технологической установке происходит дозирование компонентов и перемешивание их в смесителе. В процессе перемешивания смеси осуществляют контроль степени однородности получаемой смеси и, если достигнута необходимая степень однородности, процесс перемешивания прекращают. По окончании перемешивания осуществляется контроль показателей качества получаемого тампонажного раствора путем затворения СМТС. В случае, если фактические значения показателей качества тампонажного раствора не выходят за допуски, то полученную смесь выгружают из смесителя и отгружают Заказчику. В противном случае, осуществляют корректировку рецептуры, заключающуюся в решении оптимизационной задачи и введении в смесь корректирующих добавок с повторным перемешиванием ранее произведенной смеси. Если решение задачи подбора рецептуры получить не удастся, то исследовательская лаборатория определяет причину недопустимых отклонений показателей

качества и разрабатывает новую рецептуру с изменением качественного состава смеси. Перечисленные элементы жизненного цикла СМТС требуют разработки методов и моделей автоматизированного управления рецептурой при производстве смесей и определяют структуру автоматизированной системы.

Для повышения эффективности управления операциями составления рецептуры СМТС разработана и применена опытная PDM-система, входящая в структуру автоматизированной системы управления рецептурой, а также позволяющая оптимизировать деятельность персонала производства.

На рисунке 1 приведена структурная схема, отражающая актуализацию баз знаний и данных PDM-системы, необходимых для решения задач по управлению составлением рецептуры, обеспечивающей получение растворов с требуемыми значениями показателей качества.

На схеме (рисунок 1) указаны блоки, индексы которых обозначают: И – информация баз, В – вычислительный модуль, М – модуль построения математической модели, Э – модуль проведения лабораторного эксперимента, П – модуль производства (перемешивания) смеси (индекс указан на других схемах приведенных ниже).

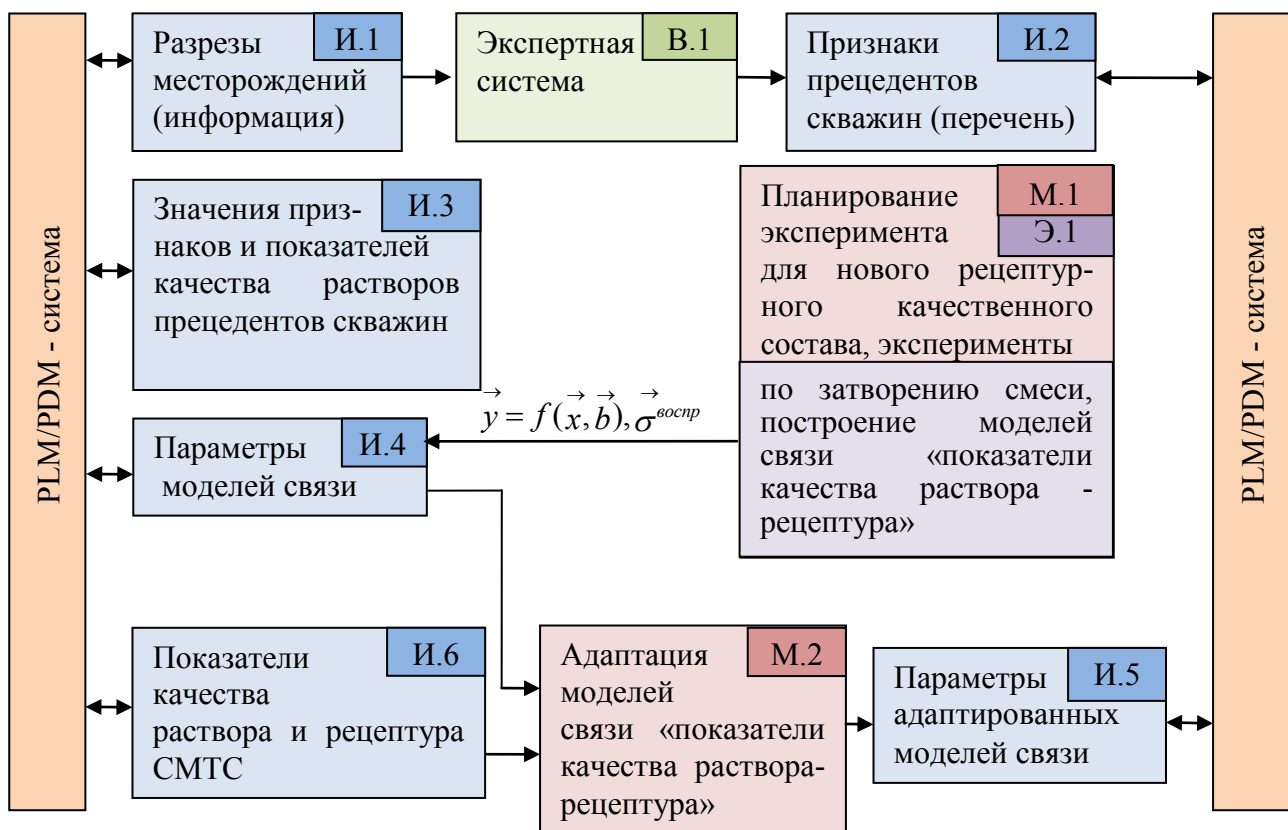


Рисунок 1 – Актуализация баз данных и знаний системы управления рецептурой

С применением метода экспертных оценок на основании информации о горно-геологических условиях разрезов месторождений, на которых обустроены скважины, формируется перечень признаков признакового пространства скважин и вводятся в базу данных значения признаков для каждой скважины, включая обустраиваемую, а также соответствующие

