

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УДК 681.518.52:622.53

Лазебная Людмила Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ И ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА
УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ**

Специальность 05.13.06 – «Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами (по отраслям)
(технические науки)»

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор,
Павлыш В. Н.

Идентичность всех экземпляров
ПОДТВЕРЖДАЮ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.024.04
канд.тех.наук

Т.В. Завадская

Донецк – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Раздел 1 АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1 Теоретическое обоснование и технологическая реализация процесса гидравлического воздействия на угольные пласты	14
1.2 Анализ результатов исследований по совершенствованию обработки угольных пластов	16
1.2.1 Анализ результатов исследований по совершенствованию технологических схем и параметров гидравлического воздействия	16
1.2.2 Задача управления процессом гидравлического воздействия и анализ путей совершенствования параметров и технологии воздействия	22
1.2.3 Анализ характеристик угольного пласта как объекта гидравлического воздействия и особенности организации управления процессом	24
1.3 Анализ результатов теоретических исследований процесса гидравлического воздействия на угольные пласты	26
1.4 Анализ результатов исследований процессов пневматического воздействия на угольные пласты	31
1.5 Цель и задачи исследования	35
1.6 Выводы по разделу 1	38
Раздел 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУР И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК	40
2.1 Обоснование путей развития способов автоматизированного контроля параметров и управления технологическими процессами воздействия на угольный пласт	40
2.2 Теоретические основы разработки алгоритмов и структур системы управления технологическими схемами подземной обработки пластов	47
2.2.1 Основные схемы гидравлического воздействия на пласт из подземных выработок	47
2.2.2 Математические модели как способ имитации состояния пласта и реакции на воздействие	52
2.2.3 Математическое моделирование и обоснование методов совершенствования технологии гидравлического воздействия	56

2.2.4	Совершенствование структуры и алгоритмов подсистемы управления гидравлической обработкой	84
2.2.5	Математическое моделирование процесса пневматического воздействия на неувлажнённый пласт	96
2.2.6	Структура и алгоритмы управления процессом комплексного гидропневматического воздействия	102
2.3	Выводы по разделу 2	107
Раздел 3	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ С ПОВЕРХНОСТИ	110
3.1	Цель и технология воздействия на угольный пласт с поверхности. Особенности процесса	110
3.2	Совершенствование математических моделей и алгоритмов управления процессом гидропневматического воздействия с поверхности	113
3.3	Основы системы автоматизированного проектирования технологии и управления процессом гидропневматического воздействия на пласт	122
3.4	Выводы по разделу 3	132
Раздел 4	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ	134
4.1	Элементная база системы управления	134
4.2	Основные параметры элементов и способы их совершенствования	139
4.3	Рекомендации по применению и дальнейшему развитию автоматизированного управления процессами воздействия на угольные пласты	160
4.4	Выводы по разделу 4	161
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	162
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	165
	ПРИЛОЖЕНИЕ А	181
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	189

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В промышленности и народном хозяйстве уголь является важным энергоносителем. Донбасс располагает большими запасами угля, основная масса которого добывается подземным способом. Научными и производственными коллективами проделана значительная работа по улучшению технико-экономических показателей отрасли. Технические возможности созданных и внедренных добычных и проходческих комплексов, транспортных средств позволяют значительно повысить нагрузку на забой.

Вместе с тем, интенсификация и концентрация горных работ, особенно по мере углубления шахт, все более ограничивается проявлениями опасных свойств угольных пластов, таких как газовыделение, пылеобразование, внезапные выбросы угля и газа, самовозгорание угля в массиве.

В комплексе методов решения задач борьбы с основными опасностями при подземной добыче угля очень важное место занимают процессы воздействия на угольные пласты, позволяющие изменить их состояние и за счет этого снизить интенсивность проявления опасных и вредных свойств.

В числе способов воздействия выделяются технологические (схемы вскрытия, системы разработки, порядок отработки пластов, управление проявлениями давления горных пород, системы проветривания) и специальные (предварительное гидравлическое воздействие, увлажнение, пневматическое, физико-химическое воздействие, дегазация, комплексное воздействие).

Воздействие осуществляется в соответствии с разработанными технологическими схемами, параметры которых рассчитываются на основании теоретических представлений о процессе и описывающих их зависимостей.

Эффективность процессов воздействия определяется степенью снижения проявлений основных опасных и вредных свойств угольного пласта при выемке угля. Разработанные и внедренные способы воздействия на пласт дают возможность в определенной степени преодолеть негативное влияние основных опасностей и значительно повысить нагрузку на забой и улучшить условия труда.

Однако эффективность применяемых средств в определенных горнотехнических и горно-геологических условиях все еще недостаточна, о чем свидетельствуют данные об авариях на ряде шахт. Одной из причин недостаточной эффективности воздействия является несовершенство способов контроля и управления процессами обработки, что не позволяет оперативно реагировать на частые изменения условий работы технологического оборудования, обусловленные анизотропией угольного пласта. Решение данной задачи возможно путем автоматизации управления процессами гидравлического и пневматического воздействия.

В этой связи развитие теоретических основ, совершенствование алгоритмов функционирования и модификация элементов систем автоматизированного управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты является важной научно-технической задачей, имеющей отраслевое значение.

Степень разработанности темы исследования. Решению проблем развития теории и технологии воздействия на угольные пласты посвящены работы многих научно-исследовательских институтов и вузов СНГ, в том числе МакНИИ, ДонУГИ, ВостНИИ, ИГТМ, РАНМИ, ИФГП, ДОННТУ, МГГУ и др., а также зарубежных учреждений и вузов Германии, Чехии, Польши, Словакии, Англии, Австралии.

Одним из основных преимуществ способа гидравлического воздействия является заблаговременное и необратимое изменение свойств угольного массива, что позволит предупредить возникновение опасных явлений при разработке угольного пласта.

Исследованиями в области создания и совершенствования способов и средств нагнетания текучих веществ в угольный пласт занимались многие ученые: А.А. Скочинский, А.И. Ксенофонтова, А.С. Бурчаков, Э.М. Москаленко, Н.В. Ножкин, Г.Е. Панов, А.Ф. Булат, К.К. Софийский, Б.И. Медведев, А.Д. Алексеев, И.В. Антипов, В.Н. Павлыш, М. Маскет, Беккер, П.Б. Уартони др.

Применяемые и предложенные к настоящему времени способы нагнетания

жидкостей в угольный пласт дают принципиальную возможность предотвращения опасных явлений в шахтах. Вместе с тем, несмотря на большой объем проведенных исследований, эффективность применяемых способов во многих случаях не удовлетворяет требованиям практики.

Анализ существующих способов нагнетания жидкостей в угольный пласт с целью борьбы с основными опасностями показывает, что необходимым условием высокой эффективности воздействия является равномерность гидравлической обработки угольного массива.

Главной причиной неравномерности распространения жидкости при нагнетании является анизотропия фильтрационных и коллекторских свойств пласта, выражающаяся в изменчивости значений коэффициента проницаемости и эффективной пористости по всем направлениям, что приводит к резким колебаниям параметров процесса. Эффективным способом поддержания стабильности воздействия является внедрения автоматизированного управления технологическим процессом обработки массива.

Целью работы является обоснование способов развития структур и методов модификации параметров систем управления процессом комплексного гидропневматического воздействия на анизотропный угольный массив для повышения эффективности борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены **следующие задачи:**

- выполнить анализ технологических схем гидравлического и пневматического воздействия на угольный пласт с целью определения особенностей протекания процессов в условиях выраженной анизотропии угольного пласта;
- разработать математические модели и провести компьютерные исследования процессов нагнетания жидкости в угольный пласт подземным способом и с поверхности;

- проанализировать математические модели пневматического воздействия на угольный пласт, провести моделирование процесса и обосновать связь гидравлической и пневматической обработки;
- систематизировать параметры технологии и разработать алгоритмы управления процессами с учетом нестабильности их протекания;
- разработать рекомендации по модернизации параметров структурных элементов системы автоматизированного управления процессом комплексного гидропневматического воздействия;
- разработать структуру системы автоматизированного проектирования технологии управления процессами и обосновать ее параметры;
- разработать рекомендации для практического применения системы управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольный пласт.

Объект исследований – процессы гидравлического и пневматического воздействия на анизотропный угольный пласт.

Предмет исследований – математические модели, структура и алгоритмы функционирования системы автоматизированного управления процессами воздействия на угольный пласт.

Идея работы состоит в использовании особенностей физических явлений, происходящих при воздействии на анизотропный угольный пласт жидкими и газообразными агентами, для обоснования структуры и параметров системы автоматизации управления процессами, обеспечивающей повышение эффективности способа комплексной гидропневмообработки.

Научная новизна и практическая ценность полученных результатов состоит в следующем.

Научная новизна:

- Впервые разработана детерминированная математическая модель процесса высоконапорного нагнетания гидровоздушной смеси в угольный пласт с поверхности как объекта управления, в основу которой положены уравнения

математической физики. Использование новой модели позволяет определить влияние основных параметров процесса на качество воздействия.

– Впервые разработан алгоритм управления сбросом давления в технологической схеме обработки пласта с поверхности на основе редукции уравнений в частных производных к системе соотношений, позволяющих обосновать как дискретный, так и непрерывный характер управления, обеспечивающего предотвращение негативного влияния процесса на окружающую среду.

– Получили дальнейшее развитие методы модификации характеристик микропроцессорных устройств, составляющих элементную базу системы автоматизированного управления процессом.

– Обоснованы направления совершенствования алгоритмов управления и параметров оборудования для повышения эффективности и качества воздействия.

Практическая ценность:

– Разработаны алгоритмы и пакеты прикладных программ для компьютерной реализации предложенной детерминированной математической модели процесса принудительного внедрения газожидкостных смесей в неоднородную сплошную среду с неопределёнными характеристиками, что позволяет исследовать параметры процессов и системы управления.

– На основании результатов вычислительного эксперимента обоснованы направления совершенствования структуры и параметров систем управления процессами.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что обоснованная методика построения детерминированной математической модели, основанной на уравнениях в частных производных, отражающих физику процессов, происходящих в неоднородной сплошной среде при напорном гидропневматическом воздействии, является новым эффективным теоретическим

инструментом исследования технологических процессов без проведения долгосрочных дорогостоящих промышленных экспериментов.

Предложенный подход в дальнейшем может быть расширен и дополнен функциями автоматизированного проектирования для повышения качества управления, а также позволяет ставить и решать большой спектр статистических и математических расчетных задач и задач, связанных с принятием решений, имеющих место в технологических системах. Развитие данной разработки может осуществляться путем дополнения ее новыми решениями в области аналитического и численного анализа технологических схем, усовершенствования методов организации и управления специализированными процессами.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что результаты исследований имеют широкий спектр применения для различных предметных областей. Предложенная практическая реализация разработанной модели позволяет формировать базы данных о возможных наборах параметров оборудования для использования в системах автоматизированного управления и проектирования, что может послужить функциональным дополнением и развитием информационных систем различных предприятий и организаций.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе применен комплексный метод, который включает в себя: анализ и обобщение данных исследований процессов гидравлического и пневматического воздействия на угольные пласты и методов расчета их параметров; математическое моделирование процессов на основе детерминированных математических моделей; теоретическое обоснование путей повышения эффективности процессов за счет использования автоматического управления; компьютерные эксперименты для обоснования и расчета параметров процессов.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с тематическими планами Донецкого национального технического университета и является частью исследований, в которых автор принимала участие как исполнитель: гостемы Н-19-10 «Разработка и исследование математических моделей и прикладного программного обеспечения

для компьютерного моделирования и расчета параметров сложных динамических систем», № Государственной регистрации 0113U000955; гостемы Н–25–05 «Исследование процессов, разработка математических моделей, прикладного и системного программного обеспечения для моделирования и расчета параметров динамических систем»; гостемы Н–18–15 «Исследование и разработка математических моделей и программного обеспечения для моделирования и расчёта параметров динамических систем»; гостемы Н–20–18 «Исследование процессов, разработка математических моделей и программного обеспечения для компьютерного моделирования и расчёта параметров сложных динамических систем».

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что процесс высоконапорного воздействия на угольный пласт гидровоздушной смесью с поверхности при сбросе давления сопровождается резкими выбросами загрязнённых растворов на большие расстояния от скважин, что наносит ущерб окружающей среде. На основе разработанной математической модели разработан алгоритм дискретно-аналогового сброса давления, применение которого позволяет устранить негативное влияние процесса на окружающее пространство.

2. Показано, что обоснованные методы модификации параметров элементов системы управления способствуют повышению быстродействия и качества управления процессом.

Степень достоверности и обоснованности результатов, положений и выводов обеспечивается корректным использованием результатов исследований, имеющих широкий спектр применения для различных технологических схем и режимов принудительного внедрения текучих веществ в сплошную среду неоднородного строения с выраженной анизотропией фильтрационных свойств. Предложенная практическая реализация результатов математического моделирования позволяет рекомендовать способы модификации технологии и параметров, что может послужить новым решением задачи повышения эффективности воздействия и качества обработки пластов, а также развития

теории построения систем автоматизации управления процессами и проектирования оборудования.

Реализация выводов и рекомендаций работы подтверждается:

– внедрением в практику работы служб охраны труда на горных предприятиях разработанного с участием автора нормативного документа «Регламентные требования к устройствам контроля параметров и управления процессом гидродинамической обработки угольных пластов» (Утверждено генеральной дирекцией ГП ДУКК, согласовано ГУ МакНИИ, ГУ ДонНИИ, г. Донецк, 2005г.);

– внедрением в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (справка № 52.1-03/19 от 14.05.2019 об использовании в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических (лабораторных) занятий на кафедрах «Искусственный интеллект и системный анализ» и «Прикладная математика» по дисциплинам: «Теория управления», «Имитационное моделирование», «Системный анализ сложных систем управления», «Системы управления предприятием», «Математические пакеты прикладных программ»).

Разработанные автором рекомендации по применению предложенных алгоритмов и структур системы управления процессом гидропневматического воздействия на угольный пласт приняты к использованию:

- в исследовательских и проектных работах Макеевского государственного научно-исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности (МакНИИ) при разработке методов и средств повышения безопасности труда на шахтах;

- в научно-исследовательских работах ОАО «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» при создании системы автоматизированного контроля и управления мероприятиями по технике безопасности и охране труда на шахтах.

Апробация результатов диссертации.

Основные результаты, положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VII Международной научно-методической

конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» в городе Сусс (Тунис) с 08 по 17 октября 2013 г.; IX международной научно-практической конференции «Проблемы горного дела и экологии горного производства» (24-25 апреля 2014 г., г. Антрацит); XXI Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 15–20 сентября 2014г.); VIII Международной научно-методической конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» в г. Хаммамет (Тунис) с 28 сентября по 5 октября 2014 г.; XXIII международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века» в г. Севастополе 12-18 сентября 2016 г.; IX Международной научно-методической конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» в городе Сухум, 01–09 октября 2016 г.; IX Международном симпозиуме Geotechika 2000: Польша, Гливице-Устронь, 17-21 октября 2000 г.

Личный вклад соискателя состоит в формулировании цели, задач исследований, основных научных положений и выводов, разработке математических моделей и программного обеспечения для их компьютерной реализации, разработке рекомендаций по практическому применению результатов; основные научные результаты диссертации включают в себя анализ особенностей протекания процессов, происходящих при напорном нагнетании жидкостей и газов в анизотропный угольный пласт с целью управления его состоянием для борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче, математические модели, вычислительные методы и алгоритмы управления процессом гидропневматического воздействия, а также программные комплексы, что впервые позволило сформировать полное алгоритмическое и программное обеспечение системы автоматизированного управления процессами комплексной гидропневматической обработки угольных пластов; текст диссертации написан автором самостоятельно.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 19 научных работах, из них 6 статей в специализированных изданиях,

рекомендованных ВАК ДНР и в рецензируемых журналах, 2 в других изданиях, результаты прошли апробацию и опубликованы в материалах 11 международных научно-технических конференций. Публикации в достаточной мере отражают содержание работы.

Соответствие темы и содержания диссертации паспорту научной специальности.

Полученные результаты, положения и выводы отвечают требованиям паспорта специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)», в частности: п.4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; п.5 «Теоретические основы, средства и методы промышленной технологии создания АСУТП, АСУЦ, АСТПП и др.»; п.17 «Использование методов автоматизированного проектирования для повышения эффективности разработки и модернизации АСУ»; п.18 «Средства и методы проектирования технического, математического, лингвистического и других видов обеспечения АСУ».

Тема и содержание диссертации «Совершенствование алгоритмов и параметров элементов системы автоматизированного управления процессом гидropневматического воздействия на угольные пласты» на соискание ученой степени кандидата технических наук соответствует паспорту научной специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)», по которой диссертационному совету Д 01.024.04 предоставлено право принимать диссертационные работы к защите.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов и заключения, изложена на 164 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 11 таблиц, список использованной литературы из 124 наименований и 2 приложения на 10 страницах.

РАЗДЕЛ 1

АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ
ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Теоретическое обоснование и технологическая реализация процесса гидравлического воздействия на угольные пласты

Метод обработки угольных пластов в различных режимах соединениями, обладающими свойством текучести (жидкости, эмульсии, химические растворы, полимеры, аэрозоли, газообразные смеси) является одним из важнейших способов решения проблемы борьбы с проявлениями вредных и опасных свойств пластов при подземной угледобыче [1, 2, 3].

Одним из основных преимуществ этого способа является заблаговременное и необратимое изменение свойств угольного массива, позволяющее предупредить возникновение опасных явлений при ведении горных работ [4, 5].

Результаты научно-исследовательских и проектно-конструкторских разработок легли в основу соответствующих разделов нормативных документов, регламентирующих необходимость и порядок применения предварительного увлажнения для борьбы с пылеобразованием и газодинамическими явлениями в угольных шахтах [6, 7, 8].

Применяемые и предложенные к настоящему времени способы нагнетания жидкостей в угольный пласт дают принципиальную возможность предотвращения опасных явлений в шахтах [9, 10, 11, 12].

По данным МакНИИ, МГГУ, ДОННТУ, ИГТМ и др., пылеобразование при выемке угля снижается до санитарных норм, если предварительным увлажнением достигнут равномерный прирост влажности в пределах 6-7% [13, 14]. Способствует уменьшению пылеобразования применение водных растворов смачивателя ДБ (неионогенное вещество, представляющее собой темно-коричневую жидкость, растворимую в воде любой жесткости), хлористого

кальция, жидкого стекла и водомасляной эмульсии. За счет использования при нагнетании в угольный пласт различных растворов удастся снизить запыленность на 40-50% по сравнению с увлажнением водой [15].

Исследования процессов нагнетания жидкости в угольные пласты показали, что кроме снижения пылеобразования гидравлическое воздействие способствует как снижению интенсивности газовыделения, так и способности пласта к выбросам угля и газа [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Вместе с тем, несмотря на большой объем проведенных исследований, эффективность применяемых способов во многих случаях не удовлетворяет требованиям практики.

Анализ существующих способов нагнетания жидкостей в угольный пласт с целью борьбы с основными опасностями показывает, что необходимым условием высокой эффективности воздействия является равномерность гидравлической обработки угольного массива.

К одной из основных причин недостаточно высокой эффективности уменьшения пылеобразования при предварительном увлажнении относится неравномерность распределения влаги в массиве, вызванная преимущественным движением жидкости по крупным трещинам и приводящая к недостаточному повышению влажности больших блоков угля [26, 27]. Неравномерное распределение влаги в массиве приводит к блокированию газа в слабопроницаемых зонах и образованию местных скоплений метана, который высвобождается при работе выемочных машин. В связи с этим высокая равномерность обработки играет особо важную роль при применении растворов, переходящих в твердое состояние в трещинно-поровом объеме угля.

Основной причиной неравномерного распространения жидкости при её нагнетании в пласт является анизотропия фильтрационных свойств пласта, выражающаяся в изменчивости значений коэффициента гидравлической проницаемости даже на ограниченных участках [27, с.19].

1.2 Анализ результатов исследований по совершенствованию обработки угольных пластов

1.2.1 Анализ результатов исследований по совершенствованию технологических схем и параметров гидравлического воздействия

Равномерное насыщение обрабатываемой области угольного пласта рабочей жидкостью является необходимым условием эффективности всех способов гидравлического воздействия. Основные способы гидравлической обработки, рекомендованные к применению в настоящее время, подразделяются на группы и сравниваются с точки зрения их эффективности по следующим показателям (Рисунок 1.1):

- схеме расположения скважин;
- виду рабочей жидкости;
- режиму внедрения жидкости;
- способу внедрения.

Оценка различных вариантов производится по их влиянию на качество насыщения массива жидкостью. Схема расположения скважин определяется их длиной и ориентировкой относительно линии очистного забоя. Характеристики, параметры и область применения соответствующих схем описаны в литературе достаточно подробно [27, с.62, 28, 29]. Рассмотрим их особенности с точки зрения качества обработки угольного массива. Известно, что длинные скважины, параллельные линии очистного забоя, в этом смысле более предпочтительны, чем короткие скважины и шпуры [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38].

Эффективность снижения пылеобразования (характеристика, наиболее тесно связанная с качеством обработки) при нагнетании через шпуры составляет 50-60%, через короткие скважины - 60-80%, через длинные скважины – 70-90% [36, с.31]. Обусловлено это тем, что длинные скважины располагаются в зоне, не подверженной влиянию горных работ, вследствие чего обеспечивается значительная длительность контакта жидкости с углем, способствующая более глубокой его пропитке.

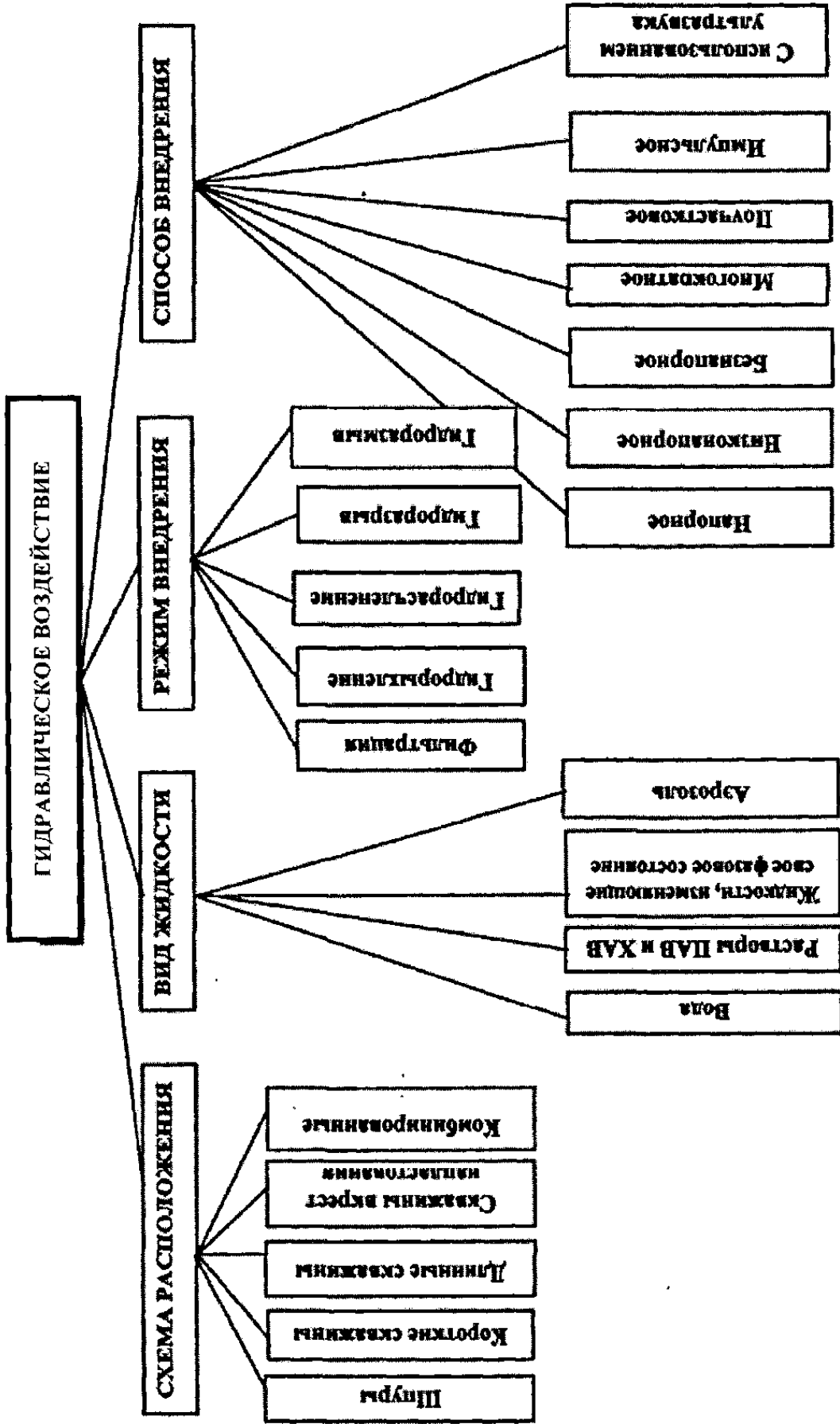


Рисунок 1.1 – Способы и схемы гидравлического воздействия на угольные пласты

Эти преимущества, а также независимость работ по нагнетанию через длинные скважины от очистных работ определяют их возрастающий удельный вес в предварительном увлажнении угольных пластов.

Большой объем исследований был направлен на изыскание рабочих жидкостей, способствующих более равномерной обработке массива. Установлено [11, с. 20, 15, с. 19], что применение водных растворов смачивателя ДБ, электролитов, жидкого стекла и других способствует проникновению жидкости в более мелкие поры и трещины при одном и том же давлении. Нагнетание растворов, в связи с этим, повышает качество насыщения угля жидкостью за счет его более глубокой пропитки.

В работах ДОННТУ, РАНИМИ, ИФГП [11, с.163] рассматривается способ повышения равномерности обработки пласта за счет применения водных растворов ПАВ (поверхностно-активные вещества, понижающие поверхностное натяжение на границе раздела жидкость - воздух, жидкость - жидкость, жидкость - твердая поверхность). Как отмечается, в результате исследований можно подобрать такие поверхностно-активные среды, ввод которых в массивы, благодаря адсорбционному понижению прочности, заставит развиваться трещины за счет сил горного давления. Так как трещины в угольном пласте расположены хаотически и нет преобладающего опорного давления, развитие их будет равновероятным во всех направлениях.

Для достижения высокой равномерности увлажнения угля режим нагнетания должен быть регулируемым и происходить при давлениях, больших давления газа в пласте, но меньших давления гидрорыхления. При этом нагнетание в скважину должно продолжаться до тех пор, пока в пласт будет подано требуемое количество воды, т.е. $0,02-0,08\text{ м}^3$ на 1т угля в массиве [15, с. 19]. Следует отметить, что случайный характер распределения проницаемости вызывает частые колебания параметров нагнетания, и для обеспечения качественного выполнения мероприятий по увлажнению необходимо рассмотреть вопрос об автоматизации управления процессом закачки с целью стабилизации основных параметров – давления и темпа нагнетания.

Как отмечается далее в [15, с.19], региональные способы профилактической обработки угольных пластов имеют преимущество по сравнению с локальными, т.к. позволяют воздействовать на пласт на больших площадях заблаговременно и тем самым разделить в пространстве работы по проведению увлажнения и очистные работы, что дает возможность не только бороться с основными опасностями, но и увеличить нагрузку на очистной забой по сравнению с забоями, где применяются локальные способы.

Таким образом, применение различных жидкостей, обладающих большей по сравнению с водой проникающей способностью, позволяет улучшить качество насыщения угля за счет заполнения мелких пор и трещин, однако не решает проблему равномерной обработки массива в целом.

Для существующих способов гидравлического воздействия по классификации Н.В. Ножкина [39] различают следующие режимы внедрения жидкости в угольный пласт: фильтрация, гидрорыхление, гидрорасчленение, гидроразрыв, гидроразмыв. Достаточно хорошо известно, что режим фильтрации обеспечивает наибольшую равномерность обработки, остальные режимы используются в других целях.

Специально для повышения качества обработки предложено большое количество способов внедрения жидкости в угольный пласт. В литературе описаны, в основном, следующие: напорное нагнетание, низконапорное, безнапорное, многократное, поучастковое, нагнетание с использованием ультразвука, импульсное (импульсно-волновое), с использованием силы взрыва (торпедирование) [11, с. 22, 27, с.28, 39].

Наибольшее распространение получило напорное нагнетание с использованием насосных установок, поскольку область его применения практически не ограничивается горно-геологическими и горнотехническими условиями. Автором работы [28, с.79] обоснован способ нагнетания жидкости в угольный пласт, названный каскадным, который обеспечивает преодоление фильтрационной анизотропии взаимодействием встречных потоков жидкости от одновременно работающих скважин. Нагнетание через каскад скважин не требует

специального оборудования и достаточно просто реализуемо практически в любых условиях.

В работах [26, с.58, 40] методом математического моделирования и в натурных условиях показано, что при каскадном нагнетании показатель равномерности распределения жидкости повышается на 25-30%. На рисунке 1.2 приведена технологическая схема гидравлического воздействия через скважины, параллельные линии очистного забоя.

Таким образом, рассмотрение предложенных к настоящему времени разновидностей гидравлического воздействия на угольный пласт позволяет сделать вывод, что существующие способы не позволяют принципиально решить проблему преодоления фильтрационной анизотропии и значительного повышения качества обработки массива. Причинами этого являются либо невысокая эффективность, либо сложность технологии, отсутствие специального оборудования, узкая область применения. Методом, позволяющим существенно увеличить равномерность распределения жидкости в анизотропном угольном пласте, может стать использование идеи каскадного нагнетания жидкости, основанного на взаимодействии встречных потоков от одновременно работающих скважин.

В связи с этим, задачами дальнейших исследований по повышению качества обработки массива следует считать установление физических предпосылок и принципиальной возможности преодоления фильтрационной анизотропии взаимодействием встречных потоков жидкости, исследование эффективности каскадной обработки в различных условиях, разработку технологии и параметров воздействия, определение рациональной области применения способа. Математическое моделирование с целью определения требуемых характеристик при заданном строении пласта и распределении проницаемости позволит решить поставленные задачи, обеспечит заданную точность решений, что невозможно в натурных условиях, а исследования большого количества вариантов связано с трудовыми и материальными затратами.

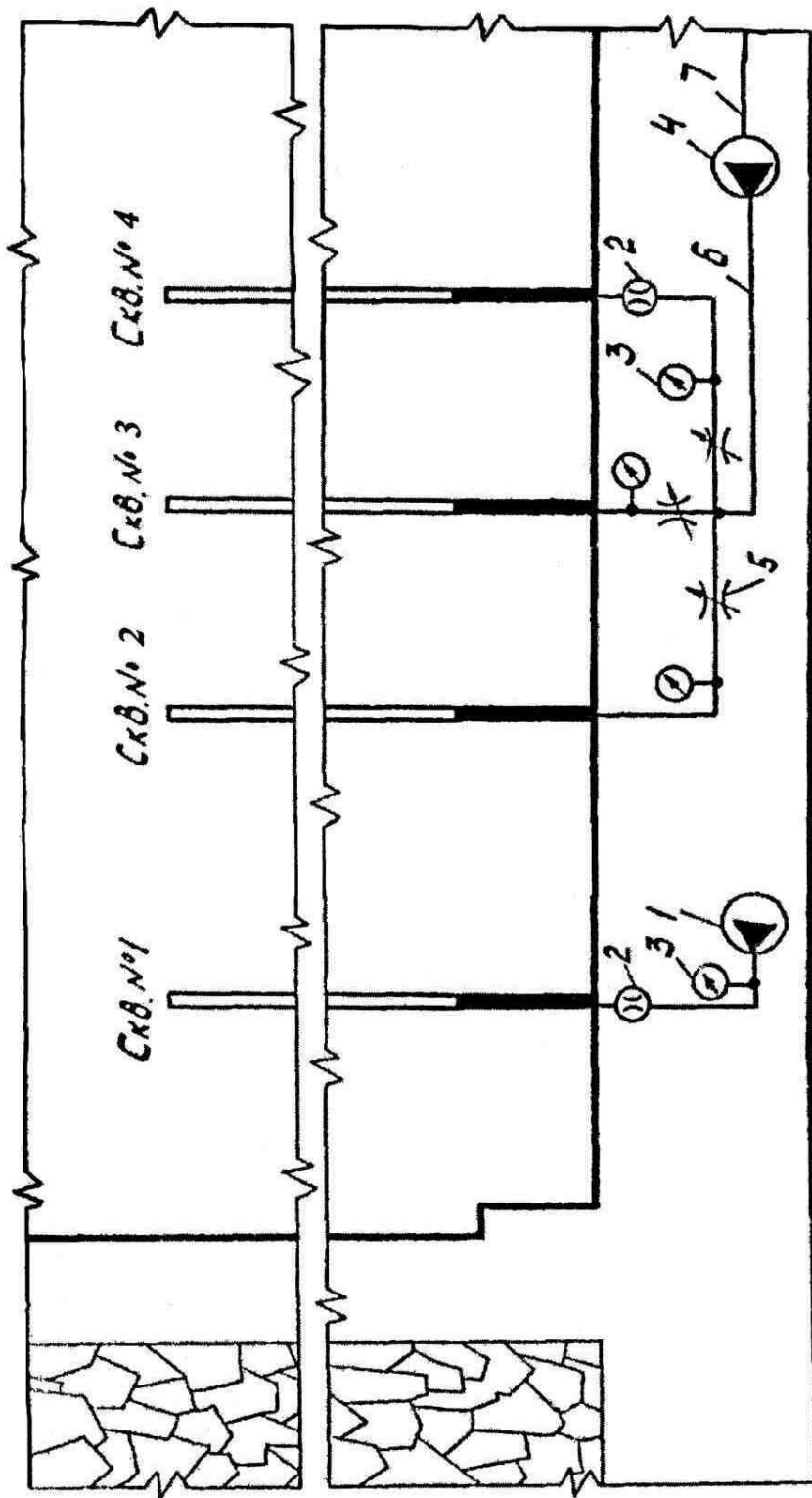


Рисунок 1.2 – Технологическая схема нагнетания воды через длинные скважины, параллельные линии очистного забоя

- 1 – насосная установка НВУ-30м;
- 2 – счетчик-расходомер СРВД-20;
- 3 – манометр;
- 4 – дроссель регулируемый;
- 5 – рукав высоконапорный;
- 6 – манометр;
- 7 – участокный водопровод

Для использования математического моделирования необходимо осуществить разработку математической модели, учитывающей специфику анизотропного пласта как фильтрующей среды и взаимодействие встречных потоков жидкости.

1.2.2 Задача управления процессом гидравлического воздействия и анализ путей совершенствования параметров и технологии воздействия

Анизотропия угольного пласта оказывает негативное влияние не только на качество насыщения обрабатываемой зоны массива, но и на характер протекания процесса воздействия. Резкие изменения фильтрационных свойств пласта на коротких отрезках движения жидкости приводят к столь же резким колебаниям технологических параметров нагнетания в короткие промежутки времени, тогда как качественное выполнение обработки требует стабильности основных параметров (давление и темп нагнетания).

На рисунке 1.3 приведена запись параметров процесса в типичных условиях [11, 27, 39]. В настоящее время регулирование параметров процесса производится «вручную», что не позволяет обеспечить штатный режим воздействия, предполагающий поддержание стабильных значений рассчитанных параметров.

В связи с этим, важной задачей является обеспечение стабильного характера процесса воздействия, что возможно только на базе применения системы автоматического контроля параметров и управления процессом нагнетания жидкости.

Проблемам автоматизации управления процессами горного производства посвящены работы ряда научно-исследовательских учреждений и вузов, в том числе МГГУ, ДонНТУ, Автоматгормаш, ИГТМ, ИФГП и др. В работах данных учреждений решены задачи развития теоретических основ и создания технических средств автоматического управления процессами в горной промышленности.

Весомый вклад в решение проблем управления процессами внесли известные ученые Ф.А. Абрамов, С. Цой, В.Г. Гейер, Л.А. Пучков, К.З. Ушаков, А.М. Морев, В.И. Груба, В.Н. Ткаченко, В.В. Лапко, А.А. Борисов, К.Н. Маренич, В.Н. Павлыш, О.А. Погорелов и другие. Разработанные ими теоретические основы и технологические решения создали базу для широкого применения автоматизированного управления на угольных предприятиях.

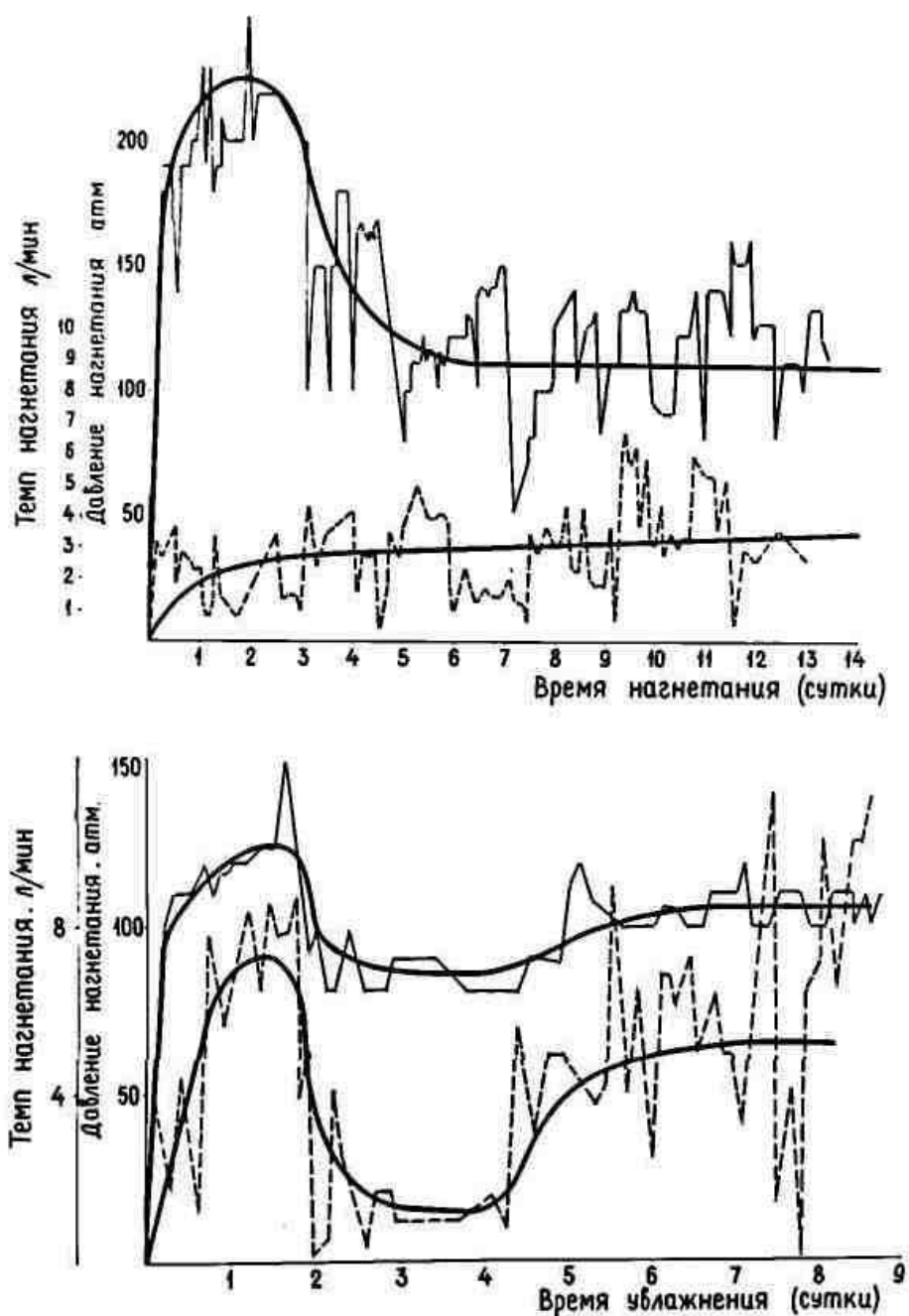


Рисунок 1.3 – Графическая запись параметров процесса нагнетания жидкости в анизотропный угольный пласт

Вместе с тем, задача дальнейшего развития автоматизации управления процессом гидравлического воздействия на угольный пласт, решение которой является актуальной для обеспечения стабильности параметров процесса и в конечном итоге повышения качества обработки и эффективности воздействия, на данный момент не рассмотрена [41].

1.2.3 Анализ характеристик угольного пласта как объекта гидравлического воздействия и особенности организации управления процессом

Сущность гидравлического воздействия состоит в принудительном внедрении под давлением в проектную зону угольного пласта веществ, обладающих текучестью (жидкости, газы, аэрозоли, суспензии), т.е. в нагнетании текучих в угольный пласт с целью управления его состоянием.

Угольный пласт представляет собой трещиновато-пористую среду со сложной структурой, имеющую разветвленную сеть микро- и макротрещин всевозможной величины и направленности. Движение жидкости по трещинам и порам угольного пласта представляет собой процесс фильтрации. Массив угля как объект гидравлического воздействия характеризуется способностью пропускать сквозь себя воду и газ, а также аккумулировать определенное их количество. Эти возможности характеризуются такими показателями как проницаемость и пористость. При проектировании технологических схем нагнетания жидкости в пласт необходимо провести предварительный расчет основных параметров, в частности, давления и темпа нагнетания, расхода жидкости и других. Применяемые приближенные формулы, во-первых, дают слишком далекий от практики результат, а, во-вторых, не учитывают фактор времени, так как основываются на уравнениях стационарного течения.

Для разработки методик расчета параметров, более адекватно отвечающих характеру процесса, необходимо построить реальную математическую модель, учитывающую нестационарный характер течения.

При разработке модели введем некоторые допущения и положения:

- угольный пласт это трещиновато-пористая структура, расположенная на значительной глубине и находящаяся под давлением расположенных над ним слоев горных пород;
- вмещающие породы непроницаемы по сравнению с угольным пластом и обладают идеальной жесткостью;

– при движении жидкости под давлением возмущения напряженного состояния имеют малую величину, а смещения твердой фазы незначительны по сравнению со скоростью потока.

В [28, с.25, 36, с.31, 42, 43] рассмотрены основные процессы, происходящие при нагнетании жидкости под давлением, и соответствующие им уравнения, в результате сформирована система уравнений, на которой основывается математическая модель процесса.

Один из путей подбора таких параметров – задание анизотропии пласта по всей области фильтрации независимо от направления осей, при этом, естественно, необходимо учесть, что коэффициент проницаемости вдоль оси Z в любом случае в несколько раз меньше проницаемости по простиранию (оси X, Y). Поскольку пласт состоит из блоков с разной проницаемостью, пересечен трещинами различного происхождения, то в нем можно выделить некоторые области с различной величиной коэффициента фильтрации, и соответствующим образом задать набор коэффициентов проницаемости [44, 45, 46, 47]. Ввиду того, что выделить на практике такие области, не проникнув в пласт, невозможно, то в первом приближении можно задать набор коэффициентов проницаемости хаотично, используя имитационное моделирование. Благодаря этому приему можно будет исследовать процесс фильтрации в условиях, более близких к реальным по сравнению со случаем, когда показатель проницаемости принимается средним по трем (двум) направлениям [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55].

Фактически жидкость распространяется неравномерно, она может найти путь фильтрации, по которому быстро выйдет на соседнюю скважину, оставив большие блоки неувлажненными. Обходя эти блоки, жидкость «закупоривает» имеющийся в них метан, а это может привести к образованию зон с высоким содержанием газа под давлением, и увлажнение даст нежелательный эффект в отношении внезапного выброса. Особенно это характерно при нагнетании крепителя, так как после затвердевания газ запирается в блоках с плохой проницаемостью.

Таким образом, угольный пласт как объект воздействия представляет собой сплошную среду, характеристики которой являются случайными величинами, непосредственное определение которых физически невозможно. Данные геологической разведки дают усредненную информацию, тогда как в процессе воздействия приходится иметь дело с конкретными значениями, изменяющимися в широких пределах.

Единственным способом представления пласта как объекта воздействия является математическое моделирование.

1.3 Анализ результатов теоретических исследований процесса гидравлического воздействия на угольные пласты

Широкие исследования по разработке теории движения жидкости и газа в угольном пласте ведутся сравнительно недавно - с начала 60-х годов 20-го века. Сходство основных закономерностей процессов движения текучих в угле и горных породах привело к тому, что базой для этих исследований стала уже разработанная теория фильтрации в нефтегазовых коллекторах и грунтах.

Большой вклад в создание этой теории был сделан в трудах таких ученых, как Ф.Б. Абуталиев, Г.И. Баренблатт, Н.Н. Веригин, В.П. Желтов, Л.С. Лейбензон, Г.М. Ломизе, В.Н. Николаевский, С.Н. Нумеров, П.Я. Полубаринова-Кочина, И.А. Чарный, В.Н. Щелкачев, А.Ф. Булат, К.К. Софийский, А.Н. Зорин, Л.М. Васильев, А.Д. Алексеев, В.Н. Павлыш, А. Бан, М. Маскет, Р. Мизес, А.Э. Шейдеггер и многие другие. Ими исследованы закономерности фильтрации жидкостей и газов в горных породах, разработаны аналитические и численные методы решения соответствующих краевых задач.

Основные модели напорной фильтрации жидкостей в горных породах описывают жесткий, упругий и нелинейно-упругий режимы для пористых и трещиновато-пористых сред. Жесткий режим фильтрации представляет собой движение несжимаемой жидкости в недеформируемой пористой среде. В общем случае, при наличии в системе источников или стоков этот режим описывается

уравнением Пуассона относительно давления [56, 57, 58, 59, 60]:

$$\Delta P = f, \quad (1.1)$$

где

P - давление жидкости;

f - функция источника (стока), учитывающая свойства среды и фильтрующей жидкости.

Упругий режим соответствует нестационарному изменению давления слабосжимаемой жидкости в малодеформируемой пористой среде, когда жидкость и фильтрующая среда подчиняются закону Гука.

Основным уравнением является уравнение пьезопроводности, полученное В.Н. Щелкачевым [28, с.26]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \Delta P, \quad (1.2)$$

где

$\chi = \frac{k}{\mu(n_s \beta_{жс} + \beta_c)}$ - коэффициент пьезопроводности;

k - коэффициент проницаемости среды;

n_s - эффективная пористость;

μ - вязкость жидкости;

$\beta_{жс}, \beta_c$ - коэффициенты сжимаемости соответственно жидкости и пористой среды.

Уравнение (1.2) не учитывает изменение фильтрационных характеристик пористой среды в процессе ее деформации. Исследования В.Н. Николаевского, К.С. Басниева, А.Т. Горбунова и других авторов [61, 62, 63, 64] показали, что в процессе напорной фильтрации жидкости в пористой среде имеет место увеличение коэффициента проницаемости среды в зависимости от давления.

Принимая на основе экспериментальных данных линейную зависимость проницаемости и пористости среды, плотности и вязкости жидкости от давления (что имеет место при давлениях порядка нескольких сотен атмосфер), получено

уравнение нелинейно-упругой фильтрации жидкости в пористой среде, по форме сходное с уравнением (1.2):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \operatorname{div}\{[1 + \alpha(P - P_0)] \operatorname{grad} P\}, \quad (1.3)$$

где

$$\alpha = \beta_k + \beta_{жс} - \beta_{\mu},$$

$\beta_k, \beta_{\mu}, \beta_{жс}$ - коэффициенты, характеризующие зависимость проницаемости среды и вязкости жидкости от давления;

P_0 - пластовое давление.

В каждом конкретном случае для выбора одного из уравнений (1.1) - (1.3) необходимо исследование степени влияния давления на характеристики пористой среды и жидкости и специфики фильтрационного потока.

Кратко рассмотренные модели являются основными для исследования напорной фильтрации жидкости в горных породах. Существующие в настоящее время способы математического описания движения жидкости в угольных пластах основаны на этих моделях.

С точки зрения гидродинамики, особенностью процесса нагнетания жидкости в угольный пласт является то, что фильтрация происходит в среде, первоначально не заполненной жидкостью, тогда как большинство моделей напорной фильтрации построены для насыщенных жидкостью пористых сред. Учет этого факта приводит, во-первых, к нестационарности процесса фильтрации, во-вторых, к необходимости введения дополнительных условий для вычисления координат фронта движущейся жидкости, что существенно усложняет решение и ограничивает область применения модели.

Для жесткого режима фильтрации движение жидкости согласно данной модели подчиняется уравнению Лапласа

$$\operatorname{div}[k_{\phi} \operatorname{grad} P(x, y, z)] = 0, \quad (1.4)$$

где

k_{ϕ} - коэффициент фильтрации, зависящий от координат.

На скважине задается режим давления

$$P|_{s_i} = p_i(t) \quad (1.5)$$

или дебита

$$- \iint \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n} ds = Q_i(t), \quad (1.6)$$

а на поверхности фронта движущейся жидкости – условие

$$\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{n_s \mu}{k} \left[\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial t} \right)^2 \right] = 0. \quad (1.7)$$

На основе данной модели был выполнен расчет параметров предварительного увлажнения, как для изотропного, так и для анизотропного пласта. Однако в последнем случае учитывалась только анизотропия в плоскости, перпендикулярной напластованию, при допущении, что в этой плоскости область, занятая жидкостью, представляет собой эллипс.

Таким образом, для исследования движения жидкости в угольном пласте с неупорядоченным распределением коэффициента проницаемости в условиях взаимодействия встречных потоков необходима разработка математической модели, учитывающей специфические особенности процессов, происходящих при гидравлическом воздействии на угольный пласт, в первую очередь – конечность скорости движения фронта фильтрации.

В работах А.Ф. Булата, К.К. Софийского [10] рассматриваются процессы гидродинамического воздействия на угольные пласты как основа способа добычи угля и предотвращения газодинамических явлений.

В работе [10] К.К. Софийским рассмотрена краевая задача для уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2}. \quad (1.8)$$

Задача решается на конечных промежутках времени $T_H^i \leq t \leq T_K^i$, $i = 0, 1, 2, \dots$, и рассматривается процесс сброса давления.

Аналитически получено решение в виде бесконечного ряда:

$$P_i(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\alpha_k}{b_i} + \frac{c_3}{c_2} + \frac{(-1)^k}{k\pi} (P_G + P_C(T_H^i)) \right] e^{C_2(T_H^i - t)} \sin \frac{k\pi x}{b_i} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c_3}{c_2} \sin \frac{k\pi x}{b_i} + P_C(t) \left(1 - \frac{x}{b_i}\right) + \frac{x}{b_i} P_G. \quad (1.9)$$

Полученное выражение позволяет выполнять расчет точечных значений $P_i(x,t)$ с помощью компьютера.

Сказанное позволяет сделать вывод о том, что в исследовании процессов и разработки технологии гидравлического воздействия на угольные пласты имеются серьезные достижения. Вместе с тем, повсеместно отмечается, что применение различных способов нагнетания текучих субстанций в угольные пласты на практике не всегда приводит к желаемым результатам: по целому ряду причин не удается использовать в полной мере преимущества конкретного способа. Одним из главных факторов, снижающих эффективность воздействия, как показывают многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, является фильтрационная анизотропия угольного пласта, приводящая при его гидравлической обработке к неравномерному распределению жидкости в заданной области, а также к существенной нестабильности технологических параметров процесса.

Перспективным путем решения проблемы представляется использование идеи каскадной обработки угольного пласта, заключающейся в преодолении фильтрационной анизотропии взаимодействием встречных потоков жидкости от одновременно работающих скважин [28, с.79], а также применение системы автоматического контроля параметров и управления процессом [2, с.84, 65]. Отсутствие к настоящему времени достаточно полной проработки принципов и алгоритмов управления процессом в различных условиях и детальной разработки его технологий и параметров препятствует применению данной технологии в промышленных масштабах.

Таким образом, анализ результатов теоретических исследований нагнетания жидкостей в угольный пласт показывает, что к настоящему времени вопрос создания систем автоматического управления процессом гидравлического

воздействия на анизотропный угольный пласт является актуальным для угольной отрасли.

1.4 Анализ результатов исследований процессов пневматического воздействия на угольные пласты

В ходе исследований по разработке способов борьбы с газом в шахтах была выдвинута идея использования нагнетания воздуха в угольный пласт в режиме фильтрации через скважины, пробуренные из горных выработок (пневматическая обработка), для интенсификации дегазации и окислительной дезактивации угля в массиве [4, с.4, 41, с.193, 66, 67]. Теоретические и экспериментальные исследования показали возможность использования пневматической обработки неувлажненного угольного пласта как самостоятельного способа борьбы с газом и эндогенными пожарами в шахтах. Механизм снижения газонасыщенности пласта при нагнетании воздуха заключается в вытеснении свободного метана воздушным потоком в отточную скважину, приводящем к смещению сорбционного равновесия в системе «свободный - сорбированный газ» и десорбции метана с последующим его выносом [28, с.272, 68, 69]. Уменьшение эндогенной пожароопасности достигается за счет низкотемпературного окисления угля в массиве, приводящего к снижению его химической активности и, следовательно, склонности к самовозгоранию.

В работах Э.М. Москаленко [21, с.18] впервые рассмотрены основные физико-химические процессы, происходящие при нагнетании воздуха в неувлажненный угольный пласт, получена система уравнений, описывающая движение метано-воздушной смеси, сорбцию и десорбцию газов и тепловой режим в системе «уголь - метан – воздух». В первом приближении сделана попытка аналитического решения системы и получены формулы для инженерного расчета параметров пневмообработки. Математическая постановка задачи должна быть дополнена в части учета специфики процессов метана и кислорода, влияния воздуха на десорбцию метана, снижения химической активности угля при его

окислении, теплообмена между углем и вмещающими породами. Необходим выбор или разработка эффективных численных или аналитических методов решения полученной системы уравнений.

В целом математическое описание процессов, происходящих при нагнетании воздуха в угольный пласт, сделанное в работе [57, с.109], является основой для разработки модели пневмообработки.

Необходимо усовершенствование математического описания процессов, происходящих при нагнетании воздуха в неувлажненный угольный пласт в части более полного учета закономерностей сорбции и десорбции метана и кислорода, взаимного влияния метана и воздуха, окисления и теплового режима, а также выбор или разработка эффективных методов решения задачи.

Опыт работы в Донецком бассейне показывает, что уже в настоящее время многие шахты испытывают большие затруднения из-за повышенного метановыделения на добычных участках. Во многих случаях по этой причине невозможно использовать на полную мощность высокопроизводительные угледобывающие агрегаты. Повышенное метановыделение становится основным фактором, сдерживающим внедрение новой техники, увеличение добычи угля, повышение производительности труда и улучшение экономических показателей угольных предприятий. Очевидно, что без решения проблемы борьбы с газом в шахтах мероприятия по техническому перевооружению отрасли невыполнимы. В связи с этим одной из основных задач угольной промышленности является внедрение и совершенствование известных, а также разработка новых способов борьбы с газом в горных выработках [70, 71, 72].

Для снижения метановыделения из разрабатываемых пластов применяются:

- 1) дегазация скважинами;
- 2) гидрорасчленение (гидроразрыв) угольных пластов с поверхности и из горных выработок;
- 3) нагнетание жидкостей в угольный массив;
- 4) химические и биохимические методы воздействия на пласт с целью снижения его метанононасыщенности.

До настоящего времени нет общепризнанной и проверенной практикой теории метановыделения из угольных пластов в горные выработки и скважины. В основном это является следствием того, что процесс движения метана в угольном массиве очень сложный, многофакторный и недостаточно изучен.

Таким образом, при обнажении угольного пласта скважиной возникает три основных явления: образование и развитие деформаций, движение газа к обнажённой поверхности и теплообмен. Эти явления тесно связаны между собой. При математическом описании этих явлений должны быть учтены следующие факторы [21, с.18]:

- а) деформация пласта у выработки;
- б) неразрывность потока газа;
- в) состояние вещества, обладающего сорбционной способностью;
- г) движение газа;
- д) теплообмен между углём и выработкой;
- е) изменение теплоты десорбции.

При сложных граничных условиях решение такой задачи затруднено. Поэтому, обычно, задачи о притоке газа к обнаженной поверхности угля решают путём упрощения их постановки (не учитывается влияние отдельных факторов), что в итоге приводит к снижению их надежности.

В отдельных работах имеются попытки дать математическое описание процесса притока метана к дегазационной скважине, пробуренной по пласту угля. Наиболее полно этот вопрос рассмотрен в работе [73]. Авторы рассматривают процесс фильтрации метана в угольном массиве с учётом температуры и напряженного состояния пласта:

$$q = \frac{2Aml(x - x_0)}{\left(\frac{t_0}{2} + t_1\right)^b} \left[1 - \left(1 - \frac{\pi D}{2m} \right) e^{-\alpha \left(\frac{t_0}{2} + t_1\right)^2} \right], \quad (1.10)$$

где

q - метановыделение из скважины, м³/сутки;

A и b – коэффициенты, учитывающие газопроницаемость угольного пласта;

m – мощность пласта, м;

x и x^o - природная и остаточная метаноносность угля, м³/т;

t_0 – время бурения скважины, сутки;

t_1 – время дегазации угольного пласта скважиной (без учета времени бурения), сутки;

D – диаметр скважины, м;

α – коэффициент, учитывающий длительность перехода радиального потока газа в плоский, 1/сутки².

Зависимость (1.10) имеет ряд недостатков, из-за которых она не может быть использована при решении практических вопросов, возникающих при проектировании и ведении дегазационных работ. Согласно (1.10) метановыделение из скважин бесконечно во времени, причём за второй год после бурения может выделиться около 20% общего дебита скважины, в то время как натурными исследованиями [27, с.311] установлено, что метановыделение из угольного массива практически прекращается через 6-8 месяцев после его обнажения.

Выражение $1 - \left(1 - \frac{\pi D}{2m}\right) e^{-\alpha \left(\frac{t_0 + t_1}{2}\right)^2}$ характеризует изменение метановыделения из

скважины за счёт разгрузки угля вокруг неё. Из (1.10) следует, что уже через 15–20 суток после окончания бурения фильтрация газа идёт через поверхность, равную $2m$, т.е. предполагается, что пласт разгружается скважиной на всю свою мощность.

Не останавливаясь подробно на решениях задачи о притоке газа к скважине, полученных другими исследователями (Г.Д. Лидин, С.В. Кузнецов, А.Т. Айруни, С.Н. Осипов), нужно отметить, что в основу решения были положены уравнения фильтрации или диффузии.

Вместе с тем, применение способа предварительной пневмообработки неувлажненного угольного пласта требует постоянного контроля как технологических параметров нагнетания (давление и расход воздуха), так и показателей результатов воздействия (концентрация метана в контрольной

скважине и объем выноса метановоздушной смеси). Успешное применение данного способа возможно за счет автоматизации контроля и управления параметрами технологической схемы.

1.5 Цель и задачи исследования

Анализ способов воздействия на угольные пласты для снижения интенсивности проявления основных опасностей показывает, что для повышения безопасности труда при подземной угледобыче определённые перспективы имеют три способа (гидравлическое воздействие, пневматическая обработка, дегазация призабойной зоны). Естественно, возникает идея построения на их основе комплексного метода предварительного воздействия, включающего три этапа:

- пневматическая обработка неувлажненного угольного массива;
- гидравлическое воздействие;
- дегазация призабойной зоны.

Такой подход позволит объединить достоинства каждого из способов и таким путем повысить общую эффективность воздействия.

Исследование и анализ литературных и фондовых источников, нормативных документов по состоянию вопроса о нагнетании жидких и газообразных субстанций в угольные пласты показали, что в настоящее время этот способ борьбы с основными опасностями в шахтах получил широкое распространение в угольной промышленности, его развитию посвящен большой объем исследований. Предложены новые перспективные способы борьбы с газовыделением и динамическими явлениями в шахтах (гидрорасчленение, физико-химическое и микробиологическое воздействия, солянокислотная обработка, пневмообработка и другие), составы рабочих жидкостей, позволяющие достигать значительного снижения пылеобразования, газовыделения, газодинамической активности и склонности угля к самовозгоранию.

В этой связи возникает идея повышения качества гидравлической обработки угольных пластов при использовании взаимодействия встречных

потоков жидкости от одновременно работающих скважин, а также определении эффективного режима пневмообработки на основе математического моделирования процессов, происходящих при нагнетании воздуха.

Показано, что одним из негативных факторов, определяемых анизотропией угольных пластов, является существенная нестабильность параметров процессов, что не позволяет обеспечить требуемую эффективность обработки. Радикальным способом решения данной задачи является автоматизация контроля параметров и управления процессами гидравлической, пневматической и комплексной обработки угольных пластов.

Одним из важных путей совершенствования способов гидравлического и пневматического воздействий на угольный пласт является исследование процессов движения жидкости и воздуха в массиве и определение на основе этого рациональных технологических схем, режимов, параметров нагнетания. Опыт работ в данном направлении доказывает, что наряду с экспериментальными методами значительных результатов в этой области можно достичь математическим моделированием процессов, происходящих при нагнетании текучих субстанций (жидкостей, растворов, аэрозолей, суспензий и других веществ, обладающих свойством текучести) в угольный пласт [11 с.53, 12, с.20, 21, с.19, 27, с.58].

Таким образом, анализ полученных к настоящему времени результатов исследований по применению нагнетания текучих субстанций в угольные пласты с целью борьбы с основными опасностями показывает, что предложенные и используемые способы воздействия дают принципиальную возможность направленного изменения свойств угольного массива, способствующего предотвращению или значительному снижению интенсивности проявления опасных явлений в шахтах. Однако достигаемый при этом фактический эффект во многих случаях недостаточен для удовлетворения практических потребностей. При гидравлическом воздействии одной из основных причин этого является фильтрационная анизотропия угольного массива, обуславливающая неравномерность распределения нагнетаемой жидкости и, следовательно,

невысокое качество обработки. Для повышения эффективности существующих способов гидравлической обработки угольных пластов необходимо усовершенствовать технологию и параметры воздействия с целью обеспечения качественного насыщения массива, достигаемого равномерным распределением жидкости в пласте и глубокой пропиткой угля. Разработка технологии и способов расчета параметров должна производиться на основе детальных исследований процесса фильтрации жидкости в угле, проводимых как в натуральных условиях, так и на математической модели.

С целью дальнейшего совершенствования пневматической обработки угольных пластов необходимо определить основные характеристики процессов, происходящих в системе «уголь - метан – воздух», что позволит получить предварительные рекомендации относительно режима нагнетания воздуха и расчета параметров воздействия. Применение в данном случае математического моделирования позволит исследовать процессы в их взаимосвязи и проанализировать требуемое количество вариантов без проведения трудоемких натуральных экспериментов. Показано, что одним из негативных факторов, определяемых анизотропией угольных пластов, является существенная нестабильность параметров процессов, что не позволяет обеспечить требуемую эффективность обработки. Радикальным способом решения данной задачи является автоматизация контроля параметров и управления процессами гидравлической, пневматической и комплексной обработки угольных пластов.

В результате проведенного анализа сформулированы цель и задачи работы, представленные во введении.

Целью работы является обоснование способов развития структур и методов модификации параметров систем управления процессом комплексного гидропневматического воздействия на анизотропный угольный массив для повышения эффективности борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены **следующие задачи:**

- выполнить анализ технологических схем гидравлического и пневматического воздействия на угольный пласт с целью определения особенностей протекания процессов в условиях выраженной анизотропии угольного пласта;

- разработать математические модели и провести компьютерные исследования процессов нагнетания жидкости в угольный пласт подземным способом и с поверхности;

- проанализировать математические модели пневматического воздействия на угольный пласт, провести моделирование процесса и обосновать связь гидравлической и пневматической обработки;

- систематизировать параметры технологии и разработать алгоритмы управления процессами с учетом нестабильности их протекания;

- разработать рекомендации по модернизации параметров структурных элементов системы автоматизированного управления процессом комплексного гидропневматического воздействия;

- разработать структуру системы автоматизированного проектирования технологии управления процессами и обосновать ее параметры;

- разработать рекомендации для практического применения системы управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольный пласт.

1.6 Выводы по разделу 1

1. Предварительная гидравлическая обработка угольного пласта является эффективным средством борьбы с проявлениями опасных и вредных свойств угольного пласта, применение способа является обязательным мероприятием по охране труда.

2. Анизотропия фильтрационных свойств угля оказывает негативное влияние на качество воздействия, вызывая резкие колебания технологических

параметров. Эффективным способом повышения качества воздействия является разработка и внедрение системы автоматизированного управления процессом.

3. Показано, что предварительная пневматическая обработка неувлажнённого пласта является достаточно эффективным средством дегазации угля.

4. Обоснована идея применения комплексного гидropневматического воздействия как средства повышения безопасности труда.

РАЗДЕЛ 2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУР И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГОЛЬНЫЕ ПЛАСТЫ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

2.1 Обоснование направления развития способов автоматизированного контроля параметров и управления технологическими процессами воздействия на угольные пласты

Основной проблемой при выполнении воздействия является поддержание стабильных технологических параметров процесса в условиях анизотропии фильтрационных, прочностных и коллекторских свойств обрабатываемых массивов. Для решения этой задачи наиболее приемлемым способом является разработка системы автоматического или автоматизированного управления, первым и основным этапом которой является построение проекта.

Фильтрационные свойства массива характеризуются проницаемостью, т.е. способностью пропустить через себя определенное количество жидкости, а коллекторские свойства характеризуются эффективной пористостью, т.е. способностью удержать определенный объем фильтрующейся жидкости. Фильтрационные свойства жидкости характеризуются вязкостью (текучестью).

Физически процесс гидравлического воздействия представляет собой нагнетание жидкости в массив, обладающий системой пор и трещин, с целью либо развития этой структуры, либо, наоборот, тампонажа и цементации структуры массива.

В любом случае, качество воздействия определяется равномерностью насыщения зоны обработки рабочей жидкостью.

Повышение качества воздействия возможно при условии поддержания стабильных значений параметров технологической схемы (давления и темпа нагнетания). Как показано в [11, с.84], эти параметры связаны между собой через

коэффициент проницаемости, что соответствует физике процесса, а именно: снижение проницаемости при постоянном расходе приводит к возрастанию давления из-за увеличения сопротивления движению жидкости, и для приведения давления к расчетному необходимо расход соответственно снизить; напротив, увеличение проницаемости приводит к падению давления, и для его нормализации расход необходимо увеличить.

Частые колебания параметров происходят по причине изменения величины коэффициента фильтрации, что определяет необходимость автоматизации контроля параметров и их регулирования в процессе обработки массива.

Технически поставленную задачу можно решить на основе использования универсальных компьютеров, которыми в настоящее время оснащается каждое предприятие. Преимуществом этого пути является то, что для реализации задачи достаточно разработать специализированный пакет прикладных программ и обеспечить связь управляющей аппаратуры с компьютером. Однако при этом возникает ряд проблем, вызванных характером работы: объекты управления находятся нередко под землей, зачастую на большом удалении, нагнетание производится одновременно на нескольких участках, установки периодически передвигаются, а это требует создания дорогостоящих линий связи, их защиты, обеспечения мобильности. Поэтому на практике более предпочтительным является путь создания специализированного устройства управления, которое работает в непосредственной связи с технологическим оборудованием.

Исследования показали, что наиболее приемлемым в данном случае является применение специализированных устройств на базе микроконтроллера [74, 75, 76].

Базовой структурной единицей системы автоматизированного управления служит устройство управления процессом увлажнения через одиночную скважину [77, 78, 79].

Алгоритм управления строится следующим образом [11, с.84].

Исходные данные:

$L_{\text{л}}$, м - длина лавы; k , мд - проницаемость;

H , м – глубина залегания; h , м - мощность пласта;

$n_{\text{э}}$, % - эффективная пористость; μ - вязкость жидкости;

γ , т/м³ - объемный вес пород ($\gamma \approx 2,5$ т/м³).

Расчетные величины:

$$L_{\text{г}} = 20 \cdot (1 - e^{-h}), \text{ м - глубина герметизации;} \quad (2.1)$$

$$L_{\text{с}} = L_{\text{л}} - 2L_{\text{г}}, \text{ м - длина скважины;} \quad (2.2)$$

$$P = 0,1 \cdot \gamma \cdot H, \text{ кг/см}^2 \text{ - давление на скважине;} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{0,006\pi k P L_{\text{с}}}{5\mu h}, \text{ л/мин - темп нагнетания;} \quad (2.4)$$

$$T = \frac{59,7\mu n_{\text{э}} h^2}{kP}, \text{ час - время нагнетания.} \quad (2.5)$$

Проект системы включает набор специализированных электронных устройств, функционирование которых координируется с помощью программируемого микроконтроллера, и пакета программ.

Структура базовой единицы системы приведена на рисунке 2.1.

Сигналы с датчиков в виде синусоидального напряжения поступают на вход преобразователей с целью согласования выходного напряжения датчика с уровнем входного напряжения микроконтроллера. В микроконтроллере реализуется прием, хранение и обработка данных, расчет фактических параметров и их сравнение с паспортными, а также выработка и выдача на регулятор управляющих сигналов, если необходимо корректировать расход.

Контролируемые параметры: P, Q, T, t (здесь t - текущее время). Перед началом процесса задаются исходные данные, устанавливается $t = 0$, запускается устройство контроля и управления (УКУ).

УКУ считывает исходные данные и вычисляет установочные величины (2.1)...(2.5).

Величина Q задается на регулятор, устанавливающий требуемый расход, и осуществляется пуск насоса, после чего задается период опроса датчиков Δt . При

достижении таймером значения времени, кратного Δt , выполняется очередной сеанс контроля - с датчиков считываются текущие значения $P(t)$ и $Q(t)$. Если $|P(t) - P| < 0,1P$, то работа продолжается, в противном случае вычисляется новое текущее значение коэффициента проницаемости k согласно (2.5), новое, необходимое для поддержания давления, значение Q согласно (2.4), и регулятор обрабатывает новое значение расхода. Критерием окончания процесса является достижение заданного времени обработки.

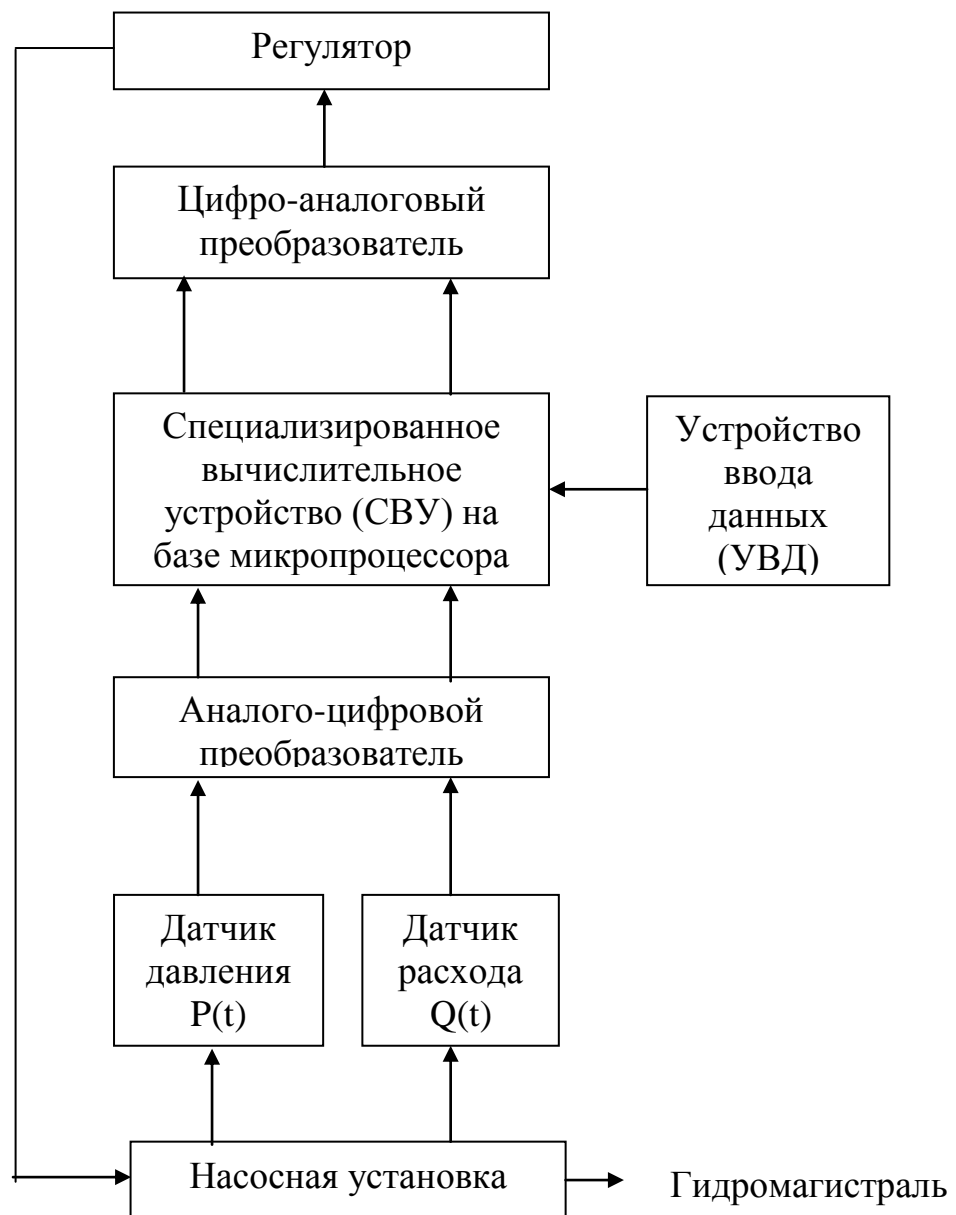


Рисунок 2.1 – Структура базовой единицы системы автоматизированного контроля и управления процессом нагнетания жидкости в угольный пласт

Блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.2.

В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, работающих на поверхности, либо во взрывобезопасном исполнении для использования в подземных условиях. В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств – это компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания и приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.).

Компанией GIC разработан ПК, который может быть реализован в различном исполнении (пылевлагозащищенный, искробезопасный шахтный и пр.) [80, 81]. Он состоит из четырех основных компонентов: центральный процессор (ЦП), устройство ввода-вывода (УВВ), блок электропитания (БЭП), память программ (ПП).

ЦП представляет собой основной блок ПК, координирующий обработку информации. В нем находится микропроцессорная логика, сканирующая программу и состояние блоков оборудования.

УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК. Источники сигналов ввода – датчики, кнопки, клавиатура и другие. Адреса вывода – пускатели электродвигателей, контакторы, насосы и т.д. Дополнительно могут применяться специализированные аналоговые модули ввода-вывода (САМВВ).

БЭП преобразует сетевое напряжение в отфильтрованное стабилизированное электропитание ПК, ПП сохраняет программы управления.

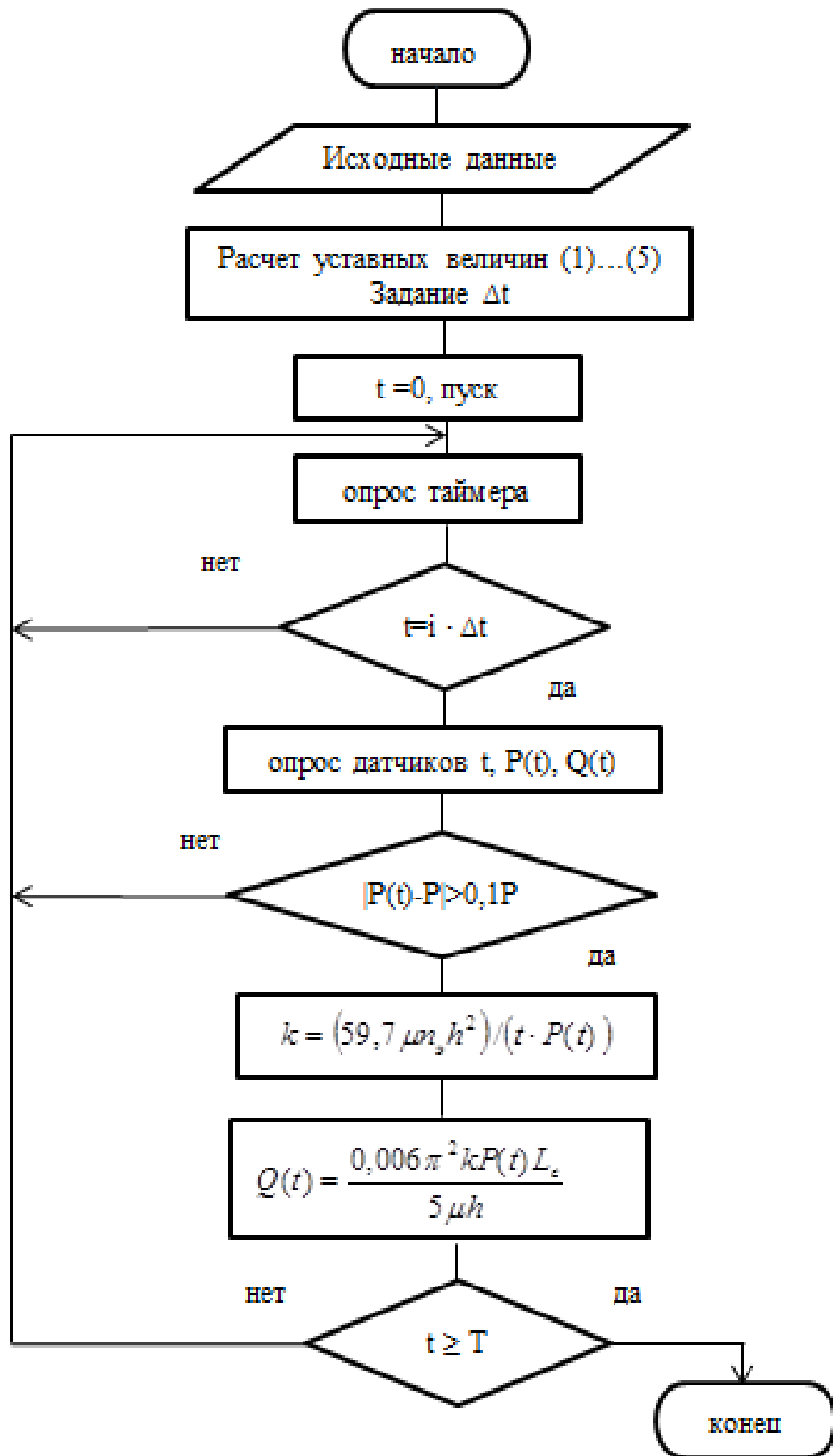


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма функционирования УК.

Обобщенная схема ПК приведена на рисунке 2.3.

Особенностью является то, что память программируется пользователем. ПК программируют по цепной схеме, т.е. на языке, схожем с релейной логикой управления. При внесении изменений в программу к ПК подключают программирующее устройство и соответствующие изменения выполняют без перемонтажа.

В течение кванта времени, определяемого частотой устройства управления, производится контроль текущего значения давления. Если его величина вследствие колебания проницаемости изменяется более чем на 10%, необходимо скорректировать темп нагнетания.

Пусть P_t - текущее значение давления, тогда $q_t = q \frac{P_t}{P_c}$. Управляющее устройство «отрабатывает» текущее значение темпа q_t с помощью исполнительного механизма.

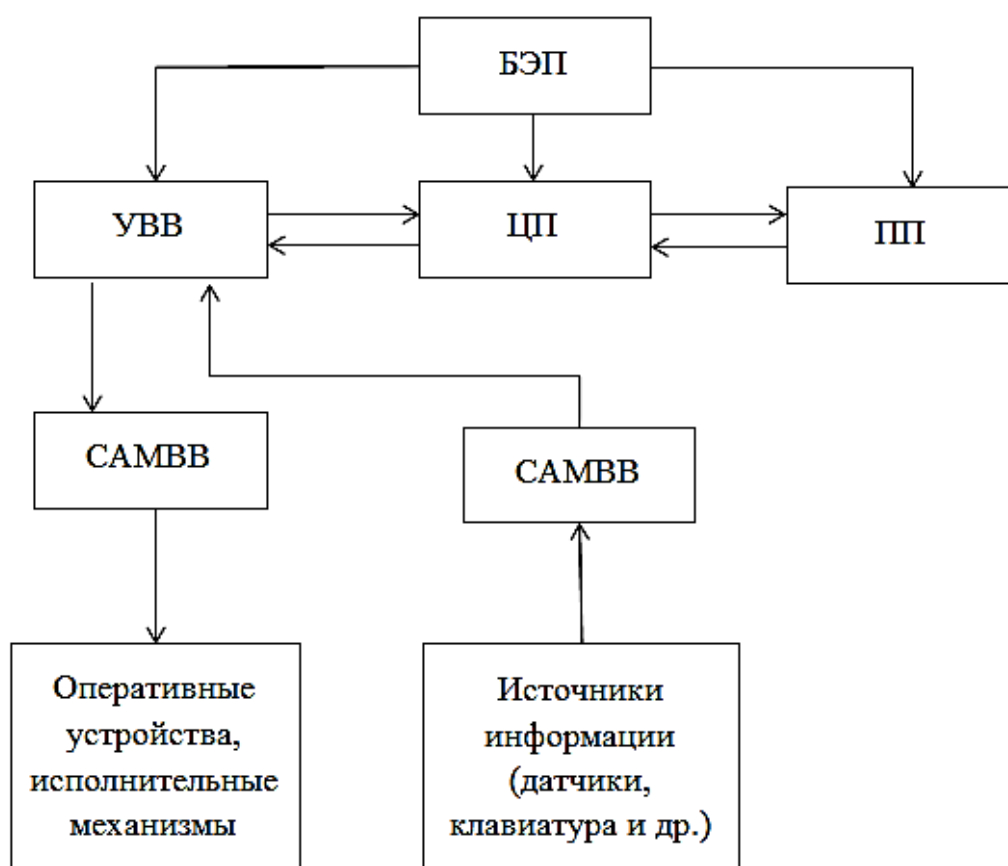


Рисунок 2.3 – Обобщенная схема программируемого контроллера (ПК)

Таким образом, разработана структура и алгоритм функционирования устройства управления процессом воздействия через одиночную скважину на участок пласта с ограничением на время обработки (УУВОСОВ).

Рассмотренный принцип распространяется на построение алгоритмов управления всеми технологическими схемами, используемыми для гидравлического воздействия. Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата: быстродействие автомата и аппаратные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую нагнетательную установку.

Для обеспечения эффективности процесса гидравлического воздействия на анизотропные породные массивы необходимо разрабатывать специализированные устройства управления процессом, поддерживающие стабильные технологические параметры. Набор исходных данных, контролируемых, управляемых и управляющих параметров определяется характеристиками объекта и целями воздействия.

Таким образом, направлением дальнейшего развития и совершенствования системы является разработка проекта, на основании которого осуществляются все последующие мероприятия, а также выбор и модификация элементной базы конструирования системы и её подсистем.

2.2 Теоретические основы разработки алгоритмов и структур системы управления технологическими схемами подземной обработки пластов

2.2.1 Основные схемы гидравлического воздействия на пласт из подземных выработок

В настоящее время применяется ряд способов воздействия на угольные пласты и расчета параметров гидравлического воздействия, различающихся как по своему назначению, так и по выполняемым операциям [8,10, 11].

Все параметры гидравлического воздействия можно разбить на две группы:

параметры схемы расположения скважин и параметры нагнетания. К первой группе относятся: длина, диаметр и глубина герметизации скважин, расстояние между скважинами или эффективный радиус, для коротких скважин - величина неснижаемого опережения, для длинных - расстояние от очистного забоя до первой скважины. Вторая группа включает: расход жидкости на скважину, давление, темп и время нагнетания.

Рассмотрим схемы и параметры отдельно для локального, регионального способов и нагнетания при вскрытии угольных пластов.

Схема расположения коротких (до 25 м) скважин, перпендикулярных линии очистного забоя, показана на рисунке 2.4 а. Гидравлическое воздействие на угольный пласт при проведении пластовой подготовительной выработки осуществляется через скважины, расположенные по одной из схем, приведенных на рисунке 2.4 б и рисунке 2.4 в.

Основные схемы расположения длинных скважин, параллельных линии очистного забоя, приведены на рисунке 2.5. Схема, изображенная на рисунке 2.5 б, применяется при невозможности пробурить скважины из одной выработки на всю длину лавы. При щитовой выемке крутозалегающих пластов столбами по падению длинные скважины бурятся по восстанию перпендикулярно очистному забою.

Основным недостатком длинных скважин, ограничивающим их применение в настоящее время, является трудность направленного бурения и герметизации, обусловленная отсутствием необходимого количества надежного оборудования. Кроме того, использование длинных скважин возможно только при наличии достаточного опережения подготовительных выработок, т.е. практически при столбовых системах разработки. Скважины, пробуренные вкрест напластования, применяются при гидрорасчленении и при вскрытии угольных пластов как противовыбросное мероприятие.

На рисунке 2.6 изображены схемы расположения скважин при вскрытии [8]. Специфика технологии вскрытия пластов делает такое расположение скважин единственно возможным.

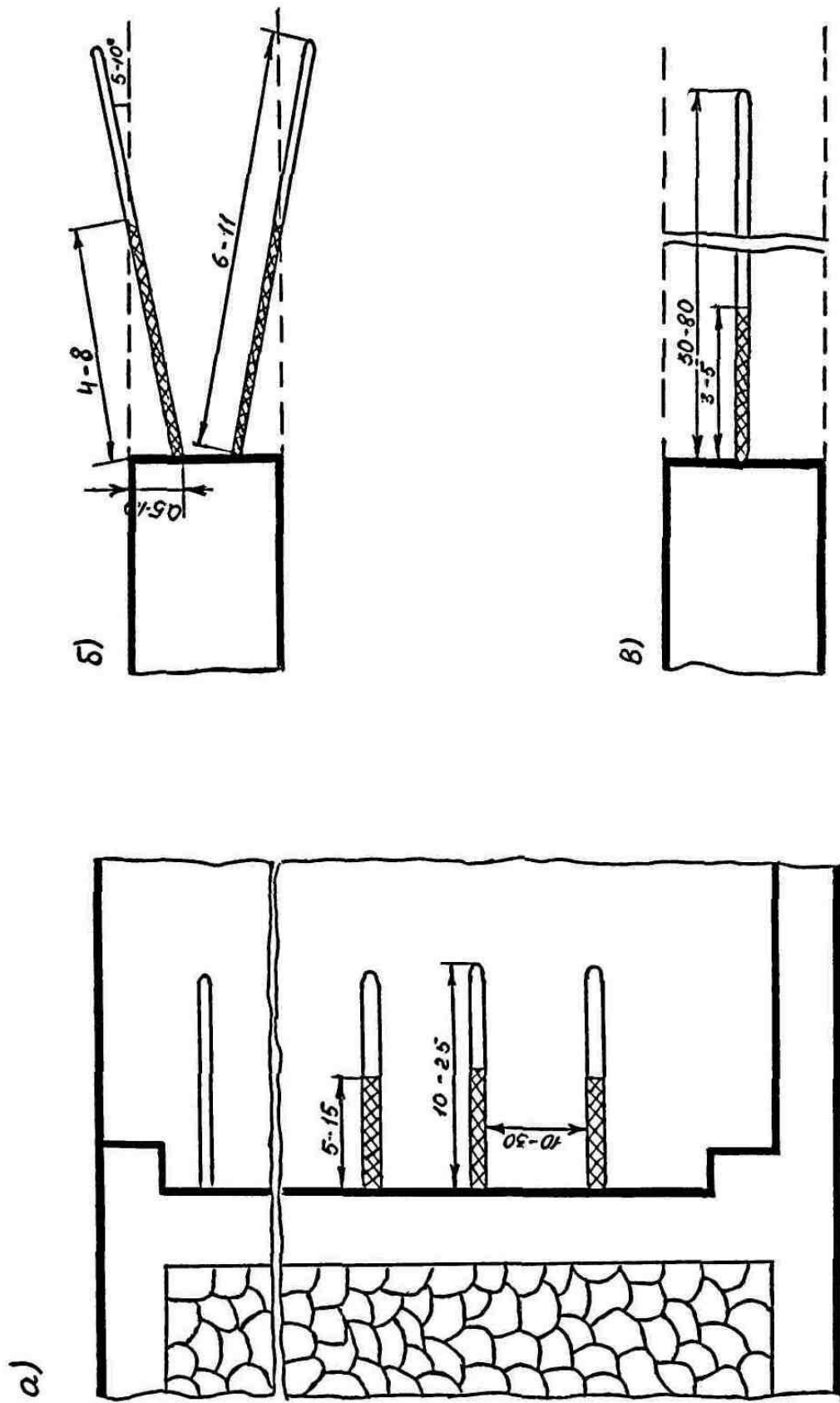


Рисунок 2.4 - Схемы расположения скважин:

а - коротких в очистном забое; б - коротких в подготовительной выработке;

в - длинной в подготовительной выработке.

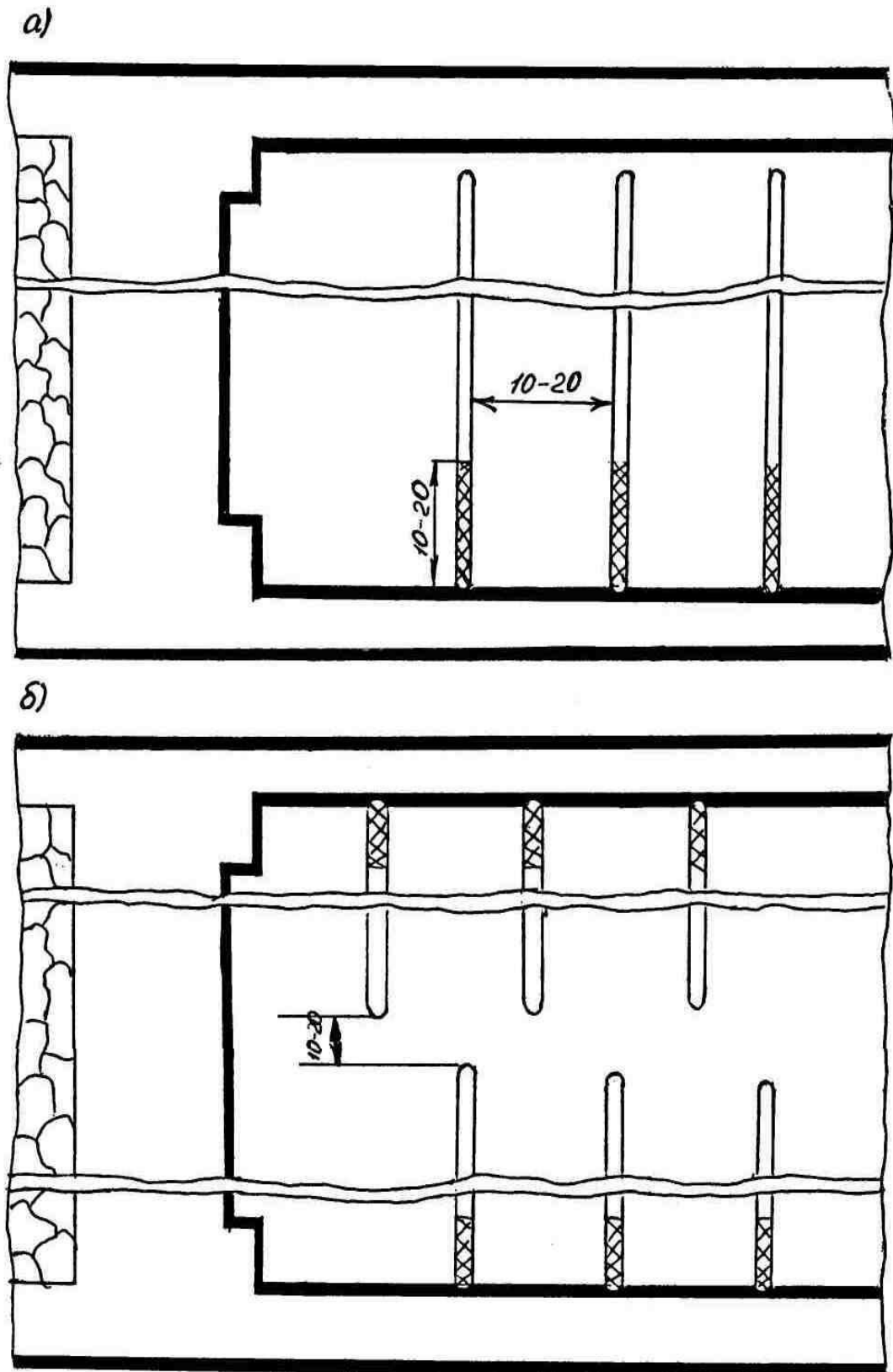


Рисунок 2.5 - Схема расположения длинных скважин, пробуренных:

а - из подготовительной выработки;

б - из откаточного и вентиляционного штреков.

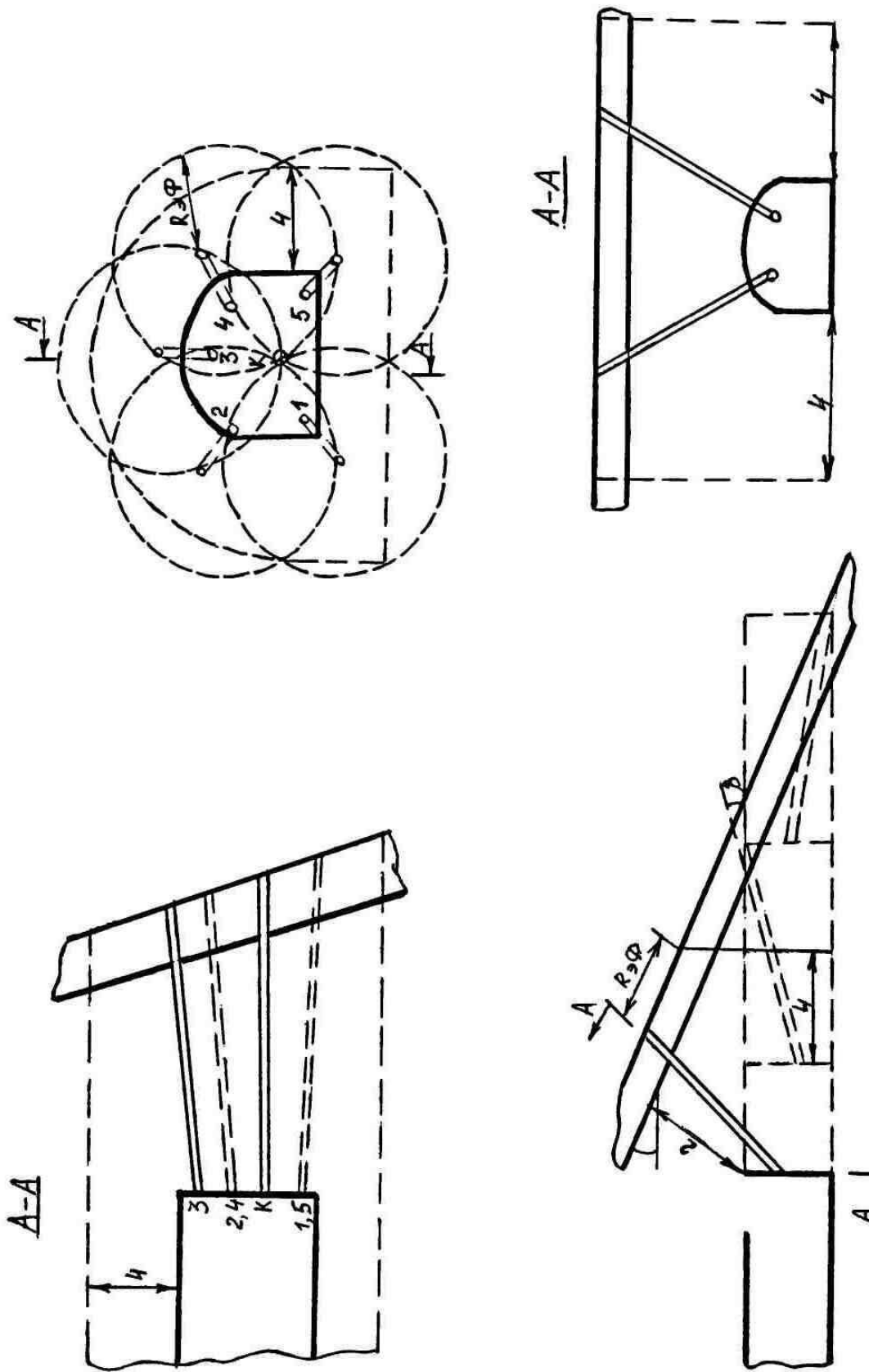


Рисунок 2.6 - Схемы расположения нагнетательных скважин при вскрытии:

а - крутого пласта; б - пологого пласта.

При невозможности обеспечить одновременную работу более трех скважин рекомендуется применять технологию непрерывной каскадной обработки, заключающуюся в следующем.

Нагнетание производится одновременно через три скважины, причем одна из них, расположенная со стороны обработанной области, является вспомогательной и служит для создания гидродинамического противодействия оттоку жидкости в этом направлении от остальных двух скважин (нагнетательных). После работы крайней нагнетательной скважины в течение половины расчетного времени нагнетания вспомогательная скважина отключается, соседняя становится вспомогательной, и к нагнетанию подключается следующая скважина.

При невозможности осуществлять нагнетание по описанной технологии или когда общее количество скважин не превышает трех, нагнетание производится отдельно по группам (раздельно-групповая обработка), причем темп подачи жидкости во все скважины группы должен поддерживаться на одинаковом уровне.

Применение каскадной обработки позволяет, по данным моделирования и натуральных экспериментов, снизить площадь необработанных зон на 50%- 80% в зависимости от технологической схемы и в 1,5-2 раза уменьшить коэффициент вариации удельного насыщения массива жидкостью в обрабатываемой области. При этом нагнетание с одинаковым темпом подачи жидкости позволяет снизить значения этих показателей соответственно на 35-60% и на 25-30% по сравнению с нагнетанием при нерегулируемом темпе.

2.2.2 Математические модели как способ имитации состояния пласта и реакции на воздействие

Существенной особенностью угольного пласта как объекта воздействия, осуществляемого для целенаправленного изменения его состояния, является то, что он «закрит» от непосредственного наблюдения, определить характеристики

пласта без вмешательства в его структуру невозможно. Фактически, в данном случае объект воздействия – это угольный массив с ненаблюдаемыми параметрами, что требует нестандартных решений при реализации управления процессом воздействия [82, 83, 84].

Вместе с тем, в процессе воздействия имеет место необходимость отслеживать результаты обработки, чтобы обеспечить направленное изменение состояния обрабатываемого массива. Реализация управления такими процессами, использующая данные о внешних воздействиях, возможна только в том случае, когда имеется модель объекта или возможность ее построения в процессе воздействия, основываясь на результатах контроля технологических параметров (давление нагнетания P и скорость его изменения dP , расход нагнетаемого вещества или темп нагнетания и скорость его изменения Q , dQ) и тем явлениям, которые можно наблюдать (в частности, пиковые всплески значений параметров, Рисунок 1.3, прорывы нагнетаемого вещества и т.п.). В этой связи стоит задача разработки адекватных моделей, по которым можно оценить состояние объекта и получить информацию о результатах воздействия [85, 86].

Для того чтобы система автоматического управления (САУ) была эффективной в течение всего времени обработки пласта с целью снижения пылеобразования и газовыделения, модели необходимо использовать в режиме реального времени, а с другой стороны, фильтрационные характеристики пласта являются фактически случайными величинами, значения которых задаются изначально по усредненным данным геологоразведки. В создавшихся условиях принят следующий подход.

Разрабатываемая САУ в своем составе использует две модели:

- исходная модель горного массива с заложенными в нее характеристиками, полученными из геологических данных;

- прогнозная модель, отражающая ожидаемое состояние на текущий момент, исходя из информации о результатах воздействия в реальном времени.

Такой подход позволяет уйти от процедуры идентификации параметров объекта воздействия (коэффициент фильтрации, эффективная пористость,

коэффициент анизотропии и др.).

Исходная модель закладывается в базу данных (БД) САУ и после первого цикла воздействия одновременно с выполнением последующих циклов осуществляется контроль технологических параметров (P , dP , Q , dQ) и по его результатам корректируется локальное распределение значений характеристик. Это дает возможность выявления и предупреждения возможных пиковых выбросов и прорывов (по направлению и величине изменения параметров), определяемых анизотропией угольного пласта.

Важное значение в процессе обработки имеет возможность прогноза не всегда предсказуемой вариации параметров в результате реакции пласта на внешнее силовое воздействие.

Резкие колебания значений параметров процесса, вызванные характером изменения физических свойств и структуры угольного пласта, оказывают отрицательное влияние на качество обработки пласта жидкостями и эффективность процесса гидровоздействия как средства борьбы с проявлениями опасных и вредных свойств угольных массивов, и первой задачей системы управления процессом является стабилизация технологических параметров.

Вместе с тем, отмечается другой аспект проблемы, заключающийся в том, что выходные каналы насосов, подающих жидкость в скважины, непосредственно гидравлически связаны с входными каналами работающих скважин, при этом режим работы насосов во многом зависит от размаха колебаний давления на скважине и, соответственно, темпа нагнетания. В этой связи возникает опасность гидроудара, когда поток фильтрующейся жидкости встречается с водоупором, определяемым резким снижением проницаемости и этот феномен сопровождается катастрофическим ростом локального давления, которое передается к устью скважины и выхлопу насоса. Такого рода явления приводят к повышенному износу оборудования, следовательно, в системе управления процессом этот аспект должен быть предусмотрен и скомпенсирован.

Поскольку фактические значения проницаемости пласта в каждый конкретный момент определены быть не могут, ставится задача прогноза

изменения фильтрационных характеристик на основании математической модели, учитывающей стохастический характер изменения проницаемости.

Физика процесса такова, что в массиве происходят фазовые переходы, свидетельствующие об изменениях в структуре обрабатываемой зоны пласта. Одним из ключевых показателей, отражающих резкие изменения структуры на коротких промежутках пространства и времени, является наличие пиковых всплесков значений параметров воздействия, по величине и длительности которых формируется оценка состояния, используемая в прогнозной модели, а также для коррекции параметров базовой (исходной) модели.

Отмечаемые пиковые всплески, не будучи своевременно учтены и скомпенсированы, могут вызвать ряд негативных последствий:

- гидроудары в гидропневматической системе с возможным выходом из строя технологического оборудования;
- затраты на восстановление работоспособности системы и возможно необходимый ремонт оборудования;
- снижение эффективности воздействия на угольный пласт;
- дополнительные затраты энергии и материальных ресурсов.

Данные, полученные по прогнозной модели, закладываются в исходную модель, которая корректируется в режиме реального времени и является базовой для расчета заданий на параметры управляющей системы, предназначенные для осуществления последующих циклов воздействия. Скорректированные данные записываются в БД и могут быть впоследствии использованы при управлении обработкой последующих участков пласта.

Для осуществления прогноза предлагается в каждом цикле опроса датчиков вводить информацию о распределении проницаемости в трех точках сеточной модели, реализующей решение уравнений методом конечных разностей, по каждому из направлений от расчетного узла сетки.

Фактически, на каждом шаге моделирования, находясь в узле (x_i, y_j) , необходимо анализировать проницаемость в тридцати шести узлах $(i, j = -3, -2, -1, 1, 2, 3)$. Учитывая данные прогноза, можно своевременно скорректировать

величину темпа нагнетания, не дожидаясь, когда скачок давления будет отмечен на скважине.

Следует отметить, что по результатам воздействия может быть фактически определена структура обрабатываемого пласта, однако эта картина формируется уже после реализации процесса, т.е. когда объект воздействия фактически разрушен. Это лишний раз говорит о том, что управление подобным процессом возможно исключительно с применением математических моделей, которые закладываются в структуру САУ. В процессе функционирования они корректируются и могут быть использованы в режиме обучающих при построении соответствующих алгоритмов обучения и настройки систем управления воздействия на новые объекты.

Таким образом, математическое моделирование является базовым атрибутом системы автоматического управления, рассматриваемым сложным динамическим процессом.

2.2.3 Математическое моделирование и обоснование методов совершенствования технологии гидравлического воздействия

Для формирования исходной математической модели рассматривается процесс гидравлического воздействия на пласт в режиме фильтрации через одиночную скважину, пробуренную впереди забоя, с учётом 1 пространственной координаты (в упрощённой формулировке – «одномерная» постановка).

На рисунке 2.7 приведено схематическое изображение данной технологии.

Здесь:

h – мощность пласта;

$L_{л}$ – длина лавы;

l_c – длина скважины;

l_2 – глубина герметизации;

$l_{\phi} = l_c - l_2$ – длина фильтрующей части скважины;

l_3 – расстояние от скважины до линии забоя (опережение).

Математическая модель основывается на уравнении параболического типа. Для численного решения применяется метод конечных разностей.

Исходное уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(P) \frac{\partial P}{\partial x} \right]. \quad (2.6)$$

Начальные и граничные условия формируются из следующих соображений. При данном расположении скважины (Рисунок 2.7 а) обрабатываемая зона ограничена, т.к. при длительном нагнетании жидкость выйдет на выработки, оконтуривающие массив угля, подвергаемый воздействию через скважину. Поэтому область фильтрации по оси X ограничена отрезком L, причем величина L может либо задаваться (когда известны размеры зоны, которую необходимо обработать одной скважиной), либо рассчитываться (когда задано ограниченное время обработки $T_{обр}$).

Следовательно, в качестве начальных условий задаются:

а) давление на скважине в начальный момент

$$P(x,t)|_{x=0}^{t=0} = P(0,0) = P_c; \quad (2.7)$$

б) распределение давления на отрезке (0,L] при $t=0$

$$P(x,t)|_{0 < x \leq L}^{t=0} = P(x,0). \quad (2.8)$$

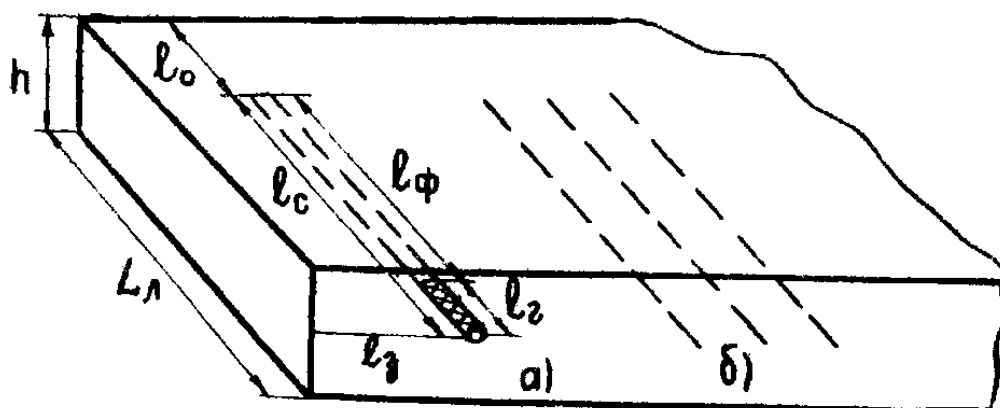


Рисунок 2.7 - Схема технологии гидравлического воздействия через опережающие скважины: а) одиночная скважина; б) группа скважин.

По смыслу, начальное распределение давления, очевидно, равно давлению газа в пласте: $P(x,0) = P_0$.

Краевые условия.

На левом конце ($x=0$) задается давление на скважине или темп нагнетания, причем эти величины могут быть либо постоянными, либо являться функциями времени:

$$P(x,t)\Big|_{\substack{x=0 \\ t>0}} = P(0,t) = P_c(t) \quad (2.9)$$

или

$$\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x}\Big|_{x=0} = cq, \quad (2.10)$$

где

q - удельный расход (расход на единицу площади фильтрующей поверхности);

c - коэффициент приведения, зависящий от размерности величин, входящих в выражение (2.10).

На правом конце ($x=L$) условия определяются схемой, а именно:

а) если на расстоянии L от нагнетательной скважины пробурена отточная скважина и исследуется движение жидкости от нагнетательной к отточной скважине, то в точке $x=L$ задается постоянное давление, равное давлению на выработке (обычно считают его равным атмосферному):

$$P(x,t)\Big|_{\substack{x=L \\ t>0}} = P(L,t) = P_K, \quad (2.11)$$

такое же условие задается, если рассматривать фильтрацию в сторону выработки, но при этом надо учитывать влияние опорного давления [27];

б) если исследовать движение жидкости по мощности пласта в сторону кровли (почвы), то на границе задается условие непроницаемости:

$$\frac{\partial P}{\partial x}\Big|_{x=L} = 0. \quad (2.12)$$

Решая уравнение (2.6) с начальными условиями, выбранными из (2.7) – (2.12) в соответствии с конкретной задачей исследования, можно найти распределение давления на отрезке $[0, L]$ в любой момент времени, что дает возможность рассчитывать параметры соответствующей схемы воздействия на пласт. При этом, как указывается в [11], решив задачу при некоторых нормированных условиях, можно получить решение большого класса задач, переход к которым осуществляется обратным пересчетом нормированных решений.

Введем безразмерные (нормированные) переменные:

$$\left. \begin{aligned} p^* &= \frac{P}{P_{хар}}; & P &= P_{хар} p^*; \\ x^* &= \frac{x}{L}; & x &= Lx^*; \\ k^* &= \frac{k(P)}{k_{хар}(P)}; & k(P) &= k_{хар}(P) \cdot k^*; \\ t^* &= \frac{t}{t_{хар}}; & t &= t_{хар} \cdot t^*; \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где

$P_{хар}, k_{хар}(P), t_{хар}$ - некоторые характерные значения соответствующих величин (часто максимальные, как, например, в данном случае для x : $x_{хар} = x_{max} = L$).

Подставляем полученные переменные в (2.6):

$$\frac{P_{хар}}{t_{хар}} \frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{k_{хар}(P) P_{хар}}{L^2} \frac{\partial}{\partial x^*} \left(k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right). \quad (2.14)$$

Если положить:

$$t_{хар} = \frac{P_{хар} L^2}{k_{хар}(P)}, \quad (2.15)$$

то получится:

$$\frac{\partial p^*}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial x^*} \left(k^* \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right). \quad (2.16)$$

Как видно, уравнения (2.16) и (2.6) различны только в обозначениях,

поэтому звездочки (*) можно опустить.

Итак, замена (2.14) позволяет перейти к нормированным безразмерным переменным, уравнение (2.16) записывается в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right). \quad (2.17)$$

Таким же преобразованиям подвергаются начальные и граничные условия.

Область, внутри которой нужно отыскать функцию $p(x,t)$, покрывается сеткой, образованной прямыми, параллельными осям координат, а непрерывная функция $p(x,t)$ отыскивается в виде таблицы дискретных ее значений в узлах сетки [87, 88]:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= i \cdot \Delta x; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \\ t_j &= j \cdot \Delta t; \quad j = 1, 2, 3, \dots \\ p(x, t) &\rightarrow \{p(x_i, t_j)\} = \{p_{i,j}\} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

Аппроксимируем производные по неявной четырехточечной схеме [87]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} \approx \frac{p_{i,j} - p_{i,j-1}}{\Delta t}, \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right) \approx \frac{k_{i+0,5,j} p_{i+1,j} - (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}) p_{i,j} + k_{i-0,5,j} p_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (2.20)$$

Приравняв (2.20) и (2.19), получим:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{i+0,5,j} p_{i+1,j} - \left[\frac{\Delta t}{\Delta x^2} (k_{i+0,5,j} + k_{i-0,5,j}) + 1 \right] p_{i,j} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} k_{i-0,5,j} p_{i-1,j} = -p_{i,j-1}. \quad (2.21)$$

Решение полученной системы находится методом прогонки [87].

Поскольку коэффициент $k(p)$ является функцией давления, необходимо применять итерационный процесс. В качестве первого приближения задается значение давления на предыдущем шаге по времени, затем итерационный расчет повторяется до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность.

Таким образом, исходя из начальных условий, можно рассчитать распределение давлений в любой момент времени. Критерием окончания может служить момент достижения фронтом фильтрации границы отрезка OL . Для

контроля за процессом выполнения расчета можно использовать метод материального баланса и другие методы [87, 88].

На рисунке 2.8 приведена обобщенная блок-схема алгоритма.

Решение задачи в «одномерной» постановке даёт возможность получать любые решения при соответствующей адаптации. В случае исследования процесса обработки угольного массива в плоскости Oxy необходимо использовать «двумерную» модель.

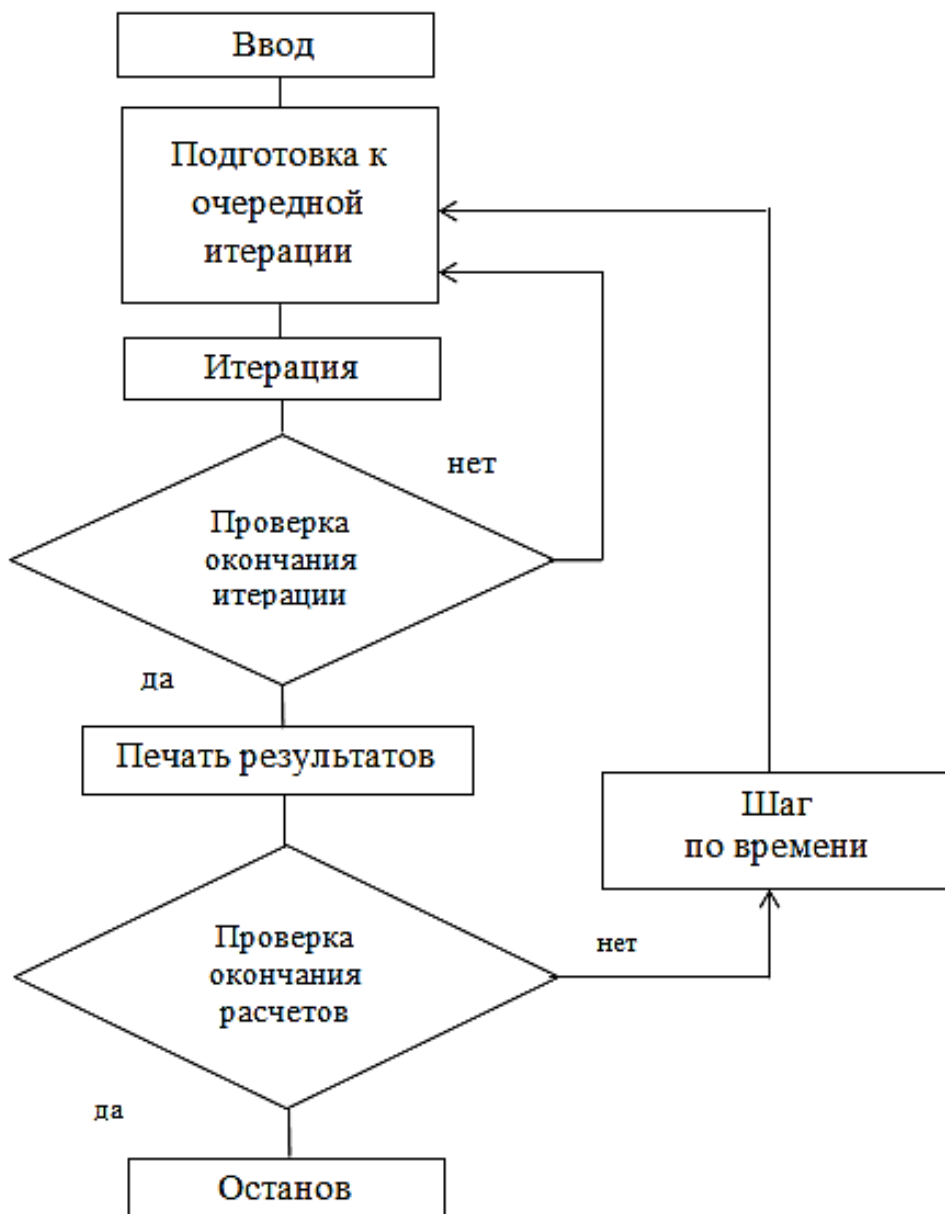


Рисунок 2.8 - Обобщенная блок-схема алгоритма моделирования процесса «одномерной» фильтрации

Для решения задачи математического моделирования процесса гидравлического воздействия на пласт через опережающие скважины в режиме фильтрации при «двумерной» (плоскостной) постановке задачи применяется схема продольно-поперечных направлений (схема Дугласа) [87].

Уравнение представляется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(p) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (2.22)$$

Область определения функции $p(x, y, t)$ покрывается сеткой:

$$x_i = i \cdot \Delta x, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n;$$

$$y_j = j \cdot \Delta y, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m;$$

$$t_k = k \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Каждый шаг по времени осуществляется в два приема.

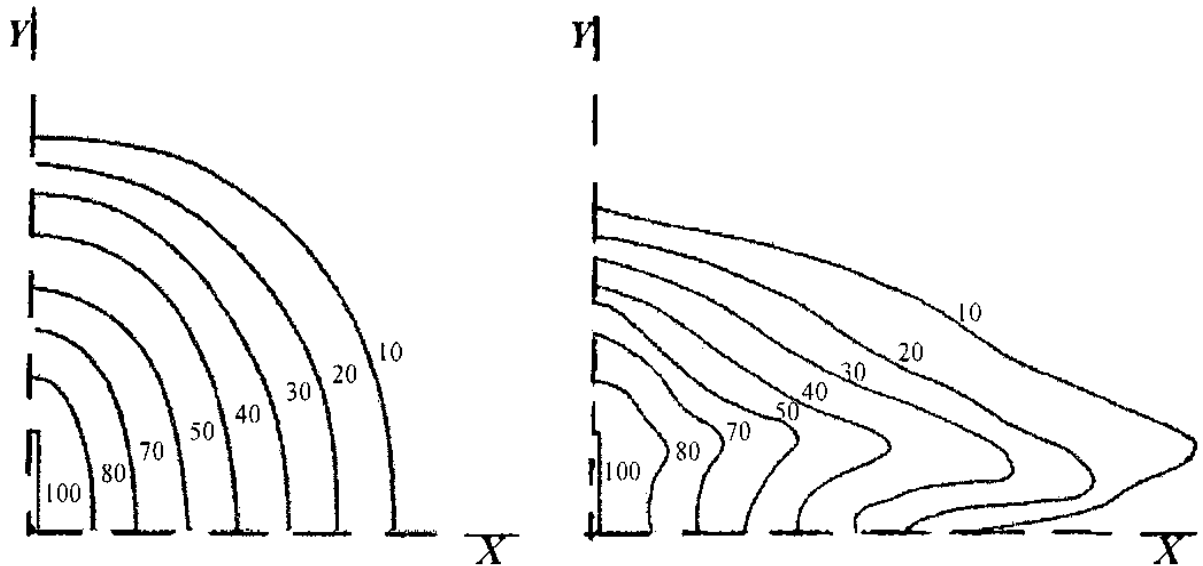
$$1) \quad \frac{p_{i,j}^{k+0,5} - p_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5} \right) + \frac{1}{\Delta y^2} \left(k_{i,j+0,5}^k p_{i,j+1}^k - (k_{i,j+0,5}^k + k_{i,j-0,5}^k) p_{i,j}^k + k_{i,j-0,5}^k p_{i,j-1}^k \right); \quad (2.23)$$

$$2) \quad \frac{p_{i,j}^{k+0,5} - p_{i,j}^k}{0,5 \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta x^2} \left(k_{i+0,5,j}^{k+0,5} p_{i+1,j}^{k+0,5} - (k_{i+0,5,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5}) p_{i,j}^{k+0,5} + k_{i-0,5,j}^{k+0,5} p_{i-1,j}^{k+0,5} \right) + \frac{1}{\Delta y^2} \left(k_{i,j+0,5}^{k+1} p_{i,j+1}^{k+1} - (k_{i,j+0,5}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1}) p_{i,j}^{k+1} + k_{i,j-0,5}^{k+1} p_{i,j-1}^{k+1} \right); \quad (2.24)$$

Исследование схем удобно производить с масштабированными (нормированными) переменными.

На рисунке 2.9 приведены результаты решения задачи в виде рассчитанных линий равного давления (в процентах от давления на скважине) в области воздействия. На рисунке 2.9 а приведены результаты моделирования при постоянном значении коэффициента проницаемости ($k = Const$).

Однако, как отмечалось выше, проницаемость пласта различается не только вдоль различных осей. Структура пласта весьма сложна, и картины фильтрации, полученные выше, дают идеализированное представление о характере процесса.



а) одиночная скважина, $k=Const$; б) одиночная скважина, $k=Var$

Рисунок 2.9 - Результаты моделирования процесса воздействия через одиночную скважину при постоянном и варьируемом значениях проницаемости

При такой форме области воздействия распространение влаги должно происходить равномерно, чего на самом деле не наблюдается. Следовательно, необходимо так подобрать параметры модели, чтобы получить более реальную картину процесса.

Один из путей подбора таких параметров – задание анизотропии пласта по всей области фильтрации независимо от направления осей, при этом, естественно, необходимо учесть, что коэффициент проницаемости вдоль оси Z в любом случае в несколько раз меньше проницаемости по простиранию (оси X). Поскольку пласт состоит из блоков с разной проницаемостью, пересечен трещинами различного происхождения, то в нем можно выделить некоторые области с различной величиной коэффициента фильтрации, и соответствующим образом задать набор коэффициентов проницаемости. Ввиду того, что выделить на практике такие области, не проникнув в пласт, невозможно, в первом приближении можно задать набор коэффициентов проницаемости хаотично, используя таблицу случайных чисел. Благодаря этому приему можно будет исследовать процесс фильтрации в условиях, более близких к реальным по сравнению со случаем, когда

проницаемость осредняется по трем (двум) направлениям.

На рисунке 2.9 б приведен результат решения задачи при таком случайном наборе значений коэффициента проницаемости ($k=Var$), т.е. коэффициент проницаемости представляется переменной, имеющей нестационарный характер.

Как видно из результатов моделирования, жидкость распространяется по всему пласту неравномерно, образуются слабо увлажненные участки. При этом жидкость может найти путь фильтрации, по которому быстро выйдет на соседнюю скважину, оставив большие блоки неувлажненными. Обходя эти блоки, жидкость «закупоривает» имеющийся в них метан, а это может привести к образованию зон с высоким содержанием газа под давлением, и увлажнение даст нежелательный эффект в отношении внезапного выброса. Особенно это характерно при нагнетании крепителя (раствора, изменяющего свое фазовое состояние), так как после затвердевания газ запирается в блоках со слабой проницаемостью.

Таким образом, используя технологию нагнетания жидкостей через одиночные скважины, добиться равномерной, качественной обработки массива вряд ли возможно.

Некоторыми авторами предлагается для повышения качества насыщения пласта производить нагнетания при минимальных давлениях – так называемое микрокапиллярное увлажнение. Однако такой способ может дать эффект только при увлажнении пласта в местах, где структура его разрушена и для проникновения жидкости достаточно невысоких давлений. В тех же случаях, когда обрабатывается массив, не подверженный нарушениям, для достижения практически целесообразного радиуса обработки потребуется слишком длительное время. Это затрудняет применение данного способа при увлажнении пласта через опережающие скважины, поскольку при современных скоростях продвижения забоя для того, чтобы успеть провести обработку, придется бурить скважины на близком расстоянии друг от друга, что резко повысит стоимость работ по увлажнению.

Следовательно, стоит задача выбора схем и параметров воздействия,

обеспечивающих повышение качества обработки несмотря на столь неблагоприятную структуру пласта. Иными словами, необходимо так усовершенствовать технологию, чтобы схема обработки позволяла компенсировать неблагоприятные особенности строения угольного пласта.

Одним из возможных путей в этом направлении является способ гидравлического воздействия через каскад скважин (способ каскадной гидрообработки) [26, с.58].

Рассмотрим задачу моделирования процесса воздействия на пласт жидкостью через каскад скважин.

Каскадным способом гидрообработки называется нагнетание жидкого агента одновременно через группу скважин в таком режиме, при котором обеспечивается взаимодействие встречных потоков жидкости от соседних скважин [28, с.77].

Физическая сущность каскадной обработки состоит в преодолении фильтрационной анизотропии пласта за счет взаимодействия встречных потоков рабочей жидкости от соседних одновременно работающих скважин и достижении за счет этого равномерного распределения жидкости в обрабатываемой зоне [26, с.58].

Физической основой каскадного способа нагнетания жидкости в угольный пласт является создание на границах слабопроницаемых областей высокого давления жидкости, близкого по величине к давлению на скважинах. Проверка этого предположения и установление возможности насыщения участков с низкой проницаемостью при каскадной обработке могут быть осуществлены только с помощью моделирования в силу невозможности проведения необходимых наблюдений в глубине массива.

Для исследования каскадного воздействия, очевидно, достаточно рассмотреть совместную работу двух скважин. Постановка задачи не отличается от вышеприведенной.

В основу математической модели положено уравнение (2.22), начальные и граничные условия формируются согласно (2.7) – (2.12). Для определения

условий необходимо задать координаты скважин, и на каждой из них задать удельный расход или давление нагнетания.

Численная реализация математической модели осуществляется согласно (2.23), (2.24).

Применение способа каскадной обработки не требует изменений оборудования, не влияет на технологию очистных работ, но при этом позволяет намного повысить качество обработки пласта текучим и тем самым повысить эффективность воздействия.

Поскольку достоверно установить проницаемость пласта в каждой точке не представляется возможным, коэффициент проницаемости в модели может быть задан как случайная величина [27, с.36], изменяющаяся в определенных пределах и постоянная на некоторой площади. Разброс значений коэффициента проницаемости, как отмечалось выше, может достигать двух-трех порядков величин.

Выбор критериев оценки эффективности каскадного способа по сравнению с одиночными скважинами производится в соответствии с поставленной целью: повышение равномерности гидравлической обработки пласта.

Равномерность обработки достаточно полно определяется наличием необработанных участков и степенью разброса значений прироста влажности в проектной зоне воздействия. В связи с этим для оценки качества обработки выбраны:

а) коэффициент относительной величины необработанных участков

$$\nu = \frac{S_H}{S_{PP}} \cdot 100, \% \quad (2.25)$$

где

S_H - площадь необработанных участков;

S_{PP} - площадь проектной зоны воздействия;

б) коэффициент вариации относительного прироста влажности, определяемого по давлению жидкости в каждой точке:

$$V_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta W_i - \Delta \bar{W})^2}}{\Delta \bar{W}} \cdot 100, \% \quad (2.26)$$

где

ΔW_i и $\Delta \bar{W}$ - значения прироста влажности соответственно в i -й точке и среднее по обрабатываемой зоне,

$$\Delta W_i = \frac{\Delta W_{расч.i}}{\Delta W_{max}}, \quad (2.27)$$

где

$\Delta W_{расч.i}$ - прирост влажности в i -и точке;

ΔW_{max} - максимальный прирост влажности.

Для оценки эффективности каскадного воздействия будем пользоваться величинами, определяющими относительное уменьшение необработанной площади:

$$\mathcal{E}_s = \frac{S_{H.O} - S_{H.K}}{S_{H.O}} \cdot 100, \% \quad (2.28)$$

где

$S_{H.O}$ и $S_{H.K}$ - площади необработанных участков при нагнетании соответственно через одиночную скважину и каскад;

и уменьшение коэффициента вариации прироста влажности:

$$\mathcal{E}_v = \frac{V_R^0}{V_R^k}, \quad (2.29)$$

где

V_R^0 , V_R^k - коэффициенты вариаций соответственно для одиночной скважины и каскада.

Связь между давлением нагнетаемой жидкости и приростом удельного насыщения массива в соответствующих точках определяется кривой согласно [21, с.18].

Разработка технологии каскадного нагнетания должна быть направлена на уменьшение степени влияния факторов, снижающих равномерность обработки, с учетом требований минимальной сложности, трудоемкости и использования серийно выпускаемого оборудования.

На основе анализа наиболее распространенных технологических схем и режимов нагнетания, многообразия фильтрационной структуры и строения угольных пластов определены задачи, методика моделирования и критерии оценки эффективности каскадной обработки.

Исследование процесса нагнетания с учетом всех вышеперечисленных факторов дает обоснование принципиальной возможности преодоления фильтрационной анизотропии за счёт взаимодействия встречных потоков рабочей жидкости.

Величинами, которые оказывают влияние на характеристики фильтрационного потока, являются: давление жидкости и его градиент, коэффициент проницаемости и пористость пласта, вязкость жидкости, расстояние и время движения. Равномерность распределения жидкости по пласту предполагает равенство скоростей движения ее фронта в каждой точке в один и тот же момент времени.

На рисунке 2.10 и рисунке 2.11 показаны линии равного давления жидкости (в долях давления на скважинах) для плоскопараллельного и радиального потоков при нагнетании через одиночную скважину и каскад в момент, соответствующий началу взаимодействия потоков при каскадной обработке.

Пунктиром на рисунке отмечены границы слабопроницаемой области.

Видно, что давление жидкости в плоскопараллельном потоке вблизи границ слабопроницаемой области при каскадном нагнетании в 2-3 раза выше и приближается по величине к давлению на скважинах; это соответствует предполагаемой физической картине движения и взаимодействия потоков при каскадной обработке.

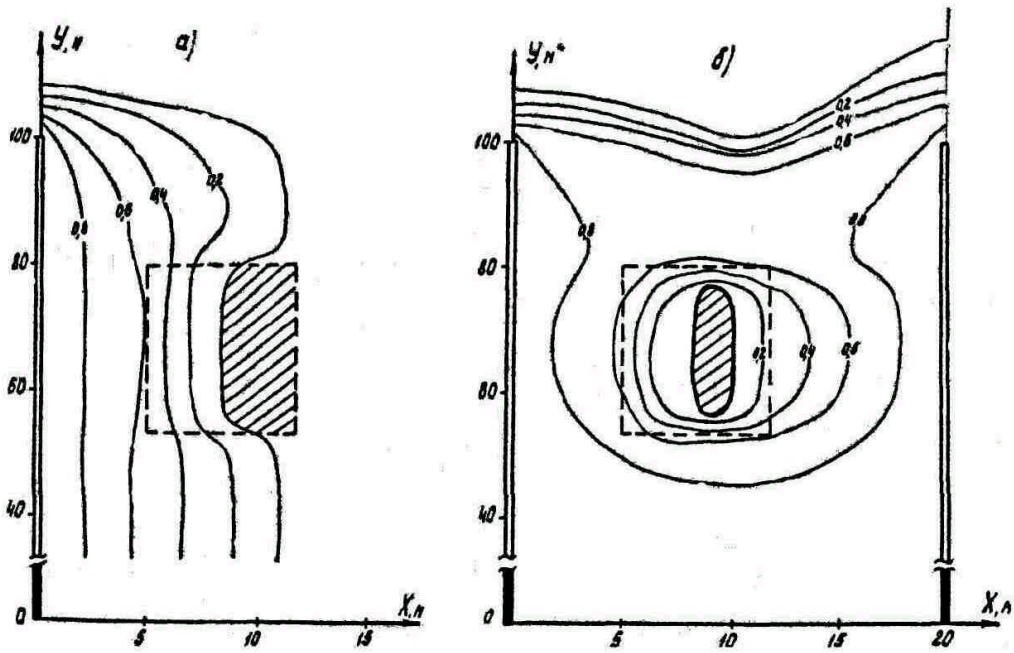


Рисунок 2.10 - Распределение относительного давления жидкости в плоско-параллельном потоке в окрестности слабопроницаемой области:

а) одиночная скважина; б) каскад скважин.

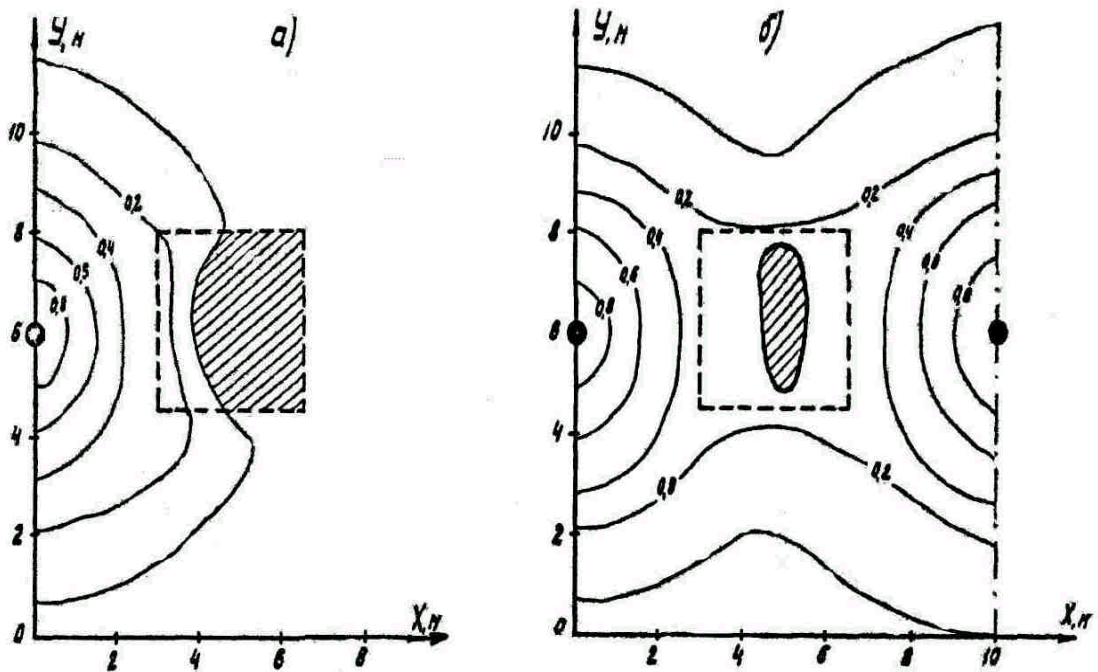


Рисунок 2.11 - Распределение относительного давления жидкости в радиальном потоке в окрестности слабопроницаемой области:

а) одиночная скважина; б) каскад скважин.

Для радиального потока разница давлений не так существенна (Рисунок 2.11). Это объясняется тем, что при плоскопараллельном движении жидкости, во-первых, больше площадь взаимодействия потоков, во-вторых, потоки движутся навстречу друг другу, а не под углом, что обуславливает их более эффективное взаимодействие.

Расчет скоростей движения фронта фильтрующейся жидкости в различных точках показал изменение направлений их векторов в сторону слабопроницаемой области и увеличение модулей этих векторов, что способствует более быстрому насыщению участков с низкой проницаемостью.

Таким образом, анализ имеющихся экспериментальных данных (МакНИИ, ИГТМ, НГУ, МГГУ, ДонНТУ) позволяет сделать вывод о том, что гидравлическая обработка через одиночную скважину не обеспечивает равномерного распределения жидкости в обрабатываемой зоне. Данные математического моделирования с учетом фильтрационной неоднородности пласта (Рисунок 2.10 а, Рисунок 2.11 а, Рисунок 2.12) подтверждают предположение о том, что жидкость при нагнетании распространяется преимущественно по путям с повышенной проницаемостью и обтекает слабопроницаемые зоны.

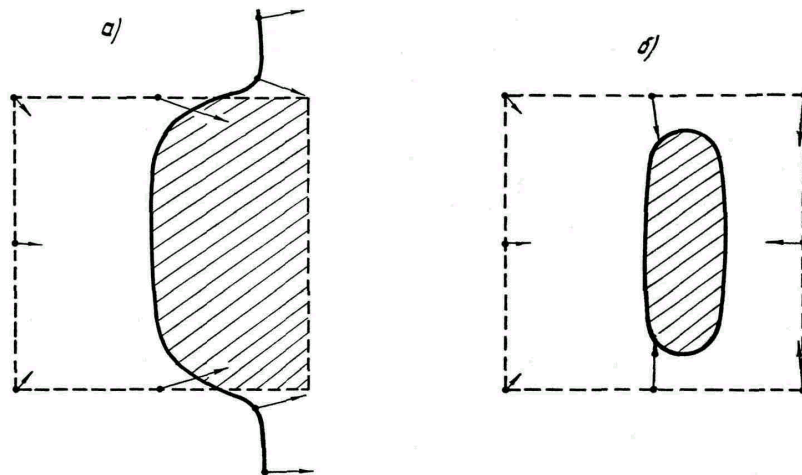


Рисунок 2.12 - Векторы скоростей потока жидкости в окрестности слабопроницаемой области: а) одиночная скважина; б) каскад скважин.

Таким образом, можно считать установленным, что взаимодействие потоков жидкости, движущихся от соседних одновременно работающих скважин, приводит к преодолению фильтрационной анизотропии угольного массива.

Исследование эффективности способа предполагает учет всех основных природных и технологических факторов, влияющих на равномерность распространения жидкости в угольном массиве: фильтрационная анизотропия, схема расположения скважин, режим нагнетания и параметры воздействия.

На рисунке 2.13 и в таблице 2.1 приведены результаты моделирования процесса для одиночной скважины и каскада.

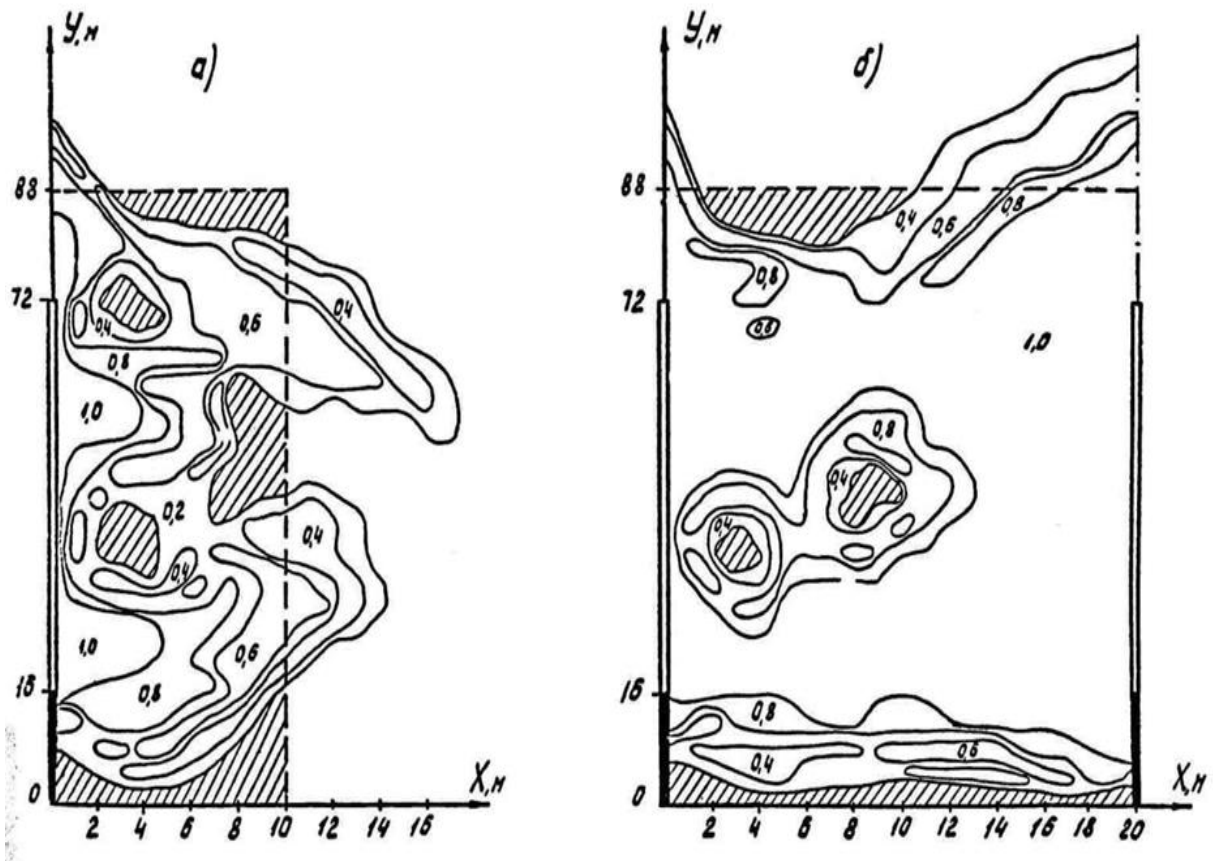


Рисунок 2.13 - Распределение прироста влажности при нагнетании через длинные скважины в режиме постоянного давления:

а) одиночная скважина; б) каскад скважин.

Таблица 2.1 - Равномерность обработки в плоскости пласта при нагнетании в режиме постоянного давления

№ варианта	Распределение проницаемости				Равномерность обработки				Эффективность каскадного способа	
	$k_{\min} \cdot 10^{16}$ м ²	$k_{\max} \cdot 10^{16}$ м ²	$V_R, \%$	$S_H,$ м ²	$\nu, \%$	$V_R^0, \%$	$\nu, \%$	$V_R^k \%$	$\mathcal{E}_S, \%$	\mathcal{E}_V
Длинные скважины										
1	2,0	54,0	42,3	42	13,3	48,4	4,3	26,5	67,6	1,8
2	0,4	9,0	50,3	16	16,6	60,9	7,2	28,9	56,5	2,1
3	0,1	65,0	70,6	80	17,8	62,3	6,9	30,2	60,2	2,1
4	0,4	53,0	76,3	12	14,8	59,6	5,5	32,5	62,7	1,8
5	1,0	54,0	81,8	20	18,1	63,2	6,6	34,4	63,5	1,8
6	0,3	39,0	82,6	64	19,1	56,5	7,3	33,8	61,8	1,6
7	0,5	32,0	86,1	60	17,4	60,0	7,9	35,8	54,6	1,7
8	0,02	86,0	96,5	64	19,6	66,3	8,4	34,2	57,1	1,9
9	0,02	143,0	108,6	80	22,6	70,3	11,8	45,0	47,7	1,6
10	0,03	162,0	112,3	40	23,7	64,1	9,7	31,6	59,0	2,0
Среднее значение					18,3	60,6	7,6	34,4	58,5	1,8
Короткие скважины										
1	2,0	117,0	63,5	4,5	24,2	80,1	11,3	62,0	53,2	1,3
2	1,0	62,0	76,7	4,0	21,8	66,4	9,1	35,3	58,2	1,9
3	0,1	78,0	81,9	8,0	27,6	80,8	10,0	47,5	63,8	1,7
4	2,0	74,0	92,0	6,0	25,2	74,9	13,8	45,0	45,4	1,7
5	0,001	54,0	114,6	7,5	34,4	78,7	16,2	48,3	52,9	1,6
Среднее значение					26,6	76,2	12,1	47,6	54,6	1,6

Данные таблицы 2.1 показывают, что на равномерность распределения жидкости оказывают существенное влияние степень разброса проницаемости и длина скважин. Заметна также следующая закономерность: при уменьшении размеров участков с постоянной проницаемостью распределение жидкости по пласту становится более равномерным. Следует ожидать наибольшей неравномерности распространения жидкости в пласте с резко выраженной зональностью фильтрационных характеристик, если размеры этих зон не превышают размеры одновременно обрабатываемой области.

Существенное влияние на эффективность каскадной обработки оказывают параметры воздействия. При каскадном нагнетании зоной эффективного взаимодействия потоков жидкости в плоскости пласта следует считать прямоугольник между фильтрующими частями двух соседних скважин.

При нагнетании через длинные скважины эта зона занимает почти всю обрабатываемую область, при нагнетании через короткие - обычно не более половины. Это, а также большее время обработки через длинные скважины приводит к тому, что и при каскадной обработке длинные скважины остаются предпочтительнее коротких с точки зрения равномерности распределения рабочей жидкости по пласту.

Другими параметрами, влияющими на результат обработки, являются давление и темп нагнетания. При нагнетании с постоянным, одинаковым для всех скважин каскада, давлением темп подачи жидкости в каждую скважину различен по причине различной приемистости пласта вокруг скважин.

В варианте, изображенном на рисунке 2.13 б, в скважину, работающую с более высоким темпом, было закачено количество жидкости, превышающее проектный объем; это явилось одной из причин неравномерности обработки.

Поэтому при каскадном нагнетании необходимо контролировать и регулировать количество жидкости, подаваемое в каждую скважину.

С целью проверки эффективности технологии с индивидуальной подачей жидкости в каждую скважину были промоделированы варианты из таблицы 2.1 с контролируемым темпом, а также одинаковым темпом для обеих скважин.

Соотношение между темпом и давлением задавалось в виде:

$$P_H = -aq + P_{\max} ; (P_H \geq P_{\text{нач}}), \quad (2.30)$$

где

$P_{\text{нач}}$ и P_{\max} - соответственно начальное и максимальное значения давления;

a - константа.

Результаты моделирования приведены в таблице 2.2 (q_1 и q_2 - соответственно темп подачи жидкости в первую и вторую скважины) и для

длинных скважин - на рисунке 2.14 (с распределением проницаемости, соответствующим области на рисунке 2.13).

Поскольку при нагнетании через короткие скважины из забоя очистной или подготовительной выработки имеет место частичное перекрытие зон обработки от скважин двух последовательных циклов, представляет интерес моделирование нескольких циклов нагнетания.

На рисунке 2.15 показано распределение прироста влажности после трех циклов нагнетания через одиночные скважины и каскад с одинаковым темпом.

Таблица 2.2 - Равномерность обработки в плоскости пласта при нагнетании с контролируемым и регулируемым темпом

№ варианта	Равномерность обработки				Эффективность по сравнению с одиночной скважиной			
	$q_1 \neq q_2$		$q_1 = q_2$		$q_1 \neq q_2$		$q_1 = q_2$	
	$\nu, \%$	$V_R^0, \%$	$\nu, \%$	$V_R^k, \%$	$\mathcal{E}_S, \%$	$\mathcal{E}_V, \%$	$\mathcal{E}_S, \%$	\mathcal{E}_V
Длинные скважины								
1	4,2	27,3	3,0	24,3	68,4	1,8	77,5	2,0
2	4,8	31,2	2,2	25,7	71,0	1,9	86,7	2,4
3	5,1	30,5	2,3	24,8	71,3	2,0	87,0	2,5
4	3,4	25,1	2,6	22,2	77,1	2,4	82,4	2,7
5	4,3	30,2	2,9	25,3	76,2	2,1	84,0	2,5
6	6,3	30,6	4,6	28,1	67,0	1,8	75,8	2,0
7	4,5	31,4	4,1	26,2	74,1	1,9	76,4	2,3
8	4,4	33,0	2,3	28,0	77,4	2,0	88,4	2,3
9	8,5	42,6	4,2	35,8	62,3	1,6	81,4	2,0
10	8,1	40,1	3,8	31,3	65,7	1,6	83,9	2,0
Среднее значение	5,4	32,2	3,2	27,1	70,5	1,9	82,6	2,2
Короткие скважины								
1	9,5	46,2	7,0	40,3	60,7	1,7	71,0	2,0
2	6,7	40,3	5,3	36,2	69,2	1,6	75,6	1,9
3	8,9	44,0	6,1	35,5	67,7	1,8	77,8	2,3
4	10,7	45,8	7,5	41,6	57,5	1,6	70,2	1,8
5	12,3	50,1	8,4	47,0	64,2	1,6	75,5	1,7
Среднее значение	9,6	45,3	6,9	40,1	63,8	1,7	74,1	1,9

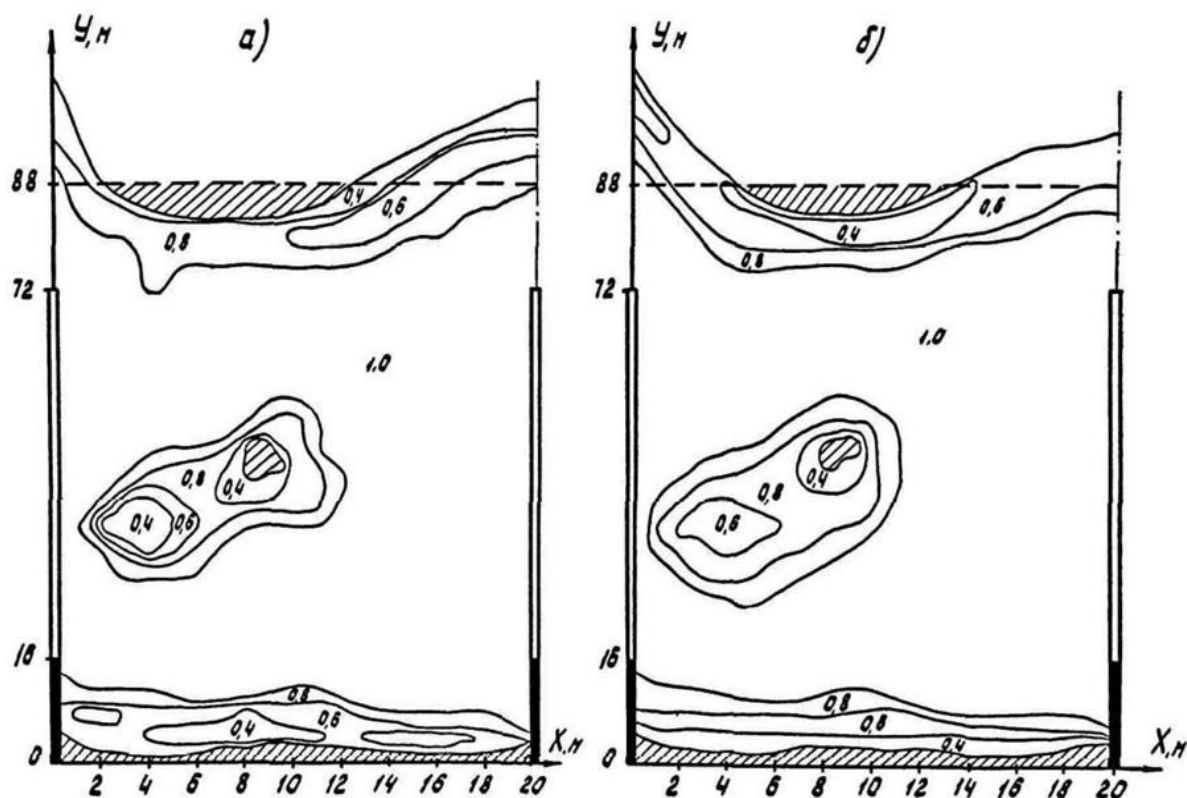


Рисунок 2.14 - Распределение влажности при каскадном нагнетании через длинные скважины с индивидуальной подачей жидкости:

а) с контролируемым темпом; б) с одинаковым темпом

Усредненные показатели равномерности обработки и эффективности каскадного нагнетания по всем вариантам сведены в таблицу 2.3.

Совместный анализ таблиц 2.1, 2.2, 2.3 показывает, что нагнетание с индивидуальной подачей жидкости существенно повышает эффективность каскадной обработки по обоим критериям, причем наибольшая равномерность достигается при нагнетании с одинаковым темпом для всех скважин каскада.

В исследуемых вариантах для длинных скважин удалось добиться снижения необработанной площади по сравнению с нагнетанием с одинаковым давлением в среднем на 57,9%, по сравнению с индивидуальной подачей жидкости - на 40,8%; коэффициент вариации прироста влажности уменьшился соответственно на 26,9% и на 18,9%.

Таблица 2.3 - Усредненные показатели равномерности обработки и эффективности каскадного нагнетания

Схема, режим	Равномерность обработки, %		Эффективность каскадного нагнетания	
	ν , %	V_R , %	\mathcal{E}_S , %	\mathcal{E}_V
Длинные скважины				
а) одиночная	18,3	60,6	-	-
б) каскад $P_1 = P_2$	7,6	34,4	58,5	1,8
$P_1 \neq P_2; q_1 \neq q_2$	5,4	32,2	70,5	1,9
$q_1 = q_2$	3,2	27,1	82,6	2,2
Короткие скважины				
а) одиночная	26,6	76,2	-	-
б) каскад $P_1 = P_2$	12,1	47,6	54,6	1,6
$P_1 \neq P_2; q_1 \neq q_2$	9,6	45,3	63,8	1,7
$q_1 = q_2$	6,9	40,1	74,1	1,9

Для коротких скважин значения соответствующих показателей составили 43,0% и 28,1% по необработанной площади, 18,7% и 13,0% по коэффициенту вариации.

Во всех режимах применение длинных скважин по обоим показателям на 35-50% эффективнее коротких.

Одной из причин, снижающих эффективность каскадной обработки, является меньшее гидравлическое сопротивление участков пласта, лежащих вне зоны взаимодействия скважин, по сравнению с межскважинной областью. Это обусловлено как гидравлическим противодействием встречных потоков на хорошо проницаемых участках, так и наличием слабопроницаемых зон больших размеров, расположенных между скважинами.

Для повышения эффективности каскадного нагнетания число одновременно работающих скважин может быть увеличено. Использование для этой цели трех (Рисунок 2.16) и четырех скважин позволило уменьшить необработанную площадь до 7,2% и 3,9% соответственно, коэффициент вариации прироста, влажности - до 36,8% и 31,3%, то есть вплотную приблизиться к показателям таблиц 2.2, 2.3.

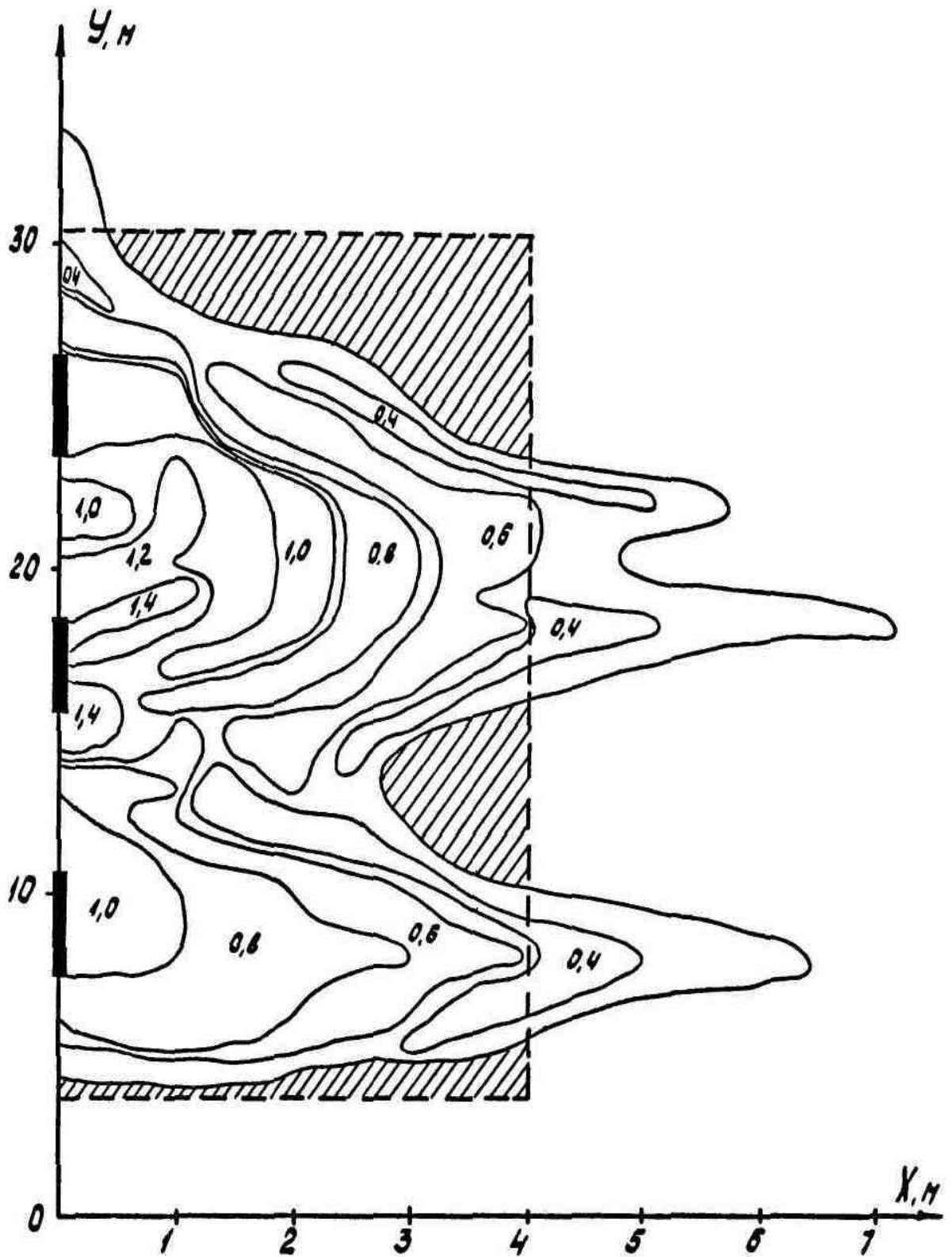


Рисунок 2.15 - Распределение прироста влажности после трех циклов нагнетания

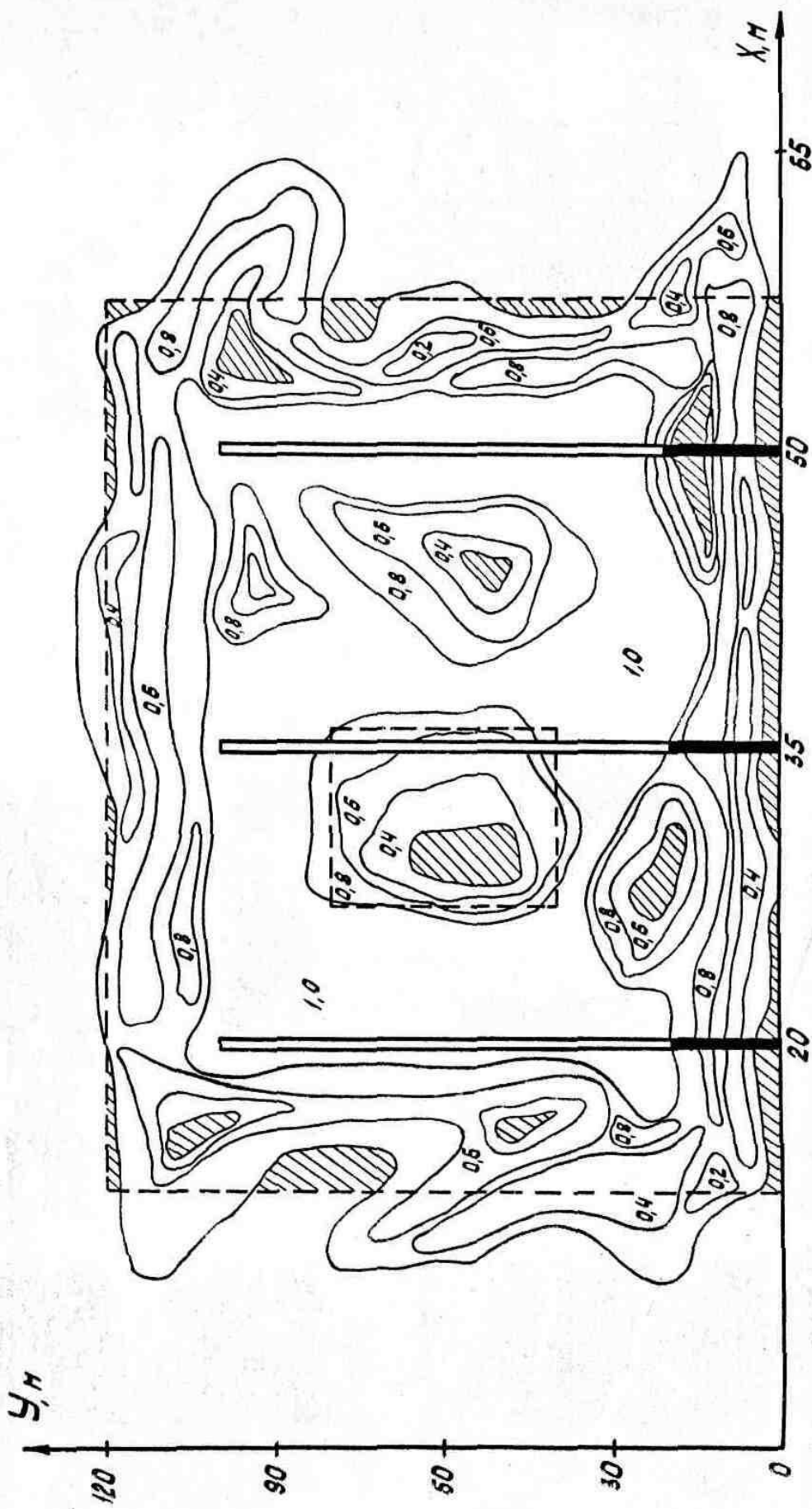


Рисунок 2.16 - Распределение прироста влажности при каскадном нагнетании через три скважины с одинаковым темпом

Увеличение числа скважин позволяет добиться повышения равномерности обработки и в плоскости, перпендикулярной напластованию. Увеличение равномерности обработки участков пласта, лежащих между группами, может быть обеспечено перекрытием зон влияния крайних скважин.

В зависимости от степени анизотропии массива это расстояние следует уменьшать в 1,5...2 раза. Недостатком этого является увеличение объема работ по бурению и герметизации скважин и времени обработки. В связи с ростом количества оборудования при увеличении числа скважин в каскаде и объема работ при уменьшении расстояния между группами возникает задача совершенствования технологии и параметров каскадного нагнетания с целью достижения высокой равномерности обработки без существенного увеличения материальных затрат и трудоемкости гидродинамического воздействия.

Проведенные исследования процесса распространения жидкости при нагнетании в угольный пласт через каскад скважин позволили сделать вывод о целесообразности использования этого способа для повышения равномерности обработки массива (Рисунок 2.17). Результаты моделирования показывают, что каскадное воздействие на пласт приводит к снижению площади необработанных участков в проектной зоне на 50-80%, коэффициента вариаций прироста влажности - в 1,5...2 раза в зависимости от горно-геологических условий, технологической схемы и режима нагнетания.

Установлено, что каскадное нагнетание через длинные скважины по обоим показателям на 36...50% эффективнее, чем через короткие.

Нагнетание с одинаковым для всех скважин каскада темпом позволяет уменьшить необработанную площадь на 40...60%, а коэффициент вариаций прироста влажности - на 18...27% по сравнению с режимом одинакового давления. При локальных способах воздействия целесообразно с целью экономии времени располагать скважины в наиболее проницаемой пачке угольного пласта.

Повышение эффективности каскадной обработки во всех случаях достигается увеличением количества скважин и расстояния между группами.

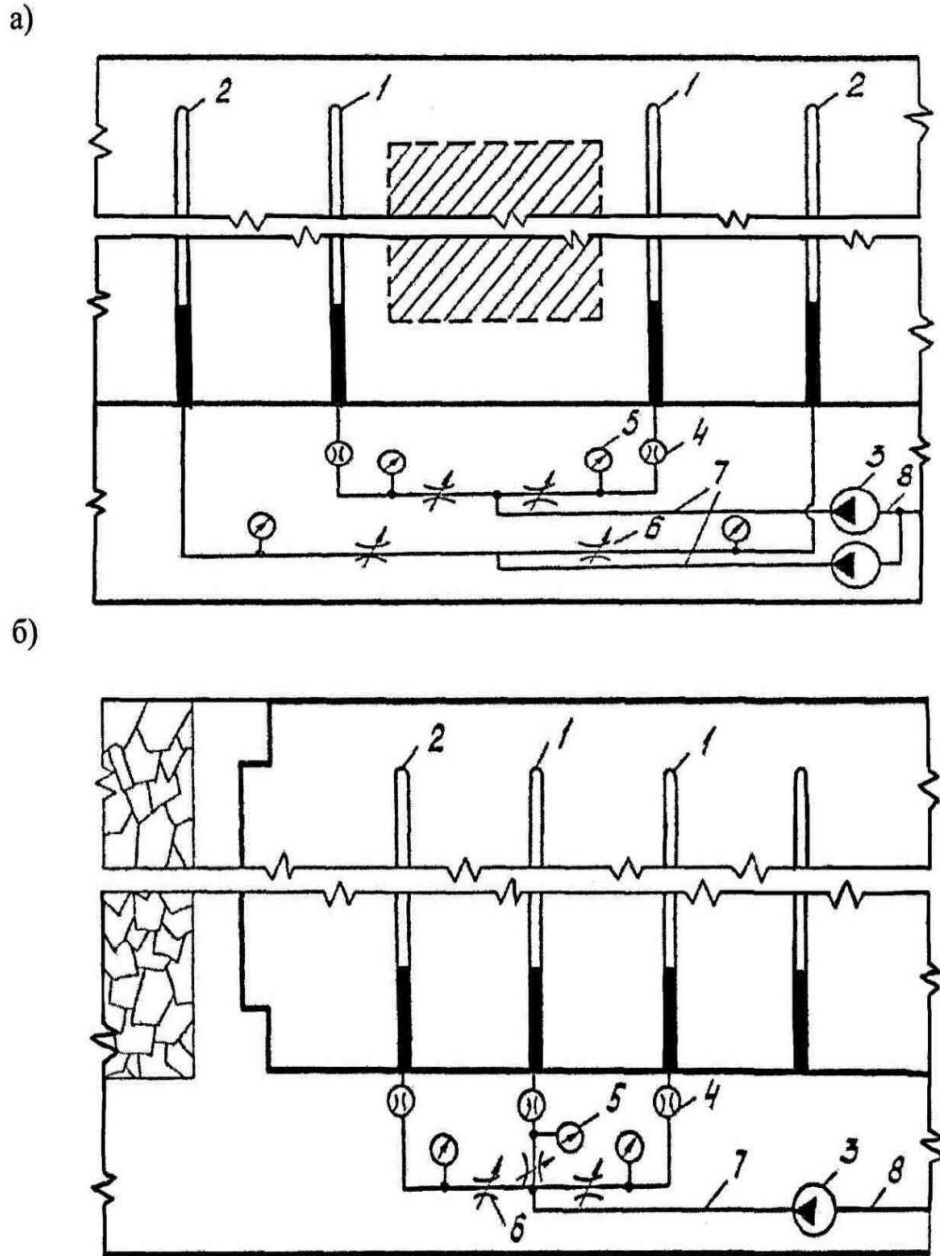


Рисунок 2.17 - Технологические схемы каскадного нагнетания со вспомогательными скважинами

а) при известном расположении слабопроницаемой области;

б) по непрерывной технологии

1 – нагнетательные скважины;

2 – вспомогательные скважины;

3 – насосная установка;

4 – счетчик-расходомер;

5 – манометр;

6 – дроссель регулируемый;

7 – рукав высоконапорный;

8 – участковый водопровод.

С другой стороны, это приводит к росту объема бурения и герметизации, количества оборудования, сложности управления процессом. Это определяет необходимость разработки технологии и параметров каскадного нагнетания, обеспечивающих высокую равномерность обработки при небольших трудовых и материальных затратах на проведение воздействия.

Параметры каскадной обработки включают в себя параметры схемы расположения скважин (длинных и коротких) и параметры нагнетания по раздельно-групповой и непрерывной технологии.

К параметрам нагнетания относятся: расход жидкости на одну скважину, давление, темп и время нагнетания.

Темп и связанное с ним время нагнетания при обработке через одиночную скважину и каскад различны, как показывают результаты моделирования. Поскольку жидкость при взаимодействии потоков движется в слабопроницаемые области, давление на скважинах, включенных в каскад, повышается, либо, при поддержании давления постоянным снижается темп и увеличивается время нагнетания.

Время нагнетания после согласования размерностей

$$T_H = 2,8 \cdot 10^{-10} \frac{Q^2 \mu}{8l_\phi^2 m^2 n_\varepsilon \lambda (P_H - P_\Gamma)}, \text{ час} \quad (2.31)$$

Соответственно темп нагнетания

$$q = 10^6 l_\phi m \sqrt{2n_\varepsilon \frac{k}{\mu} (P_H - P_\Gamma)} \frac{1}{\sqrt{t}}, \text{ л/мин} \quad (2.32)$$

Предположение об одномерности потока жидкости от скважины можно считать справедливым только для тонких пластов с небольшим коэффициентом фильтрационной анизотропии. На самом деле, поток от скважины является радиально-одномерным.

С учетом анизотропии радиальная часть потока описывается следующими образом:

$$q_p = l_\phi \frac{2\pi\sqrt{k_x k_z} (P_H - P)}{\mu \ln \left(\frac{2r}{d_c} \sqrt{\frac{k_x}{k_z}} \right)}, \quad (2.33)$$

где

k_x, k_z - коэффициенты проницаемости соответственно вдоль и вкrest напластования;

P - давление жидкости на расстояний r от скважины;

d_c - диаметр скважины.

$$q = -l_\phi \frac{m^2 n_\varepsilon}{2\pi} \sqrt{A} \ln \left(\frac{m}{d_c} \sqrt{\frac{A}{3}} \right) + l_\phi \sqrt{\frac{m^4 n_\varepsilon^2 A \ln^2 \left(\frac{m}{d_c} \sqrt{\frac{A}{3}} \right)}{4\pi^2 t^2} + 2m^2 n_\varepsilon \frac{k_x}{\mu} (P_H - P_\Gamma) \frac{1}{t}}, \quad (2.34)$$

где

t - текущее время, час.

За время T_H :

$$Q = 2\sqrt{C_1^2 + C_2 T_H} + C_1 \ln \frac{\sqrt{C_1^2 + C_2 T_H} - C_1}{T_H (\sqrt{C_1^2 + C_2 T_H} + C_1)} - C_1, \quad (2.35)$$

где

$$C = C_1 \left(\ln \frac{C_2}{4C_1^2} + 2 \right);$$

$$C_1 = 10^6 l_\phi \frac{m^2 n_\varepsilon}{2\pi} \sqrt{A} \ln \left(\frac{10^3 m}{d_c} \sqrt{\frac{A}{3}} \right);$$

$$C_2 = 2 \cdot 10^{18} l_\phi^2 m^2 n_\varepsilon \frac{k_x}{\mu} (P_H - P_\Gamma).$$

Определение времени нагнетания из (2.35) в явном виде невозможно, поэтому зависимость T_H от величин, входящих в (2.37), установим приближенно.

С достаточной для практики точностью зависимость времени нагнетания от величин, указанных в (2.35), выражается формулой

$$T_H = \frac{53 \cdot 10^{-13} Q m \mu}{l_\phi k_x (P_H - P_\Gamma)} (0,13Q + 1) \left(\frac{6,6}{m^2} + 1 \right) \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{n_\varepsilon} + 1 \right) (1,7\sqrt{A+1}), \text{ час} \quad (2.36)$$

С учетом уменьшения темпа нагнетания при каскадной обработке формула для определения времени нагнетания через длинные скважины принимает вид:

$$T_H = \frac{70 \cdot 10^{-13} Q m \mu}{l_\phi k_x (P_H - P_\Gamma)} (0,13Q + 1) \left(\frac{6,6}{m^2} + 1 \right) \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{n_\phi} + 1 \right) (1,7\sqrt{A} + 1), \text{ час} \quad (2.37)$$

Тогда среднее значение темпа нагнетания определяется:

$$q_{cp} = 16,7 \frac{Q}{T_H}, \text{ л/мин} \quad (2.38)$$

Исследование изменения давления и темпа нагнетания через короткие скважины показывает, что в данном случае взаимодействие потоков оказывает менее существенное влияние на эти параметры, чем для длинных скважин, поскольку поверхность соприкосновения потоков жидкости меньше по сравнению с общей поверхностью фронта фильтрации. Увеличение давления и уменьшение темпа нагнетания через короткие скважины при каскадной обработке составляет в среднем 10% по сравнению с одиночной скважиной; в практических расчетах этим можно пренебречь.

Если длина фильтрующей части скважины не превышает эффективного радиуса, темп нагнетания приближенно может быть определен по формуле радиальной фильтрации:

$$q = 2\pi m \frac{k}{\mu} \frac{P_H - P_\Gamma}{\ln \frac{R}{r}}, \quad (2.39)$$

где

R - радиус распространения жидкости от скважины в момент t ;

r - радиус эквивалентной скважины, вскрывающей пласт на всю мощность.

Поскольку диаметр скважин обычно изменяется в диапазоне 43... 60 мм, а эффективный радиус составляет в среднем 5 м, среднее значение темпа нагнетания через одиночную скважину и каскад с достаточной для практики точностью можно представить следующей формулой ($r = l_\phi / 2$):

$$q = 4 \cdot 10^{11} m \frac{k}{\mu} (P_H - P_\Gamma), \text{ л/мин} \quad (2.40)$$

Тогда время нагнетания

$$T_H = 16,7 \frac{Q}{q}, \text{ час} \quad (2.41)$$

Если длина фильтрующей части скважины значительно превышает эффективный радиус, темп и время нагнетания через каскад скважин определяются по формулам (2.38) - (2.40).

На основании теоретических исследований сформированы математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, которые составляют математическое обеспечение системы автоматического управления гидравлической обработкой анизотропных массивов, определены параметры технологии и системы управления:

а) контролируемые параметры – давление и темп нагнетания, объем поданной рабочей жидкости, время обработки, показатель качества и эффективности процесса;

б) управляющий параметр – темп нагнетания.

Таким образом, проведено решение задачи математического моделирования и обоснованы методы совершенствования технологии гидравлического воздействия.

2.2.4 Совершенствование структуры и алгоритмов подсистемы гидравлической обработкой

Локальный способ

При нагнетании в забое подготовительной выработки длина, глубина герметизации и расстояние между скважинами показаны на рисунке 2.4 б и рисунке 2.4 в. Эффективный радиус выбирается из условия обработки 4-метровой зоны за контуром выработки.

Региональный способ

Скважины бурятся диаметром 75-100 мм в зависимости от используемого оборудования.

Длина скважин, расположенных по схеме рисунка 2.5 а:

$$l_c = L_{л} - 20, \text{ м}$$

по схеме рисунка 2.5 б:

$$l_c = \frac{L_{л}}{2} - 20, \text{ м}$$

где $L_{л}$ - длина лавы, м.

Расстояние от очистного забоя до первой скважины в момент начала нагнетания должно удовлетворять условию:

$$L_3 > L_{м.с.} + \frac{T_H}{T_C} V_{л}, \text{ м}$$

где

$V_{л}$ - скорость подвигания лавы, м/сут;

T_C - время работы насоса в течение суток, ч.

Количество жидкости на одну скважину:

$$Q = n_{э} m L_{м.с.} (l_c + l_{г}), \text{ м}^3.$$

Расчет темпа и времени нагнетания производится в предположении радиально-одномерного характера движения жидкости от скважины. Зависимость темпа нагнетания от времени с учетом коэффициента анизотропии приобретает вид:

$$q = 10^{-3} \sqrt{0,27 \cdot 10^{-3} \frac{c_1^2}{t^2} + \frac{c_2}{t}} - 1,65 \frac{c_1}{t}, \text{ л/мин},$$

где

$$c_1 = 10^6 l_{\phi} \frac{m^2 n_{э}}{2\pi} \sqrt{A} \ln \left(\frac{10^3 m}{d_c} \sqrt{\frac{A}{3}} \right);$$

$$c_2 = 2 \cdot 10^5 l_{\phi}^2 m^2 n_{э} \frac{k_x}{\mu} (P_H - P_{Г});$$

t - текущее время, ч.

Время нагнетания:

$$T_H = \frac{53 Q m \mu}{l_{\phi} k_x (P_H - P_{Г})} (0,13 Q + 1) \left(\frac{6,6}{m^2} + 1 \right) \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{n_{э}} + 1 \right) (1,7 \sqrt{A + 1}), \text{ ч.}$$

Учет радиально-одномерного характера движения жидкости имеет смысл производить, когда $m > 1$, $A > 10$. В противном случае темп и время нагнетания с достаточной точностью могут быть определены по формулам:

$$q = 0,32 l_{\phi} m \sqrt{2 n_{\varepsilon} \frac{k}{\mu} (P_H - P_r)} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}, \text{ л/мин}$$

$$T_H = 2,8 \cdot 10^3 \frac{Q^2 \mu}{8 l_{\phi}^2 m^2 n_{\varepsilon} k (P_H - P_r)}$$

Вскрытие угольных пластов квершлагами

При вскрытии крутопадающих пластов в соответствии с [5] следует бурить 5-6 скважин по контуру выработки, пересекающих пласт на всю мощность (Рисунок 2.6 а). Диаметр скважин 45-60 мм. Длина скважин определяется расстоянием до пласта и его мощностью. Глубина герметизации должна быть не менее толщины породной пробки.

Расход жидкости на одну скважину

$$Q = \pi R_{\varepsilon \phi}^2 m n_{\varepsilon}, \text{ м}^3.$$

Среднее значение темпа нагнетания:

$$q = 1,2 \cdot 10^{-3} \pi d_c m \frac{k}{\mu} \frac{P_H - P_r}{\ln \frac{10^3 R_{\varepsilon \phi}}{d_c}}, \text{ л/мин.}$$

Расчет параметров при каскадной гидрообработке

При непрерывной каскадной обработке глубина герметизации скважины должна быть увеличена в 1,2-1,3 раза только в том случае, если не удастся обеспечить пренебрежимо малый темп подачи жидкости во вспомогательные скважины.

При региональном воздействии время нагнетания жидкости в каждую нагнетательную скважину (группу скважин):

для тонких пластов при $A \leq 10$

$$T_H = 3,6 \cdot 10^3 \frac{Q^2 \mu}{8 l_{\phi}^2 m^2 n_{\varepsilon} k (P_H - P_r)}, \text{ ч}$$

в остальных случаях

$$T_H = \frac{70Qm\mu}{l_\phi k_x (P_H - P_r)} (0,13Q + 1) \left(\frac{6,6}{m^2} + 1 \right) \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{n_\varepsilon} + 1 \right) (1,7\sqrt{A+1}), \text{ ч.}$$

Среднее значение темпа подачи жидкости в нагнетательные скважины:

$$q = 16,7 \frac{Q}{T_H}, \text{ л/мин.}$$

Разработка структуры системы автоматизированного управления процессом гидравлического воздействия

Введем обозначения структурных элементов системы:

SDH – обработка пласта через одиночную скважину, параллельную линии забоя;

LWT – обработка пласта по локальному способу;

RWT – обработка пласта через длинные опережающие скважины (региональный способ);

DSK – вскрытие пластов квершлагами;

СНТ – гидравлическое воздействие через каскад скважин, параллельных линии забоя.

При построении системы управления процессом важной составляющей является блок математического обеспечения, предназначенный для имитации состояния и оперативного определения текущих результатов обработки [32, с. 36, 49, с.40, 77, с.133, 78, с.483, 80, с.105, 81, с. 61, 90, 91, 92, 93, 94].

Моделирование гидравлического воздействия с использованием численных методов представляет собой расчет изменения во времени поля давлений нагнетаемой жидкости в заданной области и определение на его основе распределения жидкости в массиве. Процесс напорного движения жидкости в трещиноватой среде, какой является угольный пласт, описывается дифференциальным уравнением фильтрации, конкретная область воздействия и технологическая схема задаются в виде исходных данных, начальных и граничных условий.

Алгоритмы и программы, осуществляющие реализацию представленной ниже модели, являются открытыми, т.е. могут быть дополнены практически любыми условиями и исходными данными.

Процесс фильтрации жидкости в угольном пласте описывается нелинейным дифференциальным уравнением параболического типа:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda(P) \text{grad}P), \quad (2.42)$$

где

$$\lambda(P) = \begin{cases} \frac{k}{\mu m_\varepsilon} P & - \text{ на контуре потока жидкости;} \\ \chi = \frac{k}{\mu} E_y & - \text{ в заполненной области;} \end{cases}$$

χ - коэффициент пьезопроводности;

E_y - модуль упругости вещества угля.

В качестве начального условия принимается равенство нулю давления жидкости в каждой точке:

$$P(x, y, z, 0) = 0. \quad (2.43)$$

В зависимости от вида рассматриваемой области, схемы расположения скважин и режима их работы могут использоваться следующие типы граничных условий.

На нагнетательной скважине:

а) задано давление нагнетания

$$P(\Gamma_c, t) = P_H(t), \quad (2.44)$$

где

Γ_c - координаты скважины;

в частном случае $P_H(t) = \text{const}$.

б) задан темп нагнетания

$$q(t) = \frac{k}{\mu} S_c \frac{\partial P(\Gamma_c, t)}{\partial n}, \quad (2.45)$$

где

S_c - площадь поверхности фильтрующей части скважины, в частном случае $q(t) = const$;

в) задано соотношение между давлением и темпом нагнетания (нагрузочная характеристика насосов с пневмодвигателем):

$$P(\Gamma_c, t) = f(q(t)), \quad (2.46)$$

где $f(x)$ функция, определяющая конкретную характеристику.

На отточной скважине или оконтурирующих выработках:

$$P(\Gamma_1, t) = 0, \quad (2.47)$$

где Γ_1 - координаты отточной скважины или выработки.

На контакте с непроницаемыми боковыми породами:

$$\frac{\partial P(\Gamma_2, t)}{\partial n} = 0, \quad (2.48)$$

где Γ_2 - координаты поверхности контакта.

Если линия скважины является границей расчетной области, то на всем ее протяжении, за исключением фильтрующей части, также ставится условие (2.48).

На остальных границах задается условие постоянства потока:

$$\frac{\partial P(\Gamma, t)}{\partial n} = const.. \quad (2.49)$$

Для решения краевой задачи (2.42), (2.49) принят конечно-разностный метод, основы которого для нелинейных параболических уравнений с разрывными коэффициентами разработаны А.А. Самарским [87].

Блок-схемы алгоритмов

Общий алгоритм решения является универсальным, он обеспечивает возможность моделировать все приведенные выше схемы как для одиночной скважины, так и для каскада [4, с.405, 32, с.36, 66, с.93, 77, с.133, 78, с.482, 80, с.105, 81, с.61, 89, с.100, 90, с.104, 91, с.29, 92, с.9].

Основная программа составлена для двумерной постановки задачи, причем рассматриваемая область может лежать как в плоскости пласта (Рисунок 2.18 а), так и в перпендикулярной ей плоскости (Рисунок 2.18 б).

Различные варианты схем, режимов и положения области решения задаются набором исходных данных и заменой некоторых операторов программы. Для каскадного способа рассмотрим случай двух скважин, при наличии трех и более скважин внести соответствующие изменения не представляет труда.

Укрупненная блок-схема представлена на рисунке 2.19. Далее приводится расшифровка ее блоков.

Блок 1. Ввод числовых значений всех исходных данных, кроме распределения проницаемости. Для контроля предусмотрена печать вводимых величин. Место исходных данных в общем пакете и порядок оформления пакета показаны ниже.

Блок 2. Вычисляются значения шагов по пространству, переменных, определяющих местоположение скважин, задаются начальные условия, исходные значения времени, индикаторов, площадей, занятых жидкостью.

Блок 3. Состоит из двух частей: во-первых, определение исходного поля проницаемости и, во-вторых, наложение на это распределение зонального изменения проницаемости, вызванного нарушением, наличием пачек, изменением напряженного состояния пласта и другими факторами. Исходная проницаемость может быть вычислена как случайная величина, постоянная на некоторой определенной площади и изменяющаяся в заданном интервале. Вычисление значений случайной величины осуществляется с помощью подпрограммы-генератора псевдослучайных чисел, распределенных по какому-либо закону.

Блок 4. Начинается с задания давления на скважинах и коэффициентов прогонки на скважинах и на левой границе. Затем r -е строки матриц kx , F и P переписываются в соответствующие одномерные массивы и одновременно устанавливается индикатор наличия свободной поверхности потока между скважинами.

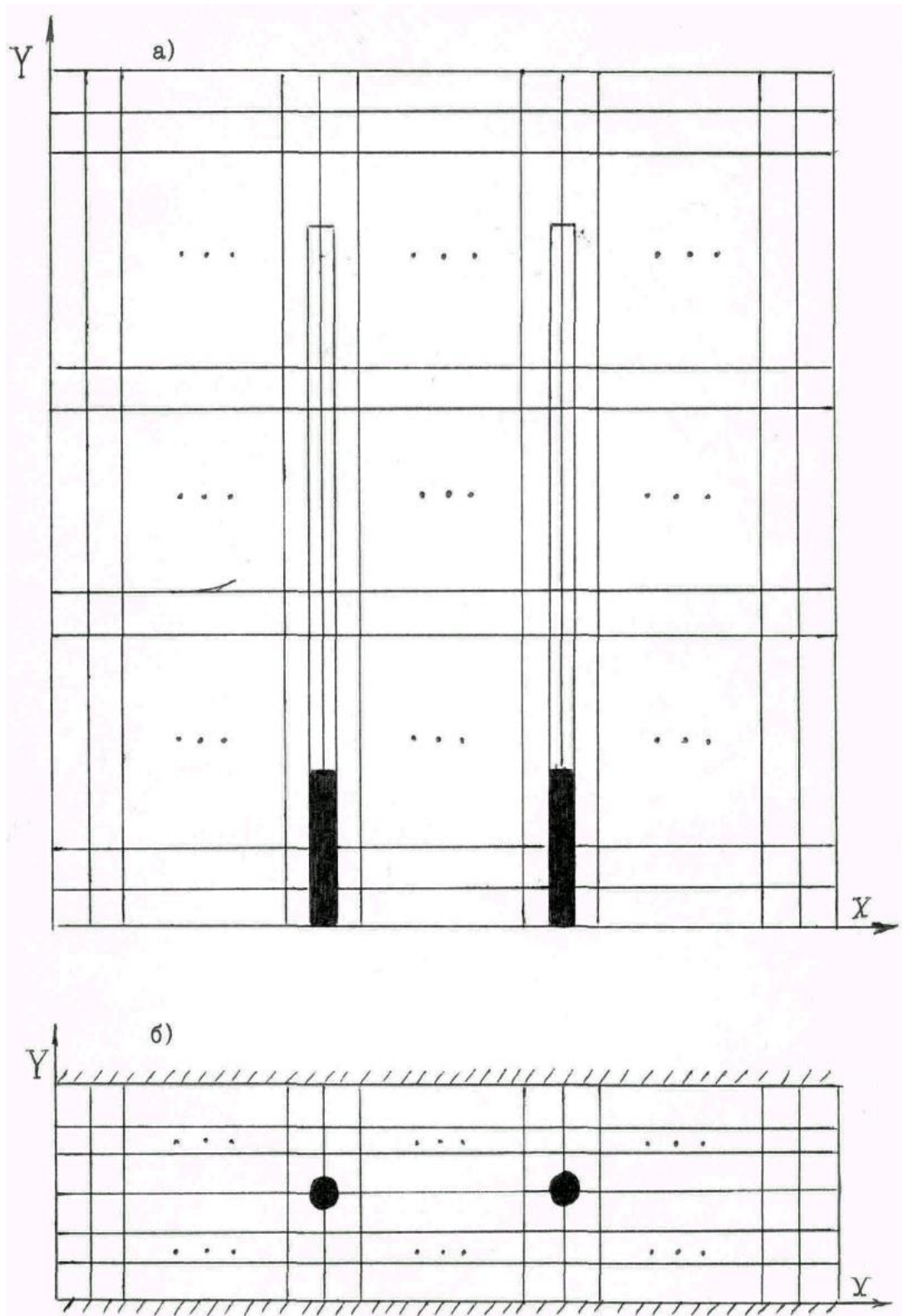


Рисунок 2.18 - Расположение сеточной области:

а - параллельно напластованию;

б - перпендикулярно напластованию

Вычисление давления осуществляется обращением к подпрограмме решения одномерной краевой задачи (Рисунок 2.20).

Блок 5. Аналогичен блоку 4.

Блок 6. Вычисление темпа нагнетания в каждую скважину на $(j+1)$ -м шаге производится непосредственным подсчетом площади, занятой жидкостью за время τ . Вычисляются площади $SN1, SN2$, занятые жидкостью к моменту $(j+1)\tau$, искомая площадь определяется как разности $SN1-S$ и $SN2-S2$.

Темп нагнетания определяется по формуле:

$$q = \frac{10^3 (SN - S) m n_{\text{э}}}{60\tau}.$$

Давление нагнетания, соответствующее полученному темпу, вычисляется по нагрузочной характеристике выбранного насоса.

В приведенной ниже программе в качестве нагрузочной характеристики принята упрощенная зависимость:

$$P_H = 300 - 10q, \text{ кгс/см}^2$$

при условии $q \leq 30$ л/мин.

Блок 7. Окончание счета определяется обычно при выполнении одного из следующих условий:

- закончилось время нагнетания;
- закачанный объем жидкости равен проектному;
- поток жидкости достиг некоторых, заранее обусловленных границ.

Анализ результатов моделирования

Результатом работы программы является набор матриц давления жидкости в рассматриваемой области и значения давления и темпа нагнетания, относящиеся к определенному моменту времени.

По значениям давления можно приблизительно определить распределение удельного насыщения массива жидкостью.

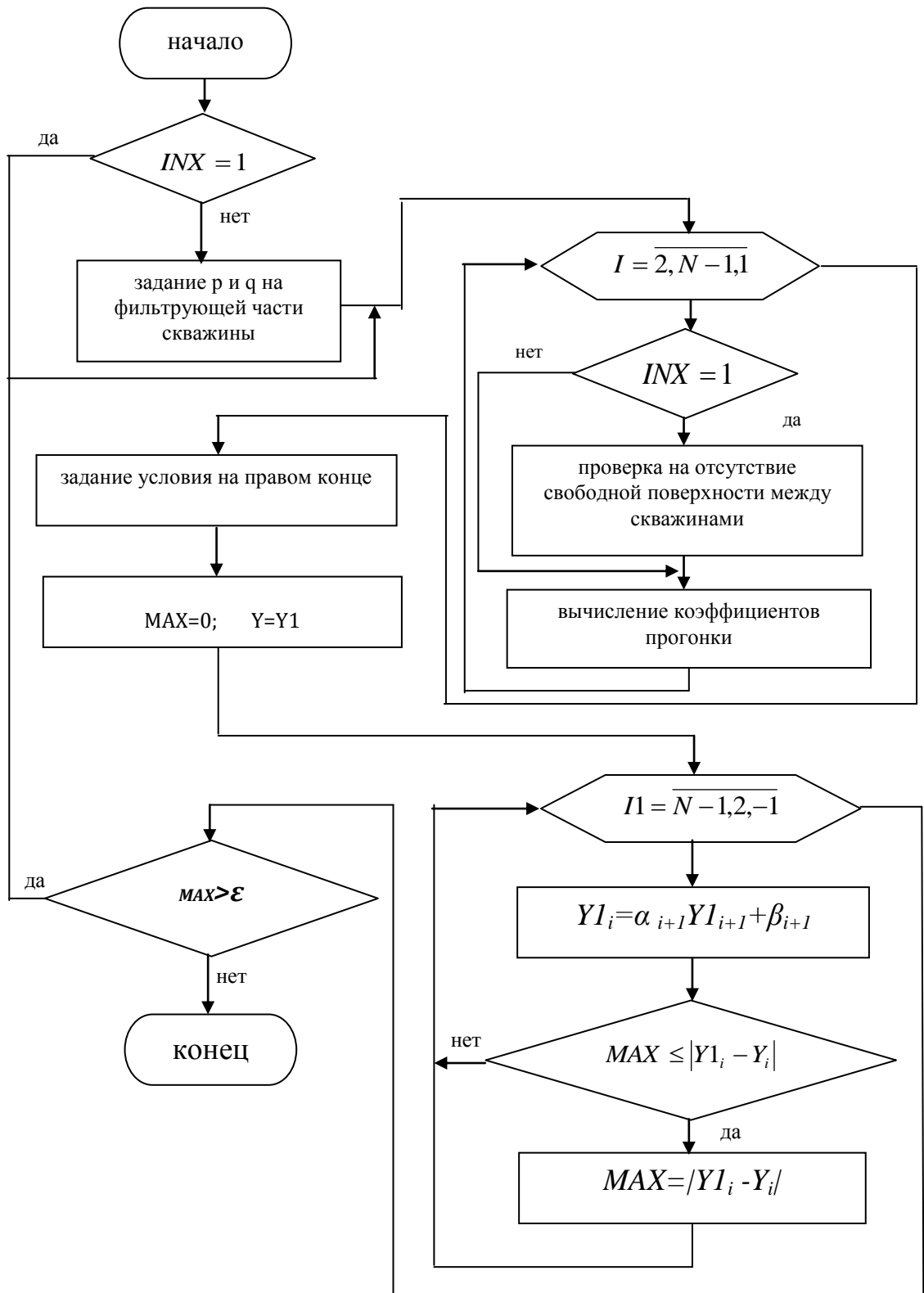


Рисунок 2.20 - Блок-схема подпрограммы решения одномерной краевой задачи

В качестве критериев равномерности обработки угольного массива можно принять отношение площади необработанных участков к площади проектной зоны воздействия:

$$v = \frac{S_H}{S_{np}} \cdot 100\%$$

и коэффициент вариации удельного насыщения в проектной зоне:

$$V_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\Delta W_i - \Delta \bar{W})^2}}{\Delta \bar{W}},$$

где

$\Delta \bar{W}$ - среднее арифметическое N значений ΔW_i .

При исследовании каскадной обработки критерием оценки эффективности может служить также относительное уменьшение площади необработанных участков:

$$\mathcal{O}_s = \frac{S_{H.O.} - S_{H.K.}}{S_{H.O.}},$$

где

$S_{H.O.}, S_{H.K.}$ - площади необработанных участков при нагнетании соответственно через одиночную скважину и каскад.

Исследование изменения давления и темпа в процессе нагнетания дает возможность точнее установить параметры воздействия.

Структура системы управления процессом

Как указывалось выше, цель автоматизации управления – стабилизация параметров технологии.

В состав системы включаются технологические схемы всех способов воздействия, координацию работы осуществляет управляющий программный модуль (СРМ).

Обобщенная структура системы приведена на рисунке 2.21.

Базовый монитор (ВМ) выбирает заданную технологическую схему и задает направление дальнейшего функционирования.

Алгоритмы функционирования для каждого способа описаны выше.

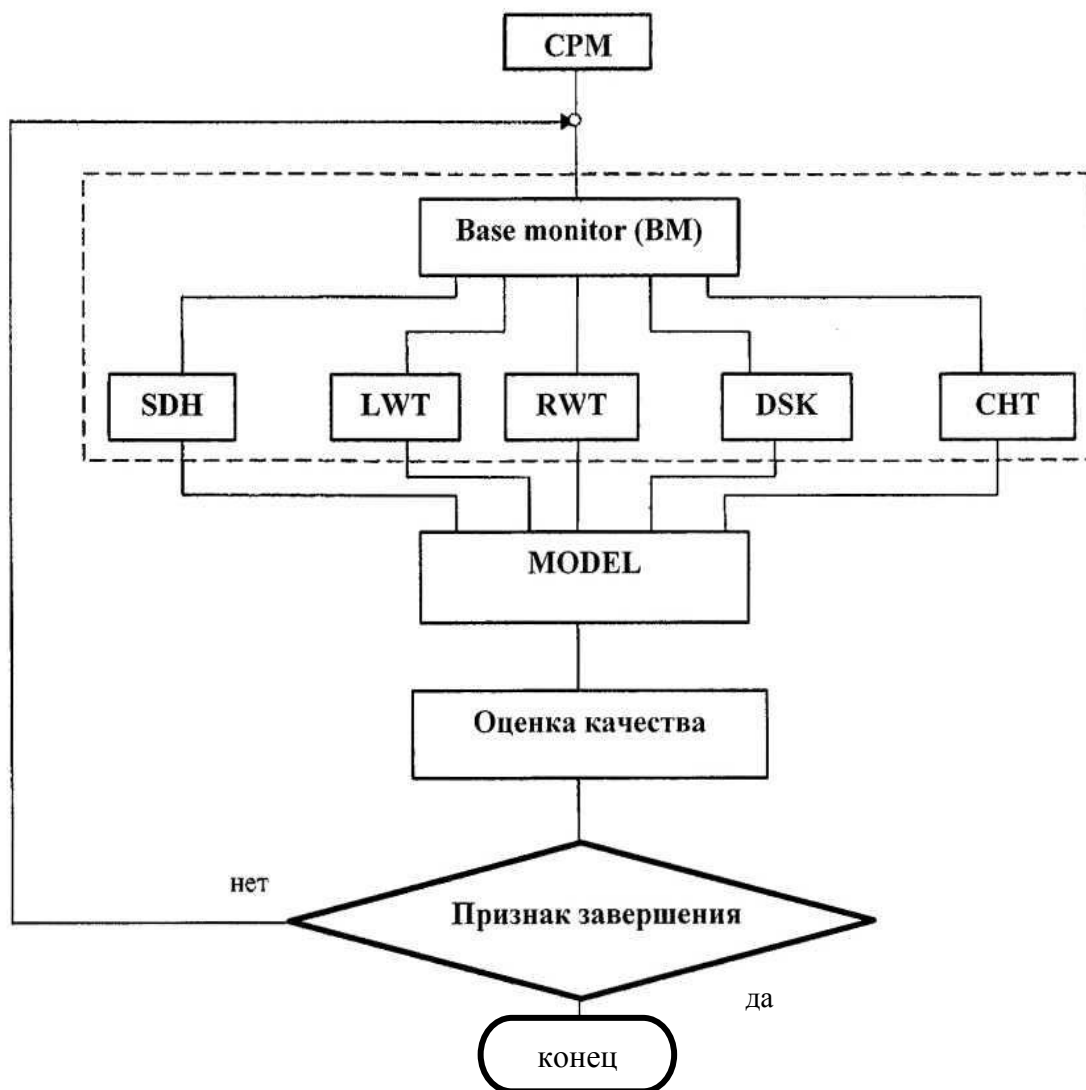


Рисунок 2.21 - Структурно-функциональная схема системы

2.2.5 Математическое моделирование процесса пневматического воздействия на неувлажнённый пласт

Механизм снижения природной газоносности пласта при нагнетании воздуха заключается в вытеснении свободного метана воздушным потоком в отточную скважину, приводящем к смещению сорбционного равновесия в

системе «свободный - сорбированный газ» и десорбции метана с последующим его выносом. Одновременно при пневмообработке возможно снижение эндогенной пожароопасности за счет низкотемпературного окисления угля в массиве, приводящего к снижению его химической активности и, следовательно, склонности к самовозгоранию [26, с.58].

Теоретические и экспериментальные исследования пневмообработки неувлажненного угольного пласта показали возможность интенсификации выноса метана по сравнению с дегазацией скважинами, позволили раскрыть механизм ряда физико-химических процессов, приводящих к снижению газоносности пласта и химической активности угля при нагнетании воздуха.

Однако отсутствие количественных характеристик протекающих при нагнетании процессов и малый объем экспериментальных данных не позволили до настоящего времени разработать эффективный режим и определить рациональные параметры пневматического воздействия [95, 96, 97].

В связи с этим, совершенствование пневмообработки как способа борьбы с газом в угольных шахтах предполагает, в первую очередь, детальное исследование процессов в системе «уголь - метан - воздух». При нагнетании воздуха в угольный пласт имеет место ряд сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов. Характерные отличия фильтрации воздуха в угле от фильтрации воды обусловлены следующими особенностями воздуха и угольного пласта: сжимаемость воздуха, высокая сорбционная активность угля по отношению к кислороду воздуха, способность угля к окислению и самонагреванию при соприкосновении с кислородом.

Эти отличия, а также общие закономерности фильтрации газов в трещиновато-пористых средах определяют основные физико-химические процессы, происходящие при нагнетании воздуха в угольный пласт:

- фильтрация метано-воздушной смеси;
- десорбция метана и его диффузия из пористых блоков в фильтрационный объем;
- диффузия и сорбция кислорода из потока воздуха;

- окисление и в определенных условиях нагревание угля.

Для разработки математической модели необходимо определить конкретную технологическую схему пневмообработки, что позволит осуществить постановку краевых условий и принять необходимые допущения.

Согласно рекомендациям, которые основаны на результатах проведенных исследований, пневмообработка угольного пласта производится через серию скважин, пробуренных из подземных выработок, причем четные скважины являются нагнетательными, а нечетные – отточными, предназначенными для выноса из пласта метано-воздушной смеси.

Следует отметить, что такая схема пригодна только для пластов с небольшой мощностью, поскольку в противном случае не будет обеспечен эффективный отвод метано-воздушной смеси в отточную скважину. В дальнейшем будем считать, что пневмообработка осуществляется через длинные скважины, пробуренные из подготовительных выработок параллельно линии очистного забоя, причём расстояние между скважинами значительно превышает мощность пласта, что позволяет принять допущение об одномерности фильтрационного потока от нагнетательной скважины к отточной скважине (Рисунок 2.22).

Формирование математической модели процесса

Считая, что движение газовой смеси подчиняется закону Дарси, и, используя уравнения неразрывности для компонентов потока, запишем уравнения фильтрации газов относительно их концентрации [26, с.58]

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C}{\partial t} = \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C \operatorname{grad}(CR) \right] - W_M - W_O, \quad (2.50)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C_M}{\partial t} = \operatorname{div} \left[\frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C_M \operatorname{grad}(CR) \right] - W_M, \quad (2.51)$$

$$n_{\text{э}} \frac{\partial C_o}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{kT}{\mu n_{\text{э}}} C_o \text{grad}(CR) \right] - W_o, \quad (2.52)$$

где

C – концентрация газа в фильтрационном объеме, г/см³;

T – абсолютная температура смеси газов, К°;

μ – вязкость смеси, Н·с/м²;

R – газовая постоянная, Дж/кг·град;

W – скорость притока газа из пористых блоков в фильтрационный объем, г/см²·с;

«М», «О» – индексы, относящиеся соответственно к метану и кислороду; переменная без индексов относится к метано-воздушной смеси.

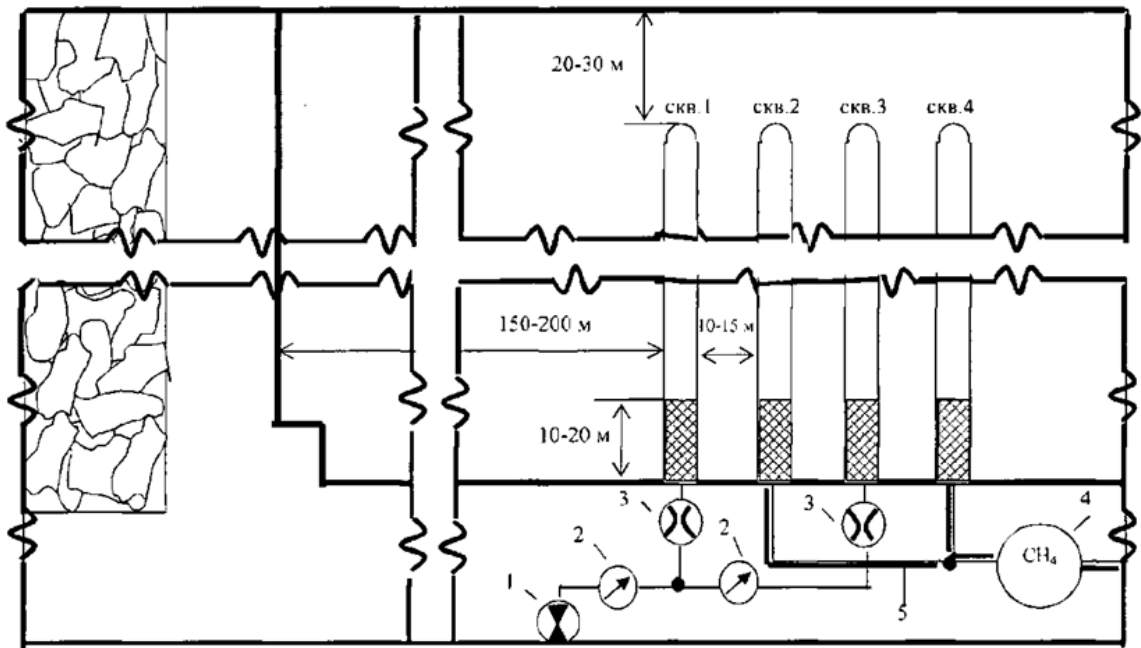


Рисунок 2.22 - Основной вариант технологической схемы пневмообработки пласта:

- 1 – компрессор;
- 2 – манометр;
- 3 – счетчик расхода воздуха;
- 4 – измеритель концентрации метана (газоанализатор);
- 5 – шахтный газопровод.

С учётом допущений математическая формулировка задачи напорной фильтрации воздуха в угольном пласте при пневмообработке представляет собой следующую нелинейную систему дифференциальных и алгебраических уравнений и краевых условий:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{kT}{n_3^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C}{\mu} \frac{\partial(CR)}{\partial x} \right] - \frac{\partial a_M}{\partial t} - \frac{\partial a_0}{\partial t}; \\
\frac{\partial C_M}{\partial t} &= \frac{kT}{n_3^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C_M}{\mu} \frac{\partial(CR)}{\partial x} \right] - \frac{\partial a_M}{\partial t}; \\
\frac{\partial C_o}{\partial t} &= \frac{kT}{n_3^2} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{C_o}{\mu} \frac{\partial(CR)}{\partial x} \right] - \frac{\partial a_o}{\partial t}; \\
\mu &= \frac{\delta_M \mu_M \sqrt{M_M T_{KP.M}} + \delta_g \mu_g \sqrt{M_g T_{KP.B}}}{\delta_M \sqrt{M_M T_{KP.M}} + \delta_g \sqrt{M_g T_{KP.B}}}; \\
R &= \frac{R_{VH.}}{\delta_M M_M + \delta_g M_g}; \\
\delta_M &= \frac{C_M \rho_{B.H.V.}}{C_M \rho_{B.H.V.} + (C - C_M) \rho_{B.H.V.}}; \quad \delta_g = 1 - \delta_M; \\
\frac{\partial a_M}{\partial t} &= \alpha_M (C_M - C_{M.P}); \quad \alpha_M = 0,9 \cdot 10^2 \frac{n_3}{CRT} \alpha_M^0; \\
C_{M.P} &= \frac{a_M n_3}{B_M R_M T (a_{M_0} - a_M)}; \\
\frac{\partial a_0}{\partial t} &= \rho_{o.n.y} \rho_y \alpha_o \frac{C_o}{C} [1 + \eta(T - T_o)]; \\
\alpha_o &= \alpha_{o_{HCX}} e^{-120a_o}; \\
\rho_y \beta_y \frac{\partial T}{\partial t} &= -\beta \frac{C}{n_3} V \frac{\partial T}{\partial x} + \psi \frac{\partial a_0}{\partial t} + \frac{2\lambda_{CP}(\Theta - T)}{\left(H_{II} + \frac{m}{2}\right)^2}; \\
\lambda_{CP} &= \frac{2\lambda_y \lambda_{II} \left(\frac{m}{2} + H_{II}\right)}{m\lambda_{II} + 2H_{II}\lambda_y}; \quad \Theta = T_o + 3[1 - e^{-0,15\Delta T}];
\end{aligned} \tag{2.53}$$

$$V = -\frac{KTR}{\mu n_3^2} \cdot \frac{\partial C}{\partial x}.$$

Ввиду сложности полученной системы решить её аналитически не представляется возможным. Поэтому в качестве метода решения выбран универсальный конечно-разностный метод [87, 88]. Поскольку первые три уравнения системы (2.53) являются нелинейными, решение соответствующих разностных уравнений на каждом временном шаге может быть получено с использованием итераций [11, 27, 28, 98].

Решение поставленной краевой задачи позволит получить комплекс характеристик физико-химических процессов, происходящих при нагнетании воздуха в неувлажнённый угольный пласт: распределение в пространстве и времени концентрации метано-воздушной смеси, метана и кислорода в фильтрационном объёме, концентрации сорбированных метана и кислорода, газоносность пласта и химическую активность угля в обработанной зоне, изменение температуры угольного пласта от нагнетательной скважины к отточной и во времени.

Критерием эффективности пневмообработки является, во-первых, степень снижения газоносности пласта по сравнению с дегазацией скважинами за одинаковое время при расчёте дегазации на аналогичной математической модели, во-вторых, время, требуемое для снижения показателя химической активности угля до величины, соответствующей категории пластов, малоопасных по самовозгоранию ($\alpha_0 < 0,015$ мл/г·час).

Таким образом, сформирована математическая модель фильтрации метано-воздушной смеси при пневмообработке неувлажнённого угольного пласта, представляющая собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений и краевых условий. Решение системы осуществляется численно, с использованием метода конечных разностей. Поставлены задачи моделирования, решение которых позволит установить требуемые характеристики процессов, происходящих при пневмообработке и разработать технологию и способ расчёта

параметров воздействия.

Детальный анализ пневмообработки неувлажнённого угольного пласта позволяет сформулировать рекомендации по технологии, расчёту параметров и области применения способа.

Наиболее эффективным и экономичным является циклический режим пневмообработки угольного пласта через длинные скважины, параллельные линии очистного забоя. Чётные скважины являются нагнетательными, нечётные – отточными. Промежуток времени между циклами нагнетания соответствует восстановлению концентрации метана в отточной скважине до максимального значения.

Общее время пневмообработки по фактору снижения газоносности определяются моментом, когда нагнетание воздуха перестаёт существенно влиять на вынос метана (когда продолжительность циклов нагнетания по вышеприведенному условию становится практически равной нулю).

Пневмообработку рекомендуется применять как способ снижения газовыделения и опасности самовозгорания на тонких пластах с коэффициентом проницаемости не ниже $0,01 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, разрабатываемых по столбовой системе, при условии, что ожидаемые значения снижения газоносности и времени воздействия по фактору уменьшения химической активности угля являются приемлемыми. Возможно применение пневмообработки на пластах средней мощности при условии, что будет обеспечен достаточно полный вынос метано-воздушной смеси в отточные скважины.

2.2.6 Структура и алгоритмы управления процессом комплексного гидропневматического воздействия

Введем обозначения:

САУПГПО – система автоматизированного управления процессами гидропневмообработки угольного пласта;

ПСУППО – подсистема управления процессом пневмообработки;

ПСУПГО – подсистема управления процессом гидрообработки.

В предыдущем подразделе описаны принципы реализации процесса пневмообработки неувлажненного угольного пласта, рассмотрена математическая модель и установлены контролируемые и управляющие параметры.

На основании результатов исследований предлагается структура подсистемы управления процессом пневмообработки, которая приведена на рисунке 2.23. Содержание структурных блоков соответствует методике расчета параметров и алгоритму, описывающему порядок реализации циклического способа пневмообработки.

Следует отметить, что предварительная гидравлическая обработка угольных пластов является обязательным мероприятием, регламентированным нормативными документами [8] в комплексе средств борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче.

С другой стороны, пневматическая обработка является новым средством воздействия, пока не вошедшим в комплекс обязательных мероприятий. И хотя эффективность способа доказана, разработаны методики расчета параметров технологических схем, определено оборудование, установлен порядок применения, тем не менее, пневмообработка предусматривается не во всех случаях.

В работах ряда авторов и организаций рассмотрены три вида воздействия на угольные пласты: гидравлическое воздействие, пневмообработка и дегазация призабойной зоны пласта. Из них к настоящему времени наиболее широко внедрено гидравлическое воздействие, которое применяется как средство борьбы с основными опасностями при подземной угледобыче.

Трудами многих исследователей созданы основы теории и технологии гидровоздействия. В рамках данной работы удалось внести определенный вклад в дальнейшее развитие теоретических основ процесса, что позволило обосновать структуру и параметры системы управления процессом, обеспечивающую стабильность параметров и повышение качества обработки пласта. Тем не менее,

в этой области еще остаются проблемы как в теоретическом аспекте, так и в области технологии.

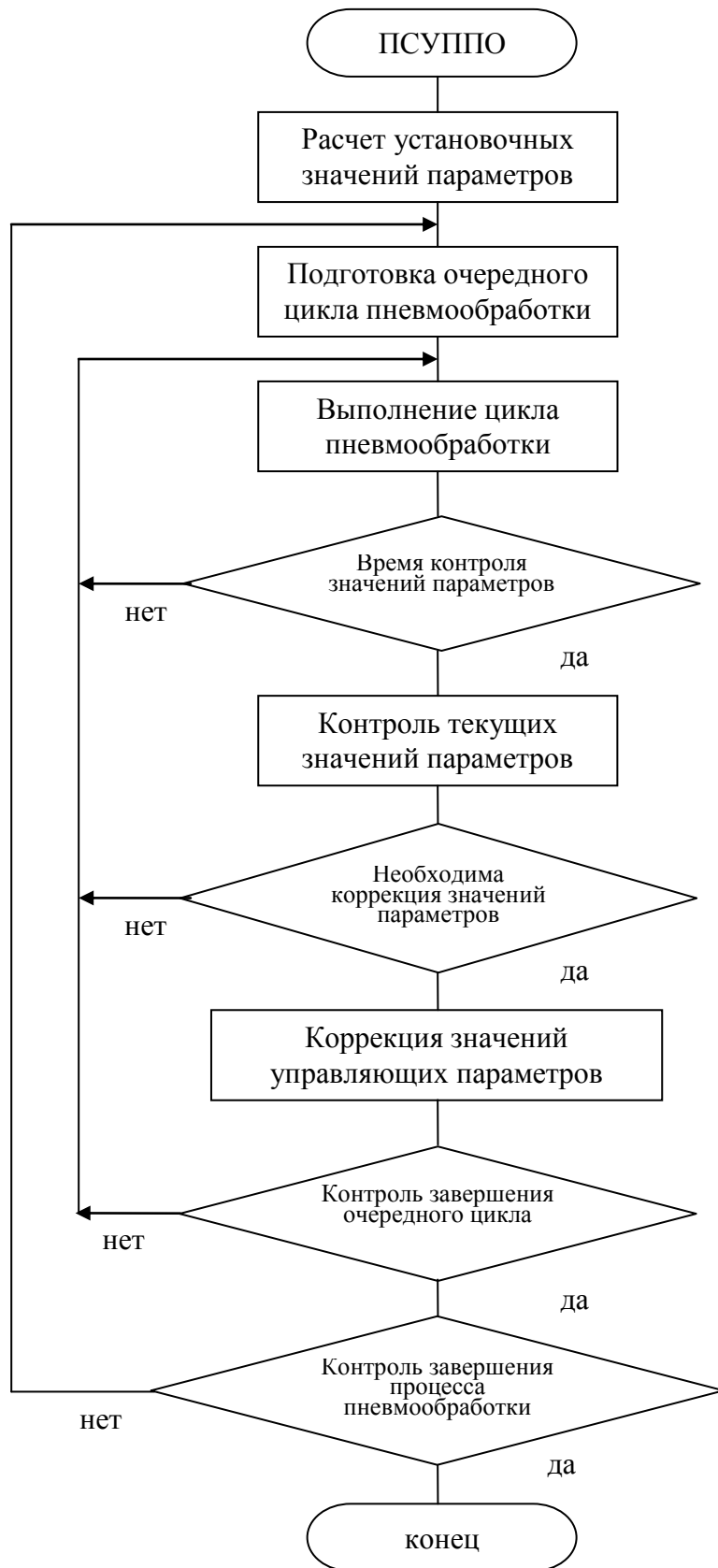


Рисунок 2.23 - Обобщенная структура подсистемы управления процессом пневматической обработки

Что касается двух других видов воздействия, то их развитие пока находится в начальной стадии. Однако уже на данном этапе благодаря полученным в работах ряда исследователей результатам есть основания ставить задачу развития теоретических основ и технологии комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты, включающего две последовательные стадии.

1. Пневматическая обработка неувлажненного пласта.

На этой стадии обеспечивается вынос свободного и десорбирующегося метана. Кроме того, этот способ имеет перспективу в аспекте изменения физико-химического состояния пласта и, возможно, позволит снизить способность пласта к самовозгоранию.

2. Гидравлическое воздействие.

Этот вид воздействия за счет применения разработанных технологий позволяет произвести насыщение угольного пласта жидкостью, что обеспечивает снижение пылеобразования, способствует уменьшению газовыделения и тем самым оказывает положительное влияние на условия труда при подземной угледобыче.

Рассмотрим основные звенья технологической цепочки при реализации комплексного воздействия.

1. *Пневматическая обработка*

Рекомендуется применять на тонких и средней мощности пластах, разрабатываемых по столбовой системе. Основным вариантом технологической схемы приведен на рисунке 2.22, где указывается рекомендуемое оборудование и геометрические параметры.

Диаметр скважины обычно принимается 76мм. Давление нагнетания P_H должно превышать давление газа в пласте, но при этом выбирается минимально возможным (обычно до 20 кгс/см²).

Наиболее эффективным и экономичным является циклический режим пневмообработки угольного пласта, через длинные скважины, параллельные линии очистного забоя. Четные скважины являются нагнетательными, нечетные – отточными.

Продолжительность циклов нагнетания определяется снижением концентрации метана в отточной скважине до 50–60%, общая продолжительность воздействия определяется интенсивностью выноса метана при нагнетании воздуха и в типичных условиях составляет 150 суток. Съём газа при пневмообработке за этот период на 35–40% выше, чем при дегазации. По такой технологии проводится пневмообработка неувлажнённого пласта.

Наряду с этой пневмообработкой угольного пласта позволяет снизить его химическую активность практически до безопасных пределов. Для пластов, имеющих показатель химической активности угля 0,06 мл/г·час (максимальное значение для каменных углей), время пневмообработки, требуемое для снижения этого показателя до 0,015 мл/г·час (значение, соответствующее категории пластов, малоопасных по возгоранию) составляет 130 суток. При этом в большинстве случаев пневмообработка не приводит к существенному нагреву угольного пласта: в любых условиях повышение температуры не является опасным с точки зрения самовозгорания. Промежуток времени между циклами нагнетания соответствует восстановлению концентрации метана в отточной скважине до максимального значения.

2. Гидравлическая обработка

Рекомендуется как второй этап комплексного воздействия, следующий за пневмообработкой неувлажнённого пласта. Начало воздействия непосредственно следует за окончанием пневмовоздействия, при этом важным является тот факт, что скважины, через которые производилась пневмообработка, могут быть использованы как элементы технологии гидравлического воздействия. Методика, технология и параметры этого этапа подробно описаны выше.

На рисунке 2.24 приведена обобщенная структура системы автоматизированного управления процессами гидропневмообработки угольных пластов, учитывающая рассмотренные особенности.

Очевидно, совершенствование технологии пневмообработки и ее широкое внедрение может составить предмет будущих научных исследований.

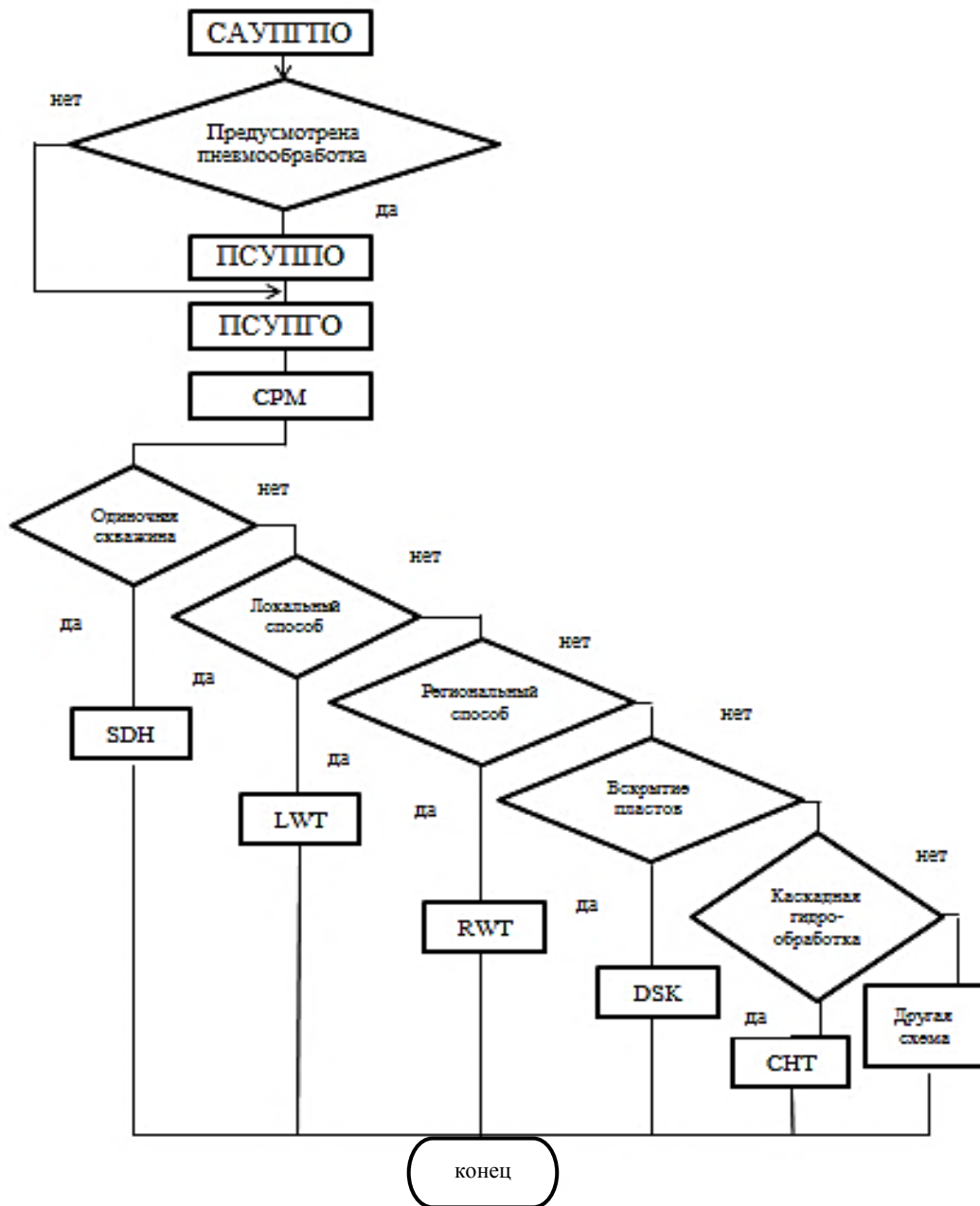


Рисунок 2.24 - Обобщенная структура системы автоматизированного управления процессами гидропневматической обработки угольного пласта

2.3 Выводы по разделу 2

1. Обосновано направление развития способов контроля параметров и управления технологическими процессами гидронеуматического воздействия на угольные пласты, связанное с внедрением специализированных программируемых устройств.

2. Сформированы теоретические основы разработки алгоритмов управления процессами, базирующиеся на математических моделях процессов как способе имитации состояния пласта и его реакции на внешнее воздействие.

3. Сформированы детерминированные математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт, в основу которых положены уравнения нелинейно-упругой фильтрации жидкости в сплошной среде.

4. Методом математического моделирования показано, что процесс увлажнения угольного пласта при гидравлическом воздействии через одиночную скважину обуславливает высокий уровень вариации прироста влажности в обрабатываемом массиве. Повышение равномерности увлажнения обеспечивается учетом коэффициента проницаемости пласта как переменной величины стохастического характера.

5. Установлены физическая сущность и механизм процесса гидравлического воздействия на угольный пласт с учетом стохастического характера проницаемости среды и режима взаимодействия встречных потоков жидкости при ее одновременном нагнетании через группу скважин.

6. Методом математического моделирования показано, что применение предложенной каскадной технологии гидровоздействия, основанной на одновременном нагнетании жидкости через группу скважин в режиме, обеспечивающем взаимодействие встречных потоков, позволяет уменьшить площадь необработанных зон на 50...80% и снизить коэффициент вариации прироста влажности в 1,2...2,2 раза по сравнению с воздействием через одиночные скважины.

7. В результате развития теоретических основ процесса гидравлического воздействия на угольный пласт обоснована каскадная технология гидрообработки

угольного массива, обеспечивающая повышение качества насыщения пласта жидкостью. Разработаны новые методики расчета параметров технологических схем увлажнения, отличающиеся тем, что они основаны на современных теоретических представлениях о процессе гидравлического воздействия.

8. Математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт составляют математическое обеспечение системы автоматического управления обработкой анизотропных массивов. Определены параметры технологии и системы управления:

а) контролируемые параметры – давление и темп нагнетания, объем поданной рабочей жидкости, время обработки, показатель качества и эффективности процесса;

б) управляющий параметр – темп нагнетания.

Разработана структура и алгоритмы функционирования подсистемы управления процессом гидравлического воздействия.

9. Рассмотрены технологические схемы и построены детерминированные математические модели процесса пневматического воздействия на неувлажнённый угольный пласт.

10. Обоснован способ комплексного гидропневматического воздействия на угольный пласт.

11. Предложена структура и алгоритмы подсистемы управления пневматической и комплексной гидропневматической обработкой.

РАЗДЕЛ 3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ
УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ПЛАСТ С ПОВЕРХНОСТИ

3.1 Цель и технология воздействия на угольный пласт с поверхности.

Особенности процесса

Сущность пневмогидродинамического воздействия (ПГДВ) состоит в принудительном внедрении газожидкостного агента под давлением через скважины с поверхности в углепородный массив с последующим сбросом давления. Технологическая схема воздействия в условиях шахты им. А.Ф. Засядько приведена на рисунке 3.1.

Угольный пласт и вмещающие породы представляют собой трещиновато-пористую среду со сложной структурой, имеющую разветвленную сеть микро- и макротрещин всевозможной величины и направленности. Движение жидкости по трещинам и порам представляет собой процесс фильтрации. Углепородный массив как объект гидродинамического воздействия характеризуется способностью пропускать сквозь себя жидкость и газ, а также аккумулировать определенное их количество. Эти возможности характеризуются такими показателями как проницаемость и пористость. При проектировании технологических схем нагнетания жидкости необходимо провести предварительный расчет основных параметров, в частности, давления нагнетания, расхода жидкости и других.

Целью воздействия является развитие трещиновато-пористой структуры пласта для активизации газовыделения с последующим отбором метана через поверхностные дегазационные скважины (ПДС).

Технологическая схема процесса приведена на рисунке 3.2.

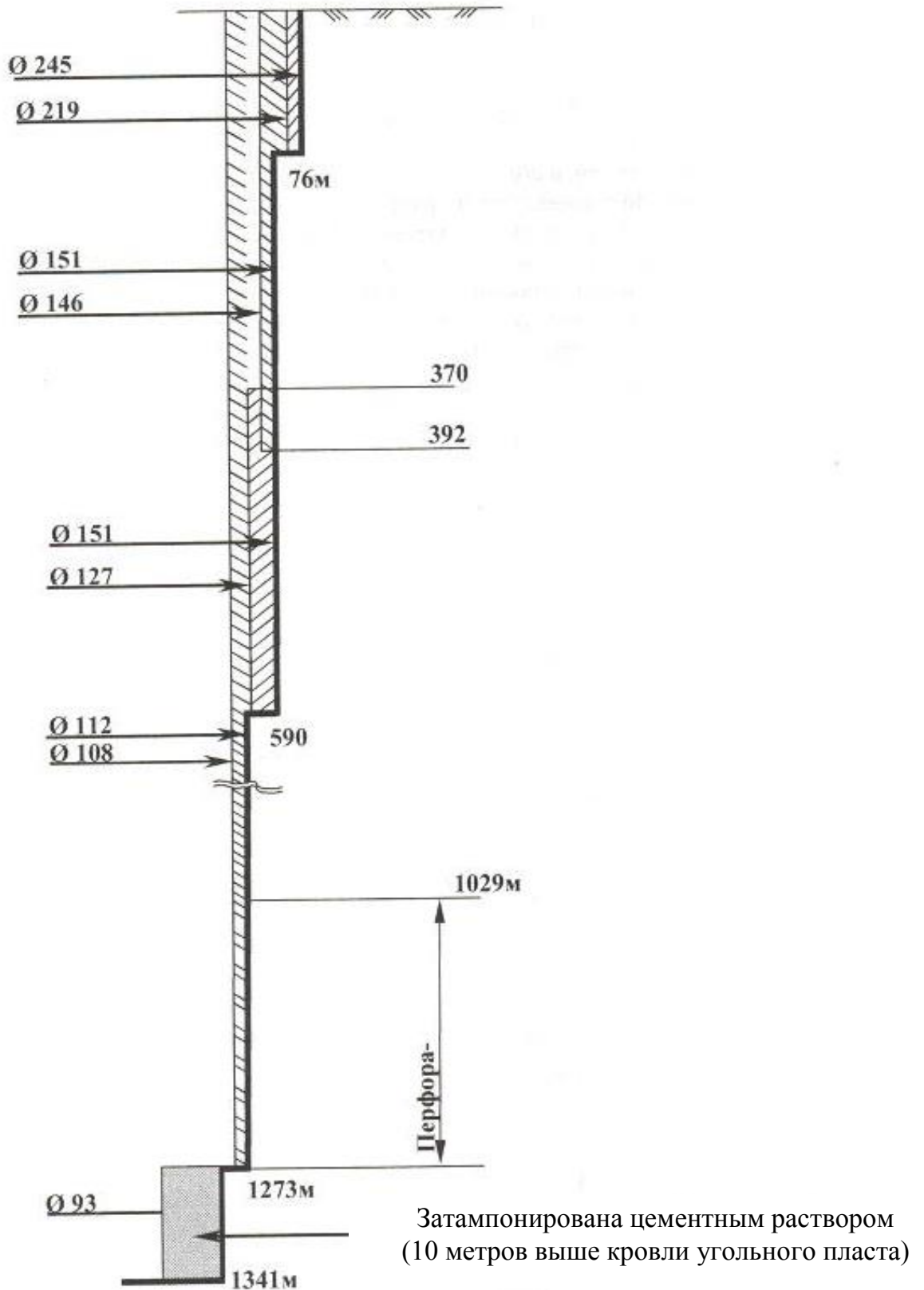


Рисунок 3.1 - Геологический разрез ПДС в условиях шахты им. А.Ф. Засядько

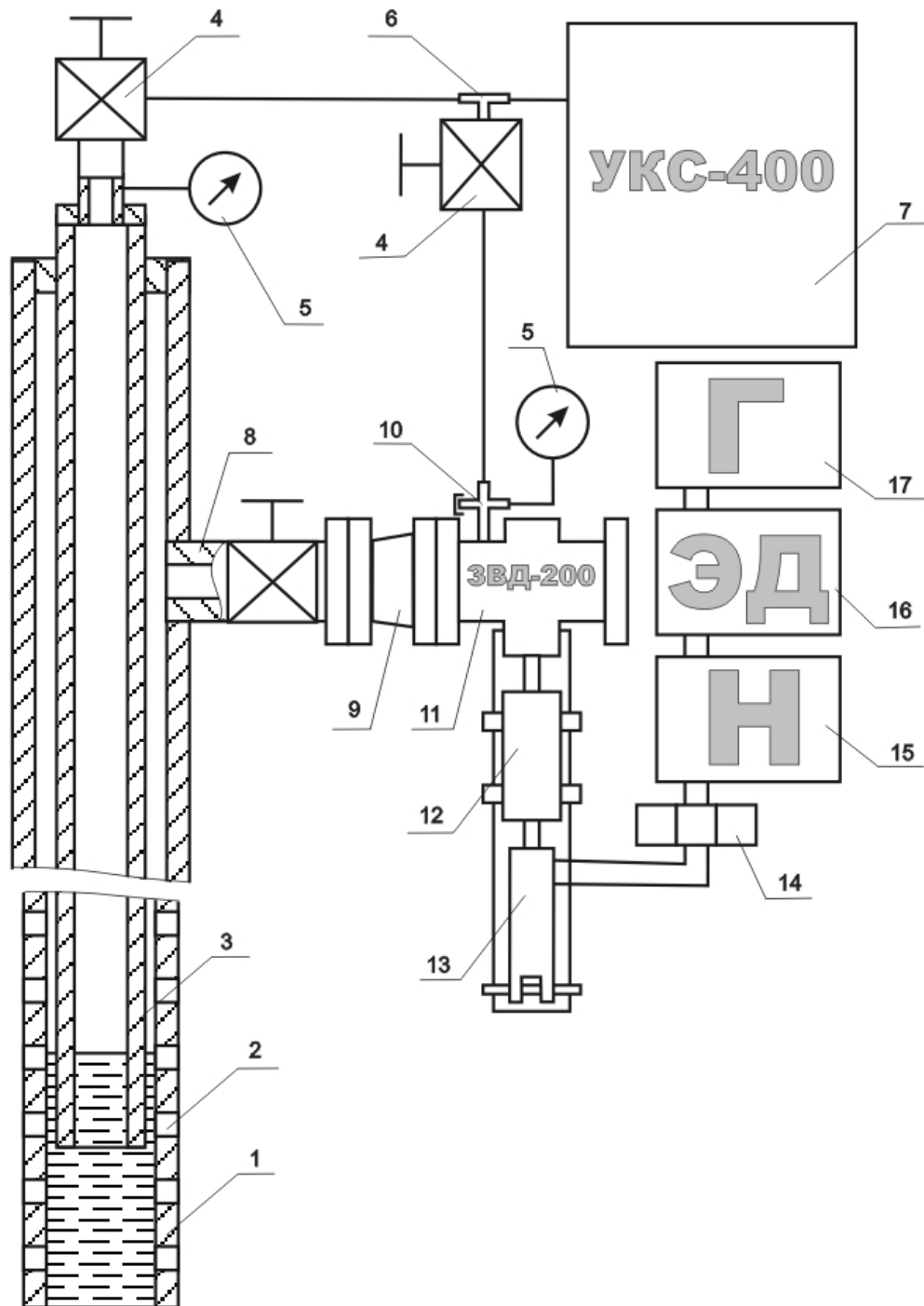


Рисунок 3.2 - Технологическая схема проведения пневмогидродинамического воздействия:

- 1 – обсадные трубы; 2 – перфорационные отверстия; 3 – НКТ; 4 – вентиль;
 5 – манометр; 6, 10 – тройники; 7 – компрессор УКС-400; 8 – патрубков;
 9 – переходник; 11- задвижки высокого давления, 12 – пружинный механизм;
 13 – гидроцилиндр; 14 – пульт дистанционного управления;
 15 – масляный насос 50 НР-32; 16 – электродвигатель; 17 – генератор.

При пневмогидродинамическом воздействии на прискважинный горный массив ПДС большинство процессов, которые происходят при разрушении и выносе образовавшегося попутного материала, а также прискважинной зоны горных пород, очень сложны. В данной работе учесть все стороны данного процесса не представилось возможным, поэтому была (разработана) решена отдельная математическая задача локального процесса воздействия на заблокированную посторонним материалом зону ПДС.

Для расширения научных представлений о влиянии пневмогидродинамического воздействия на газонасыщенные пористые среды представляет интерес развитие исследований в направлении изучения динамики структурных изменений среды с применением аналитических методов, а также современных экспериментальных, в частности, методов ядерно-магнитного резонанса, электронной микроскопии, радиоактивных изотопов с обработкой результатов современной компьютерной техникой.

В области практического применения пневмогидродинамического способа воздействия на напряженный газонасыщенный горный массив и решения проблем, стоящих перед отраслью, представляется целесообразным осуществить развитие работ и расширить область их применения в следующих направлениях.

1. Разработать способы и средства предварительной дегазации высокогазоносных угольных пластов в нетронутым массиве с применением пневмогидродинамического воздействия.

2. Разработать способы и средства пневмогидродинамической интенсификации дебита метана из ПДС, пробуренных на купольные структуры.

3.2 Совершенствование математических моделей и алгоритмов управления процессом гидропневматического воздействия с поверхности

Пневмогидродинамическая обработка подземных насыщенных массивов осуществляется путем высоконапорного нагнетания аэрированной жидкости через скважины, пробуренные с поверхности на продуктивный горизонт для

изменения его состояния с целью интенсификации выхода полезного продукта. Кроме того, гидродинамическое воздействие на угольный пласт осуществляется с целью его гидрорасчленения. Гидрорасчленение рассматривается как метод предварительной дегазации, который вызывает активизацию выделения метана [1, 4, с.4, 5, 6, 10, 18, с.16, 39].

Рассматриваемое воздействие является сложным многофакторным процессом, и для его рациональной организации необходимо применение средств автоматического управления.

Для теоретического описания процесса рассмотрим условное схематическое представление технологии воздействия (Рисунок 3.3).

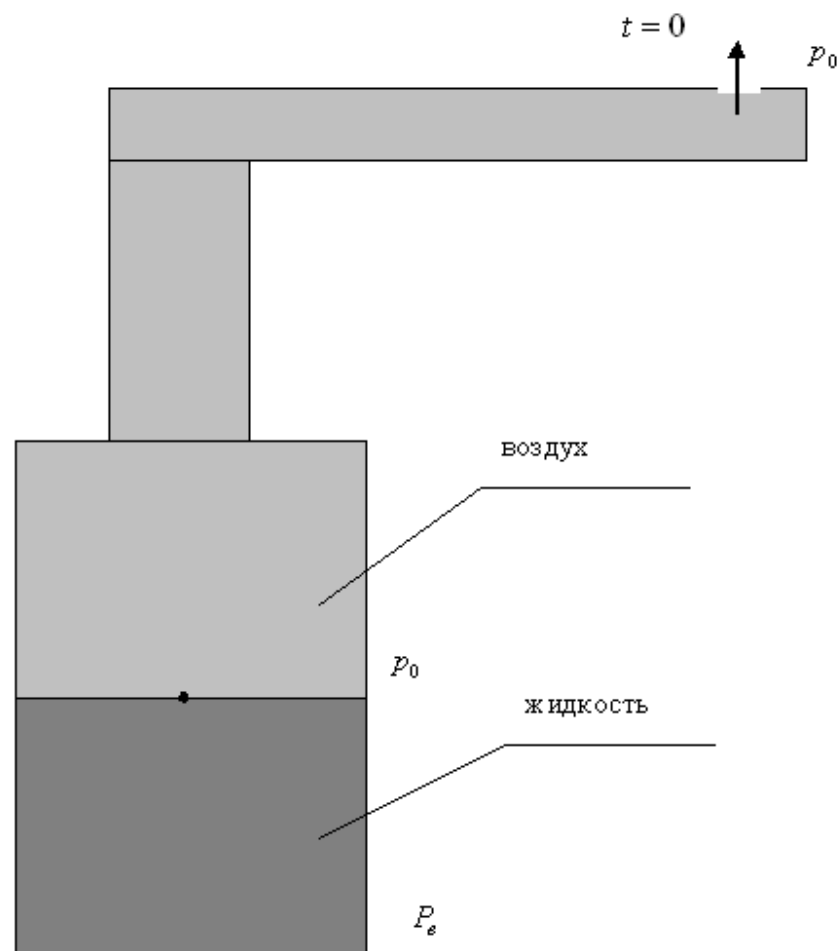


Рисунок 3.3 – Схема подачи рабочих агентов в скважину

Одной из задач управления является разработка алгоритма управления на этапе сброса давления, т.к. при неконтролируемом сбросе происходит выброс значительных масс загрязненных водных растворов, находящихся под большим давлением, на большие расстояния вокруг устья скважины, что оказывает отрицательное влияние на окружающую среду.

Для решения задачи используется одномерная модель фильтрации жидкости в трещиновато-пористой среде [27]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(x) \frac{\partial P}{\partial x} \right).$$

Согласно методике, приведенной в [27], предлагается решить задачу для единичных величин всех характеристик.

Давление жидкости к началу процедуры сброса:

$$P_c = P_{\max}.$$

Размерности величин, которые входят в уравнение, должны быть согласованы. В данном случае:

давление $[p] = 1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2$;

время $[t] = 1 \text{ сек}$;

проницаемость $[k] = 1 \text{ мд} = 10^{-11} \text{ см}^2$;

пространственная координата $[x] = 1 \text{ м} = 100 \text{ см}$;

вязкость $[\mu] = 1 \text{ снз} = \frac{10^{-7} \text{ кгс}}{\text{г см}^2}$; $[n_{\text{э}}] = 1\%$.

Вводим безразмерные величины, причем нормируем так, чтобы все они были не более единицы (такое решение позволит перейти к «единичным» величинам) [36, с. 31, 90, с.104]:

$$p^* = \frac{p}{p_c}; k^* = \frac{k}{k_o} \mu^* = \frac{\mu}{\mu_o}; n^* = \frac{n_{\text{э}}}{n_{\text{э}o}}; x^* = \frac{x}{L},$$

$$t^* = \frac{t}{t_o}; t_o = \frac{L \mu_o n_{\text{э}o}}{k_o p_c}; q^* = \frac{q}{q_o}; q_o = \frac{k_o p_c}{\mu_o LC}.$$

Время фильтрации определяется из следующих соображений. Процесс должен быть прекращен, когда жидкость достигает устья скважины и появится

возможность её выхода на поверхность. Приняв L , можно рассчитать нормирующую величину по времени t_o :

$$t_o = \frac{\mu_o n_{\text{эо}} L^2}{k_o P_c}.$$

Граница фильтрующей жидкости достигает точки $x^*=1$ ($x=L$) за 50 шагов по времени. Шаг выбран:

$$\text{по пространству } \Delta x^*=0,1; \quad \text{по времени } \Delta t^* = \frac{1}{6} \cdot 10^{-2}.$$

Учитывая размерности величин, получаем

$$T = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{\mu_o n_{\text{эо}} L^2}{k_o P_c}, \text{ час.}$$

Используя приведенные теоретические результаты, будем рассматривать методику приближенного расчета для определения времени или процедуры сброса давления.

Примем следующие предположения, которые позволят упростить задачу.

Будем считать, что коэффициенты постоянны:

$$\mu = \text{const} = \mu_o = 1 \text{ сПз};$$

$$n_{\text{э}} = \text{const} = n_{\text{эо}} = 5,0 \text{ \%};$$

$$k = \text{const} = k_o.$$

Значение k оказывает основное влияние на время T достижения фронтом жидкости устья скважины.

Для его определения в конкретных условиях можно решить обратную задачу – по фактическим данным о времени сброса определить среднее значение k :

$$k = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{\mu_o n_{\text{эо}} L^2}{T P_c}.$$

Примем ориентировочно $k = 150 \cdot 10^5$ мд, $P_c = 50$ ат, $L = 1000$ м, тогда ориентировочное время движения фронта жидкости до устья:

$$T = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 50} \approx 0,15 \text{ час} \approx 10 \text{ мин.}$$

За это время давление достигнет значения $P=50e^{-0,15\delta}$, ат.

Приняв $\delta=1$, получим: $P_1 \approx 42$ ат,

$$\text{тогда } T_1 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 42} \approx 0,18 \text{ час} \approx 11 \text{ мин.}$$

Аналогично $P_2 = 42e^{-0,18} \approx 32$ ат;

$$T_2 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 32} \approx 0,25 \text{ час} \approx 15 \text{ мин.}$$

. . .

$$T_5 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 9} \approx 0,75 \text{ час} \approx 45 \text{ мин.}$$

Время сброса должно быть рассчитано так, чтобы в любой момент достижения фронтом жидкости устья скважины давление было равным 0 по всей длине отрезка OL .

Управление сбросом давления осуществляется таким образом, чтобы столб жидкости не опускался ниже продуктивного горизонта. Сброс давления во времени должен производиться либо ступенчато, либо с высоким показателем пологого спада экспоненты (Рисунок 3.4). Периоды ступенчатого сброса рассчитываются в соответствии с выведенными формулами.

Рассмотрим другой вариант решения задачи построения алгоритма управления сбросом давления.

Итак, замена позволяет перейти к нормированным безразмерным переменным, уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial p}{\partial x} \right).$$

Таким же преобразованиям подвергаются начальные и граничные условия.

В данной работе для получения математической модели процесса гидродинамического воздействия уравнение должно быть адаптировано с точки зрения конкретной технологии и целей воздействия, а также дополнено начальными и граничными условиями, которые, в свою очередь, определяются технологическими схемами и режимами обработки.

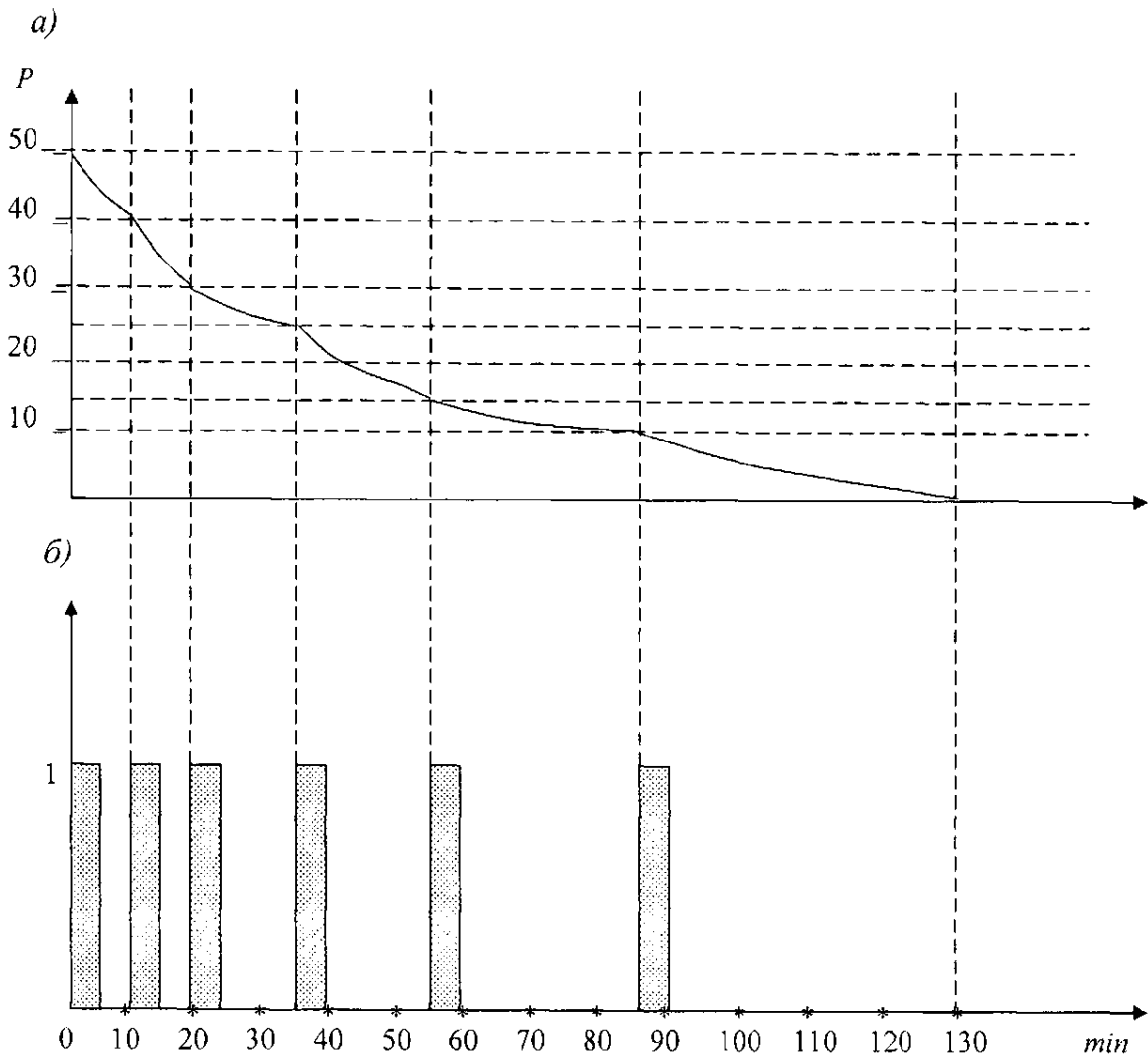


Рисунок 3.4 - Алгоритм сброса давления: а) изменение давления $P(t)$;

б) 1 – заслонка открыта, 0 – закрыта.

Значит, постановка задачи исследования и расчета параметров процесса формируется в соответствии с конкретной технологической схемой.

Задача ставится следующим образом.

На расстоянии L от поверхности находится определенная масса жидкости, находящейся под давлением P_c , и в момент времени $t=0$ производится сброс давления, что вызывает движение жидкости к поверхности, где давление принимается равным 0.

Исходя из начальных условий, можно рассчитать распределение давления в любой момент времени. Критерием окончания может служить момент

достижения фронтом фильтрации границы отрезка $0L$.

В рамках данной работы представляет интерес разработка методик инженерного расчета, позволяющих ориентировочно определить некоторые параметры. В частности, интерес представляет такая величина, как время (или последовательность) сброса давления с целью обеспечения такого завершения процесса, при котором минимизируется влияние на окружающую среду.

Для этого предлагается [27] решить задачу для единичных величин всех характеристик.

Давление жидкости к началу процедуры сброса:

$$P_c = P_{\max}.$$

Размерности входящих в уравнение величин должны быть, разумеется, согласованы. В данном случае:

$$\begin{aligned} [p] &= 1 \text{ ат} = 1 \text{ кг/см}^2; & [t] &= 1 \text{ сек}; \\ [k] &= 1 \text{ мд} = 10^{-11} \text{ см}^2; & [x] &= 1 \text{ м} = 100 \text{ см}; \\ [\mu] &= 1 \text{ спз} = \frac{10^{-7} \text{ кгс} \cdot \text{сек}}{\text{г} \text{ см}^2}; & [n_{\text{э}}] &= 1\%. \end{aligned}$$

Вводим безразмерные величины, причем нормируем так, чтобы все они были не более единицы (такое решение позволит перейти к «единичным» величинам).

Время фильтрации определяется из следующих соображений. Процесс должен быть прекращен, когда жидкость достигнет устья скважины и появится возможность ее выхода на поверхность. Приняв L , можно рассчитать нормирующую величину по времени t_0 :

$$t_0 = \frac{\mu_0 n_{\text{э}} L^2}{k_0 P_c} \quad (3.1)$$

Учитывая размерности величин, получаем:

$$T = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{\mu_0 n_{\text{э}} L^2}{k_0 P_c}, \text{ час} \quad (3.2)$$

Используя приведенные теоретические результаты, будем рассматривать

методику инженерного расчета для определения времени или процедуры сброса давления.

Примем следующие предположения, упрощающие задачу.

Будем считать, что входящие в (3.2) коэффициенты постоянны:

$$\begin{aligned}\mu &= const = \mu_0 = 1 \text{ снз}; \\ n_{\text{э}} &= const = n_{\text{э}0} = 50\%; \\ k &= const = k_0.\end{aligned}$$

Значение k оказывает основное влияние на время T достижения фронтом жидкости устья скважины.

Для его определения в конкретных условиях можно решить обратную задачу – по фактическим данным о времени сброса определить среднее значение k :

$$k = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{\mu_0 n_{\text{э}0} L^2}{TP_c}.$$

Время сброса должно быть рассчитано так, чтобы в любой момент достижения фронтом жидкости устья скважины давление было равным 0 по всей длине отрезка OL .

Примем ориентировочно $k = 150 \cdot 10^5 \text{ мд}$, $P_c = 50 \text{ ат}$, $L = 1000 \text{ м}$, тогда ориентировочное время движения фронта жидкости до устья:

$$T = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 50} \approx 0,15 \text{ час} \approx 10 \text{ мин.}$$

За это время давление достигнет значения

$$P = 50e^{-0,15\delta}, \text{ ат.}$$

Приняв $\delta=1$, получим:

$$P_1 \approx 42 \text{ ат,}$$

тогда

$$T_1 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 42} \approx 0,18 \text{ час} \approx 11 \text{ мин.}$$

$$P_2 = 42e^{-0,18} \approx 32 \text{ ат;}$$

$$T_2 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 32} \approx 0,25 \text{ час} \approx 15 \text{ мин.}$$

$$P_3 = 32e^{-0,25} \approx 25 \text{ ат;}$$

$$T_3 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 25} \approx 0,3 \text{ час} \approx 18 \text{ мин.}$$

$$P_4 = 25e^{-0,3} \approx 16 \text{ ат;}$$

$$T_4 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 16} \approx 0,5 \text{ час} \approx 30 \text{ мин.}$$

$$P_5 = 16e^{-0,5} \approx 9 \text{ ат;}$$

$$T_5 = \frac{10^3}{432} \cdot \frac{10^6 \cdot 50}{150 \cdot 10^5 \cdot 9} \approx 0,75 \text{ час} \approx 45 \text{ мин.}$$

Управление сбросом давления осуществляется таким образом, чтобы столб жидкости не опускался ниже продуктивного горизонта. Сброс давления во времени должен производиться либо ступенчато, либо с высоким показателем выполаживания экспоненты. Периоды ступенчатого сброса рассчитываются в соответствии с выведенными формулами.

На рисунке 3.5 приведен график сброса давления, соответствующий приведенным расчетам.

Если управлять сбросом в таком режиме неудобно по тем или иным причинам, его можно производить плавным снижением давления в течение времени

$$T_c = \sum T_i = 120 \text{ мин} = 2 \text{ час.}$$

Таким образом, на основании теоретических представлений о процессе пневмогидродинамического воздействия получены детерминированные математические модели процесса, обоснованы практические рекомендации по выбору технологических параметров и разработан алгоритм управления сбросом давления, при котором предотвращается отрицательное влияние процесса на прилегающую к нагнетательной скважине территорию.

В результате технологической реализации процесса

пневмогидродинамического воздействия на газонасыщенный трещиновато-пористый массив осуществляется принудительное внедрение воздуха под высоким давлением в природные пустоты, что вызывает структурные изменения массива, сопровождающиеся расширением пор и трещин. После сброса давления активизируется метановыделение из массива в скважину.

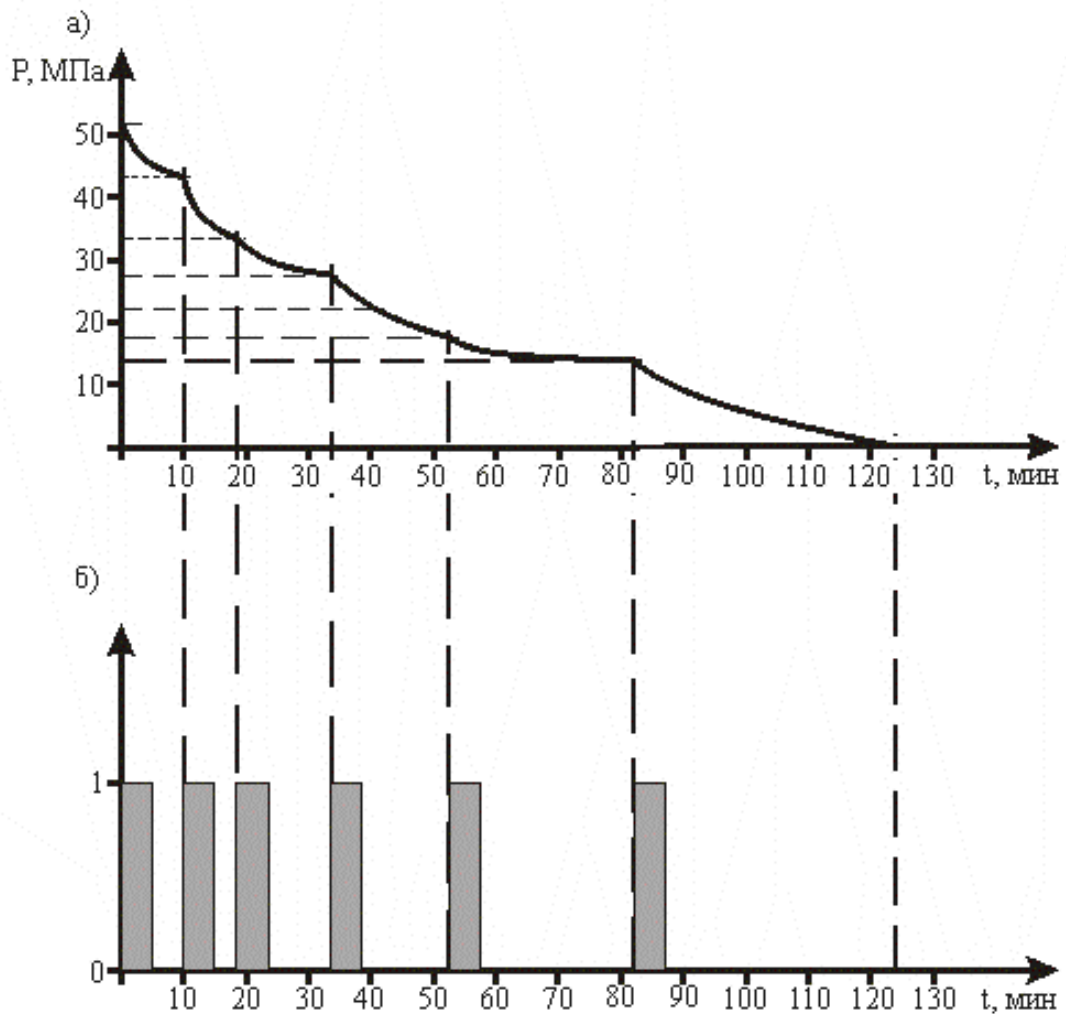


Рисунок 3.5 - График сброса давления:

а) изменение давления $P(t)$; б) 1 – задвижка открыта, 0 – закрыта.

3.3 Основы системы автоматизированного проектирования технологии и управления процессом гидропневматического воздействия на пласт

Применение методов автоматизированного проектирования с использованием компьютерных технологий в сочетании с оптимизацией

управления проектом системы гидравлического воздействия на угольный пласт обеспечивает повышение качества обработки пласта и эффективности воздействия.

Процесс проектирования включает ряд этапов, в том числе рассмотрение и оценка вариантов проектов, обоснование и верификация принимаемых проектных решений. По мере усложнения технологий, расширения числа возможных вариантов проектов возникает необходимость рационализации (оптимизации) процесса управления проектом с применением методов математического моделирования и компьютерной техники [2, с.84, 27, 81, с.61, 95, с.445, 99, 100, 101, 102].

Все основные виды гидравлического воздействия классифицируются по следующим признакам [27, 99, с.91]:

- схеме расположения скважин;
- виду рабочей жидкости;
- режиму внедрения;
- способу внедрения.

Пневматическое воздействие на угольные и породные массивы все шире применяется как средство борьбы с газовыделением при подземной добыче угля. Для реализации процесса проектируется технологический комплекс, обеспечивающий выполнение всех режимов воздействия.

Ввиду сложности процесса проектируемый комплекс функционирует с достаточной эффективностью только при условии оптимального управления проектом, что определяет актуальность статьи. В настоящее время наиболее широко применяются два способа пневматического воздействия:

– «ударное» пневмодинамическое воздействие с поверхности под большим давлением на вмещающий породный массив с последующим сбросом давления как средство «расчленения» для активизации выделения метана и его отвода [1, 6, 9, 41, 56, 66];

– пневмообработка пласта через подземные скважины в режиме фильтрации как средство снижения его газонасыщенности [27, 28].

Рассмотрим воздействие на породный массив через скважину, пробуренную с поверхности. Ставится задача контроля технологических параметров и обоснования принципов проектирования комплекса.

Исходные физические предпосылки для проектирования технологического комплекса, реализующего процесс.

1) Воздействие осуществляется путем нагнетания воздуха в скважину, пробуренную на определенную глубину в породном массиве, содержащем газ метан в связанном состоянии.

2) Целью воздействия является активизация газовыделения из массива как средство его дегазации.

3) За счет воздействия воздуха, давление в котором доводится до значительных величин, нарушается равновесие в системе «порода-воздух-метан» благодаря изменению сорбционных свойств массива, что и вызывает усиление движения газа к обнаженной поверхности.

Давление, под которым находится в фильтрационном объеме метано-воздушная смесь, оказывает существенное отрицательное влияние на скорость диффузии метана. На рисунке 3.6 приведена функционально-логическая схема построения проекта.

В результате реализации процесса пневмодинамического воздействия осуществляется принудительное внедрение воздуха под высоким давлением, что вызывает структурные изменения, сопровождающиеся расширением пор и трещин. Управляющим параметром процесса является давление на скважине. Ввиду сложности построения инженерных методик, исследования и расчет параметров в общем случае приходится проводить с применением компьютера.

Проектирование схем гидравлического воздействия на угольный пласт должно включать выбор способа, технологической схемы, оборудования и параметров нагнетания при максимально возможном учете всех влияющих факторов. Такой учет может быть сделан заблаговременно с использованием имитации процесса распространения жидкости в пласте на программной модели, реализуемой компьютером.

При этом проектирование будет включать три стадии: описательную, расчетную и моделирование. На первой стадии проектировщик составляет описание угольного пласта и вмещающих пород, технологической схемы горных работ на данном участке, определяет цель воздействия. На второй стадии производится выбор способа и технологической схемы нагнетания, с учетом анизотропии устанавливается распределение проницаемости, предварительно определяются параметры нагнетания. Эта стадия заканчивается составлением комплекта исходных данных для моделирования, которые могут быть описательными и числовыми.

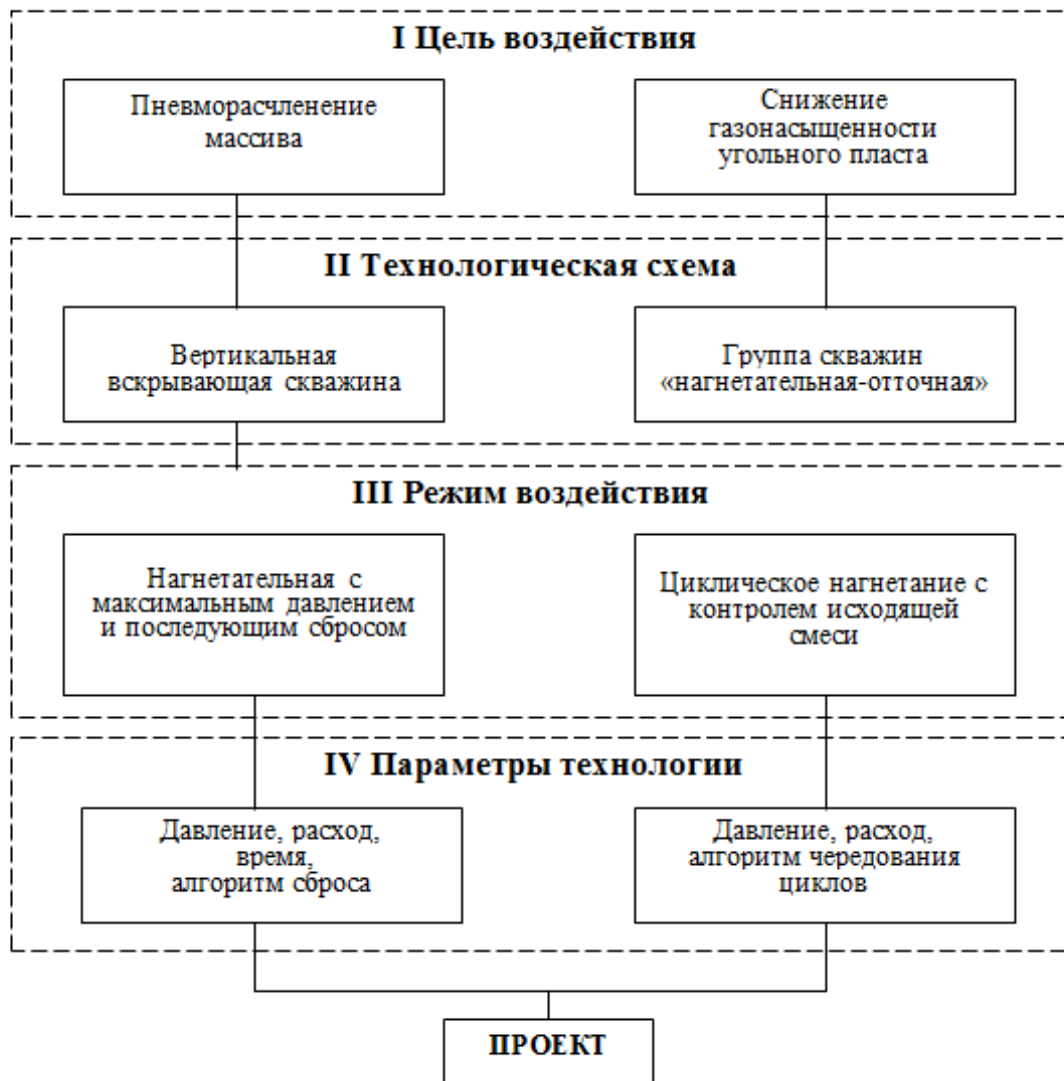


Рисунок 3.6 - Функционально-логическая схема проектирования комплекса пневмодинамического воздействия на угольные пласты и породные массивы

И наконец, последняя стадия ставит своей целью апробирование (прокрутку) выбранного способа, схемы и параметров на модели, исследование различных вариантов и, при необходимости, корректировку исходных данных и проведение повторных расчетов [12, с.25].

Многообразие горногеологических и горнотехнических условий, фильтрационных и коллекторских характеристик угольных пластов, технологических схем нагнетания не позволяет разработать рекомендации для всех случаев применения гидродинамического воздействия. В то же время при выборе конкретной схемы или способа не всегда учитываются некоторые факторы, которые существенно влияют на результат обработки, кроме того, зачастую неизвестна степень влияния того или иного фактора на эффективность воздействия.

При составлении паспорта на ведение работ это приводит к необходимости либо принять типовые рекомендации без учета некоторых свойств пласта, тем самым в недостаточной степени использовать эффект гидравлического воздействия, либо проводить трудоемкие натурные исследования.

С этой точки зрения помощь проектировщику может оказать система автоматизированного проектирования (САПР) гидравлического воздействия на угольный пласт, позволяющая выбрать схему, технологию и параметры нагнетания с учетом конкретных условий без проведения всего комплекса шахтных исследований.

Характеристика угольного пласта включает глубину залегания, угол падения пласта, марку угля, мощность и степень нарушенности пласта и слагающих его пачек, наличие и характеристику геологических нарушений, зон опорного давления, зон ПГД, сведения о подработке и надработке, степень опасности пласта по различным факторам, характеристику вмещающих пород, коэффициент проницаемости, пористость пласта и пород, коэффициент фильтрационной анизотропии, давление газа в пласте. Эта информация определяет, во-первых, цель воздействия, т.е. на изменение каких свойств пласта и в какой степени должно быть направлено гидродинамическое воздействие, во-

вторых, способ и технологическую схему нагнетания и, в-третьих, распределение проницаемости в рассматриваемой области, значение которого необходимо для моделирования.

Описание технологической схемы горных работ на данном участке должно содержать характеристику системы разработки, оборудования и технологии очистных и (или) подготовительных работ, параметры схемы, в частности длину лавы, размеры забоев подготовительных и вскрывающих выработок, опережение подготовительных выработок при сплошной системе разработки и организацию очистных, подготовительных, транспортных и ремонтных работ на данном участке. Все эти данные в значительной степени влияют на определение способа и технологической схемы воздействия. Исследование основных закономерностей физико-химических процессов, происходящих при нагнетании воздуха в угольный пласт, предполагает как моделирование поведения воздуха в типичных условиях, так и изучение влияния свойств угля и метано-воздушной смеси на результат обработки [11, 27, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109].

Предварительный выбор способа и схемы воздействия на основе имеющейся информации осуществляется согласно рекомендациям нормативных документов и опыту работ по нагнетанию. В дальнейшем принятые решения проходят проверку на модели.

Собственно модель включает в себя математическую постановку задачи, метод и алгоритм решения, комплекс программ на каком-либо алгоритмическом языке, ориентированном на конкретную ЭВМ. Моделирование включает в себя исследование требуемых характеристик процесса нагнетания, как правило, для нескольких вариантов исходных данных, в частности нескольких вероятных распределений проницаемости и пористости, и, при необходимости, корректировку принятых ранее решений. В процесс принятия решения могут быть включены лабораторные и натурные эксперименты по определению или уточнению некоторых характеристик угольного пласта.

Проект включает в себя схему расположения скважин, способ нагнетания, технологию, оборудование и параметры воздействия и является основой для

составления паспорта ведения работ по пневмогидродинамическому воздействию на угольный пласт.

В зависимости от конкретных условий содержание отдельных модулей системы может быть изменено по усмотрению проектировщика.

Применение методов автоматизированного проектирования с использованием компьютерных технологий в сочетании с оптимизацией управления проектом системы пневмогидродинамического воздействия на угольный пласт обеспечивает повышение качества обработки массива и эффективности воздействия.

Исследование влияния горно-геологических и технологических факторов на процесс нагнетания воздуха позволило выделить свойства массива и технологические параметры, положительно и отрицательно влияющие на эффективность воздействия, что дало возможность определить рациональную область применения способа.

Определяющим фактором эффективности пневмодинамического воздействия является рациональное управление проектом технологического комплекса.

Известные технологии воздействия на продуктивные пласты через скважины, пробуренные с дневной поверхности, например, гидроразрыв пластов, направленное гидрорасчленение пластов и др., используют образовавшуюся при бурении «древовидную» систему техногенных трещин вокруг скважины для закачки в них рабочей жидкости или иного агента с целью дополнительного их раскрытия.

При проектировании технологических схем нагнетания рабочего агента необходимо провести предварительный расчет основных параметров, в частности, давления нагнетания, расхода (темпа) и других.

Для решения задачи используется линеаризованная модель фильтрации жидкости в трещиновато-пористой среде [27]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(x) \frac{\partial P}{\partial x} \right).$$

Уравнения аналогичного типа получаются для описания процесса движения воздуха, газовойдушной или газожидкостной смеси.

Разработанные математические модели составляют основу математического обеспечения системы управления. Основной особенностью процесса воздействия является то, что объект (горный массив) «закрит» от непосредственного наблюдения, и математическая модель позволяет имитировать процесс воздействия, основываясь на информации о «реакции» объекта на воздействие. Сравнивая полученные данные, система обрабатывает команды по коррекции регулируемых технологических параметров.

На рисунке 3.7 приведена функционально-логическая структура системы автоматизированного управления (САУ).

Выбор и последующее проектирование системы осложняется неопределенностью, которая является основополагающим признаком реализации процесса воздействия и принципов алгоритмизации управления. В таблице 3.1 приведена сравнительная характеристика основных типов структуры управления: функционального, матричного и проектного [99, с.91].

В условиях турбулентного окружения и значительной параметрической и структурной неопределенности более приемлемыми являются матричная и проектная структуры управления.

Таблица 3.1 - Основные типы структуры управления

Критерии оценки структуры	Функциональная	Матричная	Проектная
Неопределенность среды	низкая	высокая	высокая
Технология реализации	стандартная	сложная	новая
Сложность процесса	малая	средняя	высокая
Продолжительность процесса	короткая	средняя	высокая
Взаимная связь между отдельными составляющими	низкая	средняя	значительная
Критичность времени выполнения	низкая	средняя	высокая
Связь с системами высшего уровня	сильная	средняя	слабая

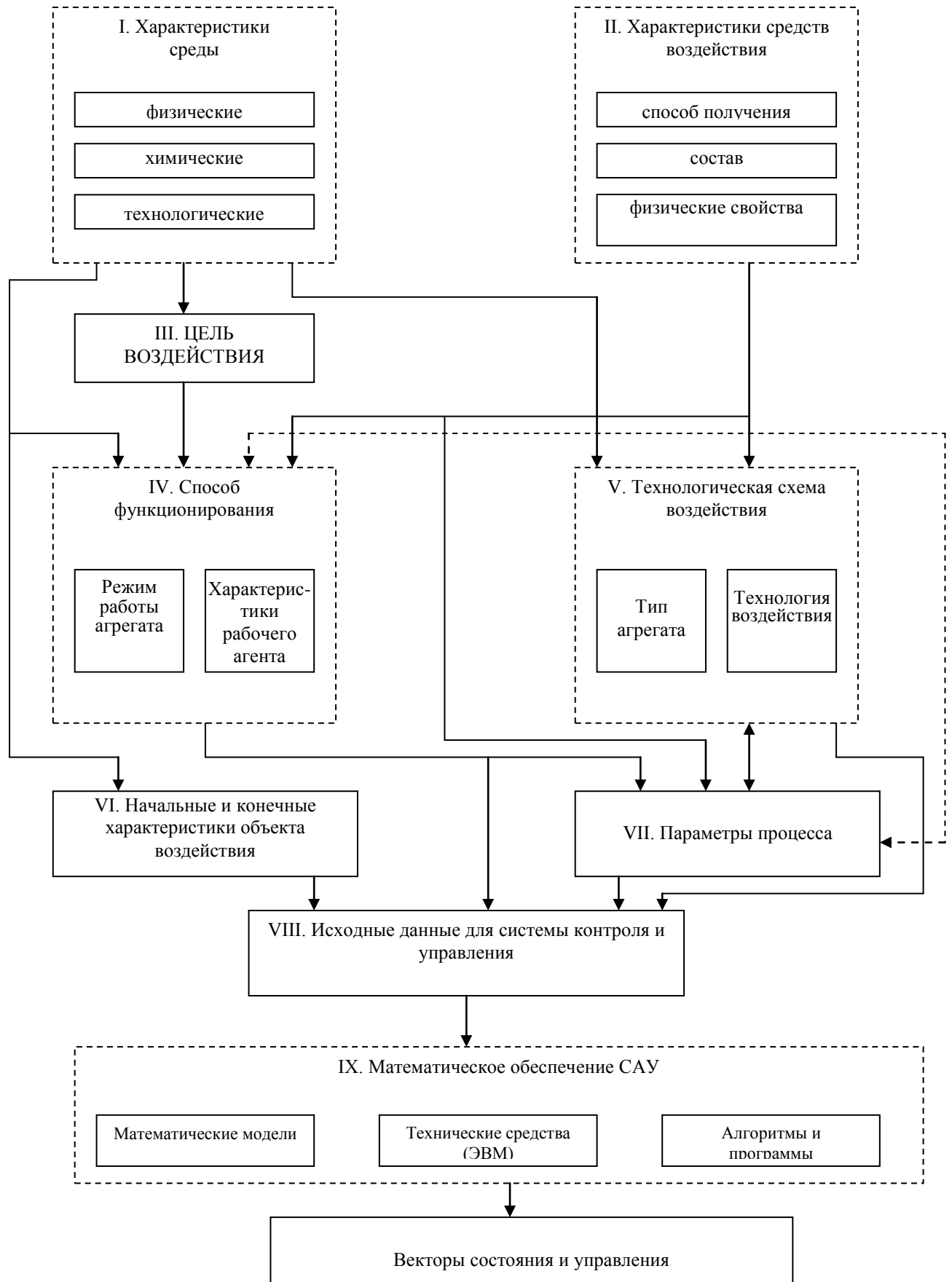


Рисунок 3.7 - Функционально-логическая структура системы автоматизированного управления (САУ)

Имитационное моделирование позволяет определить общий тренд, в направлении которого выполняется процесс автоматизированного выбора параметров оперативного управления [110,111]. Вместе с тем, необходимо иметь алгоритм текущего выбора комплекса параметров.

На рисунке 3.8 приведена блок-схема алгоритма выбора управляющего набора, близкого к оптимальному.

На вход блока выбора условно оптимального набора параметров управления поступают информационные векторы, которые формируются в базах данных, оперативно пополняемых за счет информации от технических средств контроля.

Степень коррекции, которой подвергаются входные векторы, зависит от нескольких факторов, определяемых трендом процесса. Если величина критерия ε уменьшается во время выполнения процесса, то все входные векторы считаются кандидатами на проверку.

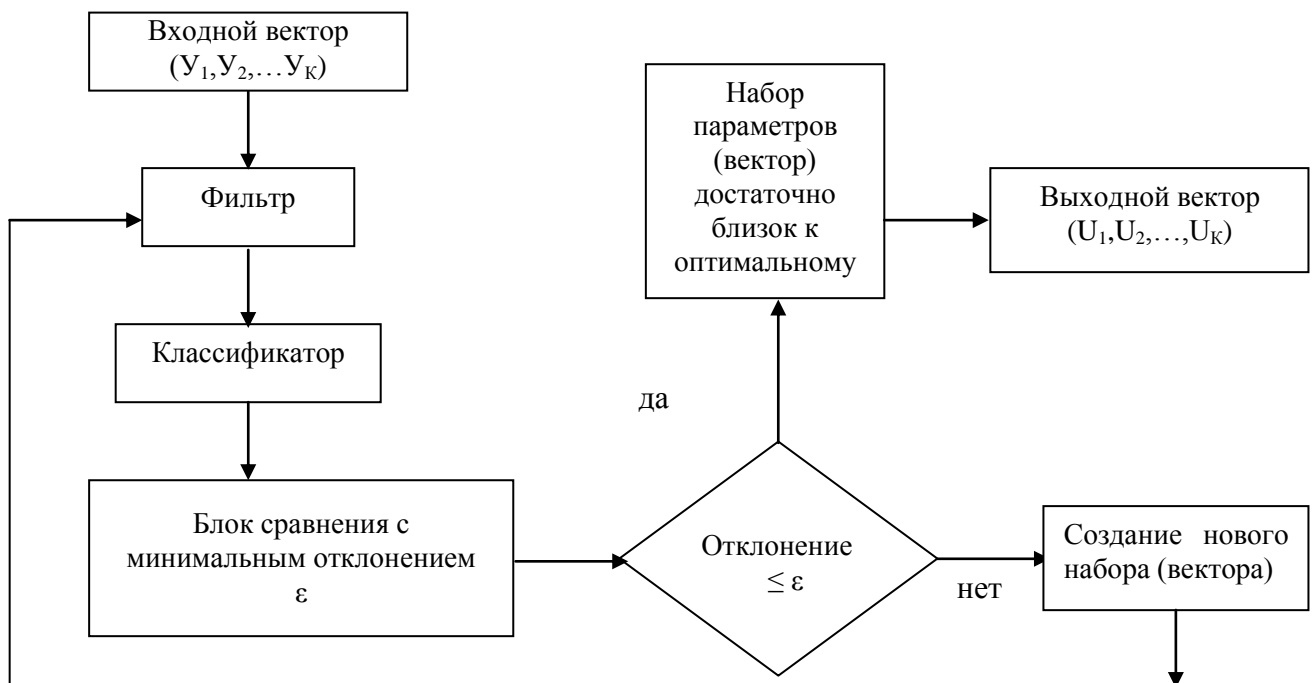


Рисунок 3.8 - Блок-схема алгоритма выбора текущего вектора управления

В результате технологической реализации процесса пневмогидродинамического воздействия на анизотропный подземный насыщенный массив осуществляется принудительное внедрение воздуха и жидкости под высоким давлением в природные пустоты, что вызывает структурные изменения массива, сопровождающиеся расширением пор и трещин.

После сброса давления активизируется выделение углеводородного сырья из массива в скважину.

На основании теоретических представлений получены практические рекомендации по выбору структуры и технологических параметров системы автоматизированного управления, разработан алгоритм выбора приближенного к оптимальному вектора управления процессом пневмогидродинамического воздействия.

3.4 Выводы по разделу 3

1. На основании теоретических представлений о процессе пневмогидродинамического воздействия получены детерминированные математические модели процесса, обоснованы практические рекомендации по выбору технологических параметров и разработан алгоритм управления сбросом давления, при котором предотвращается отрицательное влияние процесса на прилегающую к нагнетательной скважине территорию.

2. Разработана функционально-логическая схема проектирования комплекса пневмогидродинамического воздействия на угольные пласты и породные массивы. Применение методов автоматизированного проектирования с использованием компьютерных технологий в сочетании с оптимизацией управления проектом системы пневмогидродинамического воздействия на угольный пласт обеспечивает повышение качества обработки массива и эффективности воздействия.

3. Разработана функционально-логическая структура системы автоматизированного управления (САУ). На основании теоретических

представлений получены практические рекомендации по выбору структуры и технологических параметров системы автоматизированного управления, разработан алгоритм выбора приближенного к оптимальному вектора управления процессом пневмогидродинамического воздействия.

РАЗДЕЛ 4

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

4.1. Элементная база системы управления

Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата. В этой связи важное значение имеют быстродействие автомата и аппаратные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую нагнетательную установку.

Одним из основных способов построения современных систем автоматического управления является принцип микропрограммного управления, который был предложен М. Уилксом [112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121].

Обобщённая структура замкнутой системы автоматического управления представлена на рисунке 4.1, где ОА – операционный автомат, являющийся объектом управления, АР – аналоговый регулятор, реализующий алгоритм управления, ИМ – исполнительный механизм, воздействующий на ОА. Регулируемая аналоговая величина f_a поступает на АР, характеризуя состояние ОА, здесь происходит сравнение с некоторым значением x_a . В соответствии с результатом сравнения АР вырабатывает сигнал y_a , управляющий ИМ таким образом, чтобы регулируемая величина f_a была равна заданной x_a .

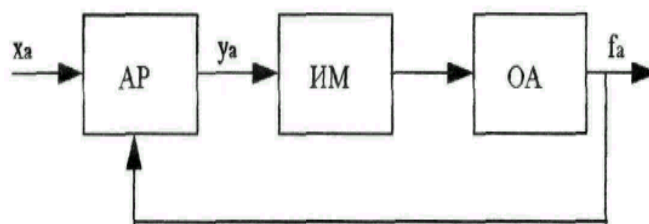


Рисунок 4.1 – Обобщённая структура замкнутой системы автоматического управления

Большими возможностями обладают цифровые регуляторы (ЦР), позволяющие реализовать закон управления в цифровой форме с помощью цифровых вычислительных средств. В этом случае в систему вводятся аналого-цифровой (АЦП) и цифро-аналоговый (ЦАП) преобразователи (Рисунок 4.2). В цепь обратной связи включён цифровой датчик ЦД, выполняющий функции АЦП для регулируемой величины. На рисунке 4.2 индексы «а» и «ц» означают, что величина является аналоговой или цифровой соответственно.

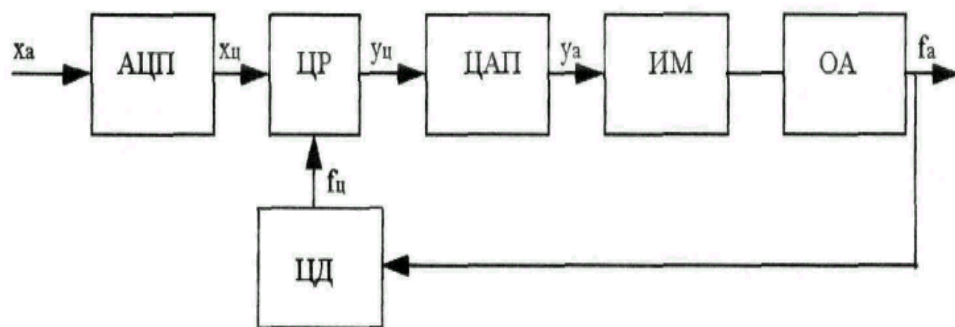


Рисунок 4.2 - Структура цифровой системы автоматического управления

Упрощённая типовая схема цифровой системы управления приведена на рисунке 4.3.

На вход управляющего автомата (УА) поступают осведомительные сигналы (логические условия) $x_i \in X = \{x_1, \dots, x_L\}$, индицирующие состояния ОА. Логические условия x формируются специальными цифровыми датчиками ЦД1, ..., ЦДL. Управляющий автомат на основе анализа сигналов x_1, \dots, x_L и закона управления, определяемого функцией F , формирует управляющие сигналы (микрооперации) $y_n \in Y = \{y_1, \dots, y_N\}$, которые преобразуются дискретными исполнительными механизмами ДИМ1, ..., ДИМN в сигналы управления ОА [122, 123, 124].

Возможны две принципиально различные структурные реализации управляющего автомата: аппаратная и программная. В первом случае алгоритм управления задаётся электрическими связями между функциональными элементами устройства, во втором - с помощью программы, которая хранится в

памяти системы.

Аппаратная реализация алгоритма управления возможна двумя путями – в виде автомата с «жесткой» логикой (АНЛ – automaton with hardwired logic) или в виде автомата с «программируемой» логикой (АПЛ – automaton with programmable logic).

Для задания алгоритма управления используется большое количество различных языков - логические схемы алгоритма, матрицы переходов, система секвенций, граф-схемы алгоритма. Язык граф-схем алгоритма (ГСА) получил наиболее широкое применение в практике инженерного проектирования. Граф-схемы представляют собой совокупность начальной, конечной, условных и операторных вершин, подчиняющуюся правилам детерминированности, конечности и результативности.

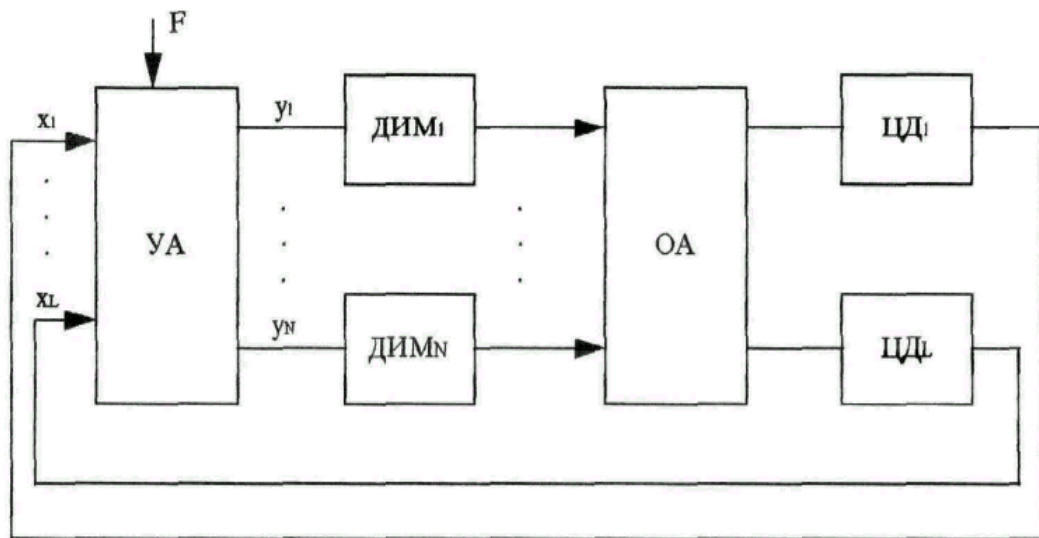


Рисунок 4.3 - Типовая структура цифровой системы программного управления

Автомат с «жесткой» логикой является конечным цифровым автоматом и может быть синтезирован каноническим методом структурного синтеза. Структурная схема АНЛ включает (Рисунок 4.4), комбинационную схему КС, формирующую по сигналам $x_l \in X$ и переменным обратной связи $T_r \in T = \{T_1, \dots, T_R\}$ управляющие сигналы $y_n \in Y$ и функции $\varphi_r \in \Phi\{\varphi_1, \dots, \varphi_R\}$

возбуждения памяти автомата, представляющей собой регистр RG. Переменные $T_r \in T$ используются для кодирования состояний автомата $a_m \in A\{a_1, \dots, a_M\}$.

Существует два типа АНЛ - автомат Мили и автомат Мура, отличающиеся видом функции выходов λ . В автомате Мили функции $y_n \in Y$ определяется как $Y = \lambda(X, T)$, а в автомате Мура:

$$Y = \lambda(T). \quad (4.1)$$

Закон перехода из состояния в состояние задаётся функцией перехода δ , которая одинакова для обоих автоматов.

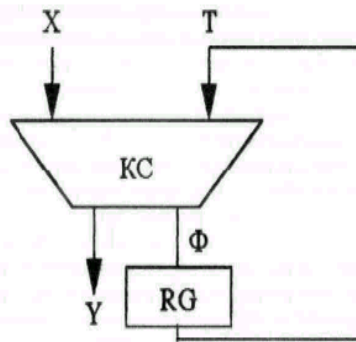


Рисунок 4.4 - Структурная схема АНЛ

Синтез автоматов по ГСА производится одинаковым образом и включает идентичные этапы, которые отличаются только содержанием:

а) Формирование отмеченной ГСА.

На этом этапе для автомата Мура начальная и конечная вершины отмечаются отметкой a_1 , а каждая операторная вершина отмечается одним из состояний a_1, \dots, a_M .

б) Кодирование состояний АНЛ.

При этом каждому состоянию $a_m \in A$ ставится в соответствие двоичный код $C(a_m)$ разрядности $R = \text{int}(\log_2 M)$.

в) Формирование прямой структурной таблицы (ПСТ) АНЛ.

Для автомата Мура ПСТ включает столбцы:

a_m – исходное состояние;

$C(a_m)$ – код состояния $a_m \in A$;

a_s – состояние перехода;

$C(a_s)$ – код состояния $a_s \in A$;

X_h – входной сигнал, задающий переход из a_m в a_s ;

Φ_h – набор функций возбуждения, формируемых для переключения памяти из $C(a_m)$ в $C(a_s)$;

h – номер перехода $\{h = 1, \dots, H\}$.

Кроме того, в столбце a_m записывается выходной сигнал, формируемый АНЛ в этом состоянии.

г) Формирование системы уравнений АНЛ.

На этом этапе по ПСТ формируется система уравнений

$$\begin{aligned} \varphi_r &= \bigvee_{h=1}^H C_{rh} A_m X_h & (r = \overline{1, R}), \\ y_n &= \bigvee_{m=1}^M C_{nm} A_m & (n = \overline{1, N}), \end{aligned} \quad (4.2)$$

где

C_{rh} (C_{nm}) – булева переменная, равная единице, если в h -й строке ПСТ записан сигнал φ_r , (в состоянии a_m формируется сигнал y_n),

A_m – конъюнкция переменных $T_r \in T$, соответствующая коду $C(a_m)$.

д) Синтез схемы автоматов в заданном элементном базисе по уравнениям (4.2).

Таблица 4.1 является ПСТ автомата Мура, построенной по ГСА GO (Рисунок 4.5).

Из таблицы 4.1 имеем, например,

$$\begin{aligned} D_1 &= A_3 \overline{x_2} \vee A_4 \overline{x_2} = \overline{T_1} T_2 \overline{T_3} \overline{x_2} \vee \overline{T_1} T_2 T_3 \overline{x_2} = \overline{T_1} T_2 \overline{x_2}, \\ y_3 &= A_3 \vee A_4 = \overline{T_1} T_2 \overline{T_3} \vee \overline{T_1} T_2 T_3 = \overline{T_1} T_2. \end{aligned}$$

Здесь память АНЛ реализована на D-триггерах, которые широко используются для этих целей на практике.

Таблица 4.1 - Прямая структурная таблица АНЛ Мура

a_m	$C(a_m)$	a_s	$C(a_s)$	X_h	Φ_h	h
a1	000	a2	001	1	D3	1
a2 (y1y2)	001	a3	010	x1	D2	2
		a4	011	x1	D2D3	3
a3 (y2y3)	010	a5	100	x7	D1	4
		a4	011	x2	D2D3	5
a4 (y3)	011	a5	100	xT	D1	6
		a4	011	x2	D2D3	7
a5 (y2y4)	100	a1	000	1	—	8

4.2. Основные параметры элементов и способы их совершенствования

Для улучшения характеристик автоматов рассматриваются модификации структур и алгоритмов синтеза автоматов с программируемой логикой (APL) на программируемых БИС:

- структура и алгоритм синтеза APL с введением дополнительной схемы адресации микрокоманд, позволяющие повышать быстродействие автомата;
- структура и алгоритм синтеза с введением схемы преобразователя адреса микрокоманд, позволяющие сократить количество команд безусловного перехода;
- структура и алгоритм синтеза с совмещением функций полей микрокоманд, позволяющие сократить длину микрокоманд;
- структура и алгоритм синтеза с многотактной выборкой микрокоманд, позволяющие сократить количество микросхем.

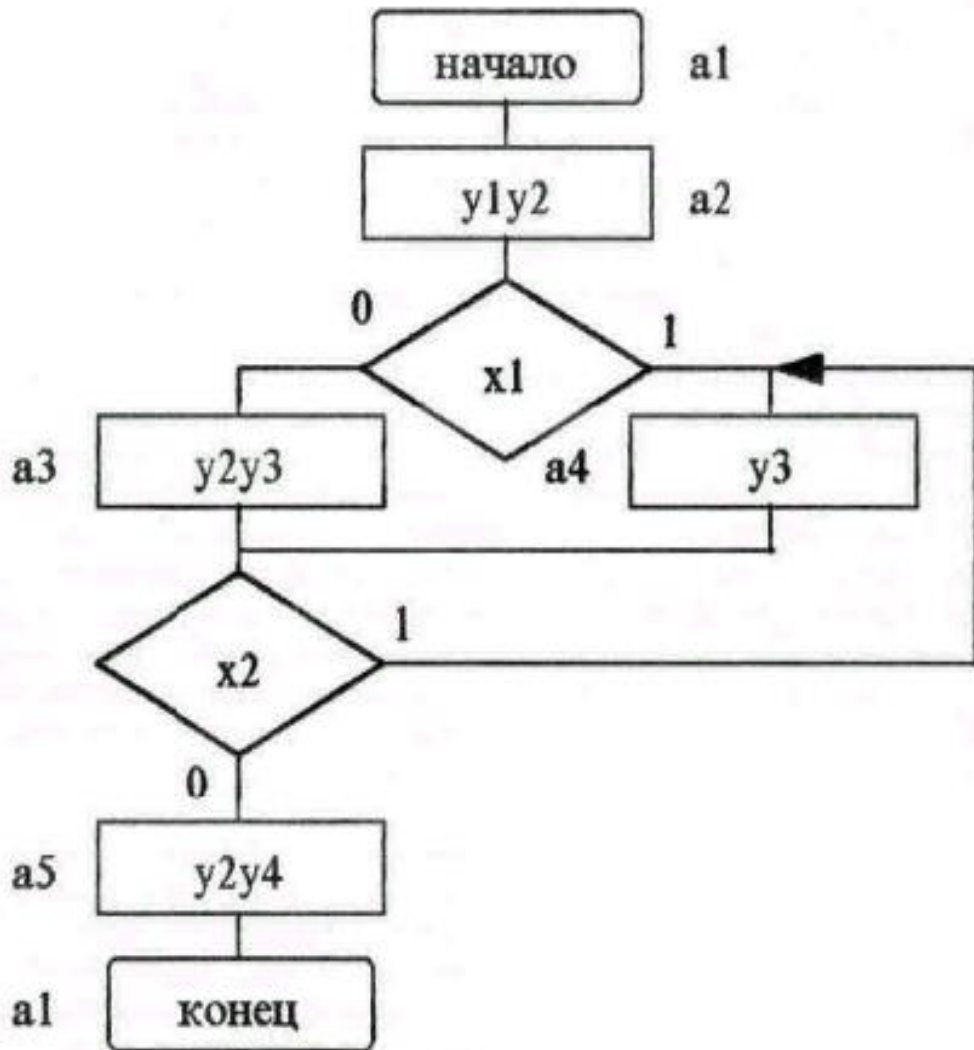


Рисунок 4.5 - Граф - схема алгоритма GO

Автоматы с «программируемой» логикой используют операционно-адресное представление микрокоманд, хранящихся в виде микропрограммы в специальной управляющей памяти.

Структурная схема APL (Рисунок 4.6) включает:

- схему адресации (СА – circuit of addressing);
- регистр адреса микрокоманд (РАМІ – register of microinstruction address);
- микропрограммную память (ММР – microprogram memory);
- схему формирования управляющих сигналов (ССС – circuit of control signals).

По сигналу φ_0 в РАМІ (вместо РАМІ может быть счётчик адреса микрокоманд СТАМІ) заносится адрес первой микрокоманды микропрограммы.

Очередная микрокоманда считывается из MMP. Операционная часть микрокоманды (FMO – field of micro operations) поступает в схему CCS и преобразовывается в управляющие сигналы Y , поступающие в ОА. Адресная часть (AP – address part) поступает в схему СА, которая анализирует ЛУ X , поступающие из ОА и формирует адрес перехода. Поле признака (FA – attribute field) позволяет определить тип микрокоманды и способ формирования адреса перехода. Если CCS формирует признак окончания микропрограммы Z , то считывание микрокоманд из MMP прекращается.

Показано, что APL является автоматом Мура, функция переходов которого определяется режимом адресации. Очевидно, что если назвать MMP, СА и CCS комбинационной схемой, то видна идентичность моделей АНЛ (Рисунок 4.4) и APL (Рисунок 4.6). Понятия «состояние» и «кодирование состояний» в АНЛ аналогичны понятиям «микрокоманда» и «адресация микрокоманд» для APL.

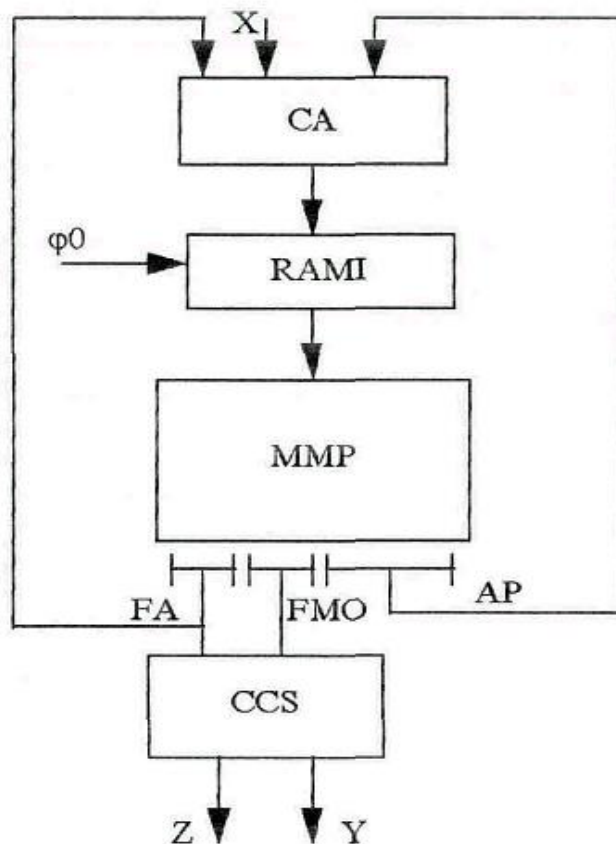


Рисунок 4.6 – Структурная схема автомата с «программируемой» логикой

Методика синтеза АРЛ по ГСА включает следующие этапы [24, 25]:

а) Преобразование исходной ГСА G в соответствие с принятым режимом адресации.

б) Формирование множества $O = \{a_1, \dots, a_M\}$ микрокоманд заданного формата по преобразованной ГСА G .

в) Адресация микрокоманд. На этом этапе каждой микрокоманде (МК) $a_m \in O$ ставится в соответствие R – разрядный адрес $C(a_m)$, определяющий её место в ММР, $R = \text{int}(\log_2 M)$.

г) Формирование содержимого ММР.

д) Синтез схем СА, ММР и ССС в заданном элементном базисе.

Существуют и другие методы реализации алгоритмов управления – логические процессоры, распределители импульсов, перестраиваемые автоматы, многофункциональные логические модули. Однако АНЛ и АРЛ нашли наиболее широкое применение в системах цифровой автоматики и вычислительной техники. При этом, как правило, АНЛ используются для реализации быстродействующих систем, а АРЛ – для реализации объёмного микропрограммного обеспечения в больших ЭВМ, мини- и микро-ЭВМ. Характерной особенностью АРЛ является возможность оперативного изменения микропрограмм при использовании для реализации ММР оперативных запоминающих устройств. Это позволяет использовать принцип динамического микропрограммирования, адаптировать алгоритм управления к изменениям в операционном автомате. Автоматы с «жесткой» логикой не представляют такой возможности и схема имеет заказной характер, а смена алгоритма управления требует изменений в связи между элементами АНЛ.

Рассмотрим задачу совершенствования характеристик автомата с принудительной адресацией микрокоманд.

Процесс синтез автомата с последовательной выборкой микрокоманд в случае ПА включает (Рисунок 4.7) все компоненты обычной структуры (СА, РАМІ, ММР, РМІ, ССС):

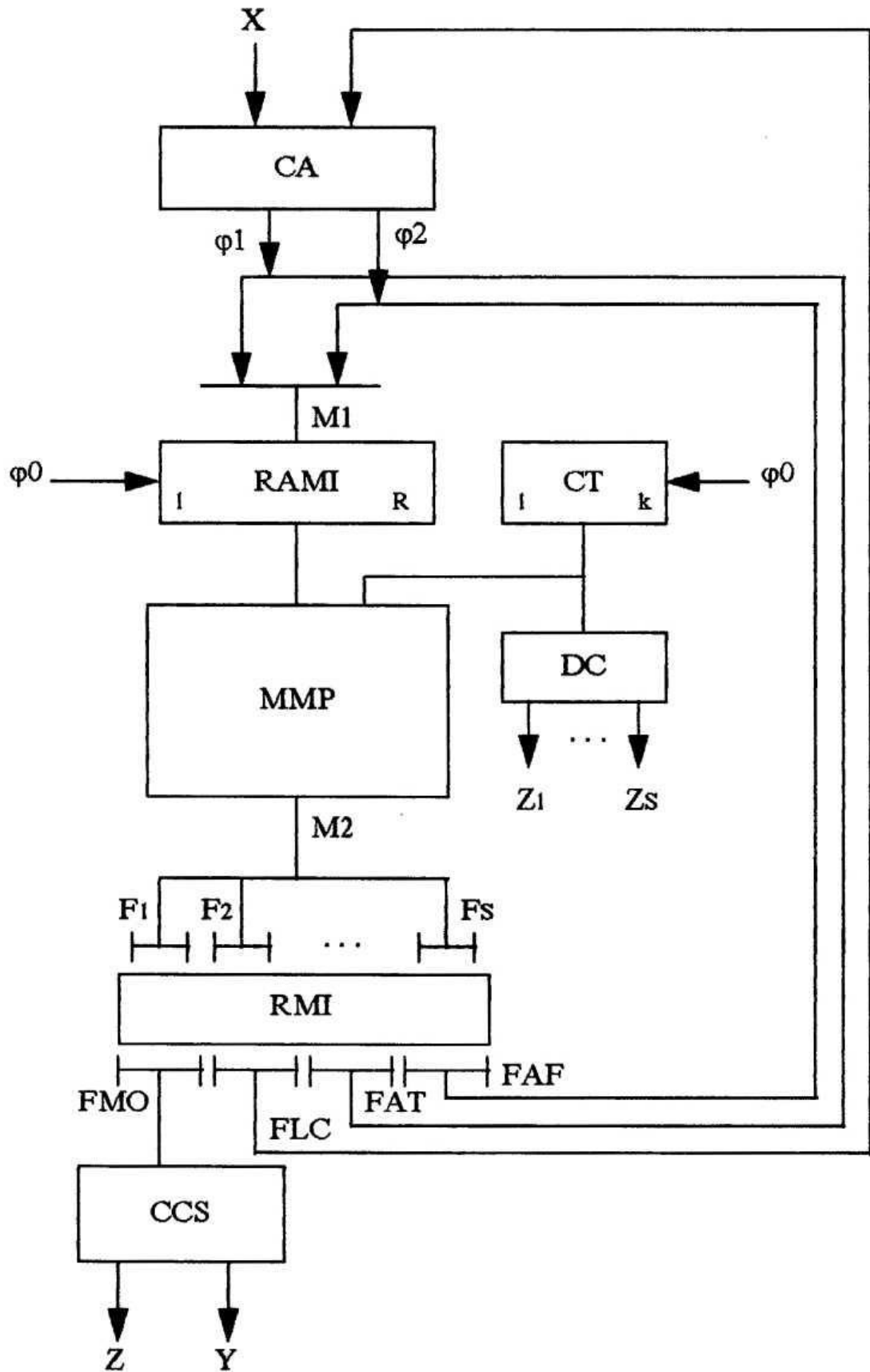


Рисунок 4.7 – Структура автомата с принудительной адресацией и последовательной выборкой микрокоманд

- k - разрядный счётчик СТ для задания числа шагов выборки МК;
- мультиплексор M2, для передача информации в RAMI из S источников.

Микрокоманда делится на S частей ($S \leq 2^k$) F_1, \dots, F_S , при этом S -я часть F_S передаётся через мультиплексор M2 по сигналу Z_s , формируемому дешифратором DC.

Рассмотрим пример реализации данного метода для автомата, содержимое ММР которого показано в таблице 4.2.

Микропрограмма содержит $M=8$ микрокоманд разрядности $r=m+l+2R=11$. Пусть для реализации ММР используется ПЗУ (2,4), тогда для этой цели достаточно $n_0 = \text{int}(M/2^S) * \text{int}(r/t) = 6$ корпусов ПЗУ.

Таблица 4.2 - Содержимое ММР при одноктактной выборкой микрокоманд

Адрес	FMO	FLC	FAT	FAF	№ МК
000	001	10	001	010	1
001	011	01	010	011	2
010	101	00	010	001	3
011	100	01	011	100	4
100	011	11	101	010	5
101	100	00	110	111	6
110	101	00	101	111	7
111	000	00	000	011	8

Разобьём каждую микрокоманду на 4 части ($k=2$), при этом размещение МК в ММР происходит следующим образом (Таблица 4.2):

- старшие R разрядов адреса МК совпадают с её первоначальным адресом;
- младшие k разрядов для F_s совпадают с двоичным эквивалентом числа $(S-1)$;
- младшие $2^k * r_0 - r$ разрядов микрокоманды, где r_0 - длина S - части МК, игнорируются и могут содержать любую информацию.

В нашем примере микрокоманда полностью выбирается за три такта (Таблица 4.3), то есть

$$S \neq 2^k. \quad (4.3)$$

Таблица 4.3 - Содержимое ММР при трёхтактной выборке микрокоманд

Адрес		Содержимое	Fs	№ МК
1 2 3	4 5	1 2 3 4		
0 0 0	0 0	0 0 1 1	F1	1
0 0 0	0 1	0 0 0 1	F2	
0 0 0	1 0	0 1 0 *	F3	
0 0 0	1 1	* * * *	F4	
0 0 1	0 0	0 1 1 0	F1	2
0 0 1	0 1	1 0 0 0	F2	
0 0 1	1 0	0 1 1 *	F3	
0 0 1	1 1	* * * *	F4	
1 1 1	0 0	0 0 0 0	F1	8
1 1 1	0 1	0 0 0 0	F2	
1 1 1	1 0	0 1 1 *	F3	
1 1 1	1 1	* * * *	F4	

Условие (4.3) приводит к наличию лишних тактов при выборке микрокоманды и, как следствие, к замедлению работы схемы в целом.

Рассмотрим эффективность предложенного метода с точки зрения экономии аппаратуры.

После разбиения МК на 2^k частей ММР фактически содержит $M_o = 2^k \cdot M$ микрокоманд разрядности $r_o = \text{int}(r/s)$. Таким образом, количество микросхем в ММР определяется как

$$n_1 = \text{int}(M_o/q) \cdot \text{int}(r_o/t).$$

С учётом введенных формул

$$n_1 = \text{int}(2^k \cdot M / q) \cdot \text{int}(r / (ts)). \quad (4.4)$$

Применение предложенного метода целесообразно, если

$$n_1 < n_0. \quad (4.5)$$

Исследуем зависимость изменения параметров n_0 и n_1 от t и q для нашего конкретного примера. Эти зависимости показаны на рисунке 4.8. Как следует из графиков, существует определённое сочетание параметров ПЗУ и характеристик микропрограммы, при котором начинает выполняться (4.5). Однако, увеличение выигрыша ограничено и существует нижний предел для функций $n_0(M, r, t, q)$ и $n_1(M, r, t, q)$. Предел определяется равенствами $M = q$ и $M_0 = q$, при этом число корпусов зависит только от числа выходов ПЗУ:

$$\lim_{q \rightarrow M} n_0 = \text{int}(r / t),$$

$$\lim_{q \rightarrow M_0} n_1 = \text{int}(r_0 / t).$$

Определим выигрыш в относительных величинах и рассмотрим функцию $\eta = n_0 / n_1$ для нашего примера (Рисунок 4.9). Как следует из графика, для конкретной микропрограммы графики не зависят от t и имеют верхний предел при $M_0 = q$

$$\lim_{q \rightarrow M_0} \eta = \frac{\text{int}(r / t)}{\text{int}(r_0 / t)} = S.$$

Таким образом, из графиков (Рисунок 4.8, Рисунок 4.9) можно сделать следующие выводы:

- абсолютное уменьшение числа корпусов имеет нижний предел, который достигается при $M_0 = q$;
- относительное уменьшение числа корпусов имеет верхний предел S , который достигается при $M_0 = q$.

Основной недостаток предложенной организации автомата – это уменьшение быстродействия по сравнению с традиционной структурой. Для устранения этого недостатка предлагаются три метода:

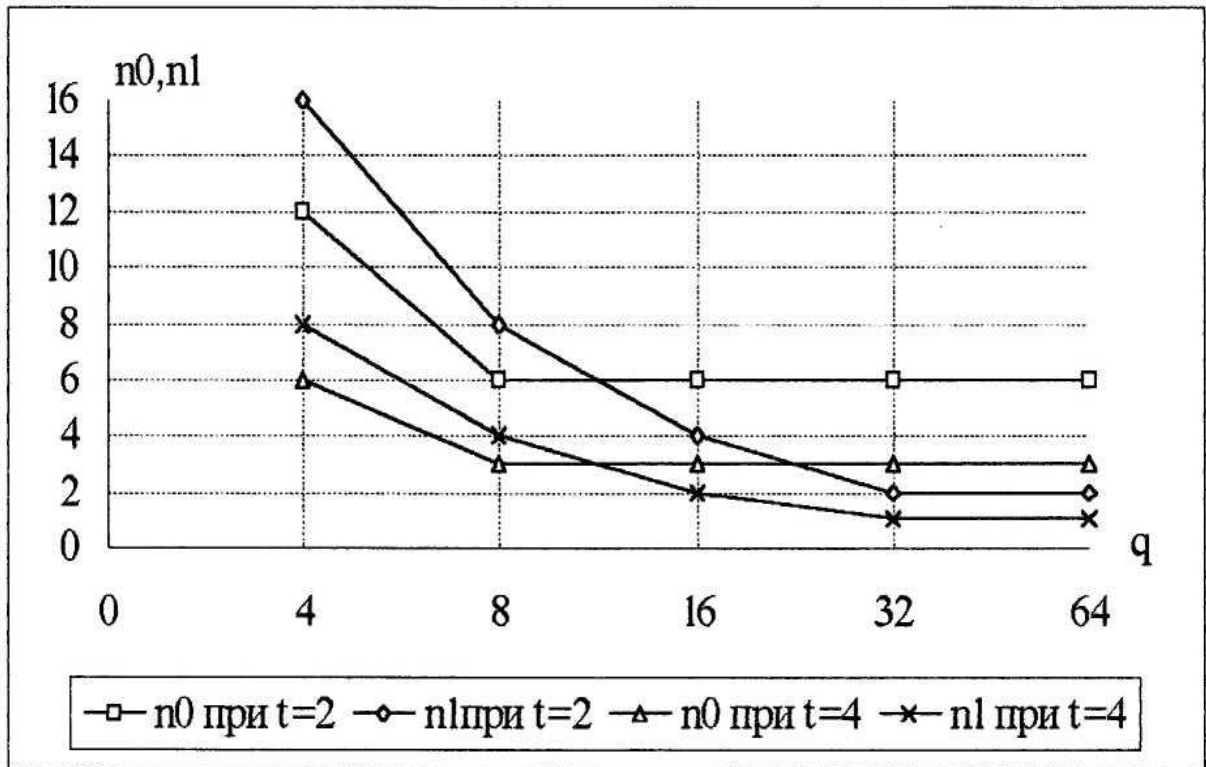


Рисунок 4.8 - Зависимость числа БИС ПЗУ от числа выходов и ёмкости ПЗУ для фиксированной MMP

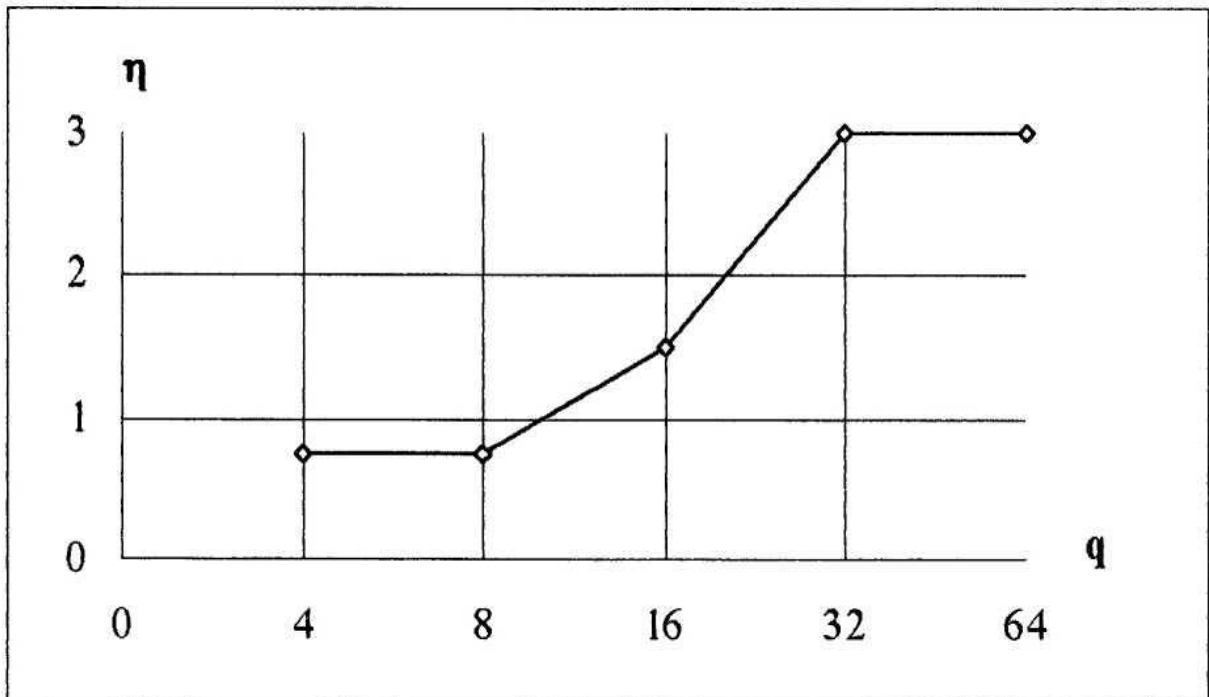


Рисунок 4.9 - Относительный выигрыш по числу БИС ПЗУ при многотактной организации выборки микрокоманд

а) Использование разной длительности такта синхронизации при выборке первой и последующих S-1 частей микрокоманды.

б) Окончание выборки за S тактов, если выполняется (4.3).

в) Запуск операционного автомата после выборки поля FMO.

Все методы основаны на усложнении схемы синхронизации автомата.

Первый метод аналогичен предложенному в работах [29, 57, 58] методу ускорения работы автомата с жёсткой логикой. В структуру автомата вводится специальная дополнительная схема синхронизации (АТС), управляемая с выхода DC сигналом Z_s (Рисунок 4.10 а). При этом переходы в пределах одной микрокоманды соответствуют переходам между дополнительными состояниями [77, с.133].

При переходах в пределах одной микрокоманды операционный автомат не запускается, что позволяет экономить время такта на t_{OA} , где t_{OA} - такт операционного автомата. Операционный автомат запускается по сигналу Z_s . На рисунке 4.10 б приведена диаграмма синхронизации автомата. Пока $Z_s = 0$ длительность такта УА складывается из времени срабатывания СТ, ММР и РМІ, при $Z_s=1$ длительность такта УА складывается из длительности времени срабатывания всех его составляющих и времени t_{OA} . Технические решения для синхрогенератора достаточно разработаны в работах [77, с.133, 62, с.29].

Оценим уменьшение времени выполнения алгоритма по сравнению с аналогичным параметром для схемы с многотактной выборкой микрокоманд. Пусть $t_{OA} = \chi t_{YA}$, где t_{YA} - время срабатывания управляющего автомата. Тогда время выполнения микрокоманды при традиционной схеме выборки $F_1 = t_{YA} + \chi \cdot t_{YA} = t_{YA} \cdot (1 + \chi)$, время выполнения микрокоманды при последовательной выборке микрокоманд и использовании $F_2 = S \cdot t_{YA} + \chi \cdot t_{YA} = t_{YA} \cdot (S + \chi)$.

Коэффициент замедления в работе ОА можно оценить выражением:

$$\alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{1 + \chi}{S + \chi}. \quad (4.6)$$

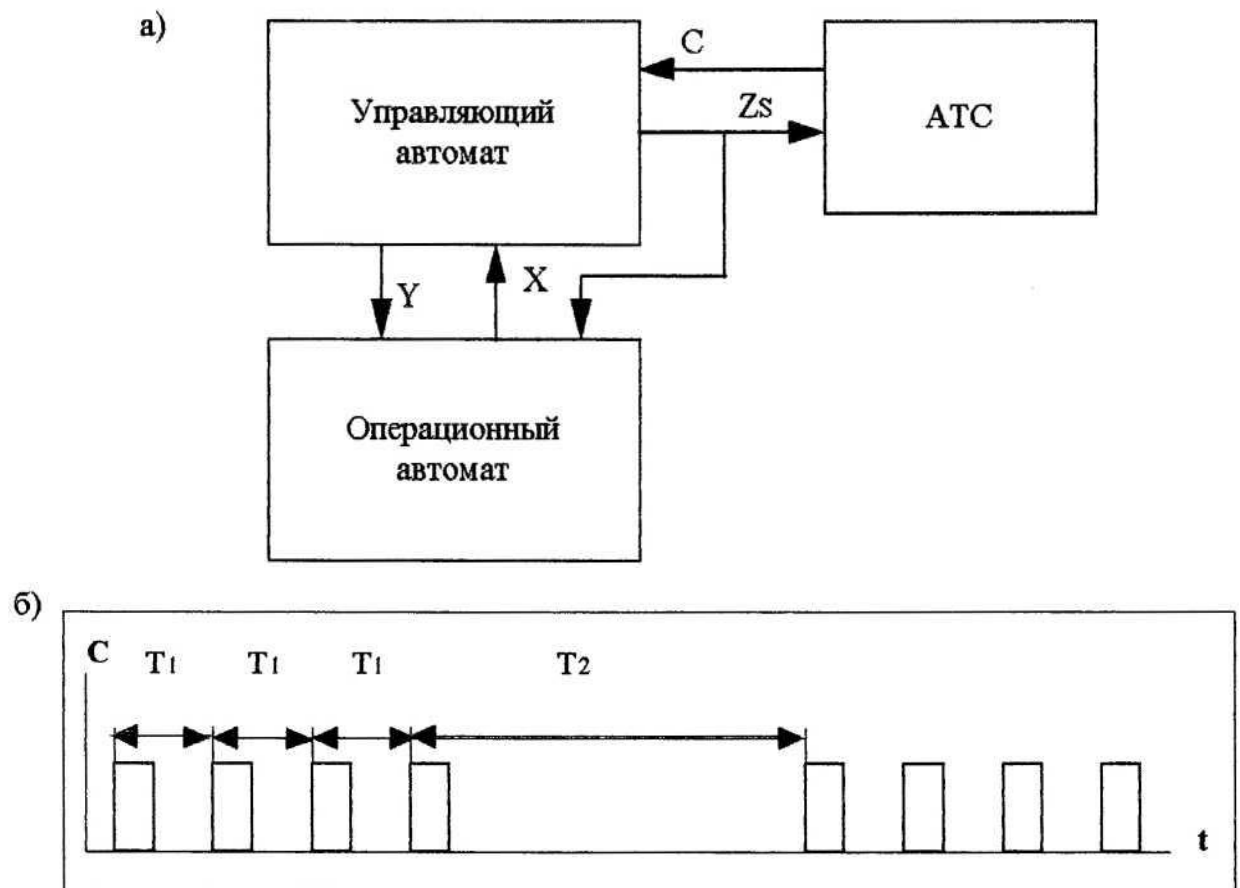


Рисунок 4.10 - Структура операционного устройства (а) и диаграмма синхронизации (б) для ускорения работы операционного устройства

Из графиков функции $\alpha(\chi, S)$, приведенных на рисунке 4.11 следует, что коэффициент замедления тем больше, чем на большее число частей разбита микрокоманда и чем меньше отношение времени такта операционного автомата к управляющему.

Необходимо отметить, что такие графики отражают картину запуска ОА сигналом Z_s . В противном случае параметр S в выражении (4.6) заменяется на 2^k и графики имеют следующий вид (Рисунок 4.12). Как видно из этих зависимостей коэффициент замедления увеличивается и на некоторых участках является константой. Точки этих участков определяются равенством

$$\text{int}(\log_2 i) = \text{int}(\log_2 i + 1).$$

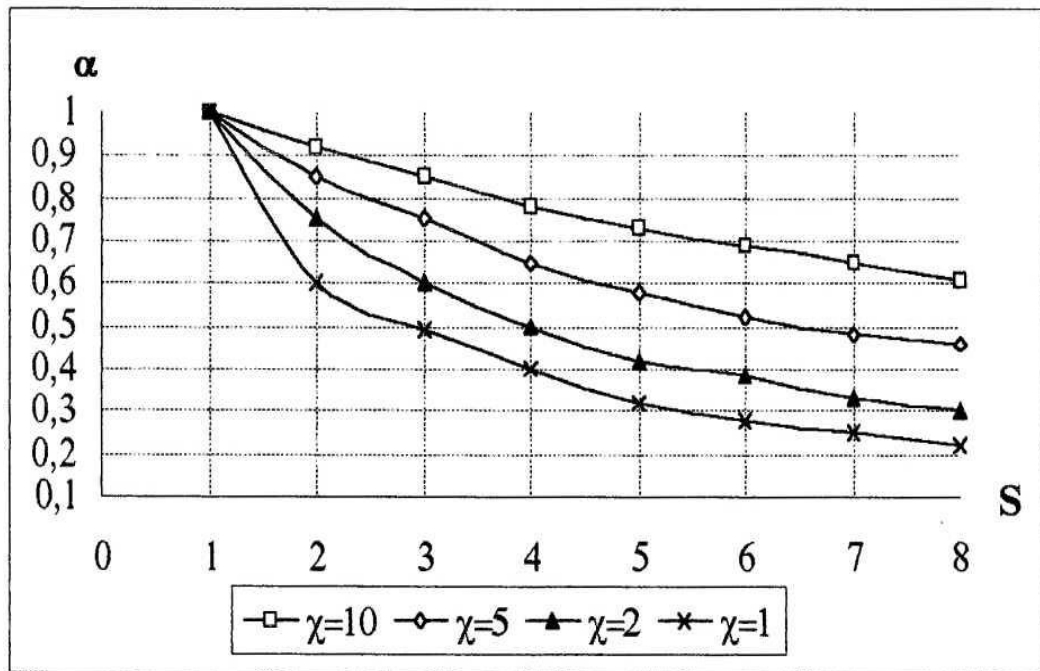


Рисунок 4.11 - Зависимость коэффициента замедления времени выполнения алгоритма от χ и S

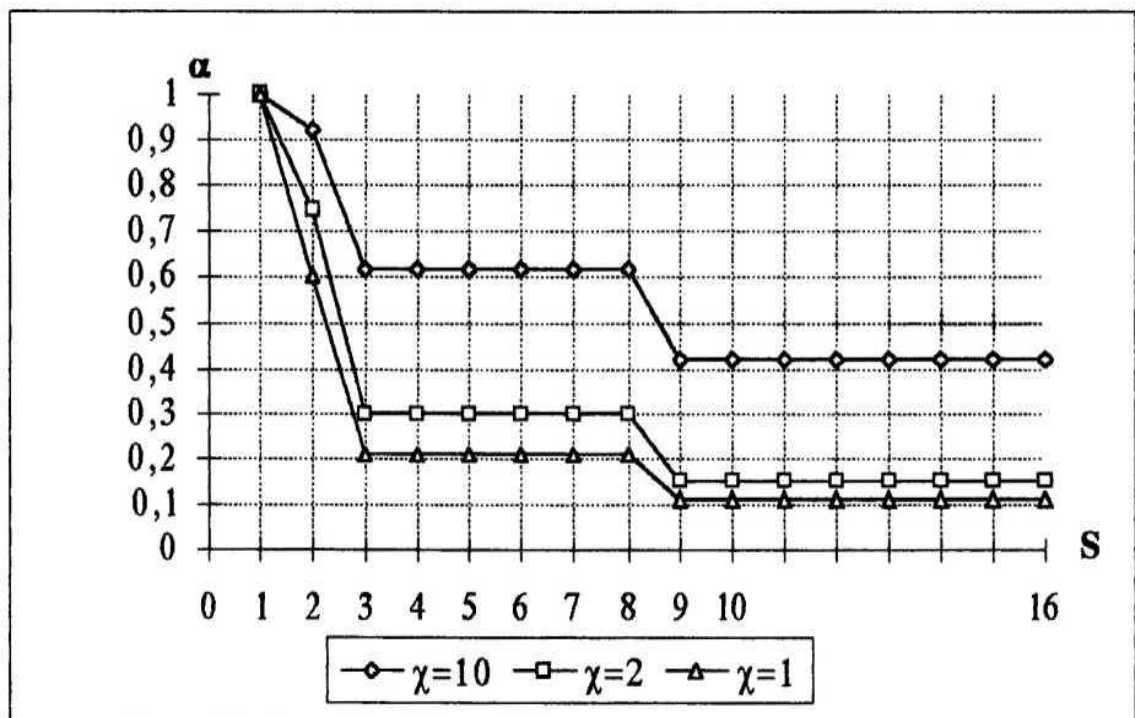


Рисунок 4.12 - Зависимость коэффициента замедления времени выполнения алгоритма от χ и S без ускоренного запуска операционного автомата

Третий метод основан на запуске операционного автомата после выборки поля ФМО. При этом достигается некоторая конвейеризация ОА и УА. Пусть $S = S_1 + S_2$, где S_1 - число частей микрокоманды, содержащее поле ФМО. При этом выражение (4.6) преобразовывается в выражение:

$$\alpha_1 = \frac{1 + \chi}{S_1 + \chi}. \quad (4.7)$$

При этом замедление определяется отношением S и S_1 . Чем ближе S к S_1 , тем ближе графики $\alpha_1(\chi, S, S_1)$ к графикам $\alpha(\chi, S)$.

Таким образом, коэффициент замедления тем меньше, чем меньшую часть микрокоманды занимает поле ФМО. Очевидно, максимальный выигрыш достигается при максимальном кодировании наборов микроопераций [27].

Приближение значений α и α_1 иллюстрируется содержанием таблицы 4.4.

Таблица 4.4 - Сравнительная характеристика коэффициентов замедления при ускоренном запуске ОА и без него

χ	S	S_1	α	α_1
2	2	1	0.75	1
		2	0.75	0.75
	4	1	0.5	1
		2	0.5	0.75
		3	0.5	0.6
		4	0.5	0.5
	8	1	0.3	1
		2	0.3	0.75
		4	0.3	0.6
		6	0.3	0.43
8		0.3	0.3	
10	2	1	0.92	1
		2	0.92	0.92
	4	1	0.78	1
		2	0.78	0.92
		3	0.78	0.85
		4	0.78	0.78
	8	1	0.62	1
		2	0.62	0.92
		4	0.62	0.78
		6	0.62	0.69
8		0.62	0.62	

Очевидно, результаты исследований инвариантны типу адресации микрокоманд.

Рассмотрим задачу синтез автомата с совмещением функций полей.

Рассмотрим совмещение функций полей FMO и FLC, при этом микрокоманды изменяют свой формат (Рисунок 4.13 а).

Функции полей FMO и FLC микрокоманд (Рисунок 4.13 а) совмещается в поле FMOLC разрядности

$$R_o = \text{int}(\log_2 T_o),$$

где

T_o - число пар <набор микроопераций, логическое условие>, встречающихся в ГСА.

При этом параметр T_o находится в диапазоне

$$T \leq T_o \leq M,$$

где

T - число различных наборов микроопераций в ГСА,

M - число микрокоманд.

Верхний предел достигается, если логические условия и наборы МО в ГСА не повторяются.

В этом случае автомат имеет структуру (Рисунок 4.13 б), в которой введён преобразователь FCC кода поля FMOLC в микрооперации Y и код логических условий FLC. Функционирование автомата происходит как и у традиционной схемы, однако схема FCC формирует и набор МО Y_t и код проверяемого логического условия.

Рассмотрим пример синтеза автомата по ГСА G1 (Рисунок 4.14).

В этом случае имеются наборы микроопераций:

$Y_o = 0$, $Y_1 = \{y_1, y_2\}$, $Y_2 = \{y_3\}$, $Y_3 = \{y_2, y_4\}$, $Y_4 = \{y_2, y_5\}$, $Y_5 = \{y_1, y_4\}$, $Y_6 = \{Z, y_2\}$
и пары $\alpha_1 = \langle Y_1, x_1 \rangle$, $\alpha_2 = \langle Y_2, x_2 \rangle$, $\alpha_3 = \langle Y_3, 0 \rangle$, $\alpha_4 = \langle Y_1, 0 \rangle$, $\alpha_5 = \langle Y_o, x_3 \rangle$, $\alpha_6 = \langle Y_4, x_4 \rangle$,
 $\alpha_7 = \langle Y_5, x_4 \rangle$, $\alpha_8 = \langle Y_o, x_5 \rangle$, $\alpha_9 = \langle Y_6, 0 \rangle$.

Число пар совпадает с числом микрокоманд ($T_o = M$), следовательно, $R_o = R$.

a)



б)

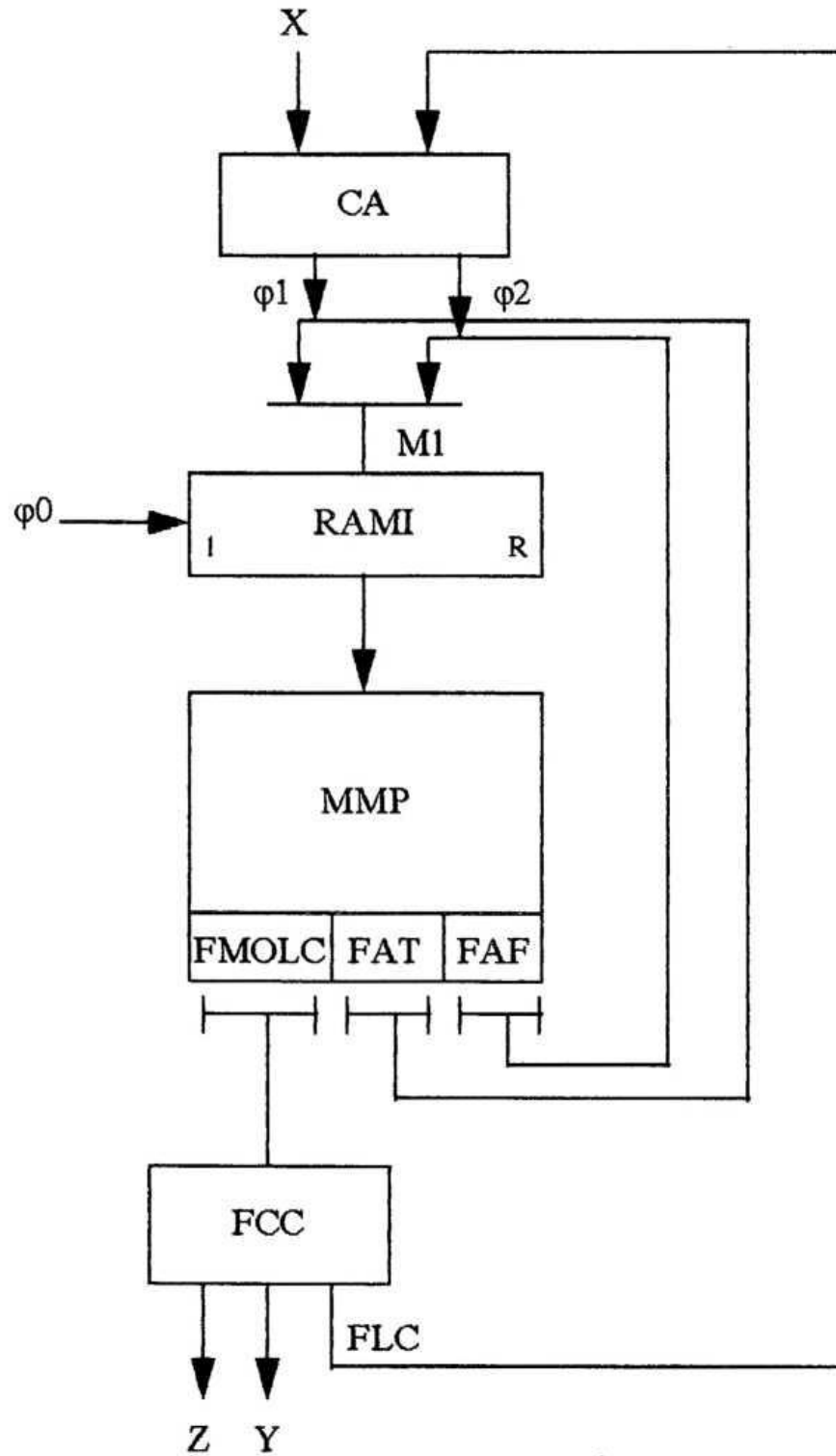


Рисунок 4.13 - Формат микрокоманд (а) и структурная схема (б) автомата с совмещением функций полей

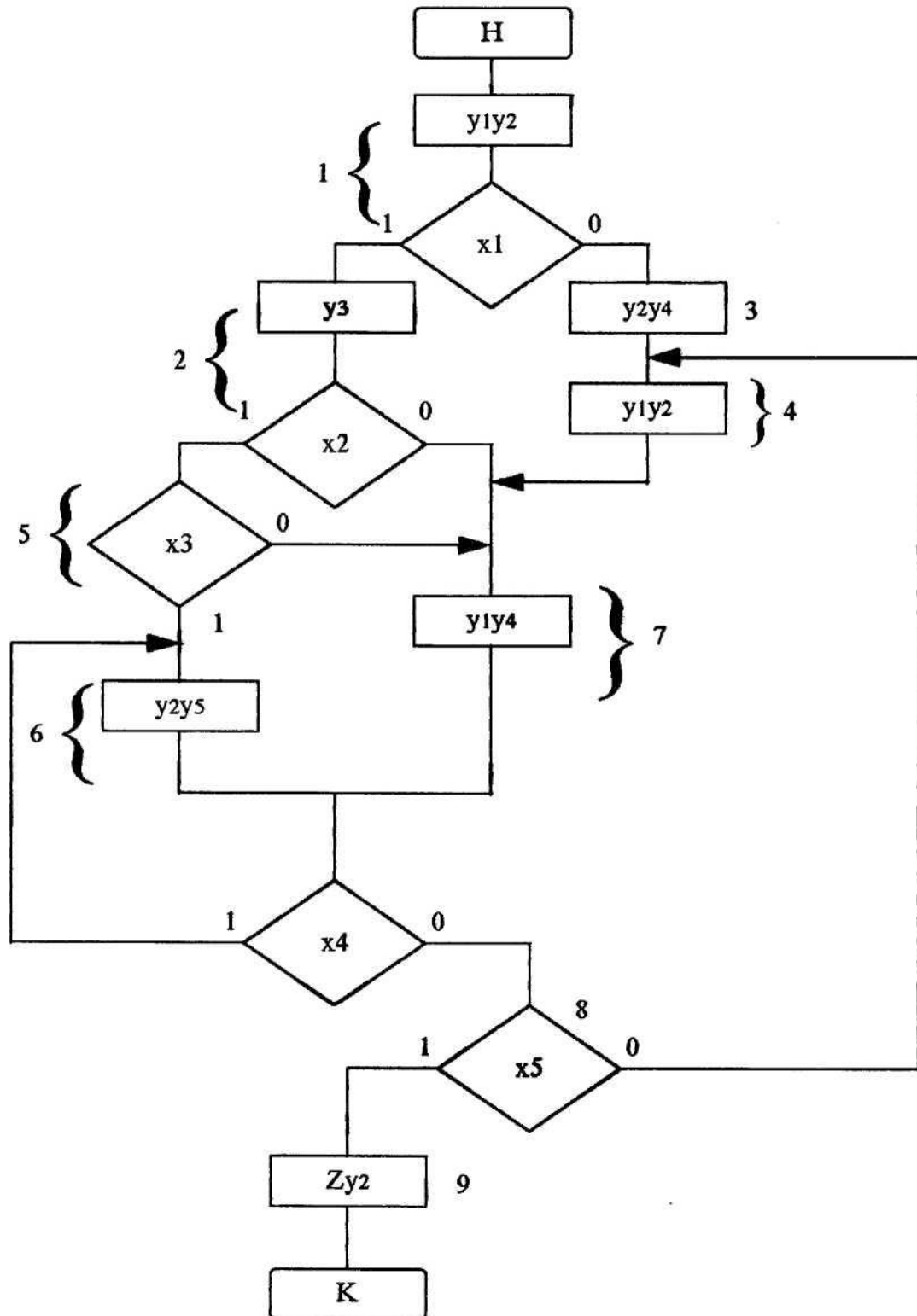


Рисунок 4.14 - Граф-схема алгоритма G1

Пусть адрес микрокоманды совпадает с её уменьшенным на единицу индексом, а код пары совпадает с адресом соответствующий МК. При этом содержимое ММР приведено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Содержимое ММР автомата с совмещением функций полей

Адрес	FMOLC	FAT	FAP	№ МК
0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 1	0 0 1 0	1
0 0 0 1	0 0 0 1	0 1 0 0	0 1 1 0	2
0 0 1 0	0 0 1 0	0 0 1 1	0 0 0 0	3
0 0 1 1	0 0 1 1	0 1 0 0	0 0 0 0	4
0 1 0 0	0 1 0 0	0 1 0 1	0 1 0 0	5
0 1 0 1	0 1 0 1	0 1 0 1	0 1 1 1	6
0 1 1 0	0 1 1 0	0 1 0 1	0 1 1 1	7
0 1 1 1	0 1 1 1	1 0 0 0	0 0 1 1	8
1 0 0 0	1 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	9

Для формирования схемы FCC достаточно задать таблицу, входами которой является поле FMOLC, а выходами - Z, Y и коды ЛУ. Пусть $C(x_1) = 001$, $C(x_2) = 010$, $C(x_3) = 011$, $C(x_4) = 100$, $C(x_5) = 101$, $C(0) = 000$.

С учётом такого кодирования таблицы 4.6 задаёт схему FCC.

При традиционном методе синтеза для задания полей FMO и FLC требуется 6 разрядов слова МК, при предлагаемом способе - 4 разряда. Если число выходов ПЗУ $t=2$, то экономится $\text{int}(M/q)$ корпусов ПЗУ.

Таблица 4.6 - Таблица FCC автомата с совмещением функций полей

Адрес	Y	C(x _c)
0 0 0 0	y ₁ y ₂	0 0 1
0 0 0 1	y ₃	0 1 0
0 0 1 0	y ₂ y ₄	0 0 0
0 0 1 1	y ₁ y ₂	0 0 0
0 1 0 0	0	0 1 1
0 1 0 1	y ₂ y ₅	1 0 0
0 1 1 0	y ₁ y ₄	1 0 0
0 1 1 1	0	1 0 1
1 0 0 0	Zy ₂	0 0 0

В общем случае экономия составляет:

$$\Delta = \text{int}\left(\frac{r-r_0}{t}\right) \cdot \text{int}\left(\frac{M}{q}\right),$$

где

r_0 - разрядность МК автомата с совмещением функций полей.

Очевидно, при $m=R$ структура (Рисунок 4.13) является избыточной, так как код FMOLC может быть задан содержимым регистра адреса RAMI. В этом случае схема имеет следующий вид (Рисунок 4.15а), а содержимое MMP (таблица 4.7) включает только поля FAT и FAF.

В случае $m=R$ экономия в числе корпусов может быть достигнута только в том случае, если для реализации FCC используется ПЛИМ или ПЛИС, так как применение ПЗУ приводит к схеме с унитарным кодированием микроопераций. Экономия достигается, если

$$n_1 + \text{int}\left(\frac{M}{q}\right) \cdot \text{int}\left(\frac{m+l+2R}{t}\right) > \text{int}\left(\frac{M}{q}\right) \cdot \text{int}\left(\frac{2R}{t}\right) + n_0, \quad (4.8)$$

где

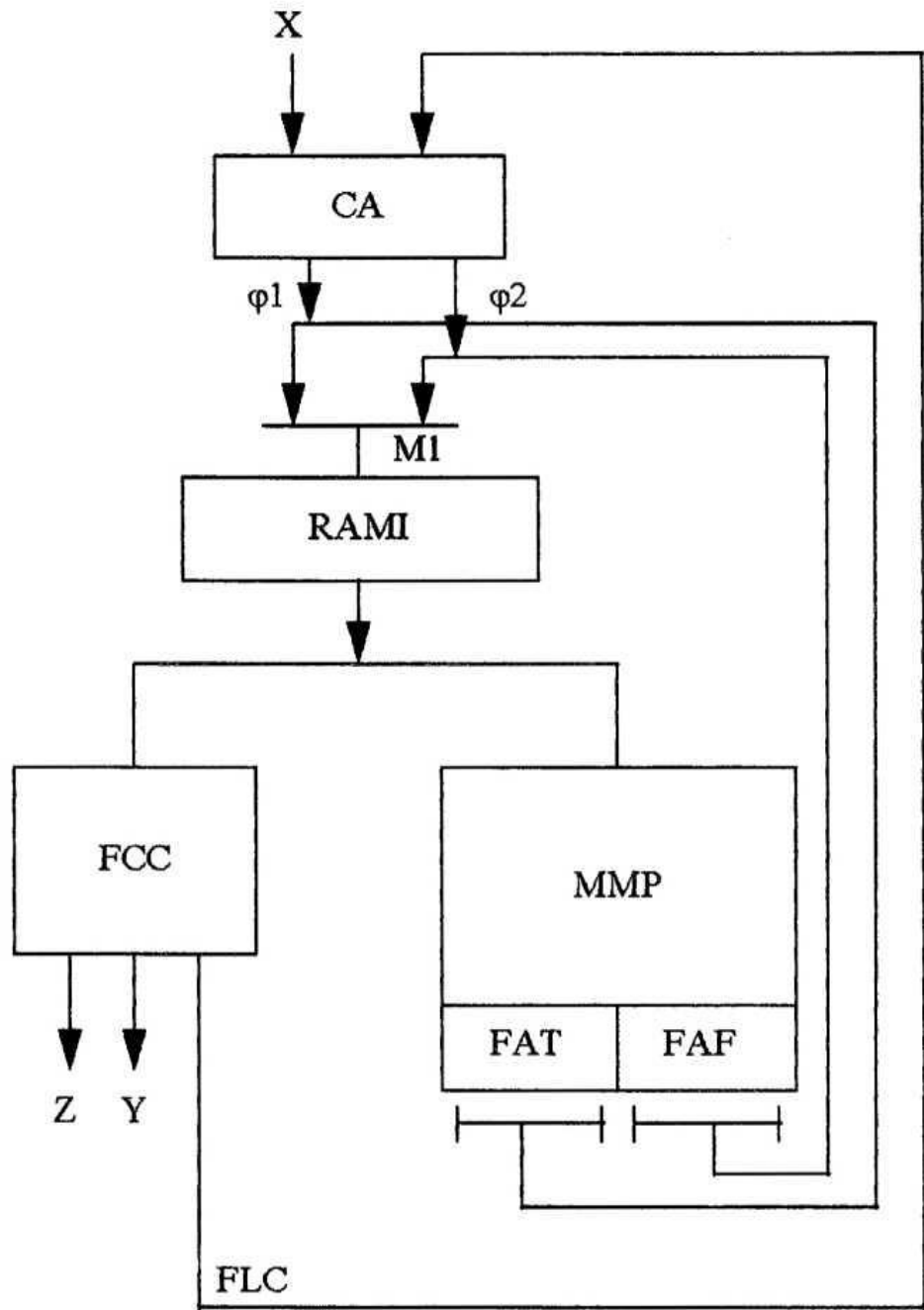
n_0 - число корпусов ПЛИМ (для определённости) в схеме FCC;

n_1 - число микросхем в схеме CCS.

Таблица 4.7 - Содержимое MMP при задании поля FLCMO содержимым RAMI

Адрес	FAT	FAF	№ МК
0 0 0 0	0 0 0 1	0 0 1 0	1
0 0 0 1	0 1 0 0	0 1 1 0	2
0 0 1 0	0 0 1 1	0 0 0 0	3
0 0 1 1	0 1 0 0	0 0 0 0	4
0 1 0 0	0 1 0 1	0 1 0 0	5
0 1 0 1	0 1 0 1	0 1 1 1	6
0 1 1 0	0 1 0 1	0 1 1 1	7
0 1 1 1	1 0 0 0	0 0 1 1	8
1 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0	9

а)



б)

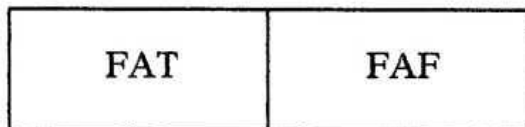


Рисунок 4.15 - Структура автомата (а) и формат микрокоманд (б) при задании поля FMOLC регистром адреса

Для минимизации параметра n_0 (и, следовательно, для максимизации разности левой и правой частей (4.8)) необходимо изменить алгоритм адресации. Адресация микрокоманд должна выполняться так, чтобы число термов в системе Y было минимальным. Для этого может быть использован алгоритм минимального кодирования из [77, с.134].

Для минимизации n_0 из (4.8) предлагается следующий алгоритм адресации МК:

- а) Построить граф связи микрокоманд, если МК O_i и O_j имеют общие микрооперации, то они связываются ребром (O_i, O_j) .
- б) Взвесить рёбра графа связи, приняв вес ребра равным числу микроопераций, общих для соединённых микрокоманд.
- в) Проранжировать пары по убыванию веса рёбер.
- г) Закодировать пары микрокоманд соседними кодами, используя алгоритм [77, с.134].

Для ГСА G1 граф связи приведен на рисунке 4.16, адреса микрокоманд - в карте Карно (Рисунок 4.17). В этом случае содержимое ММР очевидно, а микрооперации выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= A_1 \vee A_4 \vee A_7 = \overline{a_2 a_3} ; \\
 y_2 &= A_1 \vee A_3 \vee A_4 \vee A_6 \vee A_9 = \overline{a_1} ; \\
 y_3 &= A_2 = a_1 a_3 a_4 ; \\
 y_4 &= A_3 \vee A_7 = \overline{a_1} a_2 \vee a_1 \overline{a_3} a_4 ; \\
 y_5 &= A_6 = \overline{a_1} a_3 a_4 .
 \end{aligned}$$

Система получена с учётом наличия в карте неопределённых наборов. Как видно, для реализации этой системы достаточно 6 термов, при этом практически все МО выражаются одним термом и могут быть реализованы на элементах малой степени интеграции, что значительно уменьшает стоимость автомата в денежном выражении. Также упрощается реализация на заказных матрицах, так как матрица «или» практически вырождается [56].

Анализ этого метода позволяет сделать вывод, что совмещение функций

полей минимизирует количество оборудования в схеме, однако схема становится специализированной. В противном случае - если для реализации FCC используется ПЗУ - количество корпусов ПЗУ не меняется.

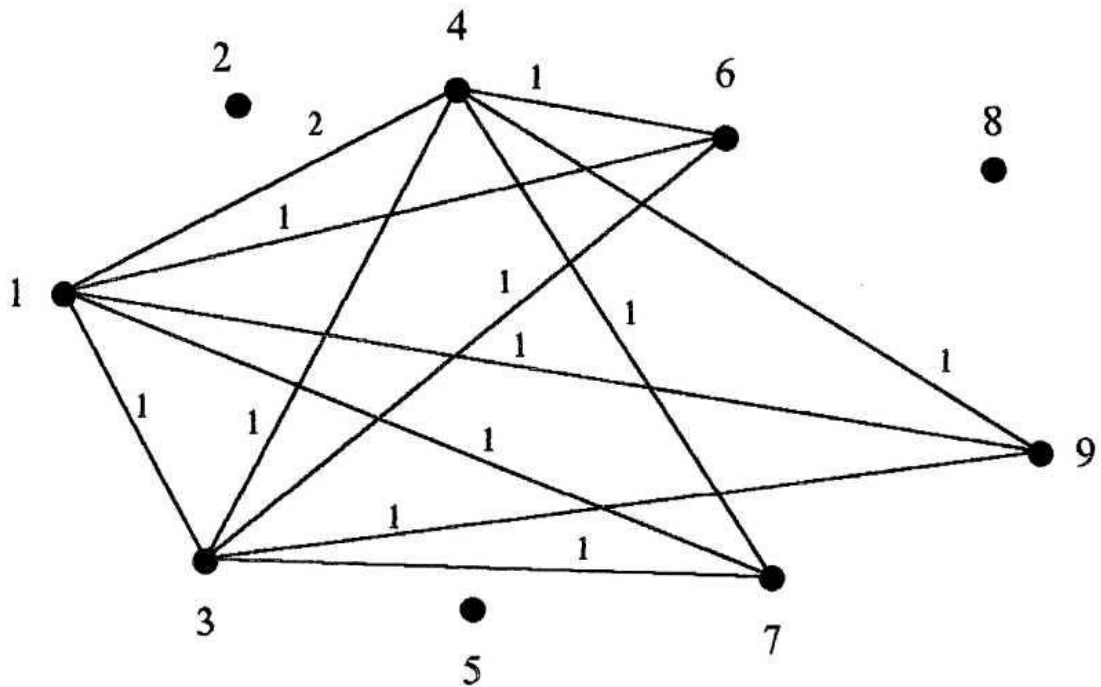


Рисунок 4.16 - Граф связи микрокоманд по общим микрооперациям

		a3a4			
		00	01	11	10
a1a2	00	1	4	6	9
	01	*	3	*	*
	11	8	*	*	*
	10	*	7	2	5

Рисунок 4.17 - Карта Карно для оптимальной адресации микрокоманд

Чтобы схема была универсальной необходимо для реализации FCC использовать ПЗУ. При этом выполнении условия

$$R_0 < R, \quad (4.9)$$

где $R_0 = \text{int}(\log_2 T_0)$.

При этом предпочтительнее оказывается структура на рисунке 4.13, так как структура на рисунке 4.15 накладывает жёсткие ограничения на размещение микрокоманд в ММР.

4.3. Рекомендации по применению и дальнейшему развитию автоматизированного управления процессами воздействия на угольные пласты

Внедрение автоматизированного управления процессом нагнетания обеспечивает повышение качества обработки пласта, а использование модифицированных структур и алгоритмов синтеза автоматов позволяют повысить быстродействие и снизить аппаратные затраты при создании управляющих устройств.

Применение автоматизированного контроля и управления при увлажнении угольных пластов позволяет повысить качество насыщения обрабатываемой зоны пласта, уменьшить численность персонала, занятого на выполнении работ, и сократить время, отводимое на предварительное нагнетание. По предварительным подсчетам, время окупаемости одного устройства – 10 месяцев.

Таким образом, установлено, что для обеспечения качественной реализации гидравлической обработки необходимо применение специализированного устройства для контроля параметров и управления процессом.

Результаты разработки алгоритмического и программного обеспечения позволяют рекомендовать применение и дальнейшее развитие комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты и системы автоматизированного управления процессом.

Дальнейшая перспектива разработок определяется внедрением в работы ГУ «Автоматгормаш» аппаратно-программного комплекса для автоматизированного

контроля параметров и управления процессом гидropневматического воздействия на угольные пласты как подсистемы автоматизированной системы управления комплексом мероприятий по улучшению условий и охраны труда на горных предприятиях.

4.4. Выводы по разделу 4

1. Последовательная многотактная выборка микрокоманды позволяет уменьшить число БИС ПЗУ в схеме микропрограммной памяти в Sраз, где S - число частей, на которые разбита микрокоманда. Для уменьшения влияния многотактности на время выполнения алгоритма целесообразно использовать режимы разной длительности циклов синхронизации и ускоренного запуска операционного автомата.

2. Совмещение функций полей FMOи FLCпозволяет уменьшить число микросхем в микропрограммной памяти. Только в случае специализации схемы автомата. Сохранение универсальности схемы уменьшает выигрыш который возможен только, если число пар $\langle Y, x_i \rangle$ не менее, чем в два раза меньше числа микрокоманд.

3. Введение дополнительной схемы адресации позволяет уменьшить время выполнения алгоритма и число микрокоманд в микропрограммной памяти. Выигрыш увеличивается по мере роста параметров микросхем, используемых для реализации дополнительной схемы адресации. В качестве элементного базиса целесообразно использовать ПЛИС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой получено новое решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в развитии структуры, математического и алгоритмического обеспечения системы автоматизированного управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты как средства борьбы с основными опасными явлениями при подземной угледобыче, обосновании параметров и алгоритмов функционирования системы и ее подсистем, обеспечивающих стабилизацию технологических характеристик процессов обработки угольных пластов и повышение на этой основе эффективности воздействия.

Основные научные результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом.

1. В результате анализа данных теоретических и экспериментальных исследований ряда авторов и организаций показано, что наиболее прогрессивным способом борьбы с основными опасностями при подземной добыче угля является комплексное гидропневматическое воздействие на разрабатываемый угольный пласт.

2. Установлено, что процесс гидравлического воздействия на угольный пласт сопровождается резкими колебаниями основных технологических параметров (давления и темпа нагнетания) в широком диапазоне, обусловленными выраженной анизотропией фильтрационных свойств угольного массива, что определяет необходимость применения средств контроля и управления технологическим оборудованием, обеспечивающих стабилизацию параметров процесса и повышение эффективности обработки пласта.

3. Методом математического моделирования показано, что процесс увлажнения угольного пласта при гидравлическом воздействии через одиночную скважину обуславливает высокий уровень вариации прироста влажности в обрабатываемом массиве.

4. Математические модели процесса гидравлического воздействия на угольный пласт составляют математическое обеспечение системы автоматизированного управления обработкой анизотропных массивов. Определены параметры технологии и системы управления:

а) контролируемые параметры – давление и темп нагнетания, объем поданной рабочей жидкости, время обработки, показатель качества и эффективности процесса;

б) управляющий параметр – темп нагнетания.

5. Разработаны структура и алгоритм функционирования устройства контроля параметров и управления процессом нагнетания жидкости в анизотропный пласт через одиночную скважину, которая является базовой единицей системы автоматизированного управления процессом гидравлического воздействия. В основу функционирования устройства положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером.

6. Разработана общая структура системы управления процессом гидравлического воздействия, включающая все практически используемые схемы и режимы гидравлической обработки. Разработаны структура и состав математического обеспечения системы, включающие математические модели процесса и алгоритмы их реализации.

7. Общий алгоритм решения задачи моделирования является универсальным, он обеспечивает возможность моделировать все включенные в систему схемы. Основная программа составлена для двумерной постановки задачи, причем рассматриваемая область может лежать как в плоскости пласта, так и в перпендикулярной ей плоскости. Различные варианты схем, режимов и положения области решения задаются набором исходных данных и заменой некоторых операторов программы.

8. Разработана структура подсистемы управления процессом пневмообработки, а также системы автоматизированного управления процессами комплексного гидропневматического воздействия на угольный пласт.

9. Разработана детерминированная математическая модель высоконапорного воздействия на угольный пласт с поверхности, на основании которой разработан алгоритм сброса давления, обеспечивающий безопасное для окружающей среды выполнения технологической операции.

10. Разработаны методы модификации параметров элементов системы управления, обеспечивающие повышение эффективности функционирования системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогрессивные технологические решения по комплексному освоению ресурсного потенциала угольных месторождений: монография / В.В. Мельник, В.Н. Павлыш, С.С. Гребенкин и др. ; // под общ. ред. В.В. Мельника, В.Н. Павлыша ; Донецк : ВИК, 2015. – 340с.
2. Автоматизированное управление процессом нагнетания жидкости в угольный пласт / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2003. – №2. – С.84-88.
3. Основные направления повышения технологического уровня и экологичности горного производства при подземной добыче угля с закладкой выработанных пространств шахт: монография / В.В. Мельник, С.С. Гребёнкин, В.Н. Павлыш и др. ; // под общ. ред. С.С. Гребёнкина, В.В. Мельника ; Донецк : ВИК, 2015. – 273с.
4. Математические модели и алгоритмы управления процессами динамического воздействия на анизотропные подземные массивы / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Проблемы искусственного интеллекта. – 2019. - № 2(13). – С.4-13.
5. Геоэкологические и экономико-математические аспекты обеспечения безопасных технологий угольных комплексов: монография / С.С. Гребёнкин, В.Н. Павлыш, В.Д. Рябичев и др. ; под общ. ред. С.С. Гребёнкина, В.Н. Павлыша. – Луганск : Ноулидж, 2016. - 340с.
6. Геомеханическое обоснование рациональных технологических решений по управлению состоянием массива горных пород при подземной добыче угля: монография / В.В. Мельник, В.Н. Павлыш, С.С. Гребенкин и др. ; // под общ. ред. В.Н. Павлыша, В.В. Мельника. – Донецк : ВИК, 2015.–327с.
7. Геомеханические и математические методы принятия решений по обеспечению экологически безопасных технологий закрытия угольных шахт: монография / С.С. Гребенкин, В.Н. Тихонов, В.Н. Павлыш и др. ; под общ. ред. С.С. Гребенкина, В.Н. Павлыша – Донецк : ВИК, 2009. – 361с.

8. ДНАОП 1.1.30-1.ХХ-04. Безопасное ведение горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям (1-я редакция). – К.: Минтопэнерго Украины, 2004. – 268с.

9. Организационно-технологическое и научно-методическое обеспечение проектирования угледобывающих предприятий: монография / В.В. Мельник, В.В. Агафонов, С.С. Гребёнкин и др. ; // под общ. ред. В.В. Мельника, В.В. Агафопова. – Донецк : ВИК, 2015.–380с.

10. Гидродинамическое воздействие на газонасыщенные угольные пласты / А.Ф. Булат, К.К. Софийский, Д.П. Силин и др. – Днепропетровск, 2003. – 220 с.

11. Физико-технические основы процессов гидравлического воздействия на угольные пласты / монография / В.Н. Павлыш, С.С. Гребенкин. – Донецк : ВИК, 2006. – 269с.

12. Павлыш В.Н., Гребенкин С.С., Стеблин В.В. Перспективы развития теории и технологии комплексного гидродневматического воздействия на угольный пласт / Проблемы горного дела и экологии горного производства: Материалы VIII международной научно-практической конференции (25-26 апреля 2013 г., г. Антрацит).– Донецк : Світ книги, 2013.– С.25-29.

13. Сусленков Б.Д., Павлыш В.Н. Совершенствование режимов насыщения угольного пласта текучим // Добыча угля подземным способом. – М.: ЦНИЭИуголь, 1978. – №7(139). – С.32-33.

14. Теория и практика проектирования систем угольных шахт, процессов подземных горных работ и забойного оборудования с применением математического моделирования: монография / С.С. Гребенкин, В.Н. Павлыш, В.Д. Рябичев и др.; // под общ. ред. С.С. Гребенкина, В.Н. Павлыша. – Донецк : ВИК, 2011.– 390с.

15. Результаты региональной гидрообработки крутого пласта растворами ПАВ / А.Е. Жуков, В.А. Канин, Г.П. Стариков, В.В. Дмитренко // Уголь Украины. – 1989. – № 11.– С.19–24.

16. Жуков А.Е., Канин В.А., Лунев С.Г. Региональная гидрообработка выбросоопасного пласта растворами ПАВ из нулевых выработок // Тезисы

докладов Всесоюзной научно-технической конференции «Интенсивная и безопасная технология разработки угольных и сланцевых месторождений». – М., 1989. – 23с.

17. Алексеев А.Д., Стариков Г.П., Малюга М.Ф., Аносов О.С. Обработка выбросоопасных пластов водными растворами ПАВ. – К.: Техніка, 1988. – 86с.

18. Пучков А.А. Проблема метана в современном горном производстве // Современные проблемы шахтного метана : сб. науч. тр. – М.: Горные науки, 2005. – С.16–22.

19. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт / К.З. Ушаков. – М.: Горные науки, 2004. – 481с.

20. Ушаков К.З. Гидравлика / К.З. Ушаков. – М.: Горное образование, 2009. – 414с.

21. Москаленко Э.М., Павлыш В.Н., Штерн Ю.М. Исследование эффективности каскадного нагнетания жидкости в анизотропный угольный пласт // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. – М.: ЦНИЭИуголь, 1981. – №3(165). – С.18-20.

22. Павлыш В.Н., Тарабаева И.В. Исследование процесса напорной фильтрации жидкости в анизотропной среде методом математического моделирования (на примере увлажнения угольного пласта) / Вестник ДонНУ. Сер. А: Естественные науки, № 2. – ГОУВПО «ДонНУ», 2017. – С.75-83.

23. Математическое моделирование процесса движения газоздушной смеси в сплошной среде (на примере угольного пласта) / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Проблемы искусственного интеллекта. - № 3(10). – 2018. – С.104-112.

24. Васючков Ю.Ф. Дегазация угольного пласта с использованием его физико-химической обработки. – М.: ЦНИЭИуголь, 1976. – 68с.

25. Научно-технологические основы управления состоянием массива горных пород: учебное пособие / С.С. Гребёнкин, В.И. Бондаренко, В.Н. Павлыш и др. // под общ. ред. С.С. Гребёнкина, В.В. Мельника и В.И. Бондаренко.– Донецк : ВИК, 2013.–515с.

26. Павлыш В.Н. Технология каскадной гидрообработки пласта как способ преодоления его анизотропии // Известия Донецкого горного института. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – Вып.2. – С.58-60.
27. Павлыш В.Н., Штерн Ю.М. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты / монография.– Донецк : ВИК, 2007. – 400с.
28. Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты: монография. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. – 347с.
29. Москаленко Э.М., Павлыш В.Н., Штерн Ю.М. Рекомендации по автоматизации проектирования гидродинамического воздействия на угольный пласт: учеб. пособие. – М., 1981. – 61с.
30. S. Grebyonkin, V. Pavlysh & O. Grebyonkina Development of mathematical foundations and technological support of the process of complex hydro-pneumatic impact on coal seams / Geomechanical processes during underground mining // School of underground mining. – Published by: CRC Press / Balkema. – Leiden, Netherlands, 2012. – p.119-121.
31. Павлыш В.Н. Математическое моделирование процесса увлажнения угольного пласта // «ICAMC'98 - 13th – ASRTP - 13th», World Mining Congress. – High Tatras, Slovak Republic. – 1998. – С.219-222.
32. Лазебная Л.А. Применение математического моделирования для решения задачи повышения эффективности управления состоянием угольного пласта / Информатика и кибернетика, №1(15). – 2019. - С.36-41.
33. Гребьонкін С.С., Павлыш В.М., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А. Управління станом масиву гірських порід: навчальний посібник. – Донецк : ВІК, 2010. – 191с.
34. Павлыш В.Н., Гребенкин С.С., Аль-Джерди Орва, Крохмалева Е.Г. Основы построения проекта системы управления технологическим процессом гидравлического воздействия на анизотропный массив / Проектно-орієнтована діяльність соціально-економічних систем: сучасний погляд: зб. наукових праць

серія «Технічні науки: управління проектами та програмами»: вип.176, ДонДУУ. – Донецьк : ДонДУУ, 2010. – Т.11. – с.116-122.

35. Павлыш В.Н., Перетолчина Г.Б. Математическое моделирование нестационарных процессов в среде с нечетко определенными параметрами / Проблемы искусственного интеллекта. – 2018. - № 2(9). – С.33-45.

36. Гребенкин С.С., Павлыш В.Н., Кукуяшный Э.В. Сравнительная оценка эффективности технологических схем гидравлического воздействия на угольные пласты // Матер. V междунар. науч.- практ. конф. «Проблемы горного дела и экологии горного производства» (14-15 мая 2010г. г. Антрацит). – Донецк : Вебер (Донецкое отделение), 2010. – С.31-36.

37. Павлыш В.Н., Аль-Джерди Орва Проектирование технологической схемы гидравлического воздействия на угольные пласты // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // сб. тр. IV Междунар. науч.-метод. конф. в г. Хаммамет с 28 октября по 6 ноября 2010. – Донецк : ДонНТУ, 2010. – С.218-221.

38. Павлыш В.Н., Гребенкин С.С., Крохмалева Е.Г., Аль-Джерди Орва Управление проектом системы гидравлического воздействия на угольные пласты / Проектно-орієнтована діяльність соціально-економічних систем: сучасний погляд: зб. наук. праць сер. «Технічні науки»; вип. 158. - Т.11. - ДонДУУ. – Донецк : ДонДУУ, 2010.- С.113-120.

39. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. – М.: Недра, 1979. – 271с.

40. Павлыш В.Н. Математическая модель процесса гидродинамического воздействия на угольный пласт // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2003. – №2. – С.58-62.

41. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Постановка задачи управления процессом пневматического воздействия на угольный пласт / Машиностроение и техносфера XXI века // сб. тр. XXI Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе, 15–20 сент. 2014 г. – Донецк : МСМ, 2014. – С.193-198.

42. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А., Перинская Е.В. Применение математического моделирования к исследованию параметров динамических процессов / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров // сб. тр. VII Междунар. научн.- метод. конф. в городе Сусс (Тунис) с 08 по 17 октября 2013г. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – С.184-187.

43. Павлыш В.М., Гребьонкіна О.С., Демченко Ю.І. Чисельно-аналітичний метод розрахунку параметрів гідравлічної дії на вугільний пласт // Науковий вісник національного гірничого університету, науково-технічний журнал, вип. 6. – НГУ, Дніпропетровськ, 2009. – с.38–42.

44. S. Grebyonkin, V. Pavlysh & O. Grebyonkina. Application of mathematical simulation method for solving the task focused on efficiency increase of hydraulic influence process on coal seam: Technical and Geoinformational Systems in Mining / PROCEEDINGS OF THE SCHOOL OF UNDERGROUND MINING, DNIPROPETROVSK / YALTA, UKRAINE, 2-8 OCTOBER, 2011. – CRC Press / Balkema, Leiden, The Netherlands, 2011. – P.313-317.

45. Применение математического моделирования в системе автоматического управления процессом гидрообработки трещиновато-пористого массива в условиях неопределенности фильтрационных параметров среды / В.Н. Павлыш, Аль Джерди Орва // Искусственный интеллект. - №1(59), 2013. – С.140-148.

46. Monsef Y. Modelling and simulation of complex systems: Methods, Techniques and Tools / Y. Monsef . – SCS, European Publishing House, Erlangen, 2000. – 296 p.

47. Newell J.C. Modeling and analysis of dynamic systems. / J.C. Newell, C. Close, D.R. Frederick. – 3rd edition. – Wiley, 2001. – 592p.

48. Павлыш В.Н. Математическое моделирование процесса увлажнения угольного пласта // «ICAMC'98 – 13th – ASRTP - 13th», World Mining Congress. – High Tatras, Slovak Republic. – 1998. – С.219-222.

49. Применение математического моделирования в системе автоматизированного проектирования технологии гидравлического воздействия

на угольный пласт / В.Н. Павлыш, Г.Б. Перетолчина // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXV междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 10-16 сент. 2018 г. В 2-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2018. Т. 2. – с.40-45.

50. Павлыш В.М., Гребьонкіна О.С., Серьожніков С.С. Розрахунок параметрів процесу нагнітання рідини при проектуванні технологічних схем гідравлічної дії на вугільні пласти // Науковий вісник національного гірничого університету, науково-технічний журнал, вип. 4. – НГУ, Дніпропетровськ, 2009. – с.27–30.

51. Численная модель процесса управления состоянием угольного пласта путем гидродинамического воздействия без нарушения сплошности / В.Н. Павлыш, О.П. Кирсанова // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров : сб. тр. IV Междунар. науч.- метод. конф. в г. Хаммамет с 28 октября по 6 ноября 2010. – Донецк : ДонНТУ, 2010. – с.221-224.

52. Колесов Ю.Б. Визуальное моделирование сложных динамических систем / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: Изд-во Мир и Семья & Интерлайн, 2001. – 242с.

53. Weise Th. Global Optimization Algorithms – Theory and Application [E-Book] / University of Kassel, Distributed Systems Group. – Kassel, 2006-2007. – 847p. – HTTP-address: <http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>.

54. Афанасьев В. Н. Математическая теория конструирования систем управления : учебник для вузов / В.Б. Колмановский, В.Р. Носов, В.Н. Афанасьев. – М. : Высшая школа, 1998. – 575с. – ISBN 5-06- 002662-0.

55. Редукция краевой задачи моделирования процесса получения сопутствующих материалов при обогащении полезных ископаемых к системе критериальных зависимостей / В.Н. Павлыш, Е.В. Перинская // Машиностроение и техносфера XXI века : сб. тр. XXIII междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 12-18 сент. 2016 г. – Донецк : МСМ, 2016. - Т. 2. – С.68-71.

56. Математические модели и вычислительные методы в теории и практике проектирования систем угольных шахт: монография / С.С. Гребёнкин,

В.В. Мельник, В.Н. Павлыш и др. ;под ред. В.Н. Павлыша, С.С. Гребёнкина. – Луганск : Ноулидж , 2017.– 291с.

57. Павлыш В.Н. Математическое моделирование и расчет параметров технологических схем гидродинамического воздействия на угольный пласт // Матер. междунар. конф. «III школа геомеханики». – Гливице-Устронь, Польша, 1998. – ч. II. – С.109-118.

58. Абуталиев Ф.Б. Решение задач неустановившейся фильтрации: численные и аналитические методы. – Ташкент: Фан, 1972. – 338с.

59. Абуталиев Ф.Б. и др. Методы математического моделирования гидрогеологических процессов. – М.: Недра, 1972. – 285с.

60. Becker H. Kohlenstosstränkung //Ergebnisse von Unterachungen auf dem Gebiet der Staub und Silikosebekämpfung im Steikolenbergbau. – Essen:Verlag Glückauf, 1977. – Band 11. – P.15-22.

61. Математическая модель и исследование переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт Донбасса / В.В. Лапко, О.Ю. Чередникова // Вісті Донецького гірничого інституту. - 2008. – №2. – С.115–121.

62. Задача управления процессом пневмодинамического воздействия на газосодержащие массивы / В.Н. Павлыш, Аль-Джерди Орва // Вісті Донецького гірничого інституту. - 2012. -№ 1(30)-2(31)'2012. – С.29-34.

63. Lapko V.V. Ein modellierungsansatz für aerodynamische netze mit verteilten parametern. / V.V. Lapko. – In: HohmannG. (Hrsg.): Tagungsband 13. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Weimar 1999. – P.325 – 330.

64. Lapko V.V. Modellgestützte entwicklung und untersuchung von adaptiven steuerungssystem fuer netzobjekte / V.V. Lapko // In Alex Kuhn und Wenzel: Tagungsband 11. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Dortmund, 1997. – P.739–744.

65. Автоматизация управления процессом комплексного гидropневматического воздействия на угольный пласт / В.Н. Павлыш,

Л.А. Лазебная // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2014. - №1(34)-№2(35) – С.405-409.

66. Задача синтеза системы автоматизированного управления процессами гидропневматического воздействия на угольный пласт / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров : сб. тр. VIII Междунар. науч.-метод. конф. в г. Хаммамет (Тунис) с 28 сентября по 5 октября 2014 г. – Донецк : МСМ, 2014. – С.93-97.

67. Шестаков М.П. Синтез системы управления шахтной вентиляции с динамическим регулятором / М.П. Шестаков, М.Н. Кузнецов. Инженерный вестник Дона, №2, 2007. – С.123-131.

68. Павлыш В.Н., Штерн Ю.М., Аль-Халаса Насер, Хасер Исмаил Даех Управление проектом комплекса пневмодинамического воздействия на угольные пласты и породные массивы / Проектно-орієнтована діяльність соціально-економічних систем: сучасний погляд: зб. наук. праць сер. «Технічні науки» вип.158. -Т.11, ДонДУУ. – Донецк: ДонДУУ, 2010. - С.120-126.

69. Математическая модель и алгоритм управления процессом пневмообработки угольного пласта для снижения его газонасыщенности / В.Н. Павлыш, А.С. Гребенкина, С.С. Сережников // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах : сб. научных трудов МакНИИ №2(24). – Макеевка : МакНИИ, 2010. – С.28-34.

70. Пучков Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт / Л.А. Пучков, Л.А. Бахвалов. – М.: Недра, 1992. – 399с.

71. Антипов И.В., Турбор И.А. Применение МГУА для формализации производственных процессов и операций в очистных забоях / Физико-технические проблемы горного производства, вып. 15 // «Физические, геомеханические и технологические проблемы добычи полезных ископаемых». – Донецк : Институт физики горных процессов НАН Украины, 2012. – С.55-63.

72. Шестаков М.П. Синтез системы управления шахтной вентиляции с динамическим регулятором / М.П. Шестаков, М.Н. Кузнецов. Инженерный вестник Дона, №2, 2007. – С.123-131.

73. Аппаратно-программный комплекс автоматизации контроля состояния рудничной атмосферы / Святный В.А., Лапко В.В., Достлев Ю.С., Краснокутский В.А., Иванов А.Ю. // Донбасс-2020: Наука и техника - производству: матер. науч.- практ. конф., 5-6 янв. 2002г..–Донецк : ДонНТУ, 2002. – С.163-173.

74. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 606с. – ISBN -978-5-9912-0060-8.

75. Discrete abstractions of hybrid systems / R. Alur, T. Henzinger, G. Lafferriere, G. Pappas // Proceedings of the IEEE, 2000. – V. 88. – № 7. – P.971-984.

76. Святный В.А. Комбинирование сервисно-ориентированного подхода и UML для комплексной реализации дискретных моделей технологических процессов (на примере объектов угольной промышленности) // В.А. Святный, А.А. Чепцов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. - серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка» (ІКОТ-2008). Випуск 9(132).– Донецьк : ДонНТУ. – 2008. – С.27-32.

77. Мороз О.К., Павлыш В.Н., Аль-Дахле М.З. Автоматизация управления процессом гидродинамической обработки угольного пласта // Матер. междунар. конф. «III школа геомеханики». – Польша, Гливице-Устронь, 1997. – Часть II. – С.133-136.

78. Автоматизированный контроль процесса нагнетания жидкости в угольный массив / О.К. Мороз, В.Н. Павлыш, О.В. Чеснокова, Л.А. Кондаревич // World Mining Congress «ICAMC'98 – 13th International Conference on Automation in Mining. ASRTP'98 – 13th International Conference on Process Control and Simulation». – High Tatras, Slovak Republic, 1998. – С.482-485.

79. Алгоритмы функционирования и технические элементы подсистемы автоматизированного управления процессом нагнетания жидкости в угольный

пласт / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева, Л.А. Лазебная // Проблемы искусственного интеллекта, 2017 № 3(6). – С.32–39.

80. О.К. Мороз, В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная Аппаратное обеспечение автоматизированного контроля параметров процесса гидродинамической обработки угольного пласта // Матер. междунар. конф. «IX международный симпозиум Геотехника 2000». – Гливице - Устронь, Польша, 2000. – С.105-110.

81. В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная, О.В. Чеснокова Автоматизация контроля и управления процессом нагнетания жидкости в пласт // Матер. 4-го междунар. науч.-техн. сем. «Практика и перспективы развития институционального партнерства». – Донецк-Таганрог, 2003. – Т.1. – С.61-67.

82. Лариков О.К., Мошкович Е.М. Качественные методы принятия решений. – М.: Наука, 1996.– 288с.

83. Белозеров В.Е. Геометрический подход к проблеме стабилизации систем управления: монография / В.Е. Белозеров, С.А. Волкова. – Днепропетровск : Изд-во ДНУ, 2006. – 440 с.

84. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич. – Киев : Наукова думка, 2006. – 267с.

85. Бурков В.К., Ириков В.К. Модели и методы управления организационными системами. – М.: Наука, 1994. – 346с.

86. Подчукаев В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы): учебное пособие / В.А. Подчукаев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 392с.

87. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1977. – 656с.

88. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736с.

89. Аль-Джерди Орва Разработка алгоритма функционирования устройства управления процессом гидравлического воздействия на подземные газонасыщенные массивы / Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях (СИТОНИ-2012) / Материалы III

Международ. науч.- техн. конф. : сб. тр. студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей. – Донецк: ДонНТУ, 2012.– С.100-104.

90. V.N. Pavlysh, L.A. Lazebnaya, Ismail Haser Dayeh, E.V. Perinskaya The mathematical modeling and automatic control of pneumohydrodynamic treatment process on underground rock massifs / Информатика и кибернетика. – 2015. -№ 1 - С.104-108.

91. Структура системы автоматического управления (САУ) процессом увлажнения угольного пласта : монография / В.Н. Павлыш, С.С. Гребенкин, Л.А. Лазебная, С.С. Сережников // Проблемы горного дела и экологии горного производства – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007.

92. Структура системы автоматизированного управления процессом увлажнения угольного пласта / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Проблемы горного дела и экологии горного производства: Матер. IX междунар. науч.-практ. конф. (24-25 апреля 2014 г., г. Антрацит). – Донецк: Донбасс, 2014. – С.9–15.

93. Modellgestützte projektierung von automatisierungssystemen für objekte mit verteilten parametern / Feldmann L., Lapko V., Moldovanov A., Svjatnyj V. // Наук. пр. ДонДТУ. - Севастополь: Вебер, 2001: сер.: «Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем». – Вип.29. – С.234-239.

94. Svjatnyj V. Zur entwicklungsorganisation des simulation - und servicezentrums für die Kohleindustrie / [V. Svjatnyj, O.Beljaev, V.Lapko, O.Tschepzov, R.Hohmann] In: F.Hülsemannu.a. (Hrsg.), Tagungsband 18. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Erlangen 2005, SCS 2005, P.554–559.

95. Павлыш В.Н., Гребенкина А.С. Расчет параметров процесса пневмообработки неувлажненного угольного пласта / Качество минерального сырья: сб.научн. тр. – Кривой Рог, 2011. – с.445-448.

96. В.М. Павлыш, О.С. Гребенкина. Кінцево-різницева апроксимація математичної моделі процесу пневмообробки вугільного пласта / Способи та засоби створення безпечних та здорових умов праці у вугільних шахтах: Збірник наукових праць, 2(22) 2008. – Макіївка – МакНДІ, 2009. – с.32-38.

97. Проектирование комплекса пневмодинамического воздействия на угольные пласты и породные массивы / В.Н. Павлыш, Хасер Исмаил Даех // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров : сб. тр. IV Междунар. науч.- метод. конф. в г. Хаммамет с 28 октября по 6 ноября 2010. – Донецк : ДонНТУ, 2010. – С.227-230.

98. Верлань А.Ф. Математическое моделирование непрерывных динамических систем / А.Ф. Верлань, С.С. Москалюк. – К.: Наукова думка, 1988. – 287с.

99. Мороз О.К., Павлыш В.Н., Чеснокова О.В. Автоматизация проектирования технологии гидродинамической обработки угольных пластов // Матер. междунар. конф. «VIII международный симпозиум Геотехника'98». – Гливице - Устронь, Польша, 1998. – Часть II. – С.91-98.

100. The mathematical models and function algorithms of automatic control system of dynamic treatment process on underground massive / Pavlysh V.N., Lazebnaya L.A. // Искусственный интеллект. – 2014. - №4(66)'2014. – С.71-78.

101. Павлыш В.М., Гребьонкіна О.С. Математична модель процесу гідропневматичної дії на масив гірських порід // Науковий вісник НГУ, № 7-8. – Дніпропетровськ : НГУ, 2010. – С.32–34.

102. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911с.

103. Павлыш В.Н., Добровольский Ю.Н. Математическое моделирование динамических процессов в системах с распределенными параметрами // Науч. тр. ДонНТУ. – Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – Вып. 52. – С.48-56.

104. Антипов И.В., Шуст А.Е. Автоматизация управления предприятием / Проблемы сучасного державного управління: зб. наук. праць ДонДУУ, вип. 152. – Донецьк, 2010. – Т. XI. – С.82-89.

105. Автоматизированные системы управления предприятием класса ERP / Антипов И.В., Капинус Е.А. // Вісті Донецького гірничого інституту: 2006. – С.205-209.

106. Hangos K. Process modeling and model analysis / K. Hangos, L. Cameron. – Academic press, 2001. – 561p.
107. Kirk D. Optimal control theory: an introduction / D. Kirk. – NY: Dover Publications, 2004. – 472p.
108. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Программно-технические комплексы: учебное пособие / В.А. Втюрин. – СПб: СПбГЛТА, 2006. – 233с.
109. Cheptsov O. Die entwicklungs eines simulations – und servicezentrums für gegebenes gegenstandsgebiet / O. Cheptsov, V. Svjatnyi, R. Hohmann // Наукові праці ДонДТУ, серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”, вип.93, 2005. – С.151–158.
110. Gilat A. Numerical methods for engineer and scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB / Amos Gilat, Vish Subramaniam / Jon Wiley&Sons, Inc., 2008.
111. Прокопенко Е.В., Павлыш В.Н. Применение пакета SURFER для экологической оценки при закрытии шахт // «Современные информационные технологии в образовании и научных исследованиях»: Материалы V Междунар. науч.-техн. конференции СИТОНИ-2017 (20 ноября 2017 г., г. Донецк). – Донецк, ДонНТУ, 2017. – с.133-138.
112. Павлыш В.Н., Аль-Дахле М.З. Минимизация числа микрокоманд в автомате с комбинированной адресацией // Информатика, кибернетика и вычислительная техника. –1997. –Выпуск 1. – С.151-158.
113. Уэйкерли Дж. Проектирование цифровых устройств, том 2. / Дж.Уэйкерли. – М.: Постмаркет, 2002.– 1064с.
114. Пьявченко Т.А. Автоматизированные информационно-управляющие системы / Т.А. Пьявченко, В.И. Финаев. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 271с.
115. Geering H.P. Optimal control with engineering applications / H.P. Geering. – Springer, 2007. – 141p.

116. Исследование параметров специализированного устройства для автоматизации управления процессом нагнетания жидкости в угольный пласт / В.Н. Павлыш, С.С. Сержников // Вісті Донецького гірничого інституту, №1. – Донецьк, ДонНТУ, 2009. – с.20–26.

117. Совершенствование системы управления процессом гидравлического воздействия на угольный пласт в режиме фильтрации / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная, Г.И. Турчанин // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XXIII междунар. науч.- техн. конф. в г. Севастополе 12-18 сент.2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. - Т. 2. – с.64- 67.

118. Модификация характеристик аппаратурного обеспечения системы управления процессом увлажнения угольного пласта / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров : сб. тр. IX Междунар. науч.-метод. конф. в городе Сухум с 01-09 окт.2016 г. – Донецк : МСМ, 2016. – с.183-187.

119. Павлыш В.Н., Перинская Е.В., Турчанин Г.И. Разработка структуры системы автоматизированного проектирования специализированного оборудования конвективного типа / Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров : сб. тр. IX Междунар. науч.- метод. конф. в городе Сухум с 01–09 окт. 2016 г. – Донецк : МСМ, 2016. – с.188-191.

120. Автоматизация управления процессом нагнетания жидкости в угольный массив / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Материалы междунар. конф. по управлению «Автоматика – 2002», 16 – 20 сент.2002 г., Донецк, С.231–235.

121. Разработка структуры специализированного вычислительного устройства для контроля параметров и управления технологическим процессом гидравлического воздействия на угольные пласты / В.Н. Павлыш, Л.А. Лазебная // Материалы седьмого междунар. науч.-техн. семинара «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы». Кн. 2, Таганрог - Донецк, 2006. - С.146–149.

122. Погорелов О.А. Условие применимости алгоритма оптимального управления флотацией / Вісник СНУ ім. В. Даля, 2010. – [Электронный ресурс]

№ 2Е. – режим доступу до журн.: http://nbuv.gov.ua/e-journals/Vsunud/2010_2E/10pooouf.html.

123. Погорелов О.А. Беспойсковый алгоритм оптимального управления флотацией / Вісник СНУ ім. В. Даля, 2010. – № 9(151), Частина 2. – С.75-81.

124. Погорелов О.А. Использование модифицированной функции Лагранжа для модельной оптимизации процесса флотации / Вісник СНУ ім. В. Даля, 2010. – № 9 (151), Частина 2. – С.82-88.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

МИНИСТЕРСТВО ТопЛИВА И ЭНЕРГЕТИКИ УКРАИНЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ДОНЕЦКАЯ УГОЛЬНАЯ КОКСОВАЯ КОМПАНИЯ»

НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

СОГЛАСОВАНО:

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ (СУГРИФАНИИ)

Директор _____ Юханов

«31»



УТВЕРЖДЕНО:

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «ДОНЕЦКАЯ УГОЛЬНАЯ КОКСОВАЯ КОМПАНИЯ», канд. тех. наук

_____ Жириченко

«3»



РЕГЛАМЕНТНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

к устройствам контроля параметров и управления процессом гидродинамической обработки угольных пластов

СОГЛАСОВАНО:

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «КОМПЛЕКСНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА ДОНБАССА (ДОННИИ)

Зам. директора по научной работе

_____ Ефименко

«27»



СОГЛАСОВАНО

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
Проректор по научной работе

_____ В.А. Башков

«27»



В разработке документа принимали участие:

от Донецкого национального технического
университета:

Павлыш В.Н., Гребенкин С.С.,
Лазебная Л.А.

от Днепропетровского национального
горного университета

Барташевский С.Е.

от Государственного предприятия «Ком-
плексный научно-исследовательский и
проектно-конструкторский институт по
проблемам Центрального района Дон-
басса» (ДонНИИ):

Доронин А.Д.

1 ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящем нормативном документе сформулированы технические требования к устройствам контроля параметров и управления процессом гидродинамической обработки угольных пластов.

Требования настоящего нормативного документа предназначены для сотрудников научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, выполняющих работы по проектированию и конструированию устройств контроля и управления процессом нагнетания жидкостей в угольные пласты, а также для работников угольных предприятий, осуществляющих эксплуатацию средств гидрообработки и устройств управления процессом.

2 УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

УК – устройство контроля;
ПК – программируемый контроллер;
ЦП – центральный процессор;
УВВ – устройство ввода-вывода;
БЭП – блок электропитания;
ПП – память программ;
БИС – большая интегральная схема.

3 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- 3.1 Нагнетание жидкости в угольный пласт производится для уменьшения пылевыведения при выемке угля, а также снижения проявлений других опасных свойств пласта. Параметры нагнетания предусмотрены паспортом технологической схемы. До настоящего времени контроль процесса осуществляется «вручную»: рабочий следит за величиной давления и темпом нагнетания жидкости и через 30 минут записывает показания в рабочую тетрадь. При таком управлении процессом обеспечить его качественное исполнение невозможно.
- 3.2 Повышение качества воздействия возможно при условии поддержания стабильных значений параметров технологической схемы (давления и темпа нагнетания). Эти параметры связаны между собой через коэффициент проницаемости, что соответствует физике процесса, а именно: снижение проницаемости при постоянном темпе приводит к возрастанию давления из-за увеличения сопротивления движению жидкости, и для

приведения давления к расчетному необходимо темп соответственно снизить; напротив, увеличение проницаемости приводит к падению давления, и для его нормализации темп необходимо увеличить. Поскольку колебания параметров происходят достаточно часто, рабочий просто не в состоянии качественно управлять процессом. Это вызывает необходимость автоматизации контроля параметров и их регулирования в процессе обработки пласта.

- 3.3 Технически поставленную задачу можно решить на основе использования универсальных компьютеров, которыми в настоящее время оснащается каждое угледобывающее предприятие. Преимуществом этого пути является то, что для реализации задачи достаточно разработать специализированный пакет прикладных программ и обеспечить связь управляющей аппаратуры с компьютером. Однако при этом возникает ряд проблем, вызванных характером работы: объекты управления находятся под землей на большом удалении, нагнетание производится одновременно на нескольких участках, установки периодически передвигаются, а это требует создания дорогостоящих линий связи, их защиты, обеспечения мобильности. Поэтому на практике более предпочтительным является путь создания специализированного устройства управления, которое работает в непосредственной связи с технологическим оборудованием.

4 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АЛГОРИТМАМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УТРОЙСТВ

- 4.1 Алгоритм управления строится следующим образом.

- 4.1.1 Исходные данные:

L_x , м - длина лавы;

k , мд - проницаемость;

H , м - глубина залегания;

m , м - мощность пласта;

$n_э$, % - эффективная пористость;

μ , сПз - вязкость жидкости;

γ , т/м³ - объемный вес вмещающих пород.

4.1.2 Расчетные величины:

$$L_r = 20 \cdot (1 - e^{-m}), \text{ м - глубина герметизации;} \quad (4.1)$$

$$L_c = L_n - 2L_r, \text{ м - длина скважины;} \quad (4.2)$$

$$P = 0,1 \cdot \gamma \cdot H, \text{ кгс/см}^2 \text{ - давление на скважине;} \quad (4.3)$$

$$q = \frac{0,0067kPL_c}{5\mu m}, \text{ л/мин - темп нагнетания;} \quad (4.4)$$

$$T = \frac{59,7\mu m_3 m^2}{kP}, \text{ час - время нагнетания.} \quad (4.5)$$

4.1.3 Контролируемые параметры: P, q, T, t - текущее время. Перед началом процесса задаются исходные данные и $t=0$, запускается устройство контроля (УК).

4.2 Функционирование устройств

4.2.1 УК считывает исходные данные и вычисляет установочные величины (4.1)...(4.5).

Величина q задается на регулятор, устанавливающий требуемый темп, и осуществляется пуск насоса, после чего задается период опроса датчиков Δt .

4.2.2 При достижении таймером значения времени, кратного Δt , выполняется очередной сеанс контроля - с датчиков считываются текущие значения $P(t)$ и $q(t)$. Если $|P(t) - P| < 0,1P$, то работа продолжается, в противном случае вычисляется новое значение k , а по нему - q , и на регулятор выдается новое значение расхода. Критерий окончания процесса - достижение заданного времени обработки.

4.2.3 В течение кванта времени, определяемого частотой устройства управления, производится контроль текущего значения давления. Если его величина вследствие колебания проницаемости изменяется более, чем на 10%, необходимо скорректировать темп нагнетания. Пусть P_t - текущее значение давления, тогда

$$q_t = q \frac{P_t}{P_c}.$$

Управляющее устройство «отрабатывает» текущее значение темпа q_t , с помощью исполнительного механизма.

5 ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

- 5.1. Исследования показали, что наиболее приемлемым в данном случае является применение специализированных устройств на базе микроконтроллера. Автоматическое устройство предназначено для контроля основных технологических параметров - давления нагнетания $P(t)$ и скорости нагнетания, пропорциональной темпу $q(t)$, - и их коррекции в зависимости от конкретных условий. Аппаратура контроля включает в себя датчики давления и темпа нагнетания, преобразователи напряжения, микроконтроллер, регулятор расхода. Структура устройства приведена на рис. 1.
- 5.2. Сигналы с датчиков в виде синусоидального напряжения поступают на вход преобразователей с целью согласования выходного напряжения датчика с уровнем входного напряжения микроконтроллера. В микроконтроллере реализуется прием, хранение и обработка данных, расчет фактических параметров и их сравнение с паспортными, а также выработка и выдача на регулятор управляющих сигналов, если необходимо корректировать темп.



Рис. 1. Структура устройства автоматизированного контроля и управления процессом нагнетания жидкости.

- 5.3. В основу функционирования системы положен программный принцип выполнения алгоритма управления процессом нагнетания, реализуемый микроконтроллером. Аппарат может быть выполнен либо на базе общепромышленных (универсальных) контроллеров, работающих на поверхности, либо во взрывобезопасном исполнении для использования в подземных условиях. В настоящее время свободно-программируемые контроллеры (ПК) приобрели законченную форму программно-технических устройств - это компьютер на микропроцессорной основе, отличающийся простотой программирования и технического обслуживания и приспособленный к эксплуатации в различных (в том числе и неблагоприятных) промышленных условиях (вибрация, нагрев, запыленность и т.д.).
- 5.4. Компанией GIC разработан ПК в шахтном исполнении, который состоит из четырех основных компонентов: центральный процессор (ЦП), устройство ввода-вывода (УВВ), блок электропитания (БЭП), память программ (ПП). ЦП представляет собой основной блок ПК, координирующий обработку информации. В нем находится микропроцессорная логика, сканирующая программу и состояние блоков оборудования. УВВ состоит из модулей, применяющихся для сопряжения ПК с оперативными устройствами и механизмами. Модули УВВ действуют в качестве преобразователей сигналов так, чтобы напряжения высокого уровня были представлены на уровне, приемлемом для ПК. Источники сигналов ввода - датчики, кнопки, клавиатура и др. Адреса вывода - пускатели электродвигателей, контакторы, насосы и т.д. Дополнительно могут применяться специализированные аналоговые модули ввода-вывода.
- 5.5. БЭП преобразует сетевое напряжение в отфильтрованное стабилизированное электропитание ПК. ПП сохраняет программы управления. Особенностью является то, что память программируется пользователем. ПК программируют по цепной схеме, т.е. на языке, схожем с релейной логикой управления. При внесении изменений в программу к ПК подключают программирующее устройство и соответствующие изменения выполняют без перемонтажа.
- 5.6. Характеристики устройства управления процессом определяются параметрами управляющего автомата. В этой связи важное значение имеют быстродействие автомата и аппаратные затраты, т.к. устройства устанавливаются на каждую нагнетательную установку. Применение автоматизированного контроля и управления при увлажнении угольных пластов позволяет повысить качество насыщения обрабатываемой зоны пласта, уменьшить численность персонала, занятого на выполнении работ, и сократить время, отводимое на предварительное

нагнетание. По предварительным подсчетам, время окупаемости одного устройства – 10 месяцев.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Безопасное ведение горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям. – ДНАОП 1.1.30-1.XX-04. – Киев: Минтопэнерго Украины. – 2004. – 314 с.;
2. Правила безопасности в угольных шахтах. ДНАОП 1.1.30-1.01-00. – Киев: Минтопэнерго Украины. – 2000;
3. Павлыш В.Н., Лазебная Л.А. Автоматизированное управление процессом нагнетания жидкости в угольный пласт // Вісті Донецького гірничного інституту. – 2003. - №2. – С.84-88

Підписано до друку 17.02.2005.

Формат 60x84 1/16. Папір Polspeed. Times New Roman.

Друк ксероксний.

Умов. друк. арк. 5,1. Наклад 75 прим. Зам. № 98 к.

Донецький інститут залізничного транспорту

Свідоцтво про внесення до Держ. Реєстру від 22.06.2004 р.

Серія ДК № 1851

Надруковано в редакційно-видавничому відділі ДонІЗТ

83018, м. Донецьк – 18, вул. Горна, 6.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

14.05.2019 № 52.1-03/19
На № _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Лазебной Людмилы Александровны «Совершенствование алгоритмов и параметров элементов системы автоматизированного управления процессом гидропневматического воздействия на угольные пласты», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» (по отраслям) (технические науки).

В ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» приняты к внедрению в учебный процесс и используются при чтении лекций и проведении практических (лабораторных) занятий для подготовки бакалавров на кафедрах «Прикладная математика» (ПМ) и «Искусственный интеллект и системный анализ» (ИИСА) следующие разработки, полученные в диссертационной работе Лазебной Л.А.:

- математические модели и алгоритмы функционирования автоматизированной системы управления процессами гидропневматического воздействия на угольные пласты (направление подготовки 01.03.04 «Прикладная математика», дисциплины: «Теория управления», «Имитационное моделирование»; н.п. 27.03.03 «Системный анализ и управление», дисц: «Системный анализ сложных систем управления», «Системы управления предприятием»);

- алгоритмы и программы для компьютерной реализации метода управления давлением рабочей жидкости при воздействии на пласт с поверхности (н.п. 01.03.04 «ПМ», дисц. «Математические пакеты прикладных программ»).

Первый проректор
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»

Нач. учебного отдела

Зав. каф. ПМ

Зав. каф. ИИСА

М.П.



[Handwritten signature]

А.А. Каракозов

[Handwritten signature]

Б.В. Гавриленко

[Handwritten signature]

В.Н. Павлыш

А.С. Миненко