

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

**В.Н. Павлыш, Е.И. Назимко,
И.В. Тарабаева, В.Г. Науменко, Е.В. Перинская,**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОБОГАЩЕННОГО МИНЕРАЛЬНОГО
СЫРЬЯ**

Монография

*Под общей редакцией
академика Академии наук технической кибернетики Украины,
члена-корреспондента Академии горных наук Украины,
доктора технических наук, профессора Павлыша В.Н.
и члена-корреспондента Академии горных наук Украины,
доктора технических наук, профессора Назимко Е.И.*

Донецк – 2013

УДК 622.734.001.57

Павлыш В.Н., Назимко Е.И., Тарабаева И.В., Науменко В.Г., Перинская Е.В.
Математическое моделирование процессов обезвоживания обогащенного минерального сырья. / Монография // под общ. ред. проф. Павлыша В.Н., проф. Назимко Е.И. – Донецк: «ВИК», 2013. – 289 с.

Рекомендовано к печати Ученым советом Донецкого национального технического университета (протокол № от 2013 г.)

Рецензенты:

Пилов П.И. – доктор технических наук, профессор, академик Академии горных наук Украины, зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых Национального горного университета (г. Днепропетровск);

Гребёнкин С.С. – доктор технических наук, профессор, академик Академии горных наук Украины, главный научный сотрудник ГП «Донбасский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ДонНИИ);

Мнухин А.Г. – доктор технических наук, академик Академии горных наук Украины, зам. директора Макеевского государственного научно-исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности (МакНИИ).

ISBN

Монография посвящена решению проблемы развития научных основ и методов исследования процессов обезвоживания продуктов обогащения полезных ископаемых с целью совершенствования технологических схем и обоснования параметров, обеспечивающих повышение эффективности производства и качества выпускаемой продукции. Представлены математические модели процессов, обоснованы современные методы расчета параметров технологических схем и предложены направления модернизации технологии и оборудования для сушки (обезвоживания) влажных сыпучих материалов, получаемых в результате обогащения угля и другого минерального сырья.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, а также для аспирантов и студентов старших курсов учебных заведений горного профиля, обучающихся по направлению «Переработка полезных ископаемых».

ISBN

АВТОРЫ МОНОГРАФИИ:

ПАВЛЫШ Владимир Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
академик Академии наук технической
кибернетики Украины, член-корреспондент
Академии горных наук Украины;

Назимко Елена Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент
Академии горных наук Украины;

Тарабаева Инна Викторовна,
кандидат технических наук

Науменко Виктория Георгиевна,
кандидат технических наук

Перинская Елена Владимировна,
ассистент

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ЧАСТЬ I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ВЛАЖНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В «КИПЯЩЕМ СЛОЕ»	10
Раздел 1. Исследование технологических схем сушки обогащенных материалов и методов расчета их параметров	10
1.1 Анализ теоретических основ расчета параметров процессов и проектирования технологии сушки обогащенного угля и других сыпучих материалов	11
1.1.1 Влажность и влагосодержание материала	17
1.1.2 Физические свойства влажного газа и воздуха ...	19
1.1.3 Материальный и тепловой балансы сушильной установки	20
1.1.4 Графический расчет сушилки	22
1.2 Анализ применяемых технологических схем обезвоживания увлажненных сыпучих материалов	25
1.2.1 Физические предпосылки проектирования технологических схем процесса сушки сыпучих материалов	25
1.2.2 Классификация сушильных агрегатов	27
1.2.3 Барабанные газовые сушилки	27
1.2.4 Газовые трубы-сушилки	30
1.2.5 Сушилки «кипящего слоя»	31
1.3 Результаты анализа теоретических основ и технологических схем процесса обезвоживания влажных сыпучих материалов. Цель и задачи исследования	37
Раздел 2. Математическое моделирование процессов сушки в установках «кипящего слоя»	39
2.1 Характеристика отечественных и зарубежных установок «кипящего слоя» и физические основы постановки задачи моделирования	39
2.1.1 Сушильная установка Донецкого КХЗ	39
2.1.2 Установка Дзержинского КХЗ	40
2.1.3 Установка Макеевского КХЗ	41
2.1.4 Зарубежные сушилки псевдоожиженного слоя	43
2.1.5 Основные узлы сушилки «кипящего слоя»	48
2.2 Разработка математических моделей для исследования параметров процесса	51
2.2.1 Постановка задачи математического моделирования сушки сыпучих материалов в «кипящем слое»	52
2.2.2 Математический аппарат для построения модели ..	54
2.2.3 Математическая модель распределения температуры.....	56
2.2.4 Математическая модель распределения скорости ..	63

2.2.5	Математическая модель поля концентрации в камере сушиллки	74
2.2.6	Критериальные модели для расчета параметров сушки	78
Раздел 3.	Исследование стохастических характеристик параметров процесса сушки в «кипящем слое»	87
3.1	Исследование характеристик плотности распределения частиц по времени пребывания в псевдооживленном слое методом вычислительного эксперимента	87
3.2	Вычисление показателей плотности распределения частиц по времени пребывания в псевдооживленном слое	89
3.3	Исследование численных показателей времени пребывания частиц в псевдооживленном слое как стохастической величины	92
3.4	Исследование параметров температуры и степени обезвоживания частиц в псевдооживленном слое как стохастических величин	96
Раздел 4.	Экспериментальные исследования процессов сушки и рекомендации по практическому применению результатов математического моделирования	103
4.1	Экспериментальные и сравнительные исследования параметров технологических схем и результатов математического моделирования.....	103
4.1.1	Сравнительный анализ параметров процесса сушки в «кипящем слое» на предприятии ЦОФ «Колосниковская» и результатов математического моделирования	103
4.1.2	Результаты сравнительного анализа параметров для беспровальной сушиллки взвешенного слоя на Узловской ЦОФ	106
4.2	Результаты внедрения рекомендаций по применению способа «кипящего слоя» для модернизации сушильного оборудования в условиях ЧАО «Яновское»	109
4.3	Разработка рекомендаций по практическому применению математических моделей и компьютерных методов при проектировании технологических схем	115
4.3.1	Общая структура системы автоматизированного проектирования технологических схем процесса обезвоживания сыпучих материалов	115
4.3.2	Методические рекомендации по применению теоретических разработок для приближенных расчетов параметров сушки	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ЧАСТИ I		126

ЧАСТЬ II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕСИФИ- КАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬ- НЫХ ШЛАМОВ	136
Раздел 1. Исследование технологических схем механического обезвоживания осадков шламовой крупности и методов расчета их параметров	136
1.1 Общая постановка задачи модификации параметров процесса механического обезвоживания шламовых осадков	136
1.2 Анализ результатов исследований фильтрования осадков шламовой крупности	137
Раздел 2. Исследование характеристик осадков, определяющих эффективность процесса механического обезвоживания	159
2.1 Исследование перемещения фронта разделения газообразной и жидкой фаз в пористой среде осадка	159
2.2 Исследование гидродинамических характеристик осадков углеобогащения	166
2.3 Определение необходимого максимального времени фильтрования для различных условий	173
2.4 Исследование влияния проницаемости осадков на перемещение влаги в порах	189
Раздел 3. Имитационное моделирование изменения поровой структуры осадков при механическом воздействии	201
3.1 Методика имитационного моделирования изменения поровой структуры осадков на микроуровне	201
3.2 Исследование свойств осадков как идеализированной среды	207
3.3 Исследование влияния скорости прилагаемого к осадку сдвига на скорость фильтрации осадка методом имитационного моделирования	216
Раздел 4. Экспериментальные исследования процесса фильтрования осадков при механическом воздействии	232
4.1 Исследование физико-механических свойств осадков, определяющих результаты механического обезвоживания	232
4.2 Исследование изменения параметров осадков при механическом воздействии	245
4.3 Исследование изменения порового пространства осадков при приложении сдвиговых деформаций	249
4.3.1 Методика проведения испытаний	252
4.3.2 Анализ результатов исследования	257
4.4 Аprobация влияния механического воздействия на осадок на параметры его обезвоживания в промышленных условиях	261
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	269
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ЧАСТИ II	272

ПРЕДИСЛОВИЕ

Состояние экономики Украины в настоящее время неразрывно связано с функционированием и развитием промышленности (угольной, химической, металлургической, стройматериалов и др.). Для деятельности каждого предприятия актуальной проблемой является снижение себестоимости продукции. В ряде отраслей промышленности важной стадией является предварительное обогащение ископаемого сырья, получаемого в виде добытой горной массы.

Технология обогащения полезных ископаемых включает ряд базовых процессов, в частности, обезвоживание конечного продукта, который получается в виде увлажненной сыпучей массы, что особенно характерно для процессов обогащения углей, производства ряда химических материалов, предпродажного высушивания углей мелкофракционного состава непосредственно в условиях угледобывающих предприятий. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности, что приводит к повышенному расходу энергии и топлива, как собственного, так и привозного, в том числе импортируемых нефтепродуктов и газа.

В этой связи актуальной является задача модернизации технологических схем и оптимизации параметров процессов обезвоживания увлажненной сыпучей массы.

Одним из основных сдерживающих факторов при внедрении современных технологических решений является несовершенство имеющегося в настоящее время математического аппарата для исследования процессов и расчета параметров технологических схем, и на повестке дня стоит задача разработки современной теоретической базы.

Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением современных математических моделей, в том числе детерминированных.

Важнейшим этапом разработки технологических систем является построение математической модели объекта или процесса. На базе математической модели объекта формируются критерии качества и ограничения, выбираются структура и параметры проекта системы, технические средства реализации. Для

технологических процессов обработки материалов могут быть построены различные по полноте и сложности описания математические модели. Основным фактором, определяющим полноту и точность математической модели, является цель моделирования.

Существует два основных метода построения математических моделей:

- 1) разработка модели на базе физических законов протекания процессов, в частности, законов механики сплошной среды, аэродинамики, тепломассопереноса;
- 2) экспериментально-статистические методы построения модели.

Для математического моделирования строго ранжированных технологических процессов обработки материалов более удобным в инженерном отношении и универсальным является первый метод построения, базирующийся на физических законах: излучение (законы Планка, Стефана-Больцмана, Ламберта и др.), фильтрация (закон Дарси), конвекция (закон Ньютона-Рихмана), теплопроводность (закон Фурье) и др.

Построение модели на базе физических законов сводится к следующим этапам:

- 1) обоснование и выбор структуры математической модели на основании физических соображений и целей моделирования;
- 2) оценивание параметров модели по имеющимся данным о процессе;
- 3) проверка адекватности математической модели реальному процессу.

В данной работе предпринята попытка рассмотреть применение различного типа моделей к исследованию процессов и технологических схем обезвоживания влажных продуктов обогащения полезных ископаемых и на основе результатов моделирования предложить рекомендации по дальнейшему совершенствованию обогатительного производства.

Учитывая разнообразие представленного материала и вариативность содержания отдельных разделов, а также опыт подготовки и издания нескольких предыдущих книг, монография составлена из двух частей, связанных общей направленностью. Каждая из частей представляет в определенной степени самостоятельную составляющую в общем комплексе решения

проблем совершенствования технологии обезвоживания на основе развития методов и средств исследования процессов и обоснования параметров производственного оборудования.

Авторы монографии, не претендуя на полноту охвата всех проблемных вопросов создания современных технологий обогащения полезных ископаемых, надеются на то, что монография в целом и её отдельные разделы найдут своего читателя как среди работников отраслевой науки, так и в среде практических инженерно-технических работников обогатительных фабрик и производственных объединений.

Надеемся увидеть среди наших читателей преподавателей и сотрудников горных вузов, магистрантов, аспирантов и студентов-старшекурсников.

С глубоким уважением к нашим читателям, по поручению авторского коллектива, редакторы монографии:

академик Академии наук
технической кибернетики Украины,
член-корреспондент Академии горных наук Украины,
доктор технических наук, профессор Павлыш В.Н.

член-корреспондент Академии горных наук Украины,
доктор технических наук, профессор Назимко Е.И.

ЧАСТЬ I

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ВЛАЖНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В «КИПЯЩЕМ СЛОЕ»

Раздел 1. Исследование технологических схем сушки обогащенных материалов и методов расчета их параметров.

В ряде отраслей промышленности важной стадией является обезвоживание конечного продукта, который получается в виде увлажненной сыпучей массы, что особенно характерно для процессов обогащения углей, производства ряда химических материалов, предпродажного высушивания углей мелкофракционного состава непосредственно в условиях угледобывающих предприятий. Вместе с тем, традиционные технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности, что приводит к повышенному расходу топлива, как собственного, так и привозного, в том числе импортируемых нефтепродуктов и газа.

Необходимо отметить следующие тенденции в данном вопросе: во-первых, наблюдается общемировое повышение цен на нефтепродукты и газ, во-вторых, качество выдаваемой на поверхность горной массы либо находится на низком уровне, либо продолжает снижаться.

При сложившемся положении одним из возможных решений является применение энергосберегающей технологии «кипящего слоя», что позволяет не только повысить эффективность процесса сушки, но и добиться снижения загрязнения атмосферы продуктами сгорания органического топлива. К несомненным достоинствам данного технического решения относится также повышение надежности функционирования системы, т.к. для сушки применяются непосредственно горячий воздух или дымовые газы при отсутствии в схеме промежуточного теплоносителя – пара или воды.

Одним из сдерживающих факторов при внедрении технологии «кипящего слоя» является несовершенство имеющегося в настоящее время математического аппарата для исследования

процесса и расчета параметров технологических схем. Результаты проведенных исследований на ряде обогатительных фабрик показывают, что при прочих равных условиях способ «кипящего слоя» является более прогрессивным, при этом отмечается так называемая «моделируемость» основных фаз процесса, и на повестке дня стоит задача разработки адекватной теоретической базы. Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением детерминированных математических моделей, основанных на уравнениях математической физики.

Этим обуславливается актуальность задачи совершенствования теоретических методов и современных средств для исследования и определения параметров процессов обезвоживания влажной сыпучей массы с применением способа «кипящего слоя», что позволит повысить эффективность функционирования технологических установок, осуществляющих сушку конечного продукта производства в ряде отраслей промышленности.

1.1 Анализ теоретических основ расчета параметров процессов и проектирования технологии сушки обогащенного угля и других сыпучих материалов

Современное состояние экономики и промышленности любого государства требует, как минимум, поддержания состояния топливно-энергетического комплекса на постоянном уровне. Дальнейшее же развитие производства невозможно без увеличения энергетических затрат. Географическое положение Украины обуславливает зависимость экономики от импорта энергоносителей, в частности, отсутствие достаточных разведанных запасов нефти и газа вынуждает осуществлять ввоз данных ресурсов из стран СНГ. В то же время наблюдается общемировая тенденция повышения цен на данные энергоносители, которая в последнее время коснулась и Украины в полной мере. При рациональном использовании имеющихся резервов времени представляется возможным снизить потребности промышленности в импортном сырье за счет увеличения доли получаемой энергии от переработки угля, разведанные запасы которого значительны [1, 2].

Добываемый на территории Украины уголь не всегда пригоден для непосредственного использования [2, 3, 4, 10, 48, 51], что требует его предварительного обогащения, завершающей стадией которого является сушка влажной обогащенной сыпучей массы.

Обезвоживание как конечный этап является важнейшей составляющей процесса получения ряда химических продуктов (в частности, ферритового порошка), сырья для металлургической промышленности (в частности, руды и ее концентратов), строительных материалов (песка, глины, щебня) и т.д.

Решению проблем развития теории и совершенствования технологии процессов сушки посвящены работы ряда отраслевых и академических научно-исследовательских и проектно-конструкторских учреждений таких, как ИТТФ НАНУ, УкрНИИУглеобогащение, ВНИИРеактивэлектрон, ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ и др., а также высших учебных заведений, в том числе ДонНТУ, НГУ. КНТУ, ДонНАСА, МГГУ, МИХТ и др.

Основы теории и технологии процессов заложены в фундаментальных трудах ряда отечественных и зарубежных ученых, в числе которых М.А. Стырикович, А.В. Лыков, В.В. Кафаров, М.И. Бейлин, Л.М. Лурье, В.А. Филиппов, П.И. Пилов, А.Ю. Майстренко, И.М. Федоров, Г. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус, И. Дэвидсон, Д. Харрисон, Х. Леви, М. Шиффер, К. Фридрихс, Дж. Эйтс и др.

На основании выполненных исследований и разработок созданы и функционируют на различных предприятиях установки, осуществляющие процесс обезвоживания сыпучих материалов [2, 3, 4, 9, 14]. Вместе с тем, учитывая постоянно изменяющиеся условия эксплуатации, связанные как с дефицитом энергоресурсов, так и с ужесточающимися требованиями к экологической составляющей деятельности промышленных предприятий, продолжаются исследования процессов и технологических схем с целью их дальнейшего совершенствования [15, 16, 21, 31].

На рис. 1.1а,б представлена общая схема оборудования обогатительной фабрики с узлом сушки.

Рядовой уголь поступает в железнодорожных вагонах, которые подаются толкателем в роторный вагонопрокидыватель 1, затем выгружается в бункеры. Из бункеров качающимися питателями уголь подается на ленточный конвейер 2 и

направляется в дробильно-сортировочное отделение конвейерами 3 и 4 на первичную классификацию. Классификация рядовых углей осуществляется на цилиндрическом грохоте 5 по классу 100 мм.

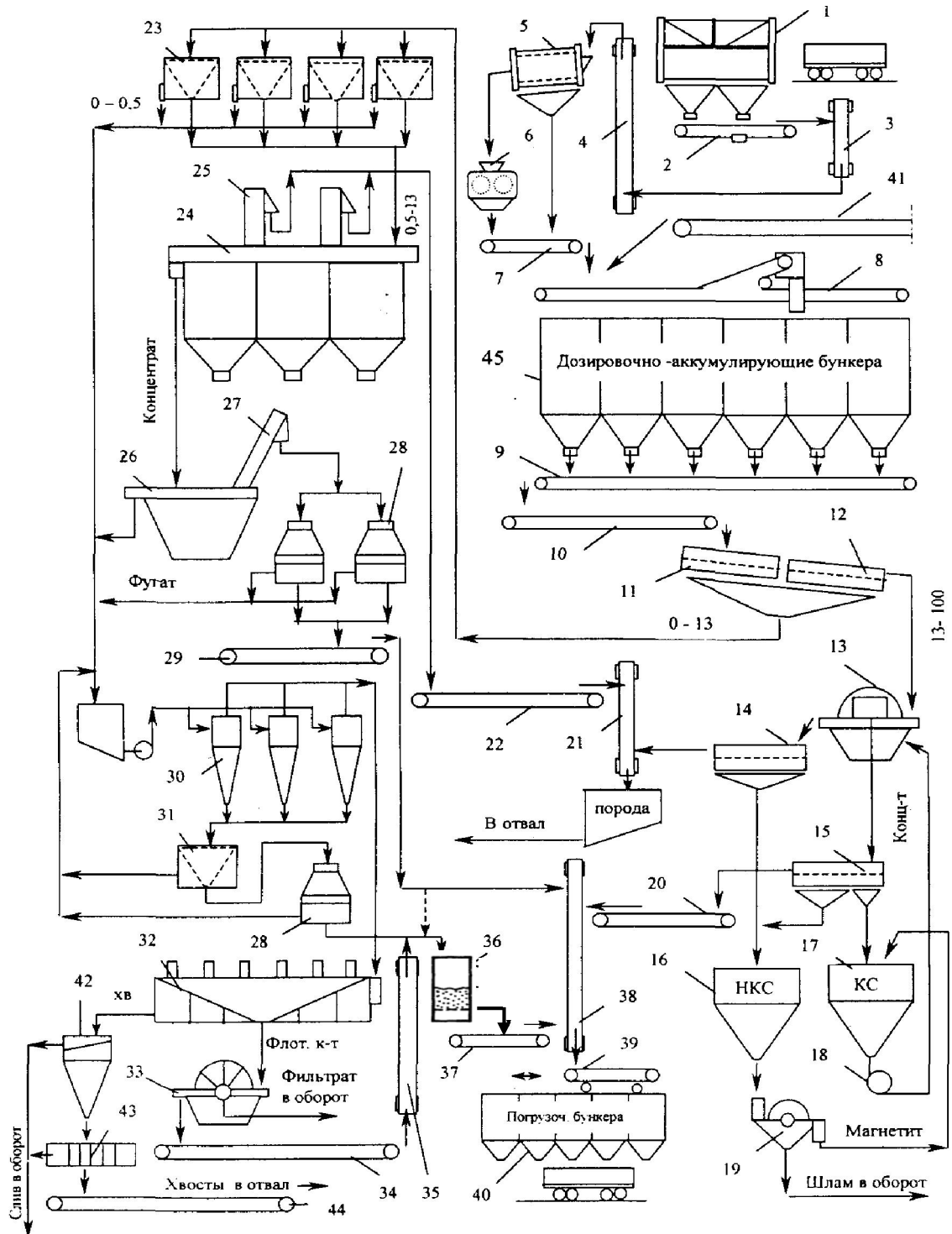


Рис.1.1а) Функциональная схема оборудования обогатительной фабрики

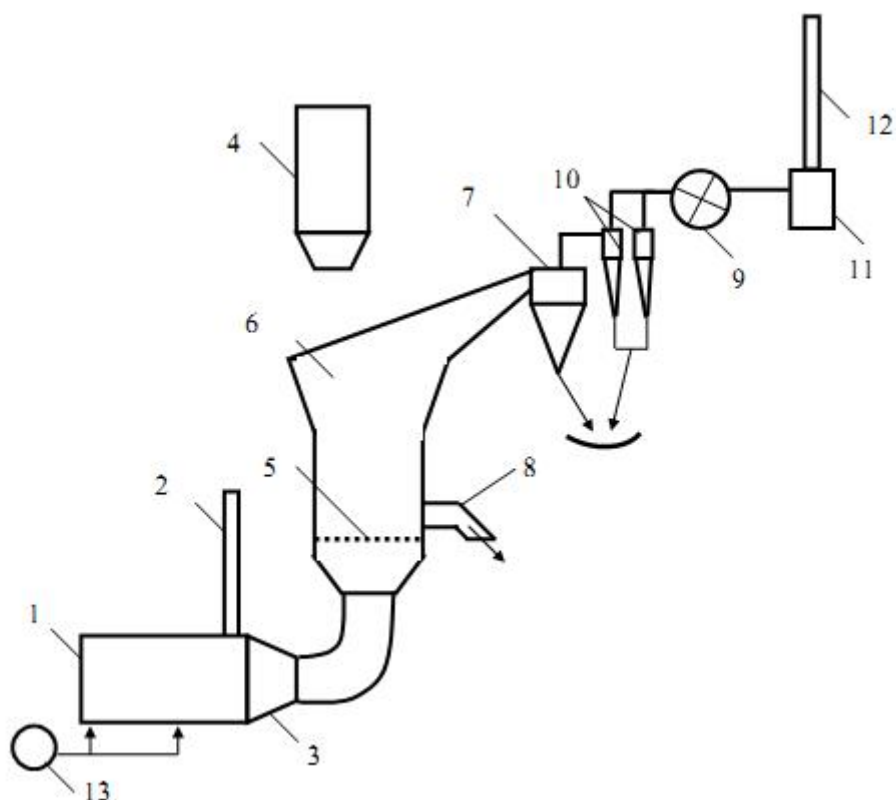


Рис. 1.16) Схема сушильной установки: 1– топка; 2 – растопочная труба; 3 – камера смешивания; 4 – бункер сырого концентрата; 5 – решетка; 6 – сушильная камера; 7 – разгрузочная камера; 8 –разгрузочный желоб; 9 – дымосос; 10 – батарейный циклон; 11 – мокрый пылеуловитель; 12 – дымовая труба; 13 – дутьевой вентилятор

Крупный уголь (+100 мм.) дробится в дробилке 6. Дробленый уголь соединяется с углем кл.(-100 мм.) после грохота на ленточном конвейере 7 и далее поступает на ленточный конвейер 8, где распределяется сбрасывающей тележкой по бункерам "силосного" типа.

Уголь из бункеров склада рядовых углей посредством качающихся и ленточных питателей подается на сборный ленточный конвейер 9 и далее конвейерами рядовой уголь подается в гравитационное отделение для классификации на машинные классы, обогащения и обезвоживания. При необходимости рядовой уголь сбрасывается на открытый напольный склад. Забор угля осуществляется при помощи бульдозера через бункер с двумя питателями.

Гравитационное отделение.