прецедентам скважин значения показателей качества использованных растворов СМТС. В базу данных вводятся также параметры математических моделей, связывающих показатели качества тампонажного раствора с рецептурой СМТС, полученных методом планирования эксперимента для вновь разрабатываемых рецептур различного качественного состава с целью сокращения числа опытов по затворению смеси, на каждый из которых затрачивается 2...3,5 часа. По мере наработки производством партий смеси известных рецептур и контроля качества растворов, эти регрессионные модели адаптируются. Базы параметров моделей пополняются.

Во **второй главе** рассмотрен подход к составлению рецептуры смеси для обустройства скважины, основанный на методе прецедентов. В этом методе используется информация, хранящаяся в базе данных, об обустроенных ранее на месторождениях скважинах. Каждый прецедент скважины характеризуется значениями признаков, которыми являются литолого-стратиграфические, горно-геологические, термобарические и технико-технологические условия ей отвечающие. Решением прецедента скважины являются значения показателей качества тампонажного раствора, использованного для её крепления с известной рецептурой. К показателям качества растворов СМТС относятся время загустевания раствора ($\tau_{\text{заг}}$), пластическая вязкость (ПВ), седиментационная стабильность (C_{20}). Признаковое пространство скважины включает следующие характеристики: назначение скважины (тех. колонна или обсадная), время перемешивания в оборудовании для приготовления раствора, температура сухой смеси и жидкости, глубина скважины и длина колонны, которые выбраны на основе согласованного мнения экспертов.

Подбор рецептуры СМТС из базы данных осуществляется по найденным требуемым значениям показателей качества раствора для конкретной скважины, представляющими пространство признаков прецедента рецептуры, также на основе метода прецедентов. Решением каждого прецедента рецептуры являются следующие характеристики сухой смеси: время загустевания оксида магния ($\tau_{\text{заг MgO}}$), содержание химически активного тонкодисперсного магнезиального вяжущего ($\text{MgO}_{\text{акт}}$), отношение жидкость-твердое (Ж:Т). Выбранный прецедент рецептуры наиболее полно отвечает требуемым значениям показателей качества раствора для обустройства скважины. На рисунке 2 приведена структурная схема автоматизированной поддержки выбора требуемых значений показателей качества раствора и рецептуры СМТС с применением метода прецедентов.

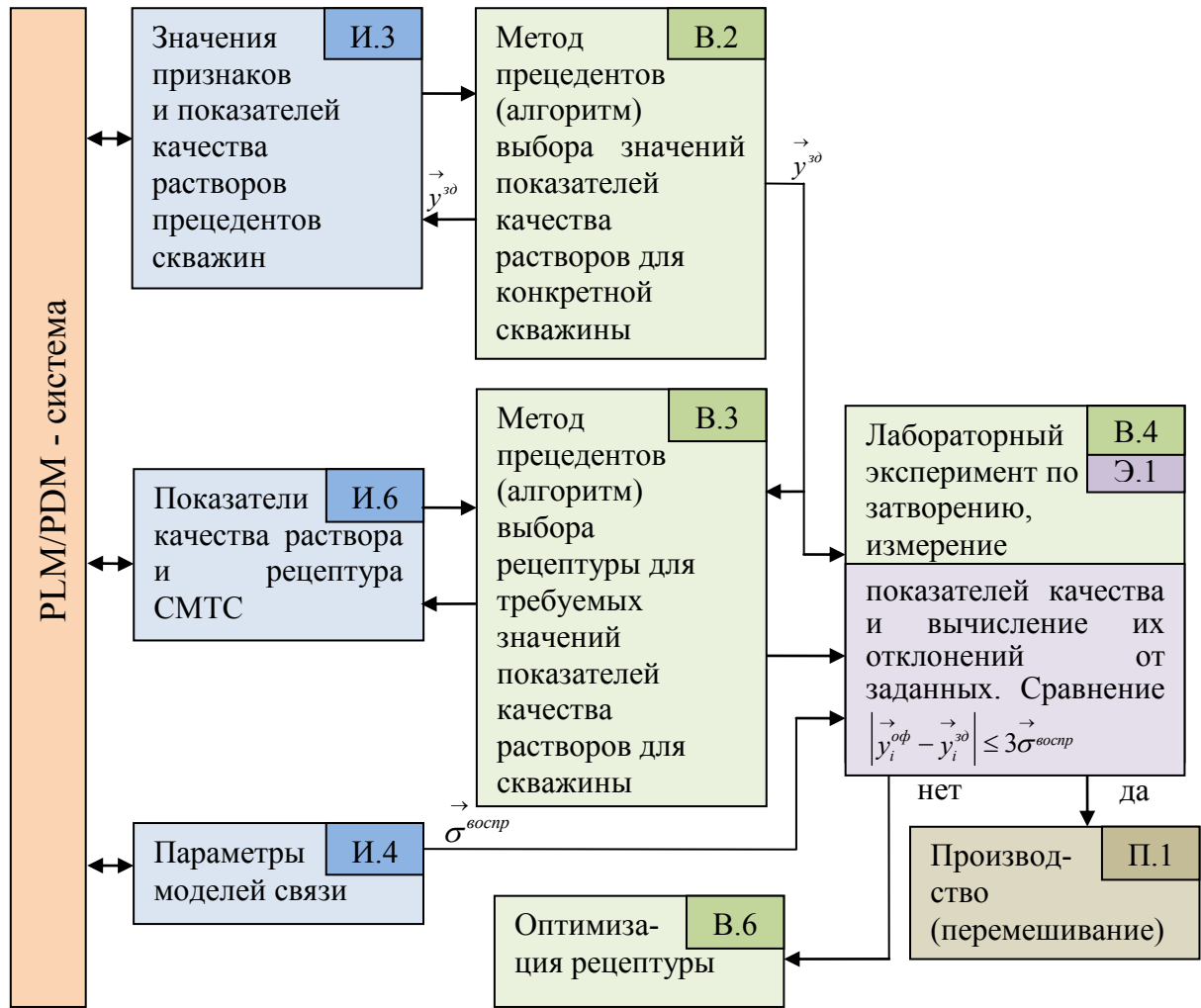


Рисунок 2 – Выбор требуемых значений показателей качества раствора и рецептуры СМТС

В методе прецедентов в базе данных отыскивается прецедент, наиболее близко, в смысле некоторой нормы в пространстве признаков, соответствующий текущему случаю. Для извлечения подходящего этому случаю прецедента используется подход, основанный на вычислении меры близости μ_j^l в признаковом пространстве текущего случая и прецедентов, которые рассчитываются по выражению $\mu_j^l(\vec{x}) = \left(1 / (x_j^l - V_j)^2 \right) / \sum_{l=1}^k \left(1 / (x_j^l - V_j)^2 \right)$, где V_j - j -ая координата точки пространства, соответствующей текущему случаю; x_j^l - j -ая координата признакового пространства l -го прецедента ($j = \overline{1, m}; l = \overline{1, k}$). Затем из базы прецедентов выбирается тот, для которого норма $\left\| \vec{\mu}^l \right\|$ максимальна.

Выбранная с применением метода прецедентов рецептура СМТС проверяется на соответствие значений показателей качества раствора из неё контрольным границам относительно требуемых значений, назначенным основываясь на правиле «трех сигм». Для этого затворяется СМТС с найденной

рецептурой и определяется абсолютная величина отклонения от заданных Заказчиком требуемых значений показателей качества тампонажного раствора, которая не должна быть больше утроенной ошибки воспроизводимости опытов по затворению. При нарушении этого условия осуществляется решение задачи коррекции её рецептуры. Задача решается как оптимизационная с применением математических моделей, связывающих показатели качества раствора с рецептурой СМТС и, при необходимости, экспериментально, поисковым методом с непосредственным затворением смеси и измерением значений показателей качества в лабораторных условиях.

В третьей главе с применением метода планирования эксперимента рассмотрено получение моделей, связывающих показатели качества тампонажного раствора с рецептурой СМТС для вновь разрабатываемых рецептов нового качественного состава. В качестве откликов в планах эксперимента берутся следующие показатели качества растворов: $\tau_{\text{заг}}$ (y_1), ПВ (y_2), C_{20} (y_3). В факторное пространство включены характеристики СМТС, в частности, $\tau_{\text{заг MgO}}$ (x_1), $\text{MgO}_{\text{акт}}$ (x_2), отношение Ж:Т (x_3). В таблице 1 в качестве примера приведены значения уровней факторов для трехуровневого трехфакторного эксперимента.

Таблица 1– Уровни факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Уровни факторов $\vec{z}$, натуральные ед.		
		основной	верхний	нижний
$\tau_{\text{заг MgO}}$, МИН	x_1	73	95	51
Содержание $\text{MgO}_{\text{акт}}$, %	x_2	10	20	0
Ж:Т	x_3	0,8	0,85	0,75

В результате обработки данных реализации эксперимента получены квадратичные формы, связывающие показатели качества тампонажных растворов с рецептурой и качеством компонентов смеси, вида:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{\substack{u=2 \\ j \neq u}}^k b_{ju} x_j x_u + \sum_{j=1}^k b_{jj} x_j^2. \quad (1)$$

Регрессионные модели (1) соответствуют: $\tau_{\text{заг}} = y_1(\vec{x})$; $\text{ПВ} = y_2(\vec{x})$; $C_{20} = y_3(\vec{x})$.

Оценена значимость коэффициентов уравнений регрессии и их адекватность. Для определения в эксперименте значений ошибок воспроизводимости ($\vec{\sigma}^{\text{воспр}}$) показателей качества раствора в точках плана ставились параллельные опыты.

Рассмотрен метод коррекции исходных моделей (1) по выборкам экспериментальных данных для смесей, полученных в производственных условиях. В методе исходные модели (1) включаются в скорректированные модели аддитивно. Для примера в таблице 2 представлены результаты

сравнения дисперсионных отношений (статистик) Фишера, указывающие на более высокую степень адекватности скорректированных моделей.

Таблица 2 – Сравнение значений статистик Фишера

Модели	Значения статистики для моделей		
	$y_1(\vec{x}) = \tau_{заг}$	$y_2(\vec{x}) = ПВ$	$y_3(\vec{x}) = C_{20}$
Исходные (1)	0.735	0.674	1.302
Скорректированные	2.341	6.613	2.647

Вид скорректированных моделей следующий:

$$y_i^{kop} = y_i + \Delta \bar{y}_i * f_{1i}(x_1) * f_{2i}(x_2) * f_{3i}(x_3), i = \overline{1,3},$$

где $\Delta \bar{y}_i = \sum_{j=1}^n \Delta y_{ij} / n, j = \overline{1, n}$; $\Delta y_{ij} = y_{ij} - y_{ij}^{of}$ – берется в качестве отклика при построении уравнения множественной регрессии методом Брандона; y_{ij}^{of} – выборочное значение i -го показателя качества; y_i – значения показателей, вычисленные по моделям (1), $i = \overline{1,3}$; n – объем экспериментальной выборки. Скорректированные математические модели позволяют адаптировать также и решение задачи оптимизации.

В четвертой главе рассмотрено решение задачи оптимизации рецептуры смеси при её коррекции с применением моделей. Поиск минимума значений отклонений показателей качества раствора от требуемых продолжается до достижения заданной точности его локализации. При этом, если при контрольном лабораторном затворении смеси найденной рецептуры отклонения показателей качества раствора не входят в заданный интервал $3\sigma_i^{босп}, i = \overline{1,3}$, то решение задачи продолжается поисковым методом, но уже непосредственно с затворением СМТС на каждом шаге с соответствующей этому шагу рецептурой. Структурная схема, отвечающая решению задачи оптимизации рецептуры, представлена на рисунке 3.

В общем случае задача составления рецептуры решается как оптимизационная многокритериальная, в которой в качестве критериев выступают отклонения частных вычисленных характеристик получаемого раствора от заданных значений. Модель векторной оптимизации с обобщенным критерием в виде суммы взвешенных квадратичных функций отклонений значений частных критериев от заданных будет иметь вид:

$$\left\{ R(\vec{x}) = \sum_{i=1}^3 \frac{b_i}{(y_i^{30})^2} (y_i(\vec{x}) - y_i^{30})^2 \rightarrow \min_{\vec{x}} |x_l - 1 \leq 0; -x_l - 1 \leq 0, \dim \vec{x} = 3, \right. \\ \left. \sum_{i=1}^3 b_i = 1 \right\} \rightarrow x_i^{opt}, i = \overline{1,3}, \quad (2)$$

где R – обобщенная целевая функция (критерий); $y_1(\vec{x}) = \tau_{заг}$, $y_2(\vec{x}) = ПВ$,

$y_3(\vec{x}) = C_{20}$ – правые части уравнений (1); $y_i^{zd}, i = \overline{1,3}$ – заданные значения показателей качества раствора; b_i – весовой коэффициент приоритета i -той характеристики раствора (определяется методом экспертных оценок); $\vec{x}^{opt}$ – вектор оптимальной рецептуры смеси.

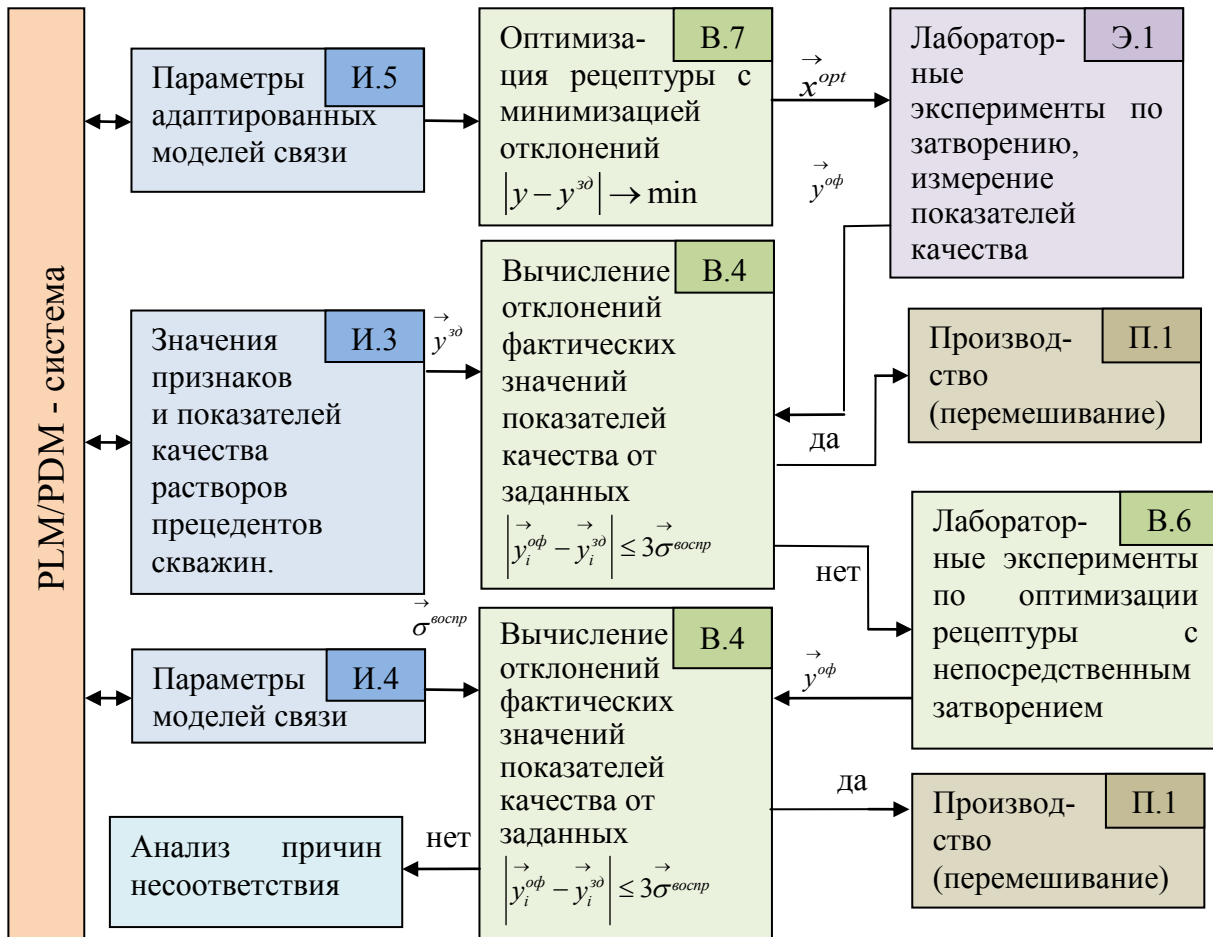


Рисунок 3 – Оптимизация рецептуры при постановке партии (заказа) СМТС на производство

В результате решения одного из примеров задачи (2) с обобщенной целевой функцией получены $z_1^{opt} = 87,31$ мин., $z_2^{opt} = 0,07\%$, $z_3^{opt} = 0,82$, где $z_i^{opt} = 0,5(z_{i\min} + z_{i\max}) + 0,5(z_{i\max} - z_{i\min})x_i^{opt}, i = \overline{1,3}$ – оптимальные значения показателей рецептуры в натуральном масштабе, $z_{i\min}, z_{i\max}$ – нижний и верхний уровни варьирования факторов при реализации плана эксперимента. После затворения СМТС найденного оптимального состава получены фактические значения показателей качества раствора $\tau_{заг} = 276,6$ мин; $ПВ = 295,35$ сПз; $C_{20} = 99,6$ кг/м³, отклонения которых от заданных не превышают значения $3\sigma_i^{воспр}, i = \overline{1,3}$.

Если отклонения полученных при затворении смеси фактических показателей качества (y_i^{of}) не удовлетворяют условиям

$|y_i^{of} - y_i^{3d}| \leq 3\sigma_i^{воспр}, \forall i = \overline{1,3}$, то переходят к поиску непосредственно на «объекте», например, методом деформируемого многогранника Нелдера-Мида с затворением СМТС в вершинах симплекса. При этом за центр исходного симплекса берется точка с кодированными координатами $\vec{x} = 0$. В вершинах симплекса ставится эксперимент с затворением и вычислением в них значений обобщенного критерия $\sum_{i=1}^3 |(y_i^{of} - y_i^{3d}) / y_i^{3d}|$. Находится вершина с наихудшим

значением критерия, которая отражается через центр противоположной грани, и вычисляются значения критерия в новой вершине. Координаты отраженной вершины без деформации симплекса вычисляются по формуле:

$\vec{x}^{(j)} = (2/n) \sum_{i=1}^{n+1} \vec{x}^{(i)} - (1 + (2/n)) \vec{x}^{(j)}$, а координаты отраженной вершины при

деформации симплекса по формуле: $\vec{x}^{(j)} = (3/2n) \sum_{i=1}^{n+1} \vec{x}^{(i)} - 0,5(1 + (3/n)) \vec{x}^{(j)}$. В

новой вершине ставится эксперимент с затворением, и лабораторным путем определяются значения показателей качества. Полученные значения частных критериев сводятся в обобщенный критерий, и найденное значение критерия в отраженной вершине сравнивается со значениями критерия в трех вершинах предыдущего симплекса. При заиклировании симплекса его размеры уменьшаются (симплекс деформируется) и осуществляется следующий шаг для улучшения значения критерия. Поиск с затворением СМТС повторяется то тех

пор, пока не будет выполнено условие $\sum_{i=1}^3 |(y_i^{of} - y_i^{3d}) / y_i^{3d}| \leq 3 \sum_{i=1}^3 \sigma_i^{воспр} / y_i^{3d}$, т.е.

пока сумма нормированных отклонений фактической величины каждого из показателей качества от заданных значений не станет меньше утроенной суммы нормированных ошибок воспроизводимости. Если условие выполнено, то осуществляется проверка условий $|y_i^{of} - y_i^{3d}| \leq 3\sigma_i^{воспр}, \forall i = \overline{1,3}$, в противном случае повышают точность поиска ужесточением предыдущего условия до

двух сумм, а затем до одной суммы $\sum_{i=1}^3 \sigma_i^{воспр} / y_i^{3d}$, включительно. Если же и

после повышения точности полученные значения тампонажного раствора не удовлетворяют условию $|y_i^{of} - y_i^{3d}| \leq 3\sigma_i^{воспр}, \forall i = \overline{1,3}$, специалисты лаборатории привлекаются к анализу и выявлению возможных причин несоответствия значений показателей качества раствора требуемым.

После передачи заявки и рецептуры на производство осуществляют подбор необходимых компонентов со склада и перемешивание их в конусном смесителе. По окончании перемешивания проводят контрольное затворение получившейся смеси. Если показатели качества полученного раствора отличаются от заданных на величину большую $3\sigma_i^{воспр}, \forall i = \overline{1,3}$, то решается задача оптимизации, описанная выше (рис. 3).

Возможной причиной больших отклонений фактических показателей качества от заданных может быть неравномерное распределение компонентов в смеси. С целью автоматизации оценки равномерности распределения разработан метод оперативного контроля, модифицирующий оптолептический способ контроля однородности перемешивания смеси с введением в нее перед перемешиванием люмогена, что позволяет повысить четкость изображения её поверхности, получаемого при фото-видео фиксации. На рисунке 4 представлены три фотографии с изображением поверхности смеси, полученные при различном времени перемешивания.

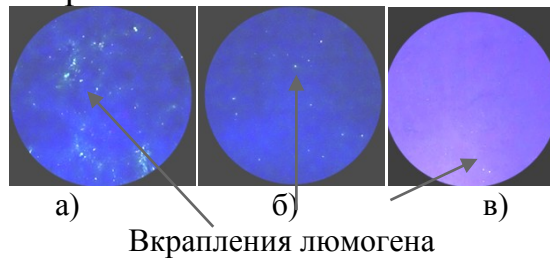


Рисунок 4 – Изображение поверхности смеси в процессе перемешивания:
а) – через 20 минут; б) – через 40 минут; в) – через 60 минут.

Исследование влияния добавок люмогена до 0,05% от массы сухой смеси показало, что присутствие добавок в СМТС не влияет на свойства магнезиального тампонажного раствора-камня. Структурная схема автоматизированного контроля и управления процессом перемешивания СМТС приведена на рисунке 5.

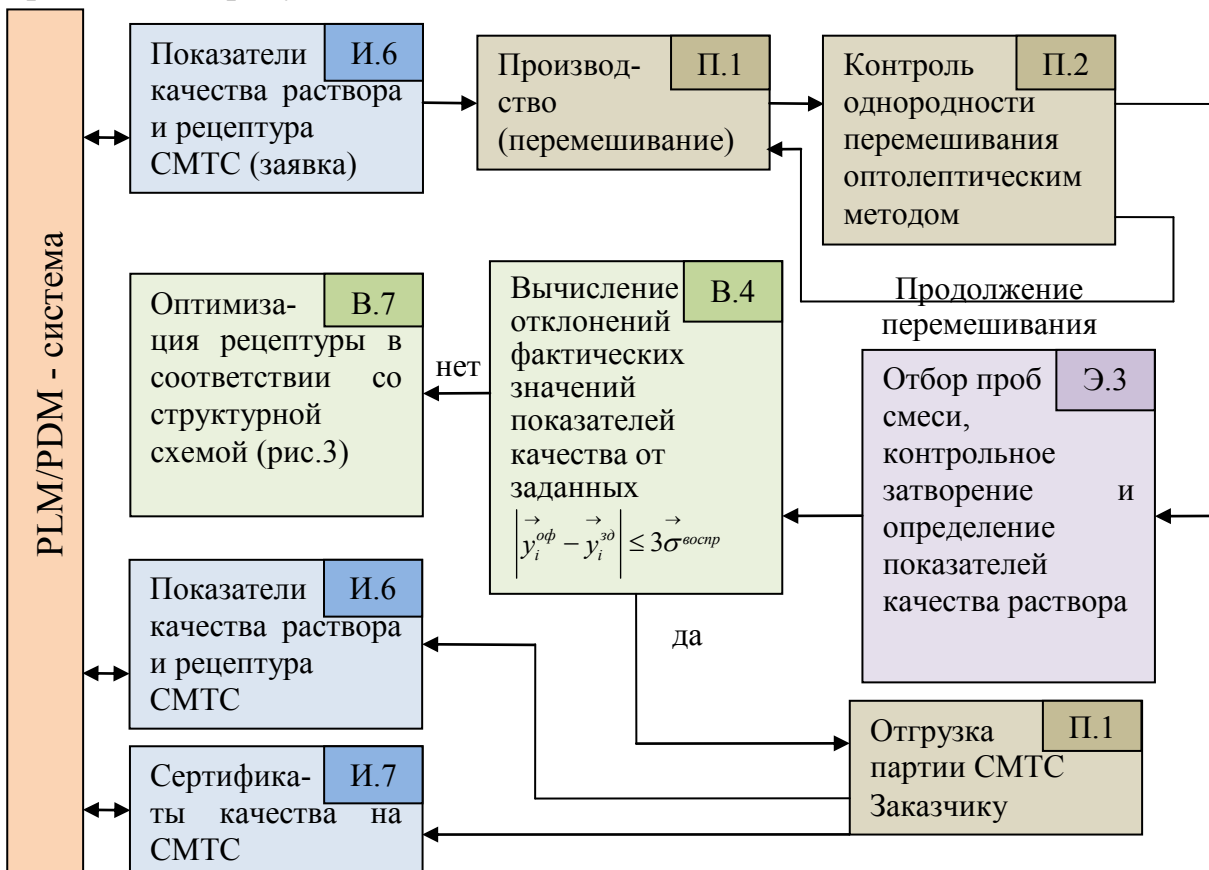


Рисунок 5 – Схема автоматизированного контроля и управления процессом перемешивания СМТС

В пятой главе приведены основные результаты внедрения предложенных разработок в производство СМТС.

Время, затрачиваемое на разработку и оптимизацию рецептуры до и после внедрения, сократилось в среднем на 9% за счет уменьшения числа контрольных затворений с 5,6 до 5,1 часа. Данные получены при обработке результатов наблюдения по методу «фотографии рабочего времени».

Внедренные методы автоматизированного управления рецептурой СМТС, в том числе метод контроля однородности перемешивания СМТС, позволяют также снизить количество исправляемого брака готовой продукции в среднем на 14%. Так, за отчетный период (12 месяцев) до внедрения методов из 100 партий произведенной продукции количество партий, не прошедших контрольные испытания, составило 16, а за отчетный период (6 месяцев) после внедрения методов из 53 партий произведенной продукции не прошли испытания 7 партий.

Внедрение в опытную эксплуатацию в составе автоматизированной системы управления рецептурой СМТС PDM-системы, реализованной на «виртуальной машине» академической версии ЛОЦМАН:PLM, позволяет сократить время, затрачиваемое на поиск информации при обработке заявки Заказчика, на определение требуемых значений показателей качества тампонажного раствора для обустраиваемой скважины на 42%. Учет в базе данных информации о текущих запасах сырья на складах при их оперативном планировании дает возможность сокращать избыток запасов в среднем на 19%.

СМТС с рецептурой, составленной с применением разработок, полученных при выполнении диссертации, использованы при обустройстве 39 нефтяных скважин на месторождениях Пермского края (ООО "ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ") и Восточной Сибири.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ особенностей производства и применения СМТС, разработана структура автоматизированной системы управления рецептурой сухих магниезальных тампонажных смесей с выделением элементов, требующих разработки методов и моделей управления рецептурой при производстве смесей и определяющих структуру системы.

2. Разработан метод определения требуемых значений показателей качества тампонажного раствора для рассматриваемой скважины с известными условиями обустройства и метод определения рецептуры СМТС для получения раствора с требуемыми значениями показателей качества, позволяющие определить их по информации о примененных ранее тампонажных растворах при цементировании обсадных колонн в скважинах и составленных на предприятии-изготовителе рецептурах.

3. Обосновано применение при разработке рецептов смесей нового качественного состава метода планирования эксперимента для получения моделей, идентифицирующих зависимости показателей качества тампонажного раствора от рецептуры и качества компонентов смеси и метода адаптации

моделей к условиям промышленного производства, отличающегося коррекцией моделей, полученных при планировании эксперимента в лабораторных условиях, введением аддитивно к каждой из них функций от тех же факторов, что и в плане эксперимента. Функции параметризуются по известной рецептуре и данным контроля показателей качества раствора из произведенной смеси, что позволило повысить точность прогнозирования показателей качества раствора.

4. Разработан метод оптимизации рецептуры СМТС с целью получения тампонажных растворов с заданными значениями показателей качества, отличающийся применением поискового подхода, включающего решение задачи с обобщенной целевой функцией, составленной из моделей, связывающих показатели качества растворов и рецептуру смеси, и поиск оптимальной рецептуры непосредственно с экспериментами по затворению смеси с учетом их воспроизводимости, что позволило сократить время на составление рецептуры. Разработан метод повышения информативности оптолептического способа автоматизации оценки равномерности распределения компонентов в смеси путем введения в нее люмогена, что позволило повысить четкость изображения её поверхности, получаемого при фото-видео фиксации.

5. Проведена апробация методов и моделей как элементов автоматизированного управления рецептурой сухих магниезиальных тампонажных смесей в производственной деятельности ООО «НПФ «Монолит», позволившая сократить время на разработку рецептуры в среднем на 9%, снизить количество исправляемого брака готовой продукции в среднем на 14%, сократить избыток запасов в среднем на 19%, сократить время, затрачиваемое на поиск информации на 42%.

Список работ, опубликованных автором

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним:

1. Толкачев, Г.М. О повышении оперативности оценки распределения компонентов в сухих смесях магниезиальных тампонажных материалов. / Г.М. Толкачев, А.С. Козлов, А.В. Анисимова, **М.В. Малимон (Ваталева)**, С.А. Бортников // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – № 3(28). – С. 62-64.

2. **Ваталева (Малимон), М.В.** Математико-информационная поддержка принятия решений при оптимизации рецептур магниезиальных тампонажных материалов для цементирования обсадных колонн / **М.В. Ваталева (Малимон)**, А.Г. Шумихин, А.В. Анисимова, А.С. Козлов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 17-19. (Scopus).

3. Шумихин, А.Г. Алгоритмическая и инструментально-квалиметрическая поддержка контроля и управления качеством приготовления сухих тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин / А.Г. Шумихин, С.И. Сташков, П.Ю. Соколичик, **М.В. Ваталева** // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. – № 7. – С. 16-21.

4. Шумихин, А.Г. Управление стадией разработки рецептуры жизненного цикла сухих тампонажных магнизиальных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин / А.Г. Шумихин, **М.В. Малимон (Ваталева)** // Ползуновский вестник. – 2015. – № 2. – С. 111-116.

5. Ваталева, М.В. Управление рецептурой в гибком производстве сухих магнизиальных тампонажных смесей для цементирования колонн в нефтяных и газовых скважинах [Электронный ресурс] / М.В. Ваталева, А.Г. Шумихин // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 1. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_207_Vataleva.pdf_3f69ab69b7.pdf

Патент:

6. Шумихин, А.Г. Способ определения качества гомогенизации гетерогенных смесей / А.Г. Шумихин, П.Ю. Сокольчик, С.И. Сташков, **М.В. Малимон (Ваталева)** // Патент на изобретение № 2544290, опубл. 20.03.2015., Бюл. №8. – 8 с.

Публикации в других изданиях:

7. Сокольчик, П.Ю. Определение степени влияния показателей качества исходных компонентов на качество получаемой смеси в производстве сухих тампонажных смесей. / П.Ю. Сокольчик, **М.В. Малимон (Ваталева)** // Наука. Технология. Производство – 2013: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Уфа, 2013. – С. 91-93.

8. Сокольчик, П.Ю. Прогноз и управление качеством гетерогенных сыпучих смесей / П.Ю. Сокольчик, С.И. Сташков, **М.В. Малимон (Ваталева)** // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2013. – № 1. – С. 64-83.

9. **Ваталева (Малимон), М.В.** Планирование исследований при разработке рецептур и технологий гибкого производства сухих тампонажных магнизиальных смесей / **М.В. Ваталева (Малимон)**, А.Г. Шумихин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2014. – № 1. – С. 7-18.

10. Шумихин, А.Г. Применение PDM-технологии при управлении жизненным циклом магнизиальных тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин / А.Г. Шумихин, **М.В. Ваталева (Малимон)** // Южно-Сибирский научный вестник. – 2014. – №2(6). – С. 106-109.

11. **Ваталева (Малимон), М.В.** Выбор концепции автоматизированной системы управления жизненным циклом сухих тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин / **М.В. Ваталева (Малимон)**, А.Г. Шумихин // Экологические проблемы нефтедобычи – 2014: IV Междунар. науч.-практ. конф.: [сб. науч. ст.]. – Уфа, 2014. – С. 153-154.

12. Анисимова, А.В. Оптимизация составов магнизиальных тампонажных материалов с использованием регрессионных зависимостей. / А.В. Анисимова, **М.В. Малимон (Ваталева)**, А.С. Козлов, М.С. Скорогонов //Международный научный институт "Educatio". – 2014. – № 5. – С. 130.

13. **Ваталева (Малимон), М.В.** Управление разработкой рецептур тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин на

основе применения метода прецедентов и экспертных оценок / **М.В. Ваталева (Малимон)**, А.Г. Шумихин // Кибернетика и высокие технологии XXI века XVI междунар. науч.-техн. конф.: [сб. докл.] Воронеж, 2015. – 1 электрон. опт. диск

14. Шумихин, А.Г. Оценка качества гомогенизации бетонных смесей по оптолептической информации об их поверхности с применением люминесцентного анализа / А.Г. Шумихин, П.Ю. Соколько, С.И. Сташков, **М.В. Ваталева** // Измерение, контроль, информатизация: материалы XVI междунар. науч.-техн. конф. – Барнаул, 2015. – Т. 2. – С. 30-33.

15. **Ваталева, М.В.** Алгоритм подбора рецептуры сухих магниезиальных тампонажных смесей для цементирования нефтяных и газовых скважин / **М.В. Ваталева**, А.Г. Шумихин // Актуальные проблемы науки и техники: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф.– Уфа, 2015.– С.25-27.

16. **Ваталева, М.В.** Интеллектуализация систем управления жизненным циклом сухих магниезиальных материалов для тампонирувания нефтяных и газовых скважин / **М.В. Ваталева**, А.Г. Шумихин // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29: сб. тр. XXIX междунар. науч. конф. – Саратов, 2016. – № 6 (88). – С. 129-132.

17. Шумихин, А.Г. Опыт разработки и внедрения системы информационной поддержки процессов производства сухих тампонажных смесей в НПФ «Монолит» на базе PDM-системы / А.Г. Шумихин, **М.В. Ваталева**, А.В. Попова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2016. – № 2. – С. 67-80.

18. **Ваталева, М.В.** Применение метода экспертных оценок при разработке рецептуры сухих смесей для цементирования обсадных колонн нефтяных и газовых скважин / **М.В. Ваталева**, А.Г. Шумихин // Химия. Экология. Урбанистика. – 2017: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Пермь, 2017. – Т.1. – С. 462-465.