Рядовой уголь кл. (100-0 мм.) классифицируется на гидрогрохоте 11-12 на два класса: крупный (100-13 мм.), мелкий

(13-0 мм.). Класс (100-13) по желобу подается на обогащение в сепаратор 13. Всплывший продукт сепаратора (концентрат) отмывается от магнетита на грохоте 15 и поступает по течкам и конвейерам 20, 38, 39 на погрузочные бункера концентрата или на сушилку 36, а так же используется в качестве топлива для топок сушильного отделения и промышленной котельной. Потонувший продукт - порода отмывается от магнетита на грохотах 14 и ленточным конвейером 21 транспортируются в погрузочные бункера породы. Породы автосамосвалами "КрАЗ" и "БелАЗ" вывозится на плоский породный отвал.

Подситный продукт гидрогрохота 11-12 (-13 мм) поступает на конические грохоты 23 для дешламации и выделения третьего машинного класса (0,5 -0 мм.).

После грохотов 23 надситный продукт поступает на отсадку в отсадочные машины 24. Отсадочные машины 24 выделяют два конечных продукта: концентрат и породу. Концентрат отсадочных машин попадает на сита предварительного сброса и далее на аппараты "каскад" и грохоты. С "каскадов" и грохотов концентрат поступает на вторичное обезвоживание на центрифуги 28.

Порода с отсадочных машин 24 обезвоживается в элеваторах 25 и поступает в породные бункера.

Концентрат крупный, мелкий и флотоконцентрат после сушки системой ленточных конвейеров 29, 37, 38 и 39 закачивается в погрузочные бункера и затем отгружается потребителям в железнодорожные вагоны.

Флото-фильтровальное отделение.

Подрешетные воды производственного цикла классифицируются по классу 0,5мм в гидроциклонах 30. Класс + 0,5 мм направляется на обезвоживание через грохот 31 на обезвоживающую центрифугу 28 и далее на сушилку в установку кипящего слоя 36. Класс 0 - 0,5 мм направляется на флотацию. Флотационное отделение оборудовано флотомашинами 32, в которых происходит разделение материала на два продукта: концентрат и отходы.

Концентрат обезвоживается на вакуум-фильтрах 33. Кек системой ленточных конвейеров 34 и 35 вместе с обезвоженным крупнозернистым шламом подается в сушильное отделение. Отходы сгущаются в цилиндрикоконических сгустителях 42 и затем обезвоживаются в фильтр-прессах 43. Обезвоженные хвосты

флотации системой ленточных конвейеров 44 направляется в отгрузку.

Весь концентрат после сушки ленточными конвейерами направляется в погрузочные бункера.

Сушильное отделение.

Флотоконцентрат и мелкий концентрат собирается ленточными конвейерами 20, 29, 35 и подаются в бункера сырого угля сушильного отделения. Сушка производится в установках для сушки угля в кипящем слое.

Установка для сушки угля в кипящем слое (рис. 1.1б) состоит из: топки 1, работающей на твердом или жидком топливе; растопочной трубы 2; камеры смешивания 3; бункера сырого концентрата 4; решетки 5; сушильной камеры 6; – разгрузочной камеры 7; разгрузочного желоба 8; дымососа 9; батарейного циклона 10; 11 – мокрого пылеуловителя 11; дымовой трубы 12; 13 – дутьевого вентилятора 13.

Влажный уголь из бункера питателем подается сверху или сбоку в сушильную камеру. При сжигании угля в топке получают дымовые газы с температурой 800–850 °С, которые подаются по газоходу под газораспределительную решетку со скоростью, обеспечивающей перевод угля, находящегося на решетке, в псевдооживленное состояние. В таком состоянии сушеного угля обеспечивается интенсивный тепло- и влагообмен с дымовыми газами. Высушенный материал пересыпается через порог и питателем подается на ленточный конвейер. Часть высушенного угля потоком газов уносится в разгрузочную камеру, в которой, благодаря перепаду скоростей движения газов, частицы осаждаются и разгружаются на конвейер. Окончательно газы очищаются в сухом и мокром пылеуловителях.

Высушенный концентрат с сушильных агрегатов собирается на сборном ленточном конвейере 37 и далее системой конвейеров направляется совместно с концентратом I секции главного корпуса на погрузку.

Таким образом, сушка является финальным этапом обогащения угля и от результатов работы этого отделения зависит в конечном итоге качество и цена готовой продукции. Дальнейшее совершенствование параметров процесса сушки является важной задачей развития технологии, что в свою очередь ставит задачу

развития теоретических основ для исследования и расчета параметров процесса сушки.

Используемые в настоящее время теоретические предпосылки базируются, в основном, на элементарных соотношениях и эмпирических формулах. На современном этапе данная задача должна решаться с применением новых математических методов и компьютерных технологий.

1.1.1 Влажность и влагосодержание материала

Любой влажный материал состоит из абсолютно сухого вещества G_c и влаги W_m , и поэтому массу влажного материала можно определить по уравнению

$$G_{вл} = G_c + W_m.$$

Относительная влажность материала определяется отношением массы влаги к массе влажного материала

$$W_0 = \frac{W_m \cdot 100}{G_{вл}}. \quad (1.1)$$

Абсолютная влажность, или влажность на сухую массу, определяется отношением массы влаги материала к массе сухого вещества:

$$W_a = \frac{W_m \cdot 100}{G_c}. \quad (1.2)$$

Между этими двумя величинами существуют следующие соотношения:

$$W_0 = \frac{W_m \cdot 100}{G_c + W_m} = \frac{\frac{W_m \cdot 100}{G_c}}{1 + \frac{W_m}{G_c}} = \frac{W_a \cdot 100}{100 + W_a}, \% \quad (1.3)$$

$$W_a = \frac{W_0 \cdot 100}{100 - W_0}, \% \quad (1.4)$$

Относительная влажность не может быть выше 100%, тогда как абсолютная может быть любой. Как правило, для минерального сырья применяется относительная влажность.

Помимо понятия влажности используют понятие влагосодержания материала, которое определяется отношением массы влаги к массе сухого материала в относительных единицах:

$$U = \frac{W_i}{G_c}. \quad (1.5)$$

На механизм процессов обезвоживания значительное влияние оказывает энергия связи жидкости с материалом. Чем больше энергия связи, тем труднее отделить влагу от материала. На этом принципе основана классификация форм связи влаги с материалом, разработанная академиком П. А. Ребиндером. По этой классификации различают химическую, физико-химическую и физико-механическую связь.

Химически связанная влага обладает наибольшей энергией связи с материалом и при сушке не удаляется. Такая влага в гидроксилах называется гидратной, а в кристаллогидратах — кристаллизационной.

Классификацию форм связи влаги, предложенную П. А. Ребиндером, применяют при изучении механизма процесса сушки. При механическом обезвоживании различают гигроскопическую, адгезионную, капиллярную и гравитационную влагу.

Гигроскопическая влага удерживается на поверхности частиц в виде пленок адсорбционными силами. Такую влагу относят к наиболее прочно связанной.

Адгезионная влага удерживается на поверхности частиц молекулярными силами.

Капиллярная влага заполняет промежутки между частицами и удерживается в них силами капиллярного давления.

Свободная (гравитационная) влага заполняет все промежутки между частицами и перемещается под действием гравитационных сил.

Часовое количество испаренной влаги может быть определено по разности масс поступившего G_1 и высушенного G_2 материала:

$$W = G_1 - G_2 \quad (1.6)$$

или

$$W = G_c \left(\frac{W_1 - W_2}{100} \right) = G_c (U_1 - U_2),$$

где G_c – масса абсолютно сухого вещества, кг/ч;
 W_1 – начальная влажность материала, %;
 W_2 – конечная влажность материала, %;
 U_1 – начальное влагосодержание материала, кг/кг;
 U_2 – конечное влагосодержание материала, кг/кг.

1.1.2 Физические свойства влажного газа и воздуха

В качестве сушильного агента применяются дымовые газы и воздух. Для сушки минерального сырья наибольшее распространение получили дымовые газы. Они всегда содержат определенное количество водяных паров, т. е. представляют собой газовые смеси. Характеристическими параметрами для влажного газа являются: давление p , парциальное давление водяного пара p_n и сухого воздуха p_b , температура T , удельный вес γ , влагосодержание d , относительная влажность ϕ , теплоемкость c и теплосодержание (энтальпия) i . Расчет сушильных установок обычно ведут на 1 кг абсолютно сухого газа, так как эта величина остается постоянной в процессе сушки [4, 9, 29].

Влагосодержание газа обозначается d (г/кг) или x (кг/кг).

В смеси газов объем каждого газа будет равен общему объему смеси V (м^3), а температура — общей температуре смеси T (град К). Поэтому влагосодержание газа может быть определено по уравнению

$$x = \frac{p_n V}{R_n T} \div \frac{p_b V}{R_b T} = \frac{R_b \cdot p_n}{R_n \cdot p_b}, \text{ кг/кг} \quad (1.7)$$

где R_b и R_n – газовые постоянные воздуха и пара.

Учитывая отношение $R_b/R_n = 0,622$, уравнение (1.7) можно представить в следующем виде:

$$x = 0,622 \frac{p_n}{p_b} = 0,622 \frac{p_n}{p - p_n}, \text{ кг/кг}$$

или

$$d = 622 \frac{p_n}{p - p_n}, \text{ г/кг} \quad (1.8)$$

Относительная влажность газа φ определяется как отношение данной абсолютной влажности газа к максимальной абсолютной влажности, которая может удерживаться в 1 м³ газа без конденсации влаги при заданных давлении p и температуре T , т. е.

$$\varphi = \frac{\gamma_n}{\gamma_n} \quad (1.9)$$

где γ_n – удельный вес сухого насыщенного водяного пара, кг/м³;
 γ_n – удельный вес водяного пара при данной температуре влажного газа, кг/м³.

Удельный вес влажного газа определяется суммой удельных весов сухого газа и водяного пара

$$\gamma_{\text{вл.г.}} = \gamma_{\text{с.г.}} + \gamma_n, \text{ кг/м}^3 \quad (1.10)$$

Для смеси воздуха с водяным паром

$$\gamma_{\text{вл.г.}} = 0,289 \frac{p}{T} \cdot \frac{1000 + d}{622d}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.11)$$

При расчете параметров смеси топочных газов и воздуха необходимо иметь элементарный состав принятого топлива. Теплоту сгорания твердого и жидкого топлива можно определить калориметрированием или подсчитать по формуле Менделеева.

1.1.3 Материальный и тепловой балансы сушильной установки

Воздух или дымовые газы, которые в условиях непосредственного соприкосновения и теплообмена с высушиваемым материалом воспринимают удаляемую из него влагу, называют сушильным агентом. Среду, получающую от внешнего источника теплоту, необходимую для сушки и передающую ее высушиваемому материалу через стенку, называют теплоносителем. Аппарат, в котором происходит искусственная сушка материалов, т. е. такой процесс сушки, при котором отвод

сушильного агента, поглотившего пары влаги, производится организованно, называется сушилкой [4]. На рис. 1.1б приводится схема сушильной установки кипящего слоя..

Взаимное движение воздуха и материала в сушилке может быть параллельным – прямоток, встречным – противоток и перпендикулярным – перекрестный ток.

При сушке изменяются вес материала G_m , его влажность W и температура.

Количество влаги, поступившей в сушилку, должно быть равно количеству влаги, выносимой из сушилки:

$$\frac{G_1 W_1 + L \frac{d_1}{1000}}{100} = \frac{G_2 W_2 + L \frac{d_2}{1000}}{100}, \quad (1.12)$$

Общим методом теплового расчета является составление теплового баланса сушилки на 1 кг испаренной влаги [4, 9, 10], в котором учитываются:

расход тепла на испарение влаги q_0 ; расход тепла на нагрев материала во время сушки q_m ; расход тепла в окружающую среду q_5 ; разность температур внутри сушилки и воздуха вне ее.

Изоляция сушилки выбирается таким образом, чтобы температура наружной стенки не была выше 40°C , или она подбирается такой, чтобы коэффициент теплоотдачи был равен $0,5-1 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Для сушилок обычно принимают $q_5 = 30 \div 60 \text{ ккал/кг}$. Как правило, потери тепла в окружающую среду не превышают $5-10\%$.

Расход сухих газов на 1 кг испаренной влаги

$$l_{c.2} = \frac{q_0 + q_m + q_5}{c'_2 t_1 - c''_2 t_2}, \quad (1.13)$$

где c'_2, c''_2 – теплоемкость сушильного агента на входе и выходе из сушилки, ккал/кг-град;

t_1, t_2 – температура сушильного агента на входе и выходе из сушки, град.

Потери тепла с отходящими газами

$$q_2 = l_{c.2} (c''_2 + 0,001 d_1 c_{e.n}) (t_2 - t_0), \quad (1.14)$$

где $c_{в.п}$ – теплоемкость 1 кг пара в сушильном агенте при t_2 , ккал/кг-град;

d_1 – влагосодержание газов при входе в сушилку, кг/кг;

t_0 – температура окружающей среды, град.

Суммарный расход тепла на 1 кг испаренной влаги

$$\sum q = q_0 + q_m + q_2 + q_5. \quad (1.15)$$

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги с учетом потерь тепла в топке

$$q = \frac{\sum q}{\eta_T}, \quad (1.16)$$

где η_T – к. п. д. топки.

1.1.4 Графический расчет сушилки

Как отмечается в [49], аналитический расчет сушилки, т.е. определение удельных расходов тепла и сухого агента сушки, является достаточно кропотливым, а при отсутствии данных по теплосодержанию I_2 или температуре t_2 выходящих из сушилки газов приходится решать эту задачу методом подбора.

Для упрощения решения предлагается использование Id -диаграммы, построенной проф. Л.К. Рамзиным (рис. 1.2). Основными параметрами этой диаграммы являются теплосодержание и влагосодержание. Барометрическое давление принято $99,25 \text{ Н/м}^2$, угол между осями взят тупой, равный 135° . Линии одинакового теплосодержания идут наклонно, а линии одинакового влагосодержания – вертикально. На диаграмме нанесены кривые одинаковой влажности воздуха ($\phi = \text{const}$), они имеют резкий перелом при температуре выше $99,4^\circ\text{C}$ (идут вертикально вверх), т.к. при этой температуре давление насыщенного пара равно барометрическому и влагосодержание воздуха почти не меняется.

Кривая $\phi = 100^\circ$ делит площадь диаграммы на две части: верхнюю, где влажный воздух представляет смесь сухого воздуха и ненасыщенного пара, и нижнюю, где пар является насыщенным и частично сконденсированным в жидкость.

На Id -диаграмме рядом с линиями $I = \text{const}$ пунктиром нанесены линии $t_m = \text{const}$, которые имеют небольшой наклон к

линиям $I = \text{const}$. Внизу диаграммы проходит кривая парциального давления водяного пара

$p_n = f(d)$ в обычной координатной сетке, по оси ординат отложено парциальное давление водяного пара, а по оси абсцисс – влагосодержание.

Приводится методика, на основании которой по диаграмме можно определить любые параметры влажного воздуха ($I, d, t_0, t_m, \varphi, p_n$), если известны два из них.

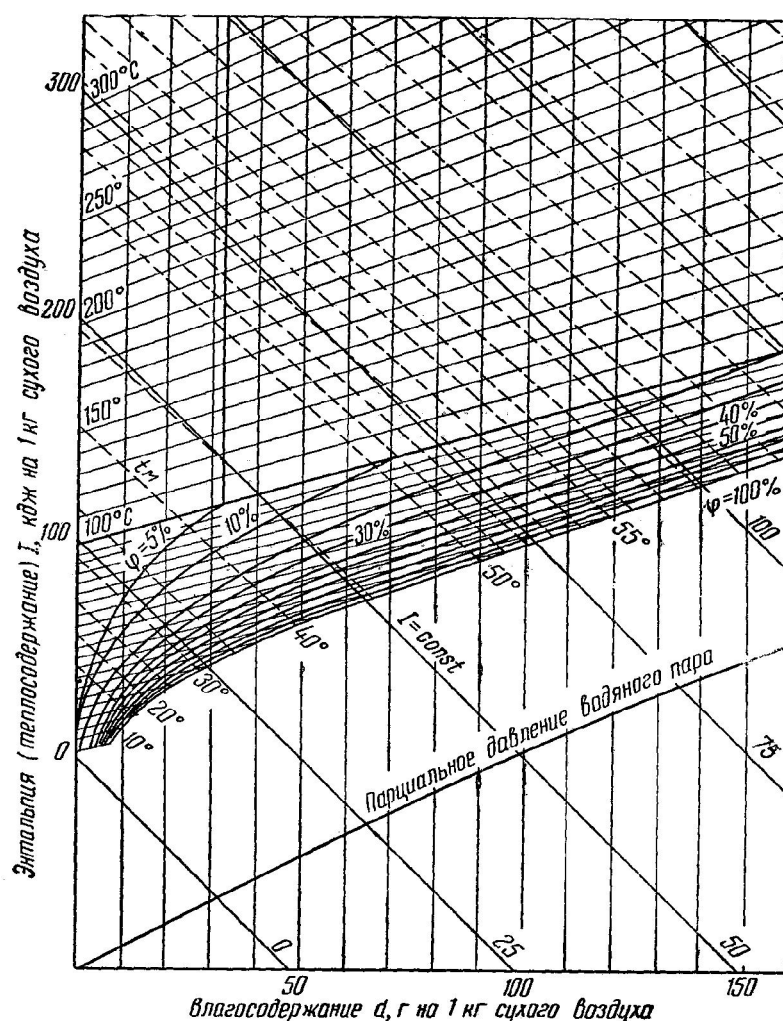


Рис.1.2 Id-диаграмма влажного воздуха

Следует отдать должное разработчикам диаграммы, которая в свое время стала новым шагом в области развития теоретических основ расчета параметров сушки, однако, во-первых, работать с диаграммой достаточно непросто, а, во-вторых, с ее помощью производится «точечный» расчет, исследование процесса как

объекта с распределенными параметрами не представляется возможным.

Рассмотренные теоретические положения легли в основу проектов сушильных установок, однако они не дают возможность исследования процессов в динамике как систем с распределенными параметрами. Такую возможность дают только математические модели детерминированного типа, основанные на уравнениях математической физики.

В работе [10] рассматриваются дифференциальные уравнения тепло- и влагопереноса, выведенные на основе общей теории тепло- и массообмена, разработанной А.В. Лыковым [34, 35]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \varepsilon \frac{r}{c} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t, \quad (1.18)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

ε – коэффициент внутреннего испарения влаги;

r – теплота фазового перехода, $\text{кДж}/\text{кг}$;

c – приведенная теплоемкость материала.

Граничные условия можно представить в следующем виде:

$$a_m \rho_0 (\nabla u)_n + a_m \rho_0 \delta (\nabla T)_n + q_m = 0, \quad (1.19)$$

$$-\lambda (\nabla T)_n + \alpha (T_c - T_n) - r(1 - \varepsilon) q_m = 0, \quad (1.20)$$

где q_m – удельный поток влаги.

Начальные условия:

$$\text{при } \tau = 0, \quad u = f_1(x); \quad t = f_2(x). \quad (1.21)$$

Данная система уравнений не имеет аналитического решения, для реализации математической модели, построенной на ее базе, необходимо применение численных методов с использованием современных компьютеров, что в 1970-е–80-е годы было невозможно.

1.2 Анализ применяемых технологических схем обезвоживания увлажненных сыпучих материалов

1.2.1 Физические предпосылки проектирования технологических схем процесса сушки сыпучих материалов

Заключительными операциями в технологических схемах обогатительных фабрик являются механическое обезвоживание и тепловая сушка.

Объектами тепловой сушки являются флотационный концентрат (полностью или частично в зависимости от мощности сушильных установок) влажностью 22–24%, мелкий концентрат (0–13 мм) влажностью 9–13% и шлам (0–1 мм) влажностью 20–26% [4, 9, 58].

На многих предприятиях металлургии черных и цветных металлов при подготовке сырья к металлургической переработке или транспортированию широко применяются процессы сушки руд, шихт и кеков [4, 9, 75].

Если материал после сушки будет транспортироваться и храниться в обычных условиях, то конечная влажность высушенного материала не должна быть меньше равновесной для условий транспорта и хранения. Иначе при хранении материал будет поглощать влагу из воздуха путем сорбции вплоть до равновесной влажности.

Характерной особенностью процесса сушки является переход влаги материала из жидкой фазы в газообразную при испарении. Испарение влаги из материала будет происходить тогда, когда парциальное давление пара окружающей среды будет меньше, чем парциальное давление пара жидкости материала.

С уменьшением разности давлений испарение влаги из материала снижается и при разности давлений, равной нулю, процесс сушки прекращается. В процессе сушки материала изменяется его вес во времени. Зная начальную влажность и вес материала, по изменению его веса можно определить влажность в любой момент сушки и эту зависимость представить в виде графика, который называется кривой сушки [4]:

$$W = f(\tau).$$

Форма кривых сушки зависит от влажности, размеров частиц материала и способа их укладки, от гидродинамических условий

обтекания, параметров среды (температуры, влажности, скорости). Совокупность этих факторов определяет характер протекания процесса сушки, который называется режимом сушки.

А.В. Лыков [34, 35], проводя работы по определению продолжительности сушки твердых частиц, разбил процесс сушки на четыре периода: первый период – первоначальная стадия (прогрев материала) до момента, когда скорость сушки принимает постоянное значение; второй период – период постоянной скорости; третий период – ненасыщенность поверхности; четвертый период – внутренняя диффузия.

После сушки материала влажность его достигает определенной величины, которую можно определять как равновесную влажность и при которой скорость сушки равна нулю.

Температура материала при достижении равновесной влажности становится равной температуре окружающей среды, так что температурные кривые могут служить хорошим критерием по определению равновесной влажности материала.

Для периода внутренней диффузии зависимость между температурой материала и его влажностью будет [34]:

$$t = t_c - \beta(W - W_p), \quad (1.22)$$

где t – средняя температура по сечению материала, град;

t_c – температура окружающей газовой среды, град;

β – некоторый постоянный коэффициент для данного режима, показывающий повышение температуры материала в период внутренней диффузии при изменении влажности на 1 %, град/%;

W – влажность материала, %;

W_p – равновесная влажность материала, %.

Температурный градиент в куске материала при сушке зависит не только от режима и размера куска, но и определяется характером того или иного периода процесса сушки. Скорость сушки, т. е. скорость изменения влажности материала в единицу времени, может быть получена методом графического дифференцирования кривых сушки:

$$-\frac{dW}{d\tau} = f(W), \quad (1.23)$$

где знак «минус» указывает, что с увеличением времени влажность материала уменьшается.

1.2.2 Классификация сушильных агрегатов

Существуют различные способы сушки материалов [4, 9, 10, 29, 63]:

- а) конвективный, когда тепло, необходимое для испарения влаги, передается от сушильного агента сушильному материалу при непосредственном их соприкосновении;
- б) контактный, когда тепло, необходимое для испарения влаги, передается материалу от горячей поверхности при непосредственном ее контакте с материалом;
- в) радиационный, когда тепло, необходимое для испарения влаги, передается материалу инфракрасными лучами от электроламп или нагретых излучающих поверхностей;
- г) сушка материалов сублимацией — в замороженном состоянии при глубоком вакууме;
- д) способ химической сушки путем предварительной пропитки материалов в водных растворах солей;
- е) сушка токами высокой частоты, когда температура внутри материала повышается и в результате этого влага из внутренних слоев быстро перемещается к наружной поверхности и испаряется в окружающую среду;
- ж) комбинированные способы сушки: конвективно-контактная сушка, сушка токами высокой частоты в комбинации с конвективной, терморadiационной и т. п.

Классификация сушилок согласно [4, 9, 10] приведена ниже (табл. 1.1).

Графически классификация может быть представлена в виде схемы, обобщающей все указанные признаки (рис. 1.3).

Рассмотрим основные особенности сушильных агрегатов, применяемых на практике: барабанные газовые сушилки; газовые трубы-сушилки; паровые трубчатые сушилки; сушилки кипящего слоя.

1.2.3 Барабанные газовые сушилки

Барабанные газовые сушилки применяются главным образом для сушки сыпучих материалов: угля, руды, песка, глины. В них также можно сушить кусковые материалы, имеющие размеры

кусков до 30 мм, и материалы, не обладающие сыпучими свойствами (флотационный концентрат и шлам). Барабанные сушилки являются сушилками непрерывного действия, которые подразделяются на следующие группы:

Таблица 1.1

Классификация сушильных установок

Признак классификации	Типы сушилок
По способу подвода тепла к материалу	Конвективные, контактные (сушка на горячих поверхностях), радиационные (сушка инфракрасными лучами), электрические (сушка в электрическом поле)
По давлению в рабочем пространстве	Атмосферные вакуумные
По способу действия	Периодического или непрерывного действия
Сушильный агент	Воздух, топочные газы, смесь воздуха с топочными газами, перегретый пар и инертные газы
По направлению движения сушильного агента относительно материала	С прямотоком, противотоком, перекрестным током и реверсивные
По характеру циркуляции сушильного агента	С естественной и принудительной циркуляцией
По способу нагрева сушильного агента	С паровыми воздухоподогревателями, огневыми воздухоподогревателями, путем смешения с топочными газами, с электронагревом
Схема нагрева сушильного агента	С централизованным подогревом, с подогревом индивидуальными агрегатами и с промежуточным Подогревом

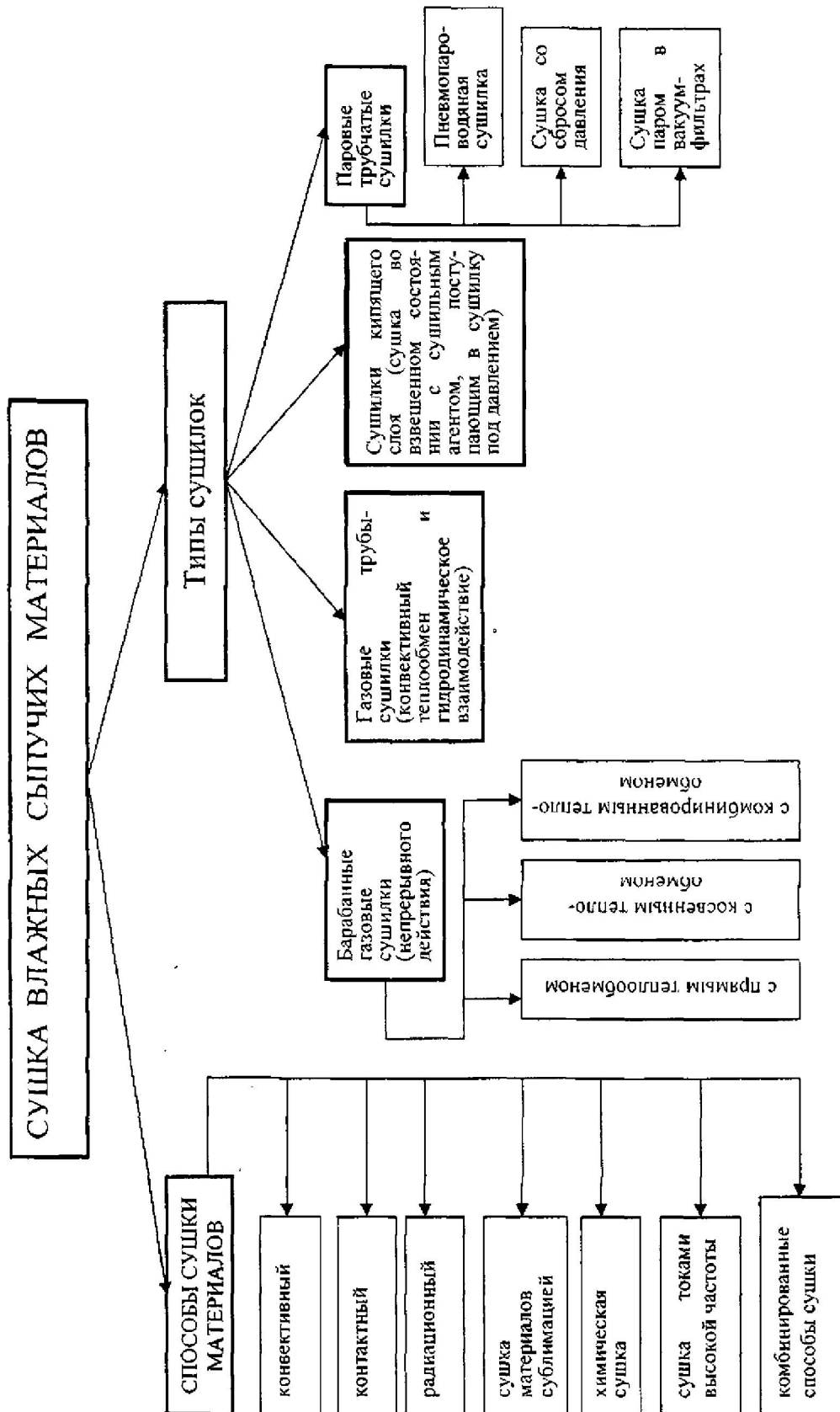


Рис. 1.3. Классификация видов технологии сушки

- сушилки с прямым теплообменом; в этих сушилках происходит непосредственное соприкосновение материала с горячими газами по прямоточной или противоточной схеме движения газов и материала;
- сушилки с косвенным теплообменом, в которых тепло передается от газов к материалу через металлическую стенку;
- сушилки с комбинированным теплообменом, в которых передача тепла материалу происходит через металлическую стенку, а также путем непосредственного соприкосновения материала с горячими газами.

Для сушки минерального сырья применяются, как правило, барабанные сушилки с прямым теплообменом и с прямотоком газов и материала [4, 9].

На предприятиях угольной промышленности для сушки угольных концентратов нашли применение газовые барабанные сушилки диаметром 2,8 м и длиной 14 м. На двух углеобогатительных фабриках установлены барабанные сушилки диаметром 3,2 м, длиной 20 м.

На коксохимических заводах для сушки флотационного концентрата и шлама применяются барабанные сушилки диаметром 2,8 м и длиной 14 м.

Основные технико-экономические показатели работы барабанных сушилок при сушке рудных и угольных концентратов приведены в [4, 9, 10].

1.2.4 Газовые трубы-сушилки

Сушке в трубах-сушилках подвергаются материалы, из которых требуется удалить свободную влагу, или материалы, обладающие малым сопротивлением внутреннего переноса влаги. Преимущественно в трубах-сушилках сушатся уголь, торф, глина. Сушка в трубах-сушилках обычно происходит при параллельном токе газов и материала. Простейшая труба-сушилка состоит из прямолинейного отрезка трубы постоянного сечения, по которому горячие газы и взвешенные в их потоке частицы материала проходят при восходящем или нисходящем движении газов.

Сушка материалов в трубах-сушилках протекает в условиях конвективного теплообмена и гидродинамического взаимодействия между движущимися частицами материала и газовым потоком.

В трубе-сушилке процесс сушки протекает во время движения частиц материала под действием газового потока. Поэтому чрезвычайно важно иметь правильное представление о характере движения материала.

Двигаясь поступательно, частицы одновременно вращаются, на что расходуется часть энергии, и их поступательное движение замедляется.

Материал, движущийся в восходящем потоке газа, распределяется неравномерно по сечению трубы. В результате торможения частиц у стенок материал концентрируется ближе к центру трубы, а газ, наоборот, прижимается материалом к периферии, отчего скорость его в центре ниже.

Неравномерность профиля скоростей увеличивается с ростом концентрации потока и скорости газа в трубе. Исследования показали, что по высоте трубы-сушилki создаются различные фазы движения материала.

При расчете процесса сушки во взвешенном состоянии имеет важное значение правильное представление о характере поведения твердых частиц в потоке газа.

Технологические показатели работы труб-сушилок достаточно полно характеризуются в [4, 9, 10, 49].

1.2.5 Сушилki «кипящего слоя»

1.2.5.1 Общий принцип функционирования

Продолжительность сушки в трубах-сушилках обычно составляет несколько секунд. При необходимости увеличения продолжительности сушки размеры труб-сушилок получаются слишком большими.

В этом случае более целесообразно переходить от обычного принципа работы труб-сушилок к принципу работы в кипящем слое. Сушилka кипящего слоя позволяет увеличить продолжительность сушки материала во много раз и регулировать ее в очень широких пределах. Этот принцип наиболее приемлем для таких материалов, продолжительность высушивания которых исчисляется десятками секунд или минутами. Таким образом, сушка материалов в кипящем слое позволяет значительно расширить область применения метода сушки во взвешенном состоянии [3, 4, 9, 33, 35, 94].

На рис. 1.4 представлена общая схема установки для сушки продуктов обогащения угля – флотационного и мелкого концентратов. Она состоит из топки 1, работающей на твердом топливе, газохода 2, сушильной камеры 4, питателей сухого 3 и влажного 6 угля, разбрасывателя 5, шибера донной разгрузки 7, обводного газохода 8, разгрузочной камеры 9, сухого 10 и мокрого 12 пылеуловителей, дымососа 11 и конвейера высушенного угля 13.

Влажный уголь из бункера питателем подается на конусный разбрасыватель, который равномерно распределяет уголь по поверхности газораспределительной решетки сушильной камеры. Камера представляет собой сварную конструкцию круглого сечения, футерованную под решеткой огнеупорным кирпичом. Над газораспределительной решеткой стенки камеры футерованы плитами из жаростойкого металла.

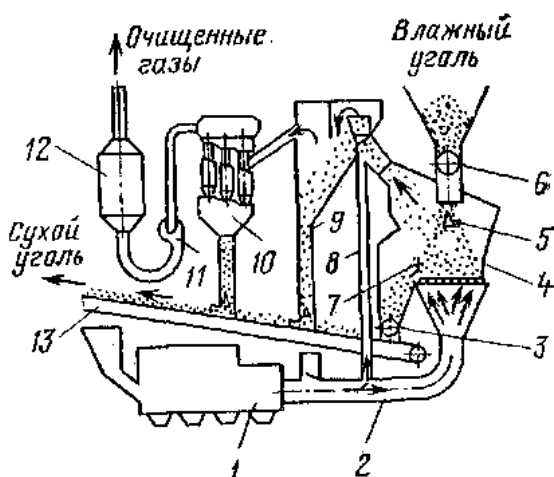


Рис 1.4 Установка для сушки угля в кипящем слое

При сжигании угля в топке получают дымовые газы с температурой 800–850 °С, которые подаются по газоходу под газораспределительную решетку со скоростью, обеспечивающей перевод угля, находящегося на решетке, в псевдооживленное состояние. В таком состоянии сушеного угля обеспечивается интенсивный тепло- и влагообмен с дымовыми газами. Высушенный материал пересыпается через порог и питателем подается на ленточный конвейер. Часть высушенного угля потоком газов уносится в разгрузочную камеру, в которой, благодаря перепаду скоростей движения газов, частицы осаждаются и

разгружаются на конвейер. Окончательно газы очищаются в сухом и мокром пылеуловителях.

Сушилки кипящего слоя могут работать как под давлением, так и под разрежением. Наибольшее распространение получили сушилки кипящего слоя, которые работают с наддувом, т. е. с сушильным агентом, поступающим в сушилку под давлением [49].

1.2.5.2 Теоретические предпосылки расчета сушилок кипящего слоя

Различают три состояния слоя сыпучего материала при прохождении через него воздуха [4, 9, 10, 49, 63].

При прохождении потока газа с малыми скоростями через слой сыпучего материала, лежащего на газопроницаемой поверхности, не изменяются состояние слоя и его объем. В этих условиях сыпучий материал представляет собой фильтрующий слой, при этом скорость газового потока меньше критической скорости.

При определенной скорости газового потока этот слой становится похожим на вязкую жидкость, т. е. переходит в псевдооживленное состояние, образуя «кипящий» слой. Скорость газового потока, соответствующая началу кипения слоя, носит название критической скорости псевдооживления.

При последующем увеличении скорости газового потока до предельной скорости псевдооживления весь слой переходит во взвешенное состояние, при этом скорость газового потока достигает скорости витания частиц.

Условие перевода сыпучего материала в псевдооживленное состояние может быть записано следующей формулой [49]:

$$\Delta p_{сл} = \frac{gG}{F} = H(1 - \varepsilon)(\rho_m - \rho_g)g \quad (1.24)$$

где $\Delta p_{сл}$ – перепад давления в «кипящем» слое, н/м²;

G – масса твердых частиц слоя, кг;

F – поверхность решетки, м²;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

H – высота слоя, м;

ε – порозность кипящего слоя (доля пустот);

ρ_m, ρ_g – плотность твердых частиц и газа, кг/м³.

Для определений оптимальной скорости газового потока, обеспечивающей интенсивное перемешивание кипящего слоя

зернистого материала, И. М. Федоровым рекомендована формула [63]:

$$Re_{opt} = 0,19Fe^{1,56}, \quad (1.25)$$

$$Fe = d_{cp}^3 \sqrt[3]{\frac{4g(\rho_m - \rho_g)}{3\nu^2 \rho_g}};$$

$$\nu = \frac{Re\nu}{d_{cp}} \quad \text{для значений } 40 < Fe < 200,$$

где Re – критерий Рейнольдса;

Fe – критерий Федорова;

d_{cp} – средний диаметр зерна, м;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

ν – кинематическая вязкость газов, м²/с;

v – скорость газового потока, м/с.

Определение оптимальной скорости «кипящего» слоя для гранул угольных флотационных концентратов может быть произведено по формуле $Re_{opt} = 0,427Fe^{1,56}$.

В критерий Fe входит средний диаметр гранул:

$$d_{cp} = 0,228W_2^p + 0,16, \quad \text{мм}$$

для рабочей влажности $W_2^p = 7 - 11\%$.

На рис. 1.5 изображены графики, определяющие границы существования псевдооживленного слоя, порозность ε которого может изменяться в пределах 0,4–1,0. В данном случае критерий Re заменен критерием Лященко Lu . Пользуясь графическими зависимостями, можно ориентировочно определить не только критическую скорость и скорость витания, но и скорость потока.

Тепло- и массообмен в процессе сушки в «кипящем» слое может значительно изменяться в зависимости от свойств высушиваемого материала и режима сушки.

Для угля И. М. Федоровым была получена зависимость

$$Nu = 0,23Re^{0,863}, \quad (1.26)$$

которая справедлива для $Re = 20 \div 500$;

$$Nu = \frac{\alpha d_{cp}}{\lambda_C} \quad (1.27)$$

где Nu – критерий Нуссельта;

α – коэффициент теплообмена, $\text{Вт}/\text{м}^2 \times ^\circ\text{С}$;
 $\lambda_{\text{с}}$ – коэффициент теплопроводности газа, $\text{Вт}/\text{м} \times ^\circ\text{С}$.

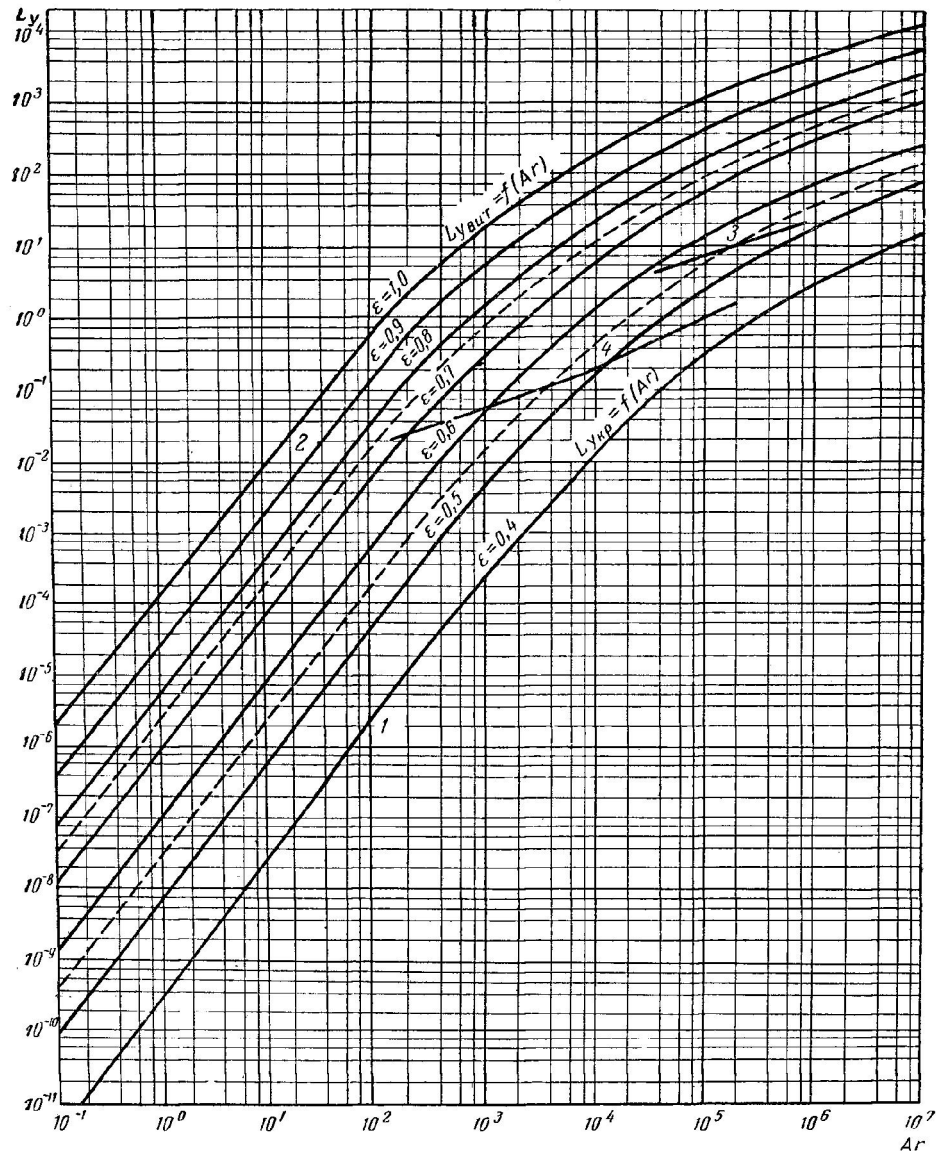


Рис. 1.5 Зависимость критерия Лященко Ly от критерия архимеда Ar при разной порозности ε слоя:
 1 – зависимость $Ly_{кр} = f(Ar)$ при $\varepsilon = 0,4$; 2 – зависимость $Ly_{вум} = f(Ar)$ при $\varepsilon = 1$;
 3 – оптимальные значения Ly ; 4 – оптимальные значения скоростей
 Область между пунктирными линиями – ориентировочная область работы сушилок кипящего слоя

Для сушки смеси, состоящей из мелкого и флотационного угольных концентратов, в сушилке кипящего слоя с направленным потоком «коэффициент» теплообмена может быть определен по формуле

$$Nu = 0,227 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{1,82} . \quad (1.28)$$

Количество газов (сушильного агента) (L , кг) для сушилок с кипящим слоем может быть определено с помощью Id диаграммы или расчетным путем.

По количеству сушильного агента L определяют необходимую площадь удерживающей решетки:

$$F_p = \frac{L}{3600v_r \rho_r}, \quad (1.29)$$

где v_r – оптимальная скорость сушильного агента, м/с;

ρ_r – плотность сушильного агента, кг/м³.

Высота «кипящего слоя» принимается на основании опытных данных равной 0,5–0,6 м. Для псевдооживленного слоя флотационного концентрата установлена следующая зависимость между сопротивлением слоя и его высотой:

$$\Delta p = 3,3H, \quad (1.30)$$

где Δp – сопротивление слоя, кН/м²;

H – высота псевдооживленного слоя, м.

Количество материала, которое одновременно находится в «кипящем» слое сушильной установки, определяется из уравнения, характеризующего условия существования «кипящего слоя»:

$$G = \frac{\Delta p F_p}{g}, \text{ кг} \quad (1.31)$$

Среднее время пребывания частиц в «кипящем слое»

$$\tau = \frac{G}{\frac{1}{2}(G_1 + G_2)}, \quad (1.32)$$

где G_1 и G_2 – производительность установки по исходному и высушенному продукту, т/ч.

Вместо $1/2(G_1 + G_2)$ можно подставить среднюю часовую производительность сушилки в т/ч.

Аппарат с направленным перемещением кипящего слоя отличается сравнительно низким уносом материала. Так, при скорости газов над слоем 2,46–2,51 м/сек и конечной влажности угля 8,4–8,5% унос мелочи составлял 0,3–0,37% от расхода сухого угля, а при скорости газа 3,43–3,5 м/сек – 0,67–0,71%.

При сушке флотационного концентрата до влажности 10,9–11,2% унос составлял 1,1–1,2%, а при конечной влажности 7% – 3,6–3,9%.

Незначительный унос материала из аппарата объясняется расширением потока газов кверху и отсутствием перемешивания высушенного угля по всему объему слоя, как это имеет место в аппаратах круглого и прямоугольного сечения.

1.3 Результаты анализа теоретических основ и технологических схем процесса обезвоживания влажных сыпучих материалов и задачи исследования.

Осуществление любого практического мероприятия включает в себя ряд стандартных этапов: постановка цели, определение физической сущности задачи, определение исходного набора составляющих технологической схемы, разработка теоретических основ расчета параметров реального процесса, разработка проекта, техническая реализация, лабораторные и натурные эксперименты, промышленные испытания и окончательное оформление проекта. При этом нередко запуск проекта не является конечной стадией, чаще всего технология требует постоянного совершенствования, а это, в свою очередь, вызывает необходимость развития теоретической базы и математического аппарата для обеспечения возможности предварительных исследований, не связанных с натурными экспериментами.

Рассматриваемый процесс обезвоживания сыпучих материалов является важнейшей составляющей в ряде отраслей промышленности.

На основании исследований и разработок, выполненных учеными в данной области, созданы и функционируют на различных предприятиях установки, осуществляющие процесс обезвоживания сыпучих материалов. Вместе с тем, учитывая постоянно изменяющиеся условия эксплуатации, связанные как с дефицитом энергоресурсов, так и с ужесточающимися требованиями к экологической составляющей деятельности промышленных предприятий, продолжаются исследования процессов и технологических схем с целью их дальнейшего совершенствования.

Результатами многочисленных теоретических и экспериментальных исследований обосновано, что наиболее прогрессивным способом является сушка в «кипящем слое», подчеркивается его экономичность, более низкая по сравнению с

другими способами экологическая вредность [4, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 27, 28, 30, 31, 34, 35, 42, 49, 63, 66, 67]. Однако используемые в настоящее время теоретические предпосылки не дают возможности исследования процессов в динамике как систем с распределенными параметрами. Такую возможность обеспечивают только математические модели детерминированного типа.

Цель работы – развитие теоретических основ исследования и обоснования параметров процесса сушки в аппаратах «кипящего слоя», обеспечивающих эффективное функционирование технологических схем и повышение качества их проектирования за счет применения математического моделирования, заменяющего дорогостоящие натурные эксперименты.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ технологических особенностей установок по обезвоживанию влажной сыпучей массы традиционными способами, в том числе и способом «кипящего слоя»;
- разработать математические модели и провести компьютерные исследования процессов распределения температурного поля, скорости частиц и концентрации материала в рабочем пространстве сушильного аппарата «кипящего слоя»;
- разработать критериальные модели для инженерного расчета отдельных технологических параметров процесса сушки в «кипящем слое»;
- провести сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных для определения степени адекватности моделей;
- разработать рекомендации по модернизации параметров процесса сушки в «кипящем слое» в условиях действующих предприятий;
- разработать рекомендации для практического применения теоретических результатов к проектированию и расчету параметров процесса обезвоживания влажных сыпучих масс в аппаратах «кипящего слоя».

Реализация поставленных целей и задач позволит расширить теоретические основы для исследования процессов сушки обогащенного угля и обезвоживания сыпучих материалов с использованием способа «кипящего слоя» и усовершенствовать методы проектирования технологических схем.

Раздел 2. Математическое моделирование процессов сушки в установках «кипящего слоя»

2.1 Характеристика отечественных и зарубежных установок «кипящего слоя» и физические основы постановки задачи моделирования

Сушилки «кипящего слоя» функционируют в ряде стран СНГ и за рубежом [104, 105, 106].

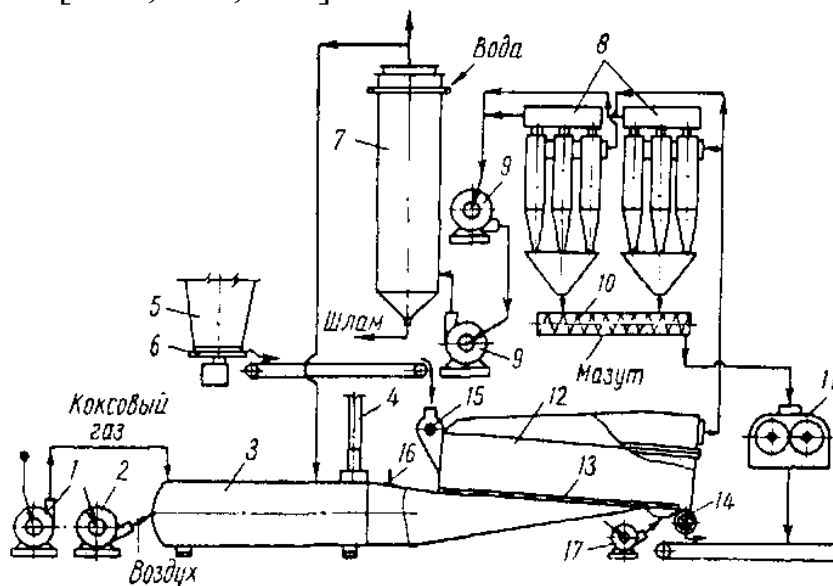


Рис. 2.1 Сушильная установка Донецкого КХЗ

1 – газодувка; 2 – вентилятор; 3 – топка; 4 – растопочная труба; 5 – бункер влажного материала; 6 – дозировочный стол; 7 – скруббер; 8 – батарейный циклон; 9 – дымосос; 10 – шнек; 11 – брикетный пресс; 12 – сушильная камера; 13 – газораспределительная решетка; 14, 15 – шлюзовые затворы; 16 –отсекающий шибер; 17 – вентилятор

2.1.1 Сушильная установка Донецкого КХЗ

Донецким коксохимическим заводом совместно с Донецким филиалом института Гипросталь внедрена установка для сушки продуктов обогащения угля в кипящем слое (рис. 2.1).

С помощью газодувки 1 и вентилятора 2 в топку 3 подаются соответственно коксовый газ и воздух. Топка снабжена растопочной трубой 4. Исходный материал (угольная шихта с содержанием класса менее 3 мм – 85-87%) из бункера 5 дозировочным столом 6 выгружается на конвейер, а затем подается в шлюзовый затвор 15, который загружает реактор 12 с провальной

решеткой 13. Высушенный уголь выгружается с помощью шлюзового затвора 14 на конвейер, куда поступает также спрессованная в прессе 11 пыль из циклонов 5. Отработанный теплоноситель транспортируется дымососами 9 и через скруббер 7 подается в рециркуляцию и частично сбрасывается в атмосферу.

Температура в слое угля, как и температура отходящих дымовых газов, колеблется в пределах 85–100° С.

Технические характеристики установки для сушки продуктов обогащения угля в «кипящем слое» приведена ниже в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Технические характеристики установки для сушки в кипящем слое

Производительность по углю, т/ч	80–120
Производительность по испаренной влаге, т/ч	5
Площадь газораспределительной решетки, м ²	2,5
Удельная производительность по углю, т/м ² ·ч	32–48
Удельный влагосъем, т/м ² ·ч	2
Влажность угля, %:	
до сушки	13-14
после сушки	7-10
Мощность, потребляемая двигателем сушильной установки, кВт	170
Начальная температура теплоносителя, °С	500–650
Расход теплоносителя м ³ /ч	30000
Гидравлическое сопротивление решетки (включая псевдоожиженный слой), мм вод. ст	150–200

2.1.2 Установка Дзержинского КХЗ

Установка с аналогичным принципом действия производительностью 70–80 т/ч по исходному углю сооружена по проекту УкрНИИУглеобогащения совместно с заводом на Днепродзержинском КХЗ.

Схема установки представлена на рис. 2.2, характеристики – в табл. 2.2.

Исходный флотоконцентрат с 10% крупнозернистого шлама рассредоточенно загружается в цилиндрическую сушильную

камеру 1 спирально-коническим разбрасывателем 3. Псевдооживленный слой создается на газораспределительной решетке 2, а разгрузка высушенного угля осуществляется через отверстие с регулируемым порогом в боковой стенке и желоб 4.

Теплоноситель образуется в горизонтальной топке 13 в результате сжигания коксового газа и разбавления продуктов горения воздухом.

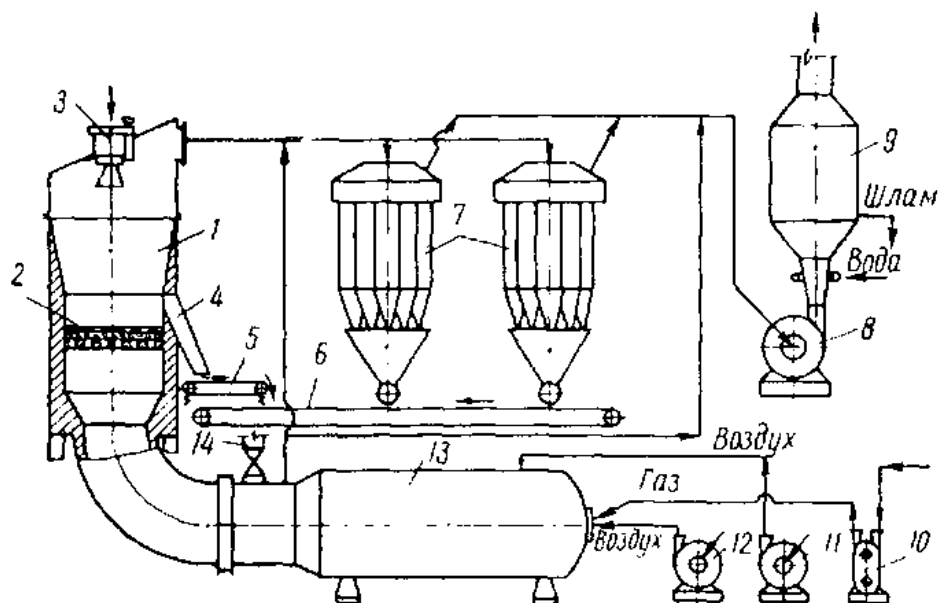


Рис. 2.2 Сушильная установка Днепродзержинского КХЗ:

1 – сушильная камера; 2 – газораспределительное устройство; 3 – разбрасыватель; 4 – желоб; 5 – ленточные весы; 6 – конвейер; 7 – батарейный циклон; 8 – дымосос; 9 – мокрый прямоточный пылеуловитель; 10 – газодувка; 11 – вентилятор вторичного воздуха; 12 – вентилятор первичного воздуха; 13 – топка; 14 – растопочная труба

Отработавший теплоноситель отсасывается дымососом 8 через систему 7 сухой пылеочистки, проходит через мокрый пылеуловитель 9 и выбрасывается в атмосферу. Для сброса горячих газов в период розжига топки и остановок имеется растопочная труба 14. Установка работает в технологическом комплексе углефабрики и ее обслуживают два человека.

2.1.3 Установка Макеевского КХЗ

На Макеевском коксохимическом заводе по проекту Донецкого политехнического института и завода была построена и эксплуатируется опытно-промышленная сушильная установка с

направленным перемещением псевдоожиженного слоя от загрузки к выгрузке. Схема цепи аппаратов установки Макеевского КХЗ представлена на рис. 2.3.

Таблица 2.2

Сравнительные характеристики установок Донецкого и
Днепродзержинского КХЗ

Предприятие	Донецкий КХЗ (коксовая шихта)	Днепродзержинский КХЗ (флотационный концентрат)
Влажность угля, %		
до сушки	12	21,9
после сушки	8,2	13,5
Площадь поверхности решетки, м ²	2,5	7
Высота слоя, мм	200	500^00
Влагонапряженность, т/(м ² -ч)	2,2	1,8
Расход:		
тепла на 1 кг испаренной влаги, кДж	4300	3980
теплоносителя, м ³ /(м ² -ч)	10000	9000
электроэнергии на 1 т испаренной влаги, кВт-ч	30	35
Температура теплоносителя, °С	619	500
Унос, % к высушенному углю	4,8	24

Исходный уголь, смесь флотоконцентрата с крупнозернистым шламом и мелким концентратом направляется конвейерами в цепной забрасыватель 7, а затем — в сушильную камеру 8. Псевдоожиженный слой образуется на провальной газораспределительной решетке 9.

Для образования теплоносителя предназначена вертикальная топка 3, в которую с помощью газодувки 1 подается доменный газ, а вентилятором 2—воздух на горение и разбавление. В топку на горение также поступает и коксовый газ. Топка оборудована растопочной трубой 4. Установленный перед сушильной камерой скребковый конвейер 5 имеет в днище клиновидную щель для равномерного распределения исходного угля по ширине загрузочного желоба. Отработанный теплоноситель отсасывается дымососом 11 через одноступенчатую сухую систему очистки, после чего часть его подается вентилятором 12 на рециркуляцию.

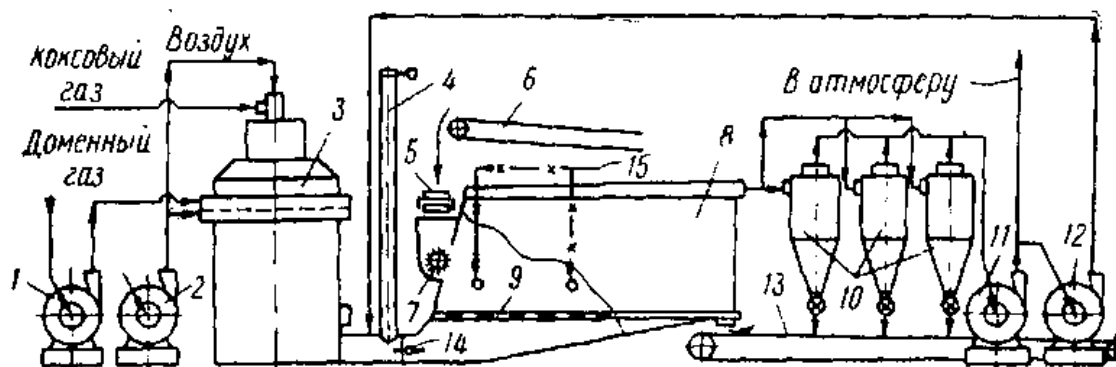


Рис. 2.3. Сушильная установка Макеевского КХЗ:

1 – газодувка; 2 – вентилятор; 3 – топка; 4 – растопочная труба; 5 – скребковый конвейер; 6 – ленточный конвейер; 7 – цепной забрасыватель; 8 – сушильная камера; 9 – газораспределительная решетка; 10 – циклоны; 11 – дымосос; 12 – вентилятор рециркуляции; 13 – конвейер; 14 – отсекающий клапан; 15 – паропровод

Установка работает в технологической схеме обогатительной фабрики и обслуживается двумя операторами.

2.1.4 Зарубежные сушилки псевдоожиженного слоя

Наибольшее распространение сушка угля в псевдоожиженном слое получила в США. Первые попытки осуществить сушку угля в псевдоожиженном слое были сделаны в начале 1950-х годов на основе грохотов-сушилок.

Последние отличаются от сушильных установок в псевдоожиженном слое тем, что газовый теплоноситель может поступать как сверху на слой угля, так и снизу со скоростью, не обязательно равной скорости псевдоожижения. При этом удаление влаги осуществляется одновременно механическим и термическим способами.

Грохоты-сушилки используются на обогатительных фабриках США в основном для сушки влажного угля крупностью более 3 мм. Основным недостатком грохота-сушилки является сложность конструкции.

В Линвилле (штат Индиана) в 1956 г. была сдана в эксплуатацию углеобогатительная фабрика с сушилками псевдоожиженного слоя фирмы «Дорр-Оливер». Схема сушилки представлена на рис. 2.4. Сушильная установка фирмы «Дорр-Оливер» весьма проста по компоновке. Установка состоит из топки

для получения теплоносителя, сушильного реактора, загрузочного и разгрузочного устройств, дутьевого и пылеулавливающего оборудования.

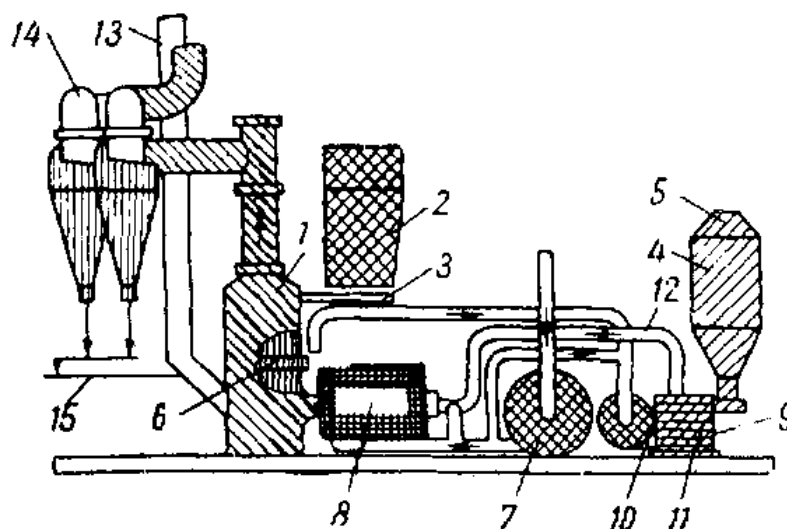


Рис. 2.4. Сушильная установка фирмы «Дорр-Оливер»:

1 – реактор; 2 – бункер исходного угля; 3 – питатель; 4 – бункер для пыли; 5 – пыль из циклонов; 6 – газораспределительная решетка; 7 – вентилятор воздуха на разбавление; 8 – камера подогрева и разбавления воздуха; 9 – форсунка для пылевидного топлива; 10 – вентилятор воздуха на горение; 11 – топка; 12 – трубопровод; 13 – растопочная труба; 14 – циклоны; 15 – контейнер высушенного угля.

Для получения сушильного агента в топке сжигается 16—17 кг угольной пыли для сушки 1 т угля. Топка имеет форсунки для нефти, которые при необходимости включаются в работу.

Топки выполняются вертикальными и горизонтальными. Работа топки под давлением позволяет получать высокое теплонапряжение с единицы объема.

Сушильные реакторы диаметром 1600—2100 мм устанавливают на вертикальную топку, а большего диаметра — на горизонтальную топку.

В связи с непосредственным совмещением топки и реактора растопочная труба проходит через нижнюю (подрешетную) часть реактора.

Загрузка угля в реактор осуществляется из бункера сдвоенным шнековым питателем. Питатель снабжен электронным устройством для автоматического регулирования числа оборотов шнеков.

Высота псевдооживленного слоя в реакторе регулируется разгрузочной задвижкой, которая приводится в действие автоматически в зависимости от сопротивления слоя.

Сушилка «Дорр-Оливер» работает в открытом (без рециркуляции) цикле под давлением. Дутьевое оборудование состоит из двух вентиляторов, один из которых подает воздух на горение, второй – на разбавление теплоносителя.

Пылеулавливание, как правило, двухступенчатое и состоит из группового Циклона и скруббера. В газах, выбрасываемых в атмосферу, содержится до $0,136 \text{ г/м}^3$ пыли.

Особенностью режима сушки является весьма большой расход теплоносителя $11000\text{—}12000 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, что соответствует скорости $3,7\text{—}4,25 \text{ м/сек}$. При этих скоростях уносится в циклоп $50\text{—}60\%$ от общего количества высушенного продукта.

Первоначально температура теплоносителя составляла $600\text{—}700^\circ\text{C}$, затем была снижена до $412\text{—}460^\circ\text{C}$, а в последнее время вновь повышена до $462\text{—}649^\circ\text{C}$.

Температура отработавших газов на выходе из сушилки колеблется от 60 до 80°C .

Расход тепла составляет 900 ккал/кг испаренной влаги.

Предохранительными устройствами на установке являются индикаторы температуры, автоматически включающие подачу охлаждающей струи, и электрические блокировочные устройства для предупреждения перегрузок оборудования.

На установке предусмотрен автоматический контроль и регулирование влажности конечного продукта.

На обогатительной фабрике компании «Юнайтед Стейтс Стил Корпорейшн» в городе Веллингтоне (штат Юта) была пущена в эксплуатацию сушилка производительностью 725 г/ч по исходному или 23 г/ч по испаренной влаге для коксующегося угля крупностью $158\text{—}0 \text{ мм}$.

Производительность действующей сушильной установки компании «Инлэнд Стил Ко» составляет 163 г/ч по исходному или 20 г/ч по испаренной влаге для коксующегося угля крупностью $16\text{—}0 \text{ мм}$.

Опыт эксплуатации двух сушилок псевдооживленного слоя на заводе Гэри в Западной Виргинии показал, что производительность

обеих сушилок была удвоена по сравнению с проектной (37 г/ч по испаренной влаге).

Таблица 2.3

Техническая характеристика сушилок фирмы «Дорр-Оливер»

Показатели	Диаметр реактора, м	
	2,1	4,3
Площадь газораспределительной решетки, м ²	3,45	14,5
Высота псевдоожиженного слоя, мм	—	1000
Температура, °С: под решеткой над слоем	600–700 80	412 65
Расход теплоносителя, м ³ /(ч·м ²)	10 500	11600
Крупность угля, мм	6,3–0	15,8–0
Влажность угля, %: начальная конечная	11,0 2,0	14,5 4,8
Производительность по испаренной влаге, т/ч	6,0	18,0
Напряжение по влаге, кг/(м ² ·ч)	1725	1250
Установочная мощность на 1 т испаренной влаги, квт·ч	56	52

Уголь влажностью 9–14% подается в каждую сушилку из аккумулирующего бункера шнековым питателем производительностью 375 г/ч. Скорость подачи материала регулируется в зависимости от температуры псевдоожиженного слоя угля, которая поддерживается в пределах 65–70° С.

Теплоноситель получают в результате сжигания угля и подают в реактор при температуре 480–650° С.

Система пылеулавливания состоит из шести циклонов и мокрого скруббера. Очищенные газы выбрасываются в атмосферу.

Фирмой «Дорр-Оливер» сооружено более семи установок для сушки угля в псевдоожиженном слое общей производительностью 2300 г/ч, характеристика которых приведена в табл. 2.4.

На обогатительной фабрике № 3 Вестморлэндской угольной компании в штате Западная Виргиния работает сушильная установка псевдоожиженного слоя фирмы «Мак-Нелли». Сушильная часть реактора имеет переменное сечение, увеличивающееся от газораспределительной решетки, что снижает унос и создает лучшие условия для псевдоожижения.

Дымосос, установленный на отсасывающей стороне сушилки, создает в системе разрежение, хотя в схеме имеется и нагнетательный вентилятор.

Таблица 2.4

Технические характеристики сушилок фирмы «Дорр-Оливер» (США)

Штат	Диаметр сушилки, мм	Производительность по исходному, т/ч	Съем влаги, т/ч	Крупность угля, мм
Индиана	2100	100	10,0	6-0
Западная Виргиния	4200	700	70,0	10-0
Кентукки	4200	230	25,0	15-0
Западная Виргиния	3600	230	17,0	10-0
Пенсильвания	1800	140	6,5	10-0
Юта	4200	800	25,0	38-0
Кентукки	2100	100	11,0	10-0

Газы с 650—760° С поступают из топки в камеру смешения, в которой воздухом разбавляются до 430—460°С. Затем теплоноситель проходит по борову, который снабжен регулятором-заслонкой, и поступает в реактор.

Для непрерывного контроля процесса сушки и поддержания постоянного режима в топке имеются контрольные устройства, которые регулируют подачу топлива и создают постоянную температуру около 650°С, что увеличивает сроки службы футеровочного огнеупорного материала.

При помощи воздушного регулятора горячие газы в сушилку подаются в зависимости от нагрузки и температуры газового потока на входе в сушилку. Если подача угля в сушилку по каким-либо причинам уменьшается, и температура газов на выходе отклоняется от номинальной, регулятор открывает доступ воздуха в камеру смешения. Если при этом температура продолжает расти, то регулятор открывает заслонку растопочной трубы. При нарушении работы дымососа автоматически открывается заслонка растопочной трубы. На установке по схеме предусмотрена блокировка электродвигателей механизмов.

Огнеупорным материалом футерованы топка, камера смешения, газоход к реактору и нижняя (подрешеточная) часть реактора.

Низкая температура угля и газов исключает необходимость футеровки сушильной части реактора над решеткой.

Ниже приведены некоторые показатели работы сушилки.

Температура газов, °С:	
под решеткой	430—480
над решеткой	66—77
Температура сухого угля, °С	55—66
Влажность угля, %:	
начальная	12
конечная	3

Производительность сушилок от 25 до 500 г/ч по исходному углю и 3—36 г/ч по испаренной влаге. Сушилки работают с топкой на твердом топливе.

Следует отметить, что в зарубежной практике в сушилках фирмы «Мак-Нелли» впервые осуществлена сушка угольного шлама.

2.1.5 Основные узлы сушилки «кипящего слоя»

2.1.5.1 Сушильная камера.

Рассмотрение различных конструкций сушилок кипящего слоя показывает, что они представляют собой сварные камеры той или иной формы и имеют газораспределительное устройство. Газораспределительная решетка делит сушильную камеру на верхнюю и нижнюю части.

Нижняя часть сушилки представляет собой газовую камеру, в которую поступают газы из топки. Для более равномерного распределения газов по площади решетки газовой камере целесообразно придавать форму сужающейся вверх до размера решетки. Газовая камера изнутри должна быть футерована огнеупорным кирпичом.

Верхняя часть сушилки состоит из зоны кипящего слоя и сепарационного пространства. Высота кипящего слоя, на основании практических данных, обычно не превышает 300—700 мм в зависимости от свойств высушиваемого материала, режима сушки и конструкции сушильной камеры.

Высота сепарационного пространства должна обеспечивать возможно меньший вынос частиц из сушилки.

Исследования показали, что при скорости газов 3,6 – 4,2 м/сек и диаметре сушилки цилиндрической формы 4,2 м критическая высота сепарационной высоты должна быть около $3-4D_{ан}$. Отсюда

следует, что форма камеры должна выполняться в виде конуса с углом раскрытия 6–8°. Это мероприятие позволяет значительно сократить высоту камеры.

На основании опыта работы сушилок кипящего слоя высота сепарационного пространства в конусных камерах должна быть в 3,5–4,5 раза больше высоты слоя.

2.1.5.2 Газораспределительные устройства.

Эти устройства выполняют две функции – поддерживающей конструкции и приспособления для равномерного распределения газа по сечению аппарата. Различают два основных типа решеток: провальные и беспровальные.

Провальная решетка – это плита, через отверстия которой проваливается материал при остановках. Беспровальная решетка не допускает провала материала ни во время работы, ни при остановках. Наиболее предпочтительной является последняя. Провальные решетки применяются в большинстве случаев при сушке легко кристаллизующихся материалов, которые приплавляются к решетке, образуя спекшиеся куски.

Газораспределительная решетка является основным элементом сушилки кипящего слоя. От конструкции и живого сечения решетки во многом зависит стабильность кипения слоя.

И. М. Федоров отмечал, что для равномерного кипения необходимо, чтобы сопротивление решетки было равно сопротивлению слоя материала или было больше него. С. С. Забродский считает, что решетки должны отвечать двум условиям: шаг отверстий не может быть больше диаметра частиц, расположенных непосредственно на решетке, и сопротивление последней при рабочей скорости должно быть настолько велико, чтобы при обнажении части ее скорость газов в закрытых материалом точках не стала ниже скорости псевдооживления.

Практика показала, что для достижения равномерного кипения относительно неглубокого слоя материала необходимо поддерживать сопротивление решетки 250–300 мм вод. ст.

На укрупненной лабораторной установке М. И. Бейлиным были проведены исследования по определению влияния конструкции и живого сечения решетки на стабильность процесса кипения.

Было испытано девять типоразмеров решеток: грибковая с живым сечением 1,55 и 3,1%, сверленная с живым сечением 1,5; 3,1; 6 и 12%, а также шпальтовая с живым сечением 4, 5, 12; 18 и 25%.

Исследования показали, что наибольшее среднеквадратичное отклонение скоростей наблюдается на шпальтовом сите, имеющем в то же время минимальное сопротивление. Наименьшее отклонение скоростей, а следовательно, наивысшая стабильность слоя имеют место при установке двух шпальтовых сит с засыпкой, а также грибковой решетки. В этих случаях стабильность слоя практически одинакова, но сопротивление грибковой решетки более чем в два раза выше. Таким образом, лучшими решетками являются шпальтовая с засыпкой и грибковая.

Обычно беспровальная решетка состоит из нижнего перфорированного металлического листа и верхнего щелевидного сита, между которыми укладывается слой металлических цилиндров (шариков) или кусочков гравия.

Провальные решетки выполняются различных типов: щелевидные, перфорированные и др.

Щелевидные ступенчатые решетки собираются из полосового железа толщиной 4–8 мм в виде ступеней (уклон в сторону разгрузки 3–8°). Полосы накладываются друг над другом с напуском 30–60 мм и с зазорами, исходя из заданного живого сечения решетки (зазор 12 мм с расчетом 9% живого сечения решетки). В центре решетки сделана точка.

Горизонтальное направление потоков дутья обеспечивает кипение слоя и в то же время сдувает с решетки крупные куски. Этой же цели способствует перепад высоты решетки в сторону точки. В качестве щелевых решеток иногда используются шпальтовые сита с площадью живого сечения 8–12%. В сушилках больших размеров решетки состоят из набора профилированных колосников, которые поддерживаются снизу балкой из огнеупорного материала, расположенной в центре камеры. Они выполняются в виде купола из отдельных сегментов с овальными отверстиями размером 2–3 мм, изготовленных из нержавеющей стали. В центре решетки размещается небольшая круглая плита, опирающаяся на балку из огнеупорного материала.

Рассмотренные технические показатели определяют исходные физические условия для математической постановки задачи.

2.2 Разработка математических моделей для исследования параметров процесса

Общие требования к построению математических моделей.

Важнейшим этапом разработки технологических систем является построение математической модели объекта или процесса. На базе математической модели объекта, формируются критерии качества и ограничения, выбираются структура и параметры проекта системы, технические средства реализации. Для технологических процессов тепловой обработки материалов могут быть построены различные по полноте и сложности описания математические модели. Основным фактором, определяющим полноту и точность математической модели, является цель моделирования.

Существует два основных метода построения математических моделей:

- 1) разработка модели на базе физических законов протекания процессов, в частности, законов тепломассопереноса;
- 2) экспериментально-статистические методы построения модели.

Экспериментально-статистические методы сводятся к построению весовой (импульсной переходной) функции объекта, которая полностью определяет его статистические и динамические свойства [13]. На базе экспериментальных данных, полученных в процессе нормального функционирования объекта, определяются весовые функции различных одномерных каналов типа "температура греющей среды в зоне, температура материала на выходе из зоны" [13] и т.д.

Экспериментально-статистический метод построения моделей обладает рядом недостатков: требует большого количества труднодоступной информации о процессе, получаемые модели работают лишь в узком диапазоне изменения параметров. В силу указанных недостатков экспериментально-статистический метод не нашел широкого использования на практике.

Для математического моделирования технологических процессов тепловой обработки материалов более удобным в инженерном отношении и универсальным является первый метод построения, базирующийся на физических законах теплопередачи: излучение (законы Планка, Стефана-Больцмана, Ламберта и др.),

конвекция (закон Ньютона-Рихмана), теплопроводность (закон Фурье).

Построение модели на базе физических законов сводится к следующим этапам:

- 1) обоснование и выбор структуры математической модели на основании физических соображений и целей моделирования;
- 2) оценивание параметров модели по имеющимся данным о процессе;
- 3) проверка адекватности математической модели реальному процессу.

2.2.1 Постановка задачи математического моделирования сушки сыпучих материалов в «кипящем слое»

Значительный интерес для организации процесса сушки сыпучих материалов представляет режим локального фонтанирования в псевдооживленный слой, используемый для высушивания влажных сыпучих масс, а также грануляции и обезвоживания веществ из растворов [7, 9, 12, 14, 30, 31, 32, 49].

Сушка происходит в аппарате, схема которого показана на рис. 2.5. В камеру сушилки, снабженной газопроницаемым поддерживающим устройством в виде сетки, пористой перегородки и т.п., которое будем называть газораспределительной решеткой, помещается сыпучий материал.

Для создания режима локального фонтанирования применяют газораспределительную решетку, позволяющую вводить в псевдооживленный слой оживающий агент с высокой скоростью. Благодаря этому в слое образуются зоны, в которых частица и среда движутся с более высоким, чем в слое, скоростями, а обмен между этими зонами делает более интенсивными процессы тепло- и массообмена [14, 18, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 49, 63, 101].

Гидродинамическая структура потоков, возникающих при локальном вводе оживающего агента в псевдооживленный слой, указывает на наличие четырех зон перемешивания (рис. 2.6) [31, 33, 35].

Зона I - фонтан из частиц, движущихся вверх.

Зона II - прирешеточная активная зона.

Равнодействующая сил на частицы в этой зоне направлена в сторону фонтана вследствие интенсивного перемешивания и втягивающей силы фонтана.

Зона III - зона слоя, прилегающего к фонтану и активно питающая фонтан.

Зона IV - наименее активная зона с преимущественным движением вниз за счет обмена с активной прирешеточной зоной II и зоной III.

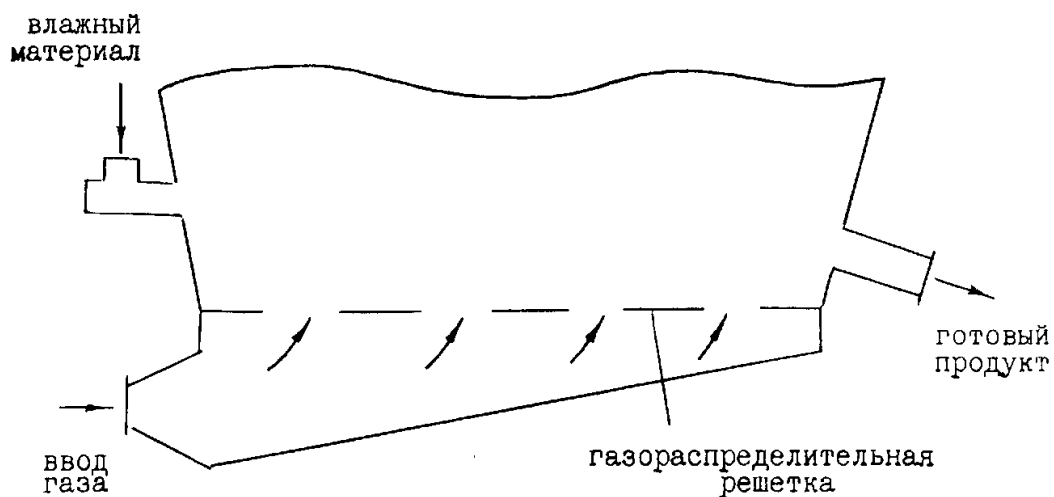


Рис. 2.5 Схема сушильного аппарата

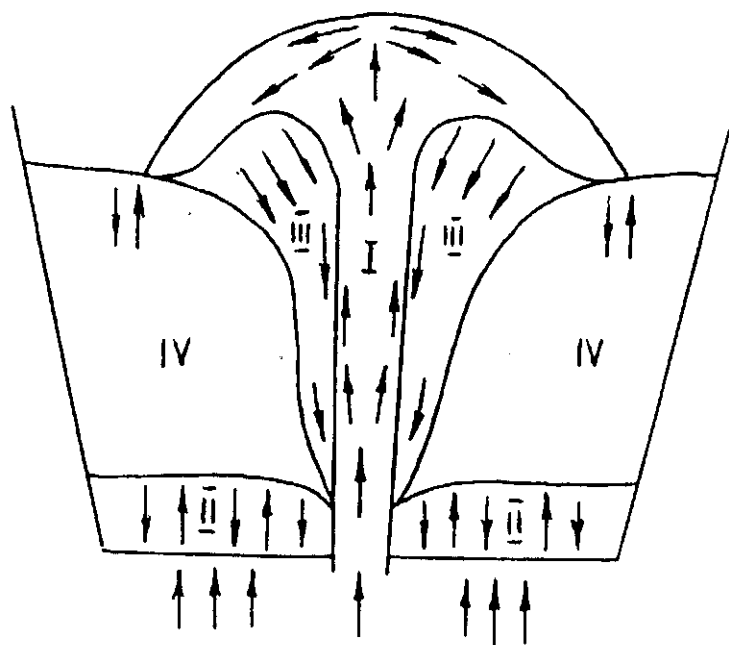


Рис. 2.6 Схема структуры потоков при наложении на псевдоожижающий слой режима фонтанирования

При исследовании процесса выделим три основных величины, изменение которых будет исследоваться: температура, концентрация и скорость влажного сыпучего материала. Имеющийся математический аппарат уравнений в частных производных позволяет моделировать распределение этих величин по сечению камеры сушилки.

2.2.2 Математический аппарат для построения модели

Основные уравнения, используемые для построения моделей, представляют собой частный случай системы Навье - Стокса:

$$\rho \left(u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{dP}{dx} + \mu \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.2)$$

где ρ – плотность текущего вещества, $\text{кг} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$;

μ – коэффициент вязкости, $\text{кг} \cdot \text{с} / \text{м}^2$;

P – давление, $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^2)$;

$u = u(x, y)$, $v = v(x, y)$ – компоненты вектора скорости

$$\vec{w} = \vec{i}u + \vec{j}v.$$

Введем характерные параметры:

l – характерный размер (например, длина камеры), м;

V – характерная скорость, м/с.

Примем безразмерные величины:

$$x' = \frac{x}{l}, \quad y' = \frac{y}{l}, \quad u' = \frac{u}{V}, \quad v' = \frac{v}{V}.$$

Тогда система (2.1) – (2.2.) примет вид:

$$\rho \left(\frac{V^2}{l} u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{V^2}{l} v' \frac{\partial u'}{\partial y'} \right) = - \frac{1}{l} \frac{dP}{x'} + \frac{V}{l^2} \mu \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2}$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0.$$

Уравнение (2.1) перепишем в виде:

$$u' \cdot \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \cdot \frac{\partial u'}{\partial y'} = -\frac{1}{\rho V^2} \cdot \frac{dP}{dx'} + \frac{\mu}{\rho V l} \cdot \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2}$$

Здесь $\rho V l / \mu$ – безразмерный параметр – число Рейнольдса.

Отдельно рассмотрим слагаемое

$$\frac{1}{\rho V^2} \cdot \frac{dP}{dx} = \frac{d}{dx} \cdot \left(\frac{P}{\rho V^2} \right),$$

где $\rho = const, V = const$. Величина $P/(\rho \cdot V^2)$ является безразмерным давлением: $P' = P/(\rho \cdot V^2)$.

Тогда система (2.1) – (2.2) переходит к виду:

$$u' \cdot \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \cdot \frac{\partial u'}{\partial y'} = -\frac{dP'}{dx'} + \frac{1}{Re} \cdot \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0. \quad (2.4)$$

Дальнейшее преобразование системы (2.3) – (2.4) направлено на исключение числа Рейнольдса:

$$v'' = v' \sqrt{Re}, \quad y'' = y' \sqrt{Re},$$

тогда

$$\begin{cases} u' \cdot \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{v''}{\sqrt{Re}} \cdot \sqrt{Re} \cdot \frac{\partial u'}{\partial y''} = -\frac{dP'}{dx'} + \frac{Re}{Re} \cdot \frac{\partial^2 u'}{\partial y''^2} \\ \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v''}{\partial y''} = 0 \end{cases}$$

Переобозначив переменные (опустив штрихи), получим окончательную систему:

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dP}{dx} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

В этой системе все величины безразмерные. Физический смысл условия (2.6) состоит в том, что внутри области источники и стоки отсутствуют:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \operatorname{div} \vec{w} = 0.$$

Массовые силы, т.е. силы тяжести в системе (2.5) – (2.6) отсутствуют, т.к. при движении однородной жидкости ($\rho = \text{const}$) они исключаются из (2.5).

2.2.3 Математическая модель распределения температуры

Рассматривается следующая задача. В области G (сушильный аппарат, рис. 2.7) требуется определить распределение температуры при заданном количестве узлов (отверстий) на газораспределительной решетке.

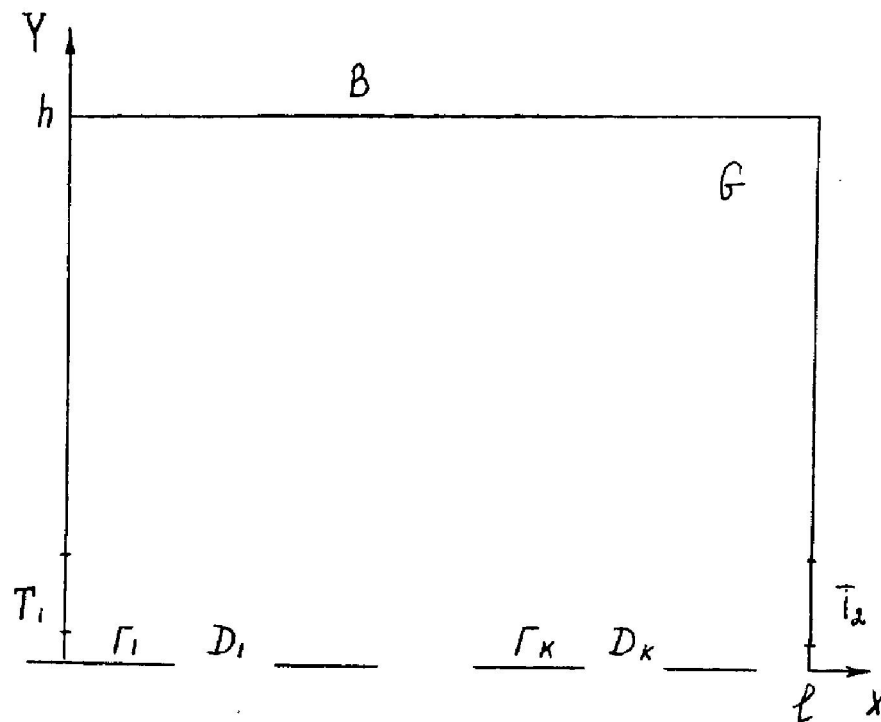


Рис. 2.7 Схема сушильного аппарата в плоском разрезе

Такие задачи относятся к классу краевых задач со смешанными краевыми условиями, а само уравнение есть уравнение эллиптического типа.

Дифференциальное уравнение распределения температуры и краевые условия имеют следующий вид [37]:

$$\omega \cdot c \cdot \rho \frac{\partial u}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \alpha \cdot (u - T_s). \quad (2.7)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} \text{при } 0 \leq x \leq l \quad \left. \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} \right|_{y=h} &= 0; \\ \text{при } 0 \leq y \leq h \quad \left. \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} \right|_{x=0} &= 0; \quad \left. \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} \right|_{x=l} = 0; \\ \text{при } (x,y) \in \Gamma_K \quad \frac{\partial u(x,y)}{\partial y} &= 0; \\ \text{при } (x,y) \in D_K \quad u(x,y) &= U, \end{aligned}$$

где U – температура поступающего газа;
 c – удельная теплоемкость сыпучей среды;
 ρ – плотность среды;
 ω – скорость поступающего газа;
 k – коэффициент теплопроводности среды;
 α – коэффициент теплообмена;
 T_s – температура внешнего слоя (окружающей среды).

Для решения полученной краевой задачи она сводится к безразмерному виду, когда $0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$. Полученная в результате сеточной аппроксимации система линейных алгебраических уравнений решается методом матричной прогонки, предложенным М.В. Келдышем [60].

Алгоритм численного решения строится на основании следующих соображений.

Введем сетку: $x_i * y_j$:

$$x_i = i\Delta x, \quad i = 0, 1, \dots, M, \quad M\Delta x = l;$$

$$y_j = j\Delta y, \quad j = 0, 1, \dots, N, \quad N\Delta y = h.$$

Обозначим: $u_{ij} = u(x_i, y_j)$;

$$\omega \rho = \gamma; \quad \alpha(u - T_s) = f(u).$$

Неявная схема аппроксимации:

$$\begin{aligned} \gamma \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} &= k \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \\ &+ k \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta y^2} + f(u_{i,j}). \end{aligned}$$

Пусть p , q , r , g соответственно приближенное решение системы:

$$a) \frac{p_{i+1,j} - p_{i,j}}{\Delta x} = \frac{kg_{i,j}}{\gamma} \left[\frac{(p_{i,j+1} + p_{i,j})p_{i+1,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{(p_{i,j+1} + 2p_{i,j} + p_{i,j-1})p_{i+1,j}}{\Delta x \Delta y} + \frac{(p_{i,j} + p_{i,j-1})p_{i+1,j-1}}{\Delta x^2} \right],$$

$$\frac{3p_{i,N} - 4p_{i,N-1} + p_{i,N-2}}{2\Delta y} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, M;$$

$$б) \frac{q_{i+1,j} - q_{i,j}}{\Delta x} = \frac{kg_{i,j}}{\gamma} \left[\frac{(q_{i,j+1} + q_{i,j})p_{i+1,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{(q_{i,j+1} + 2q_{i,j} + q_{i,j-1})p_{i,j+1}}{\Delta x \Delta y} + \frac{(p_{i,j} + p_{i,j-1})p_{i+1,j-1}}{\Delta x^2} \right],$$

$$\frac{-q_{2,j} + 4q_{1,j} - 3q_{0,j}}{2\Delta y} = 0, \quad \frac{3q_{N-2,j} - 4q_{N-1,j} + q_{N,j}}{2\Delta y} = 0;$$

$$в) \frac{r_{i+1,j} - r_{i,j}}{\Delta x} = \frac{kg_{i,j}}{\gamma} \left[\frac{(r_{i,j+1} + r_{i,j})p_{i+1,j+1}}{\Delta y^2} - \frac{(r_{i,j+1} + 2r_{i,j} + r_{i,j-1})p_{i+1,j}}{\Delta x \Delta y} + \frac{(r_{i,j} + r_{i,j-1})p_{i+1,j-1}}{\Delta x^2} \right],$$

$$г) \frac{g_{i+1,j} - g_{i,j}}{\Delta x} = -\frac{kp_{i,j}}{\gamma} \frac{g_{i+1,j+1} - g_{i+1,j}}{\Delta y}$$

$$g_{i_k,0} = U.$$

Запишем систему для решения методом матричной прогонки [60]:

$$\begin{aligned}
& -\frac{2\Delta y^2 \gamma p_{i,j}}{kg_{i,j}\Delta x} = (p_{i,j+1} + p_{i,j})p_{i+1,j+1}^- \\
& -\left(p_{i,j+1} + 2p_{i,j} + p_{i,j-1} - \frac{2\Delta y^2 \gamma}{kg_{i,j}} \right) p_{i+1,j}^+ \\
& + (p_{i,j} + p_{i,j-1})p_{i+1,j-1} \\
& i=0,1,\dots,M-1, \quad j=1,2,\dots,N-1;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_{i+1,j} = q_{i,j} + \frac{kg_{i,j}}{2\gamma\Delta y^2} * & \left[(q_{i,j+1} + q_{i,j})p_{i+1,j+1}^- \right. \\
& \left. - (q_{i,j+1} + 2q_{i,j} + q_{i,j-1})p_{i+1,j} + (q_{i,j} + q_{i,j-1})p_{i+1,j-1} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_{i+1,j} = r_{i,j} + \frac{kg_{i,j}}{\gamma\Delta y^2} * & \left[(r_{i,j+1} + r_{i,j})p_{i+1,j+1}^- \right. \\
& \left. - (r_{i,j+1} + 2r_{i,j} + r_{i,j-1})p_{i+1,j} + (r_{i,j} + r_{i,j-1})p_{i+1,j-1} \right] \\
r_{i \in \Gamma_k} = T_s, \quad r_{i \in D_k} = U;
\end{aligned}$$

$$\frac{-kp_{i,j}}{\gamma\Delta y} g_{i+1,j+1} + \left(\frac{kp_{i,j}}{\gamma\Delta y} - \frac{1}{\Delta x} \right) g_{i+1,j} = -\frac{1}{\Delta x} g_{i,j},$$

$$g_{i,0} = T_s, \quad g_{i_k,0} = U.$$

Формулы прогонки:

$$A_j u_{i,j-1} - C_j u_{i,j} + B_i u_{i,j+1} = -f_i,$$

$$i=1,2,\dots,N-1$$

$$\alpha_{i+1} = \frac{B_i}{C_i - \alpha_i A_i}$$

$$\beta_{i+1} = \frac{A_i \beta_i + f_i}{C_i - \alpha_i A_i}$$

$$u_0 = \delta_1 u_1 + \mu_1; \quad u_N = \delta_2 u_{N-1} + \mu_2; \quad \alpha_1 = \delta_1; \quad \beta_1 = \mu_1$$

$$A_i \neq 0; \quad B_i \neq 0; \quad |C_i| \geq |A_i| + |B_i|,$$

$$i=1,2,\dots,N-1$$

$$|\delta_1| \leq 1, \quad |\delta_2| \leq 1$$

$$u_i = \alpha_{i+1} u_{i+1} + \beta_{i+1}, \quad u_N = \frac{\delta_2 \beta_N + \mu_2}{1 - \delta_2 \alpha_N}.$$

В результате реализации алгоритма численного решения данной задачи на ЭВМ разработана программа, позволяющая рассчитывать распределение температуры в сечении камеры сушилки.

На рис. 2.8 приведен результат решения задачи в безразмерном виде.

На рис. 2.9 приведены результаты решения задачи для следующих значений параметров:

$$c = 0,2 \text{ Дж/(кг град)}; \quad \rho = 500 \text{ кг/м}^3; \quad \omega = 0,5 \text{ м/с}.$$

$$k = 0,05 \text{ Вт/(м град)}; \quad \alpha = 0,5 \text{ Вт/(м град)}; \quad T_s = 20^\circ\text{C};$$

$$l = 1 \text{ м}; \quad h = 0,5 \text{ м}; \quad U = 250^\circ\text{C}.$$

На рис. 2.8 отражена качественная картина процесса распределения температуры в плоскости осевого сечения Ox при двух фиксированных значениях координаты y : при $y = 0$ получается распределение температуры на днище аппарата, локальные максимумы наблюдаются в точках, соответствующих отверстиям газораспределительной решетки (модель зон I и III, рис. 2.6), при удалении от днища (кривая, соответствующая безразмерному значению $y = 0,1$) температура материала становится ниже, что соответствует физике процесса (рассматривается слой материала, более удаленный от источника тепла).

Как следует из рисунка, характер кривой при изменении координаты y не изменяется, она имеет выраженные локальные максимумы в тех же точках, изменяется только фактический показатель температуры в сторону уменьшения, что свидетельствует об адекватности модели в качественном аспекте.

На рис. 2.9 представлен пример моделирования для заданного набора значений физических характеристик, при этом геометрические размеры оставлены 1×1 , т.к. в данном случае значение имеет в первую очередь качественная картина. Поскольку функция распределения температуры является двумерной $u(x,y)$, то графически результат придется представлять в виде поверхности с третьим измерением (что и сделано в виде примера), если же

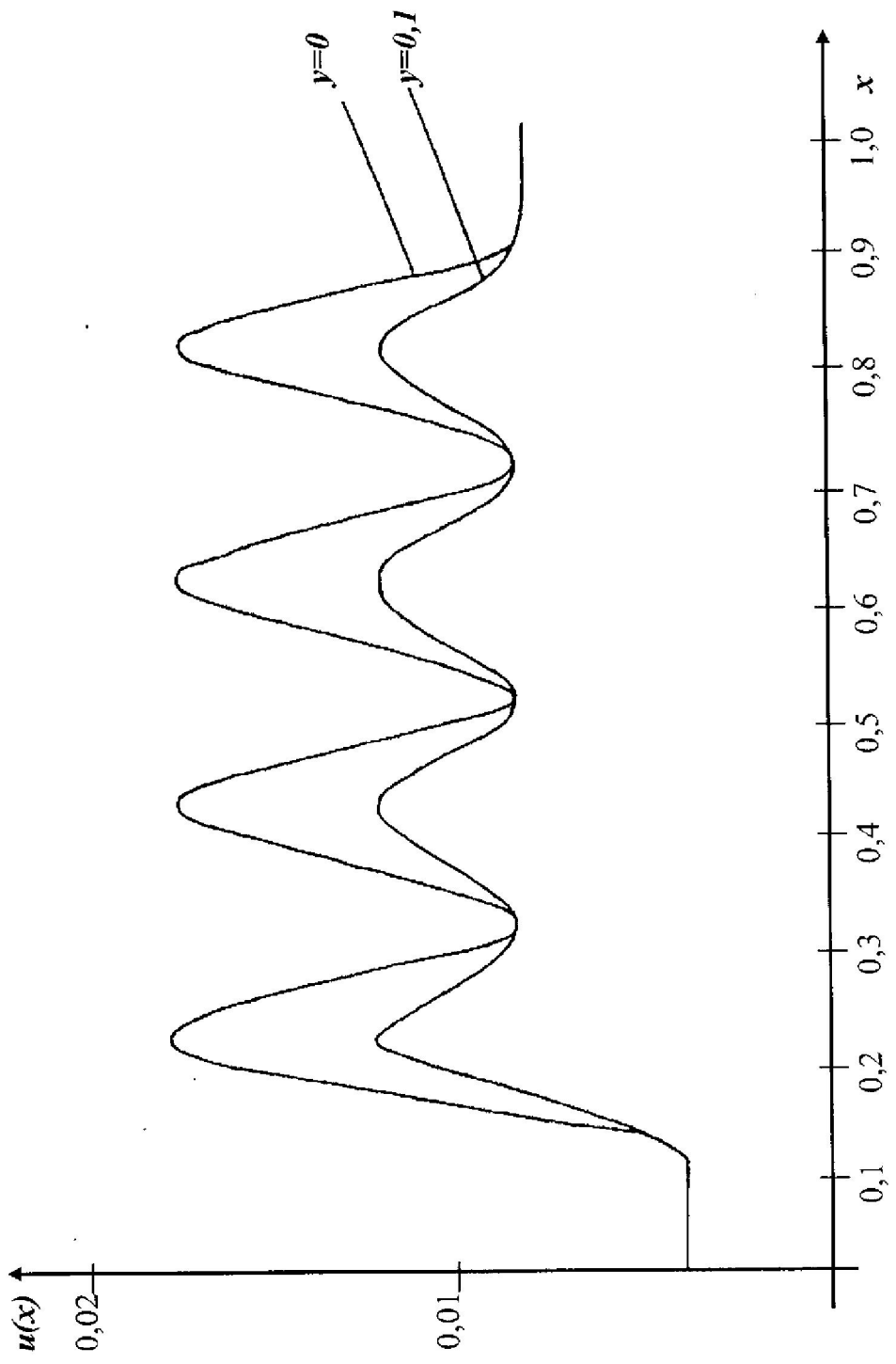


Рис. 2.8 График зависимости температуры $u(x)$ для $y=0$,
 $y=0,1$ в безразмерных величинах

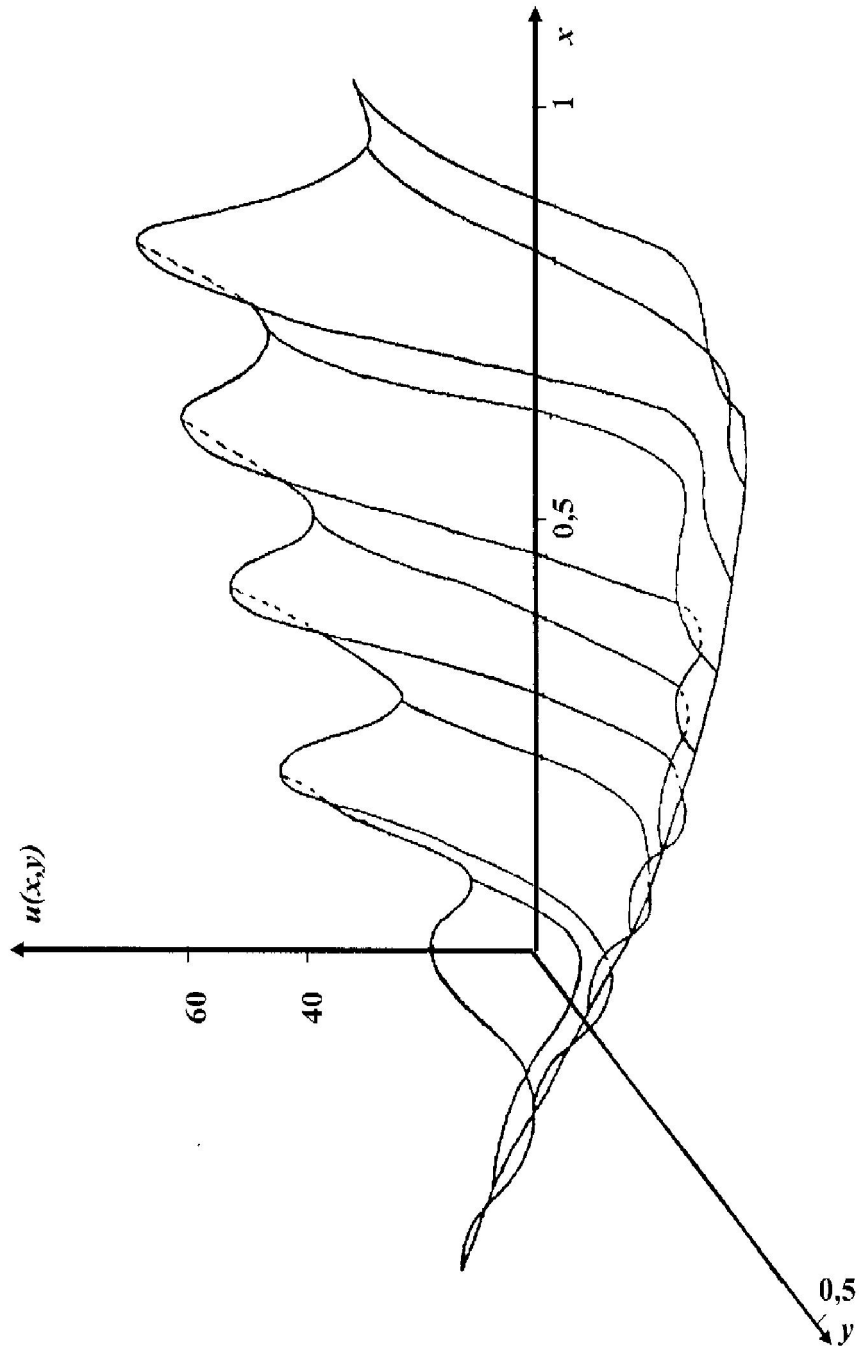


Рис. 2.9 Распределение температуры в камере сушки

рассматривать аппарат в объеме $u(x,y,z)$, то необходим инструмент четырехмерных изображений, что практически неудобно для восприятия, да это фактически и не требуется.

На рисунке представлен фрагмент поверхности, которая отражает «моментальное» распределение температуры частиц внутри высушиваемой массы. Здесь четко выражены «всплески» и «впадины» температуры, показывающие попадание материала в точки, координаты которых соответствуют отверстиям в газораспределительной решетке и ее непроницаемым зонам. Под воздействием «псевдоожигающего» агента происходит перемешивание и смещение частиц из «впадин» к «всплескам» и наоборот, что адекватно моделирует физический процесс «кипения» с перемещением от входного окна к выходному отверстию аппарата. Изменяя на модели плотность решетки и температуру сушильного газа, можно получить картину процесса для разнообразных условий.

Из представленных результатов следует, что предложенная модель дает возможность исследовать влияние на распределение температуры таких параметров, как плотность газораспределительной решетки, температура поступающих газов, геометрические размеры сушильного аппарата, и обосновывать их рациональные значения при проектировании технологического оборудования.

2.2.4 Математическая модель распределения скорости

Обозначим область сушильного аппарата (рис. 2.7) и его нижнюю часть границы через Γ_K (решетка) и D_K (отверстия в решетке). Будем считать, что вещество, подлежащее сушке, поступает через боковое отверстие T_1 , а просушенное выходит из сушилки через T_2 . Оставшуюся часть границы G обозначим через B . Пусть далее $u(x,y)$ – продольная, а $v(x,y)$ – поперечная скорость вещества в сушилке. Эти компоненты скорости определяем как решение следующей краевой задачи:

$$\begin{cases} u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dP}{dx} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, & (x,y) \in G \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

при соответствующих граничных условиях

$$u=0, \quad v=0, \quad (x,y) \in B \cup \Gamma_K; \quad (2.9)$$

$$u=1, \quad v=0, \quad (x,y) \in D_K; \quad (2.10)$$

$$u=u_0, \quad v=v_0, \quad (x,y) \in T_1; \quad (2.11)$$

$$u=0, \quad v=v_0, \quad (x,y) \in T_2. \quad (2.12)$$

Перейдем теперь к численному решению задачи (2.8) – (2.12).

Рассматриваем уравнение Навье - Стокса (2.8) в безразмерном виде.

При применении разностного метода производные, входящие в дифференциальные уравнения, заменяются конечно-разностными отношениями. Область интегрирования покрывается сеткой из 2-х семейств прямых, параллельных оси OX и оси OY .

Пусть $x=x_i$ есть сечение пограничного слоя, в котором профиль скорости задан.

Для дальнейших вычислений существенно, чтобы $\Delta x = const$, $\Delta y = const$. Каждый узел сетки отличается индексом (m,n) . Зависимая переменная – продольная скорость – предполагается известной на прямых $x=x_m$, $x=x_{m-1}$. Использование схемы центральных конечных разностей приводит в направлении X к погрешности обрыва процесса порядка $(\Delta x)^2$, а в направлении Y к погрешности $(\Delta y)^2$, т.е. получается уравновешенная система. Поэтому применим для нашего расчета такую схему.

Для частных производных продольной скорости u получим следующие выражения через конечноразностные отношения

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{3u_{m+1,n} - 4u_{m,n} + u_{m-1,n}}{2\Delta x} + \frac{1}{3}\Delta x^2 u_{xxx} + \dots \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{m+1,n+1} + u_{m+1,n-1}}{2\Delta y} + \frac{1}{6}\Delta y^2 u_{yyy} + \dots \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u_{m+1,n+1} - 2u_{m+1,n} + u_{m+1,n-1}}{2\Delta x} + \frac{1}{12}\Delta y^2 u_{yyy} + \dots \quad (2.15)$$

Для линеаризации разностных уравнений используем соотношение

$$u_{m+1,n} = 2u_{m,n} - u_{m-1,n} + \Delta x^2 u_{xx} + \dots \quad (2.16)$$

В линеаризованной форме выражения вида $u(\partial u / \partial x)$ заменяем следующим

$$(2u_{m,n} - u_{m-1,n}) \left(\frac{3u_{m+1,n} - 4u_{m,n} + u_{m+1,n}}{2\Delta x} \right).$$

После подстановки этих разностных выражений в уравнения пограничного слоя мы получим разностное уравнение:

$$A_n \cdot u_{m+1,n-1} + B_n \cdot u_{m+1,n} + C_n \cdot u_{m+1,n+1} = F_n \quad (2.17)$$

$$\text{причем } A_n = -\frac{\Delta x}{2\Delta y} (2V_{m,n} - V_{m-1,n}) - \frac{\Delta x}{(\Delta y)^2}; \quad (2.18)$$

$$B_n = \frac{3}{2} (2u_{m,n} - u_{m-1,n}) + \frac{2\Delta x}{(\Delta y)^2}; \quad (2.19)$$

$$C_n = \frac{\Delta x}{2\Delta y} (2V_{m,n} - V_{m-1,n}) - \frac{\Delta x}{(\Delta y)^2}; \quad (2.20)$$

$$F_n = \frac{1}{2} (2u_{m,n} - u_{m-1,n}) \cdot (4u_{m,n} - u_{m-1,n}) - \Delta x \left(\frac{dP}{dx} \right)_{m+1,n}. \quad (2.21)$$

$N-1$ уравнений (2.19), из которых каждое содержит три неизвестных $u_{m+1,n-1}$; $u_{m+1,n}$; $u_{m+1,n+1}$, ($n = \overline{2, N}$), связанных одно с другим, и могут быть решены как система совместных алгебраических уравнений, т.к. общее число неизвестных равно числу уравнений.

Матрица, соответствующая неизвестным $u_{m+1,n}$, такова, что допускает использовать прямой путь решения, не требующий составления обратной матрицы. Это приводит к значительному сокращению времени вычислительной работы.

Уравнение (2.17) представляет собой рекуррентное соотношение, которое может быть решено простым способом, особенно пригодным для использования на ЭВМ. Для этого перепишем уравнение (2.17) еще раз, причем опустим индекс m . Получим

$$A_n u_{n-1} + B_n u_n + C_n u_{n+1} = F_n, \quad 2 \leq n \leq N-1, \quad (2.22)$$

граничными условиями будут

$$u_1 = 0, \quad u_n = u, \quad (2.23)$$

где u_n есть значение на внешней границе пограничного слоя. Далее примем, что имеет место соотношение

$$u_n = E_n \cdot u_{n+1} + D_n. \quad (2.24)$$

Если мы используем граничное условие $u_1 = 0$ и потребуем, чтобы соотношение (2.24) соблюдалось независимо от шага Δy , то найдем, что

$$E_1 = 0, \quad D_1 = 0. \quad (2.25)$$

Далее из соотношения (2.26) следует, что

$$u_{n-1} = E_{n-1} \cdot u_n + D_{n-1}. \quad (2.26)$$

Внеся это выражение u_{n-1} в уравнение (2.22) и решив его относительно u_n , получим:

$$u_n = \frac{C_n}{B_n + A_n \cdot E_{n-1}} u_n + \frac{F_n - A_n \cdot D_{n-1}}{B_n + A_n \cdot E_{n-1}}. \quad (2.27)$$

Сравнив (2.29) и (2.26), мы найдем

$$E_n = -\frac{C_n}{B_n + A_n \cdot E_{n-1}}, \quad D_n = \frac{F_n - A_n \cdot D_{n-1}}{B_n + A_n \cdot E_{n-1}}. \quad (2.28)$$

Имея соотношения (2.28) и значения (2.25), мы можем последовательно вычислить E_n , D_n для возрастающих n .

Далее, т.к. значение u_n при $n = N$ известно из второго равенства (2.23), то мы можем последовательно определить из соотношения (2.26) все u_n для убывающих n . На этом определение продольной скорости u заканчивается. После того, как значения u_i вычислены для всех i , можно определить из уравнения неразрывности значения v_j , поступая для этого в точности так же, как и при вычислении значения u_n .

Выполнив квадратуру уравнения неразрывности при помощи правила трапеций, мы можем получить:

$$v_{m+1,n} = v_{m+1,n-1} - \frac{\Delta y}{2r^j} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r^S u)_{m+1,n} + \frac{\partial}{\partial x} (r^S u)_{m+1,n-1} \right] - \frac{\Delta y^3}{12} \cdot \frac{1}{r^j} (r^j u(x, \eta))_{xyy}, \quad (2.29)$$

где η есть некоторое значение между $(n-1)\Delta y$ и $n\Delta y$. Мы видим, что принятая схема центральных разностей при каждом шаге на расстоянии Δy дает погрешность порядка $(\Delta x^2 \Delta y)$ и $(\Delta y)^3$. Решение начинается от стенки, на которой $v=0$. Т.к. r и u при каждом шаге поперек пограничного слоя известны, то сначала мы можем определить v на расстоянии одного шага от стенки, затем на расстоянии двух шагов и т.д., пока не будет достигнута внешняя граница пограничного слоя.

Внешняя граница пограничного слоя считается достигнутой, когда после нескольких последовательных шагов Δy скорость u остается постоянной внутри некоторого наперед заданного предела точности. Этот контроль относительно внешней границы следует выполнять при каждом шаге Δx .

Изложенный метод конечных разностей сводит задачу расчета пограничного слоя, т.е. задачу интегрирования уравнений в частных производных, к более простой задаче, а именно к решению системы линейных алгебраических уравнений. Т.к. рассматриваемый численный метод всегда устойчив, то величина шага определяется только погрешностью обрыва процесса. Поэтому ее можно выбрать довольно большой, что позволяет сильно сократить время расчета. На рис. 2.10 – 2.15 приведены графики зависимостей продольной и поперечной скоростей.

Как и в предыдущем случае, результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы.

Математическая модель обеспечивает адекватное представление процесса распределения скорости частиц материала в рабочей области аппарата. На рис. 2.10 показано, что основное влияние внешнее воздействие оказывает в придонной области ($y = 0$), локальные максимумы продольной составляющей скорости соответствуют координатам отверстий в газораспределительной решетке (зоны I и III, рис. 2.6), по мере удаления от днища степень влияния снижается.

При совместном рассмотрении результатов моделирования продольной и поперечной скоростей (рис. 2.10 и 2.11) можно построить полную картину процесса в виде трех- или четырехмерной матрицы (таблицы). На рисунках 2.12 – 2.15 приводятся примеры моделирования для разных вариантов модели.

Поскольку скорость подачи сушильного агента является во многом определяющим параметром для создания «псевдооживленного» слоя, исследование распределения продольной и поперечной составляющих в сечении камеры сушиллки имеет

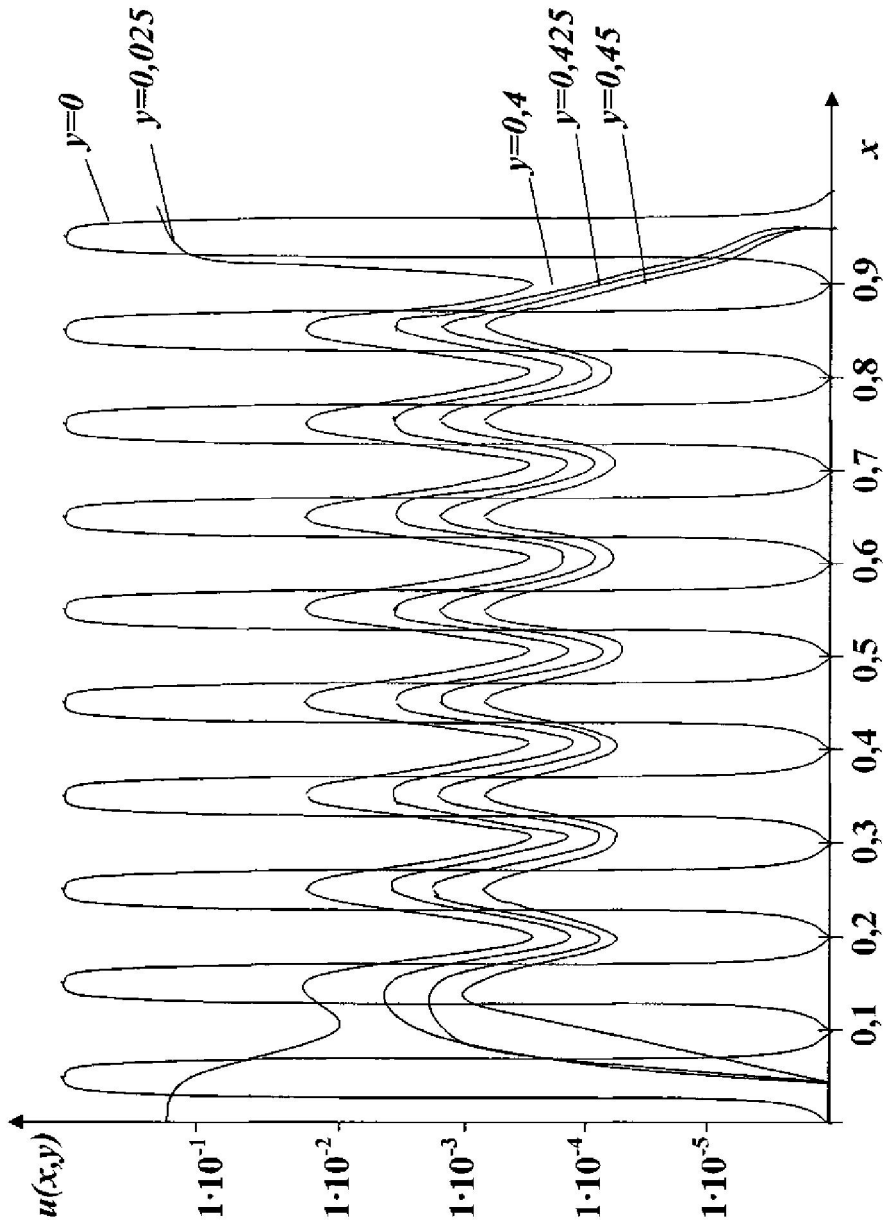


Рис. 2.10 График зависимости продольной скорости u от x при фиксированном значении y ($\omega_1=0,25$, $\omega_2=0,2$)

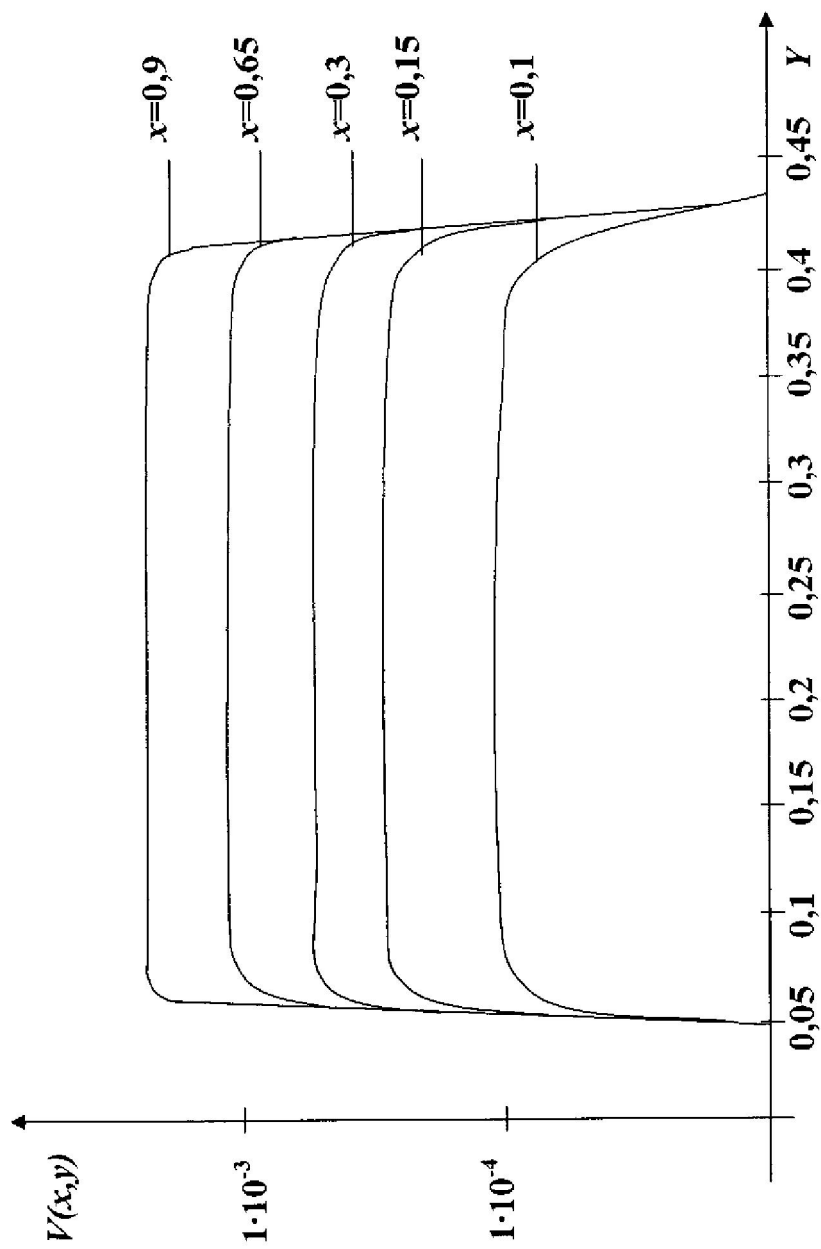


Рис. 2.11 График зависимости скорости v от y при фиксированном значении x ($\omega_1=0,25$, $\omega_2=0,2$)

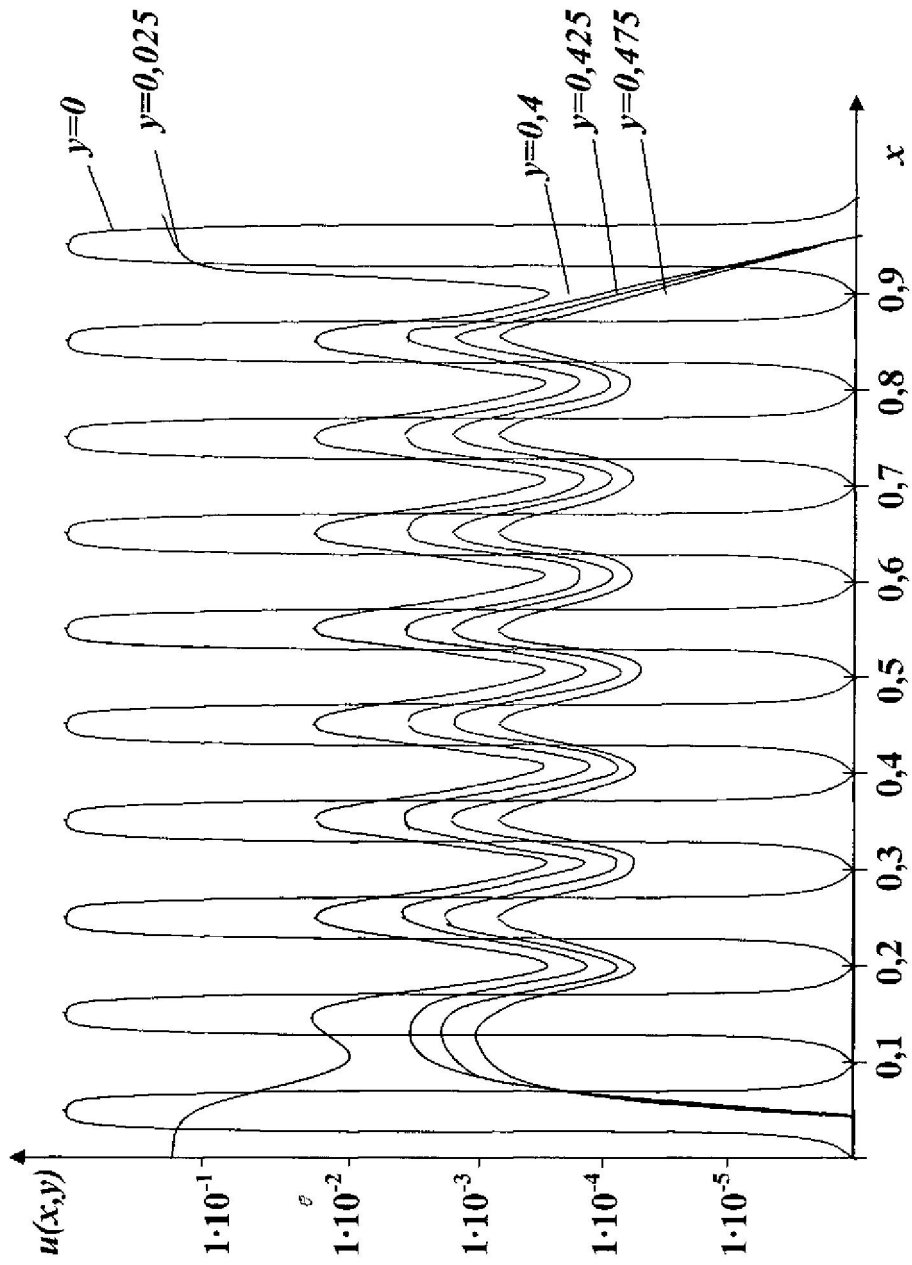


Рис. 2.12 График зависимости продольной скорости u от x при фиксированном значении y
 $(\omega_1=0,5, \omega_2=0,1)$

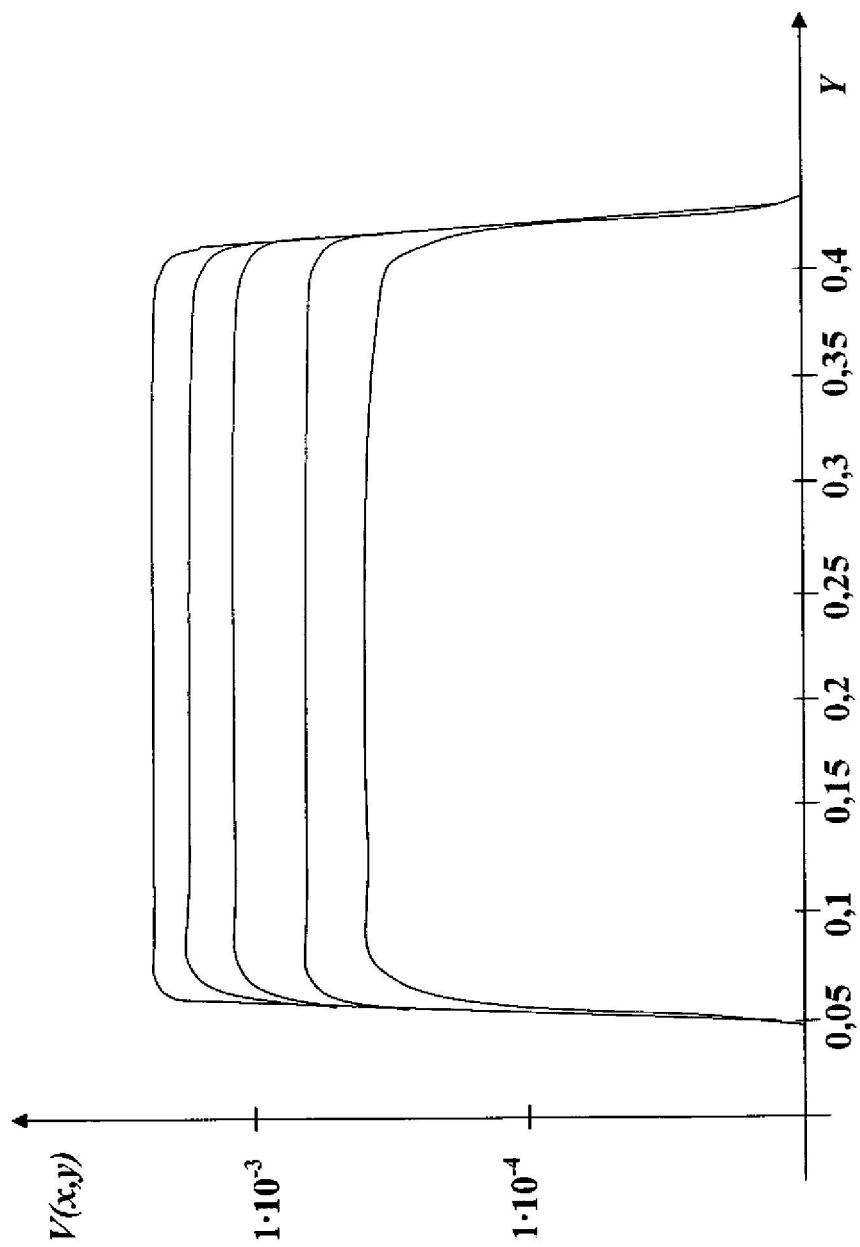


Рис. 2.13 График зависимости скорости v от y при фиксированном значении x ($\omega_1=0,5$, $\omega_2=0,1$)

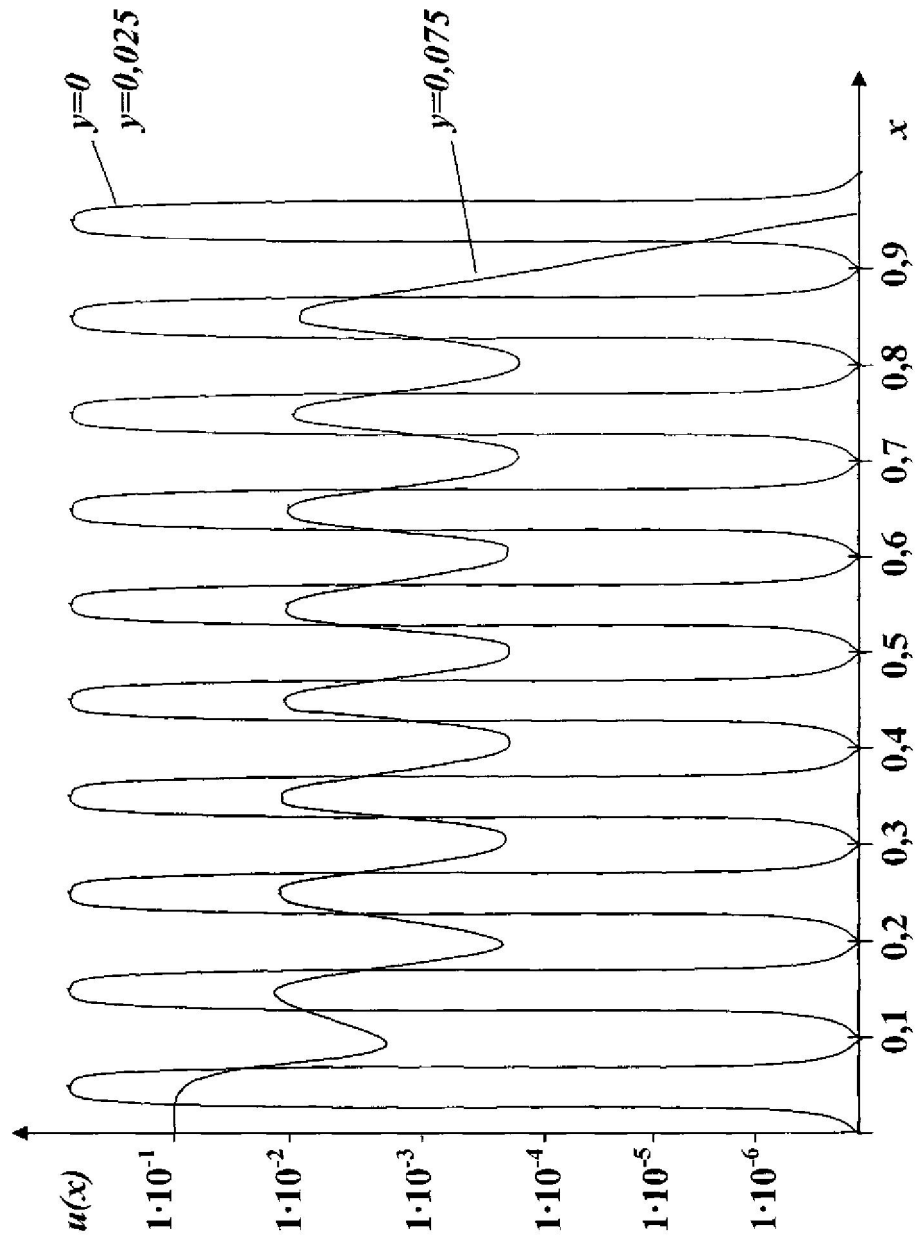


Рис. 2.14 График зависимости продольной скорости u от x при фиксированном значении y ($\omega_1=0.1$, $\omega_2=0.05$)

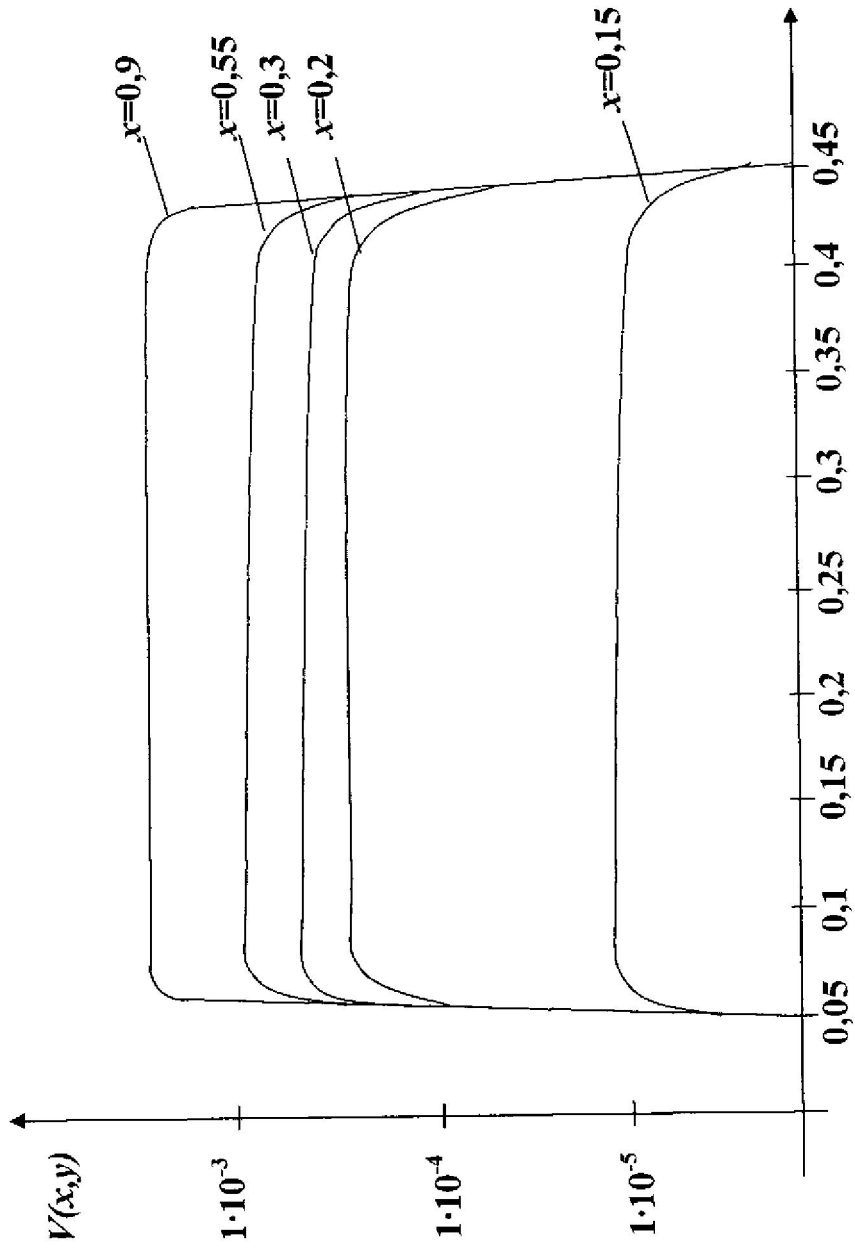


Рис. 2.15 График зависимости скорости v от y при фиксированном значении x ($\omega_1=0,1$, $\omega_2=0,05$)

важнейшее значение при изучении процесса формирования «ползущей» поверхности в рабочем объеме аппарата.

Варьируя начальные и граничные условия и рассматривая результаты моделирования распределения скорости совместно с распределением температуры для тех же условий, исследователь получает возможность подбора параметров, наиболее приближенных к оптимальным для заданных технических характеристик исследуемого или проектируемого оборудования.

Естественно, что такие исследования требуют многократной «прокрутки» моделей на ЭВМ, при этом необходимо иметь показатели, по которым можно оценивать результаты в автоматическом режиме. Подобные задачи решаются средствами математического обеспечения системы автоматизированного проектирования (САПр), чему уделено внимание в разделе 4.

Применение детерминированной модели распределения скорости частиц материала в аппарате дает возможность исследовать процесс и обосновывать рациональные значения таких параметров технологии, как скорость сушильного агента (входящих газов), плотность газораспределительной решетки, геометрические размеры оборудования.

Кроме того, результаты расчета значений скорости в точках рабочего объема являются коэффициентами модели распределения концентрации материала в сушильной камере.

2.2.5 Математическая модель поля концентрации материала в камере сушилки

Рассматривается следующая задача: в области G (сушильный аппарат) требуется определить распределение концентрации $C(x, y, t)$ при заданном количестве отверстий на газораспределительной решетке. Функция $C(x, y, t)$ является решением конвективного уравнения диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(C_{xx} + C_{yy}) - v_1(x, y) \frac{\partial C}{\partial x} - v_2(x, y) \frac{\partial C}{\partial y}, \quad (2.30)$$

где D – коэффициент диффузии;

$v_1(x, y)$, $v_2(x, y)$ – продольная и поперечная компоненты скорости, которые определяются из решения краевой задачи (2.8) – (2.12).

При этом концентрация C должна удовлетворять граничным условиям:

$$\begin{aligned}
 C_y(x, y, t) &= 0, & (x, y) \in F_1 \\
 C_x(x, y, t) &= 0, & (x, y) \in F_2 \cup F_3 \\
 C_y(x, y, t) &= 0, & (x, y) \in \Gamma_i, \quad i=1, 2, \dots, n \\
 C(x, y, t) &= C_j, & (x, y) \in D_i, \quad i=1, 2, \dots, n+1 \\
 C(x, y, t) &= \alpha, & (x, y) \in \Gamma_{вх} \\
 C(x, y, t) &= \beta, & (x, y) \in \Gamma_{вых}
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

и начальному условию

$$C(x, y, 0) = C_0. \tag{2.32}$$

Здесь C_j, α, β, C_0 – постоянные величины.

Для решения краевой задачи (2.30) – (2.32) применяется метод прямых с дискретизацией переменных x и y , т.е. рассматриваются точки $x_i = i \cdot hx$, $i=1, 2, \dots, n-1$; $y_j = j \cdot hy$, $j=1, 2, \dots, m-1$.

Тогда производные по переменным x и y можно заменить разностями:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial C}{\partial x} &= \frac{C_{i+1,j} - C_{i-1,j}}{2 \cdot hx}, & \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{C_{i,j+1} - C_{i,j-1}}{2 \cdot hy}, \\
 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &= \frac{C_{i+1,j} - 2C_{i,j} + C_{i-1,j}}{hx^2}, & \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} &= \frac{C_{i,j+1} - 2C_{i,j} + C_{i,j-1}}{hy^2},
 \end{aligned}$$

где $C(x_i, y_j, t) = C_{ij}(t)$,

а уравнение (2.30) – дифференциально-разностными:

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{T} \cdot \frac{dC_{ij}}{dt} &= \frac{D}{l^2} \cdot \frac{C_{i+1,j} - 2C_{ij} + C_{i-1,j}}{hx^2} + \frac{D}{H^2} \cdot \frac{C_{i,j+1} - 2C_{ij} + C_{i,j-1}}{hy^2} - \\
 -v_{1ij} \cdot \frac{1}{l} \cdot \frac{C_{i+1,j} - C_{i-1,j}}{2hx} &- v_{2ij} \cdot \frac{1}{H} \cdot \frac{C_{i,j+1} - C_{i,j-1}}{2hy},
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

где l и H – характерные размеры, а T – характерное время, $i=1, 2, \dots, n-1$, $j=1, 2, \dots, m-1$. Эту систему обыкновенных дифференциальных уравнений можно представить в следующем виде:

$$\frac{dC_{ij}}{dt} = A_{ij} \cdot C_{i+1,j} - R \cdot C_{ij} + G_{ij} \cdot C_{i-1,j} + B_{ij} \cdot C_{ij} + S_{ij} \cdot C_{ij} - 1. \quad (2.34)$$

Аппроксимация граничных условий приводит к следующим соотношениям: $C_{0j} = C_{1j}$, $j = 0, 1, \dots, m$; $j \neq m_1$

$$C_{0j} = \alpha, \quad j = m_1$$

(здесь использовалось граничное условие $\frac{\partial C(0,y,t)}{\partial x} = 0$);

$$C_{Nj} = C_{N-1,j}, \quad j = 0, 1, \dots, m; \quad j \neq m_2$$

$$C_{Nj} = \beta, \quad j = m_2$$

(использовалось граничное условие $\frac{\partial C(1,y,t)}{\partial x} = 0$);

$$C_{i0} = C_{i1}, \quad (x,y) \in F_1 \cup F_3 \cup D_K$$

$$C_{i0} = C, \quad (x,y) \in \Gamma_K$$

(применялось граничное условие $\frac{\partial C(x,y,t)}{\partial y} = 0$, $(x,y) \in \Gamma_1 \cup \Gamma_K$);

$$C_{im} = C_{i,m-1}, \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

Таким образом, решение краевой задачи (2.30) – (2.32) свелось к численному решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2.34) при начальных условиях

$$C_{ij}(0) = C_0.$$

Задача Коши (2.34) численно интегрируется при помощи метода Рунге - Кутты, причем погрешность метода равна $O(hx^2 + hy^2)$.

На рис. 2.16 приведен результат решения задачи распределения концентрации.

Распределение концентрации высушиваемой массы является конечным показателем, характеризующим процесс. В уравнение изменения концентрации по пространству сечения камеры во времени входят параметры, исследуемые на вышеописанных моделях (распределение температуры и скорости частиц). С одной стороны, картина получается в определенной степени идеализированной: в начальный момент ($t=0$) концентрация предполагается одинаковой по всему сечению и равной

усредненному показателю C_0 , а после начала процесса ($t > 0$) происходит «движение», т.е. формирование картины распределения параметра соответственно различным моментам t .

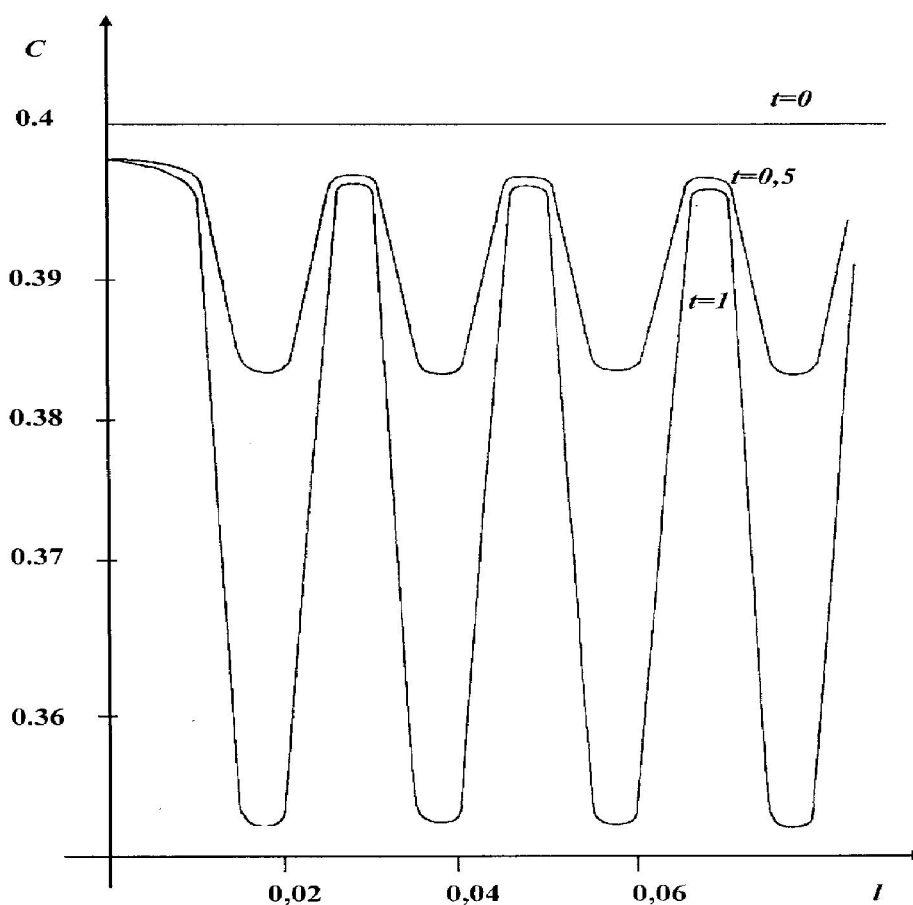


Рис. 2.16 Распределение концентрации вещества в камере сушилки при $y=0,2$, для моментов времени $t=0,0; 0,5; 1,0$

Коэффициентами уравнения (управляющими параметрами) являются величины температуры и скорости в соответствующих точках (получаются в результате решения уравнений, приведенных выше) и величина коэффициента диффузии. Комплекс указанных величин и определяет результат моделирования, представляющий информацию для принятия окончательных научных выводов или проектных решений.

Как следует из вышеизложенного, разработанные детерминированные математические модели основных процессов, происходящих при сушке влажного сыпучего материала в аппаратах «кипящего слоя», представляют процесс как объект с распределенными параметрами и дают возможность предварительного теоретического исследования и обоснования

рациональных технологических параметров при проектировании сушильного оборудования.

2.2.6 Критериальные модели для расчета параметров сушки.

Детерминированные математические модели являются эффективным средством теоретических исследований процессов и инструментом количественной поддержки проектирования технологии. Вместе с тем, они не лишены определенных неудобств, главным из которых является необходимость многократных «прокруток» моделей на компьютере. На практике часто имеет место необходимость оперативного однократного расчета того или иного параметра. Одним из путей решения такой задачи является разработка приближенных расчетных зависимостей, в частности, критериальных моделей.

2.2.6.1 Модель скорости слоя

Задача состоит в том, чтобы найти явные выражения типа $y = f(x_1, \dots, x_n)$ для расчета скорости слоя высушиваемого материала и потери давления в слое.

Будем рассматривать скорость слоя w_T , как функцию

$$w_T = f(M, b, \rho_T, \rho_{жс}, \nu_{жс}, w_{жс}, g, \varphi_v, \varphi_{вн}, \varepsilon_0, \beta), \quad (2.35)$$

где M – производительность аппарата, кг/с;

b – ширина камеры сушилки, м;

ρ_T – плотность твердой фазы, кг/м³;

$\rho_{жс}$ – плотность псевдоожигающего агента, кг/м³;

d_T – размер частиц твердого материала, м;

$\nu_{жс}$ – вязкость псевдоожигающего агента, кг/м³;

$w_{жс}$ – скорость псевдоожигающего агента, м/г;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

φ_v – коэффициент внутреннего трения;

$\varphi_{вн}$ – коэффициент внешнего трения;

ε_0 – характеристика неподвижного слоя;

β – угол наклона решетки к горизонту, град.

Для построения функции f применим теорию размерности, согласно которой w_T ищется в виде следующей степенной функции:

$$w_T = kM^n b^m \rho_T^x \rho_{жс}^y d_T^z v_{жс}^\alpha w_{жс}^h g^\lambda \varphi_\beta^\gamma \varphi_{вн}^\chi \varepsilon_0^d, \quad (2.36)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Функция (2.35) переменных, причем три последние φ_β , $\varphi_{вн}$, ε_0 – безразмерные, а остальные переменные имеют следующие размерности

$$M = \left[\frac{кг}{с} \right]; \quad b = [M]; \quad \rho_{жс}, \rho_T = \left[\frac{кг}{м^3} \right]; \quad d_T = [M]; \quad v_{жс} = \left[\frac{м^2}{с} \right].$$

Имеем:

$$\frac{l}{t} = \frac{M^n}{t^n} \cdot l^m \cdot \frac{M^x}{l^{3x}} \cdot \frac{M^y}{l^{3y}} \cdot l^z \cdot \frac{l^{2\alpha}}{t^\alpha} \cdot \frac{l^h}{t^h} \cdot \frac{l^\lambda}{t^{2\lambda}}.$$

Отсюда следует система линейных уравнений

$$\begin{cases} 1 = m - 3x - 3y + z + 2\alpha + h + \lambda \\ 1 = \alpha + h + 2\lambda + n \\ 0 = n + x + y \end{cases} \begin{matrix} l \\ t \\ M \end{matrix}.$$

Решая эту систему получим

$$n = -(x + y); \quad \alpha = 1 - h - 2\lambda - n; \quad m = -1 - n - z + h + 3\lambda.$$

Таким образом, получаем следующую зависимость

$$w_T = kM^{-(x+y)} b^{-1+x+y-z+h+3\lambda} \rho_T^x \rho_{жс}^y d_T^z \cdot v_{жс}^{1-h-2\lambda+x+y} w_{жс}^h g^\lambda \varphi_\beta^\gamma \varphi_{вн}^\chi \varepsilon_0^d.$$

Это соотношение перепишем в следующем виде:

$$\frac{bw_T}{v} = k \left(\frac{b\rho_T v}{M} \right)^x \left(\frac{b\rho_{жс} v}{M} \right)^y \left(\frac{d_T}{b} \right)^z \left(\frac{bw_{жс}}{v} \right)^h \left(\frac{b^3 g}{v^2} \right)^\lambda \varphi_\beta^\gamma \varphi_{вн}^\chi \varepsilon_0^\alpha \quad (2.37)$$

Итак, искомая функция (2.35) представлялась в соответствии с π -теоремой в виде соотношения между шестью безразмерными комплексами

$$\pi_1 = \frac{bw_T}{v}; \pi_2 = \frac{b\rho_T v}{M}; \pi_3 = \frac{b\rho_{жс} v}{M}; \pi_4 = \frac{dT}{b}; \pi_5 = \frac{bw_{жс}}{v}; \pi_6 = \frac{b^3 g}{v^2}.$$

Показатели $x, y, z, h, \lambda, \gamma, \chi, d$ определяются методом подбора по опытным данным. Следовательно, критериальное уравнение можно переписать в таком виде

$$\Phi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = 0.$$

Полученный результат согласуется с π -теоремой, согласно которой мы должны иметь $9 - 3 = 6$ безразмерных комплексов (здесь 9 – число независимых переменных в (2.36), а 3 – число единиц измерения).

Для идентификации модели разработана программа с использованием метода Монте-Карло.

Функцию скорости слоя в соответствии с π -теоремой представляем в виде

$$\pi_1 = k \pi_2^x \pi_3^y \pi_4^z \pi_5^h \pi_6^\lambda \varphi_6^\gamma \varphi_{вн}^\chi \varepsilon_0^\alpha \beta^\xi.$$

В программе показатели степени оставляют массив размерности 9, т.е.

$$x(1) = x \quad x(6) = \gamma$$

$$x(2) = y \quad x(7) = \chi$$

$$x(3) = z$$

$$x(4) = h \quad x(8) = d$$

$$x(5) = \lambda \quad x(9) = \xi$$

Каждый безразмерный комплекс соответствует элементу массива \mathcal{Y} , размерность которого также равна 9:

$$y(1) = \pi_2$$

$$y(2) = \pi_3$$

$$y(3) = \pi_4$$

$$y(4) = \pi_5$$

$$y(5) = \pi_6$$

$$y(6) = \varphi_6$$

$$y(7) = \varphi_{вн}$$

$$y(8) = \varepsilon_0$$

$$y(9) = \beta$$

Исходные данные для программы:

массив x – средние значения показателей степени в заранее определенной области;

RT – плотность твердого материала, кг/м^3 ;

RG – плотность псевдоожигающего агента, кг/м^3 ;

b – ширина камеры сушильного аппарата, м;

WT – скорость направленного кипящего слоя, м/с;

V – вязкость псевдоожигающего агента, $\text{м}^2/\text{с}$;

D – размер частиц зернистого материала, м;

WG – скорость движения псевдоожигающего агента, м/с;

G – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

FB – коэффициент внутреннего трения сыпучего материала, безразмерная величина;

FBN – коэффициент внешнего трения сыпучего материала, безразмерная величина;

ε_0 – характеристика неподвижного слоя, безразмерная величина;

RM – производительность сушильного аппарата, кг/с ;

RK – коэффициент пропорциональности;

BT – угол наклона решетки к горизонту, рад;

HX – шаг корректировки показателей степени;

XMX , XMN – определяют диапазон изменения значений показателей степени.

В качестве первой группы исходных данных вводятся 9 начальных значений элементов массива x ; во второй группе вводятся значения плотности RT и RG ; в следующих группах вводятся все остальные данные.

По известным значениям B , WT , V определяем значение скорости направленного сыпучего слоя F ; получаемые при пересчете значения функции $F1$ должны отличаться от полученного F не более, чем на 1%.

В данной программе используется стандартная подпрограмма *RANDU*. Эта подпрограмма генерирует случайные числа в диапазоне от 0 до 1. Для работы *RANDU* необходимо задавать начальное значение переменной IX , это число должно быть нечетным и иметь от 3-х до 5 знаков. В приведенной программе IX задается равным 5557.

Обращение к стандартной подпрограмме записывается в виде:
CALL RANDU (IX, IY, IFL)

где IX – начальное значение, используемое для получения случайной величины;

IY – значение, полученное в результате работы подпрограммы (целое число); после вызова подпрограммы значение IY должно быть присвоено IX , т.е. IY используется для получения следующего случайного значения;

IFL – результат работы подпрограммы $RANDU$, случайное число из диапазона $(0;1)$.

В полученном результате выделяется 2 знака после запятой и число запоминается в ID . В зависимости от значения ID изменяют на шаг один из показателей:

$$ID = 10; x_1 = x_1 + Hx$$

$$ID = 11; x_1 = x_1 - Hx$$

$$ID = 12; x_2 = x_2 + Hx$$

$$ID = 13; x_2 = x_2 - Hx$$

$$ID = 14; x_3 = x_3 + Hx$$

$$ID = 15; x_3 = x_3 - Hx$$

$$ID = 16; x_4 = x_4 + Hx$$

$$ID = 17; x_4 = x_4 - Hx$$

$$ID = 18; x_5 = x_5 + Hx$$

$$ID = 19; x_5 = x_5 - Hx$$

$$ID = 20; x_6 = x_6 + Hx$$

$$ID = 21; x_6 = x_6 - Hx$$

$$ID = 22; x_7 = x_7 + Hx$$

$$ID = 23; x_7 = x_7 - Hx$$

$$ID = 24; x_8 = x_8 + Hx$$

$$ID = 25; x_8 = x_8 - Hx$$

$$ID = 26; x_9 = x_9 + Hx$$

$$ID = 27; x_9 = x_9 - Hx$$

После изменения одного из показателей x_i пересчитывается значение функции скорости w_T по формуле:

$$F1 = RK \cdot y_1^{x_1} y_2^{x_2} y_3^{x_3} y_4^{x_4} y_5^{x_5} y_6^{x_6} y_7^{x_7} y_8^{x_8} y_9^{x_9}.$$

Вычисленное значение сравнивается с полученным ранее F , если выполняется условие

$$|F - F1| \leq 0.01 \cdot F$$

процесс завершается.

По окончании вычислений получается массив y , начиная с первого элемента.

Программа была просчитана для следующих исходных данных:

$$\begin{array}{ll}
 RT=7800 \text{ кг/м}^3 & WG=1 \text{ м/с} \\
 RG=1000 \text{ кг/м}^3 & G=9,8 \text{ м/с}^2 \\
 B=1 \text{ м} & FB=0,5 \\
 WT=0,05 \text{ м/с} & FBN=1 \\
 V=0,1 \text{ м}^2/\text{с} & \varepsilon_0=0,02 \\
 D=0,002 \text{ м} & RM=0,33 \text{ кг/с} \\
 RK=1 & BT=15^\circ=0,26 \text{ рад} \\
 HX=0,1 & XMX=5 \\
 XMN=0 &
 \end{array}$$

Получен массив:

$$\begin{array}{lll}
 x_1=3.1 & x_4=2.4 & x_7=0.3 \\
 x_2=2.1 & x_5=0.4 & x_8=4.5 \\
 x_3=4.1 & x_6=2.5 & x_9=0.2
 \end{array}$$

Таким образом, функция w_T может быть представлена в виде:

$$w_T = \left(\frac{b\rho_T v}{M} \right)^{3.1} \left(\frac{b\rho_{жс} v}{M} \right)^{2.1} \left(\frac{d_T}{b} \right)^{4.1} \left(\frac{bw_{жс}}{v} \right)^{2.4} \left(\frac{b^3 g}{v^2} \right)^{0.4} \varphi_6^{2.5} \varphi_{вн}^{0.3} \varepsilon_0^{4.5} \beta^{0.2} \quad (2.37)$$

2.2.6.2 Модель потери давления

Потерю давления в слое будем вычислять по формуле

$$\Delta P = f(M, b, \rho_T, \rho_{жс}, d_T, w_{жс}, g, w_T, H, v), \quad (2.38)$$

где ΔP – потеря давления в слое (эта величина имеет размерность $\Delta P = [\text{кг} / \text{м} \cdot \text{с}^2]$), а H – высота слоя. Остальные переменные имеют прежний смысл.

$$\Delta P = k \frac{M^n}{t^n} b^m \rho_T^x \rho_{жс}^y d_T^z w_{жс}^h g^\lambda w_T^\mu H^\chi v^\alpha, \quad (2.39)$$

$$\begin{cases} l: & -1=m-3x-3y+z+2\alpha+h+\lambda+\mu+\chi \\ t: & -2=-n-\alpha-h-2\lambda-\mu \\ M: & 1=n+x+y \end{cases}$$

решение системы приводит к следующим зависимостям

$$\begin{aligned} n &= -(x+y)+1; \quad \alpha = 2-h-2\lambda-\mu+x+y-1; \\ m &= -2+x+y-1-z+h+3\lambda+\mu-\chi. \end{aligned}$$

Следовательно, получаем

$$\begin{aligned} \Delta P &= kM^{-(x+y)+1} b^{-3+x+y-z+h+3\lambda+\mu-\xi} \rho_T^x \rho_{жс}^y d_T^z \cdot \\ &\cdot w_{жс}^h w_T^\mu g^\lambda H^\chi v^{1-h-2\lambda-\mu+x+y}. \end{aligned}$$

Откуда следует

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P b^3}{M v} &= k \left(\frac{b v \rho_T}{M} \right)^x \left(\frac{b \rho_{жс} v}{M} \right)^y \left(\frac{d_T}{b} \right)^z \cdot \\ &\cdot \left(\frac{b w_{жс}}{v} \right)^h \left(\frac{b^3 g}{v^2} \right)^\lambda \left(\frac{b}{H} \right)^\chi \varphi_v^{\gamma_1} \varphi_{вн}^{\gamma_2} \varepsilon_0^{\gamma_3}. \end{aligned}$$

Здесь

$$\pi_1 = \frac{\Delta P b^3}{M v}; \pi_2 = \frac{b \rho_T v}{M}; \pi_3 = \frac{b \rho_{жс} v}{M};$$

$$\pi_4 = \frac{d_T}{b}; \pi_5 = \frac{b w_{жс}}{v}; \pi_6 = \frac{b w_T}{v}; \quad - \quad \text{восемь} \quad \text{безразмерных}$$

$$\pi_7 = \frac{b^3 g}{v^2}; \pi_8 = \frac{b}{H}.$$

комплексов,

$\varphi_v, \varphi_{вн}, \varepsilon_0$ – безразмерные величины.

После просчета по методике, аналогичной приведенной в 2.2.6.1, получаем следующую зависимость для определения потери давления в слое:

$$\Delta P = \left(\frac{bV\rho_T}{M} \right)^{1.9} \left(\frac{b\rho_{жс}V}{M} \right)^{3.5} \left(\frac{d_T}{b} \right)^{2.2} \left(\frac{bw_{жс}}{V} \right)^{4.3} \cdot \left(\frac{b^3 g}{V^2} \right)^{3.2} \left(\frac{b}{H} \right)^{1.4} \varphi_{\text{в}}^{0.6} \varphi_{\text{вн}}^{2.7} \varepsilon_0^{0.9}. \quad (2.40)$$

Таким образом, получены явные выражения для вычисления скорости слоя и потери давления, которые удобны для инженерных расчетов и прогноза параметров процесса.

Подводя итоги исследований, выполненных в разделе 2, можно отметить следующее:

- разработана математическая модель распределения температуры в рабочей области сушильного аппарата при обезвоживании сыпучих материалов в «кипящем слое», которая представляет собой краевую задачу со смешанными граничными условиями;

- алгоритмизация разработанной математической модели выполнена путем сведения ее к безразмерному виду с последующей сеточной аппроксимацией, позволяющей перейти к решению системы линейных алгебраических уравнений методом матричной прогонки; в результате компьютерной реализации алгоритма численного решения данной задачи разработана программа, позволяющая рассчитывать распределение температуры в сечении камеры сушилки;

- из представленных результатов моделирования следует, что предложенная модель дает возможность исследовать влияние на распределение температуры таких параметров, как плотность газораспределительной решетки, температура поступающих газов, геометрические размеры сушильного аппарата, и обосновывать их рациональные значения при проектировании технологического оборудования;

- разработана математическая модель для исследования поля скоростей частиц обезвоживаемого материала, основанная на системе уравнений Навье-Стокса, связывающих продольную и поперечную составляющие;

- используя рекуррентную форму уравнения для расчета скорости пограничного слоя, оно решено упрощенным способом; в результате компьютерной реализации метода разработаны

программы для расчета поля скоростей частиц высушиваемого материала;

- варьируя начальные и граничные условия и рассматривая результаты моделирования распределения скорости совместно с распределением температуры для тех же условий, исследователь получает возможность подбора параметров, наиболее приближенных к оптимальным для заданных технических характеристик исследуемого или проектируемого оборудования;

- разработана математическая модель для исследования поля концентрации вещества в сечении камеры сушилки, являющейся функцией двух пространственных координат и времени; в основу модели положено конвективное уравнение диффузии, включающее продольную и поперечную составляющие скорости частиц; в результате численной аппроксимации задача сводится к решению системы задач Коши с нулевыми начальными условиями, решение которых выполняется методом Рунге-Кутты;

- коэффициентами уравнения распределения концентрации (управляющими параметрами) являются величины температуры и скорости в соответствующих точках, которые получаются в результате решения соответствующих уравнений, и величина коэффициента диффузии; комплекс указанных величин и определяет результат моделирования, представляющий информацию для принятия окончательных научных выводов или проектных решений;

- разработаны критериальные модели для оперативного прогнозного расчета скорости слоя и потери давления; которые идентифицированы с применением метода Монте-Карло.

Раздел 3. Исследование стохастических характеристик параметров процесса сушки в «кипящем слое»

3.1 Исследование характеристик плотности распределения частиц по времени пребывания в «псевдооживленном слое» методом вычислительного эксперимента.

Особенностью технологического процесса обработки материалов в псевдооживленном слое является случайная природа времени пребывания частиц в рабочей зоне, обусловленная хаотическими движениями и соударением частиц.

В работах В.Н. Ткаченко [13, 99, 100, 101], обобщающих теоретические результаты ряда авторов, в частности, В.В. Кафарова [31], Г. Крамера [38] и других, предложен метод вычислительного эксперимента для исследования стохастических параметров процесса воздействия на материалы в кипящем слое. Применение данного метода дает дополнительные возможности идентификации математических моделей процессов обезвоживания сыпучих материалов в псевдооживленном слое.

Время обработки материала является одним из важнейших технологических параметров, которое определяет степень завершенности технологического процесса и производительность. Для разработки методов теоретической оценки степени завершенности рассматриваемых физико-химических процессов необходимо иметь адекватное математическое описание структуры псевдооживленного слоя по возрасту частиц, которое может быть выполнено в теоретико-вероятностных терминах на основе законов распределения. Время пребывания частицы в слое определяется расходной скоростью материала (детерминированная составляющая) и диффузией, обусловленной продольным перемешиванием частиц (стохастическая составляющая).

В режиме идеального вытеснения все частицы имеют одинаковое время пребывания в зоне, равное $\tau = M / G$, где M – количество материала, одновременно находящегося в зоне, а G – расход материала в единицу времени. Однако, для кипящего слоя в силу интенсивного перемешивания частиц, эта формула дает только величину среднего времени пребывания материала в слое. Спектр времени пребывания частиц зависит от конструктивных особенностей и размеров реакционной зоны. Если в слое под-

держивается режим идеального перемешивания, то функция распределения представляется в виде экспоненциального закона

$$P(\tau) = \exp(-1/\tau)/\tau.$$

Рассматривается реактор с псевдооживленным слоем длиной L , работающий по непрерывному циклу в стационарном режиме (т.е. расходная скорость и движения материала постоянны). Частицы, покидающие реактор, характеризуются величиной τ времени пребывания в слое. Необходимо определить плотность распределения частиц $\rho(L, \tau)$ по времени пребывания в реакторе. Расчет $\rho(L, \tau)$, осуществляется в результате вычислительного эксперимента [13, 31, 38], в соответствии с которым моделируется поведение меченых частиц, поступающих в слой в начальный момент времени в виде импульсной подачи. Условия эксперимента следующие:

- предполагается, что масса меченых частиц является достаточно малой величиной относительно слоя в целом, и поведение меченых частиц идентично поведению частиц слоя;
- импульсный характер ввода частиц не нарушает стационарного режима работы реактора.

Для моделирования процесса изменения концентрации меченых частиц в псевдооживленном слое используется математическая модель диффузии частиц в конвективном потоке [13, 31]. Уравнения моделируемого процесса имеют вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial X} \quad (3.1)$$

$$D \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial X} = vC \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial C(L, \tau)}{\partial X} = 0 \quad (3.3)$$

$$C(0, X) = C_0(X) \quad (3.4)$$

где

$C(x, \tau)$ – безразмерная концентрация меченых частиц в точке x , в момент времени τ ;

D – коэффициент диффузии частиц в слое;

v – расходная скорость потока;

$C_0(X)$ – начальная концентрация меченых частиц.

Уравнение (3.1) описывает изменение концентрации частиц в результате диффузии и переносного движения слоя. Граничные условия по Дан-квартсу (3.2), (3.3) определяют материальные балансы на концах зоны. Начальное условие (3.4) задает распределение концентрации меченых частиц в момент поступления в реактор. Вычислительный эксперимент состоит в следующем. Моделируется импульсное поступление меченых частиц в слой, общее количество которых принимается равным 1. Для этого определяется концентрация меченых частиц в начальном условии, затем по уравнениям (3.1)–(3.3) определяется концентрация меченых частиц в слое в следующий момент времени $\tau+d\tau$. На выходе из реактора на каждом шаге по времени фиксируется концентрация меченых частиц и текущее время. Процесс расчета повторяется до полного выхода меченых частиц из реактора. Результатом моделирования диффузионного процесса является функция $C(L,\tau)$, с помощью которой определяется доля q меченых частиц, покинувших реактор в момент времени $\tau+d\tau$:

$$q(\tau) = \nu C(L, \tau) d\tau.$$

Величина $q(\tau)$ определяет также вероятность того, что время пребывания частиц принимает значение, принадлежащее интервалу $[\tau, \tau+d\tau]$. Тогда величина $\nu C(L,\tau)$ является плотностью вероятности времени пребывания, т.е.

$$\rho(L, \tau) = \nu C(L, \tau).$$

На основе предложенной процедуры вычислительного эксперимента можно моделировать практически любые процессы движения частиц от идеального вытеснения до идеального смешения при различных способах загрузки материала в реактор. В результате вычислительного эксперимента можно получить полную информацию о вероятностных характеристиках времени пребывания частиц: численную оценку функции плотности распределения $\rho(\tau)$, представляемую в виде массивов чисел, начальные и центральные моменты случайной величины.

3.2 Вычисление показателей плотности распределения частиц по времени пребывания в псевдооживленном слое.

Для реализации математической модели (3.1)–(3.4) на ЭВМ могут быть использованы конечно-разностные методы с явной или неявной схемой аппроксимации и их модификации [13, 40, 41, 43].

С помощью метода расщепления модель (3.1)–(3.4) может быть представлена элементарными физическими процессами (диффузией и переносом массы), для расчета которых накоплен значительный опыт. Простейшей для реализации на ЭВМ является явная схема, в соответствии с которой краевая задача представляется в виде следующей конечно-разностной:

$$\frac{C_{j+1}^L - C_j^L}{h_\tau} = D \frac{C_j^{L+1} - 2C_j^L + C_j^{L-1}}{h_X^2} - v \frac{C_j^L - C_j^{L-1}}{h_X} \quad (3.5)$$

$$\frac{C_j^1 - C_j^L}{h_X} = \frac{v}{D} C_j^0 \quad (3.6)$$

$$C_j^n - C_j^{n-1} = 0 \quad (3.7)$$

$$C(X_L, 0) = C_0^L \quad (3.8)$$

где

$$C_j^L = C(X_L, \tau), h_X = L/n, X^L = Lh_X, L = 0, n; \tau_j = jh_\tau, j = 0, 1, \dots$$

Шаг по времени h_τ выбирается из условия устойчивости, которое получено по основе анализа уравнения (3.5) и имеет следующий вид:

$$h_\tau < \frac{h_X^2}{2D + vh_X}.$$

Конечно-разностное уравнение (3.5) аппроксимирует исходное уравнение по схеме односторонней разности против потока с первым порядком точности по переменным X, τ . Для определения параметров конечно-разностной схемы (h_X, h_τ) отладки алгоритмов расчета краевой задачи удобно пользоваться интегральными характеристиками процесса, основанными на законах сохранения массы. В начальной стадии процесса, пока ни одна из меченых частиц не покинула слой, имеет место следующее интегральное соотношение:

$$\int_0^L C(X, \tau) dX = 1, \quad (3.9)$$

для всех τ , пока $C(L, \tau) = 0$.

Затем, контрольная сумма доли покинувших реактор и оставшихся в слое частиц должна быть равна 1, т.е.

$$v \int_0^{\tau} C(L, \tau) d\tau + \int_0^L C(X, \tau) dX = 1,$$

для τ : $0 < \tau < \infty$.

Использование интегральных характеристик при отладке алгоритмов расчета конечно-разностной задачи (3.5)–(3.8) позволило преодолеть особенности при определении начального условия (3.8), обусловленные нарушением непрерывности поля концентрации. Если область ΔX , заполняемая мечеными частицами, равна величине шага h_X по координате x и соответствует граничному отрезку, (для $i = 0$), то на первом шаге по времени концентрация частиц в граничной точке $i = 0$, рассчитываемая по соотношению (3.6), оказывается завышенной. Это приводит к существенному нарушению равенства (3.9) и накоплению погрешности при дальнейших шагах по времени. Удовлетворительные результаты счета дают следующие варианты определения начальных условий:

- смещение области ΔX на один шаг вправо, при равномерном распределении частиц, концентрация в граничной точке начального условия при этом принимается равной нулю;
- распределение плотности меченных частиц по нормальному закону с центром распределения, соответствующим центру области ΔX . Для обоих способов аппроксимации начального условия (3.8) требуется выполнение равенства

$$\sum_{X_L \in \Delta X} C_0^L h_X = 1.$$

Величина ΔX выбирается таким образом, чтобы соотношение $\Delta X / L$ соответствовало условиям работы конкретного загрузочного устройства. Для оценки величины ΔX необходимо учитывать скорости и траектории движения частиц в момент поступления в слой. Ввод материала в слой будем считать сосредоточенным, если ΔX является относительно небольшим отрезком, и равномерно распределенным, если ΔX совпадает с длиной слоя ($\Delta X = L$). В результате вычислительного эксперимента получаем численную оценку функции $r(t)$, представляемую в виде массивов чисел. Для дальнейшего использования функции, например, в целях моделирования технологического процесса в псевдооживленном слое с учетом случайного характера времени пребывания, необходимо иметь аналитическое представление функции $r(t)$.

Учитывая близость функции $r(t)$ к нормальному закону, в простейшем случае для описания $r(t)$ можно воспользоваться разложением в ряд Эджворта, коэффициенты которого выражаются через моменты случайной величины. Величины начальных и центральных моментов можно также рассчитать по конечным алгебраическим выражениям, которые получены аналитически через коэффициенты математической модели диффузионного процесса [13, 31]. Математическое ожидание времени пребывания частицы совпадает с расчетным временем режима идеального вытеснения $m_\tau = L/v$. Дисперсия времени пребывания частиц в слое рассчитывается по следующему соотношению [31]:

$$D_\tau = m_\tau^2 \frac{2}{Pe} \left[1 + \frac{1}{Pe} (\exp(-Pe) - 1) \right], \quad (3.10)$$

где Pe – значение критерия Пекле ($Pe = v L / D$).

3.3 Исследование численных показателей времени пребывания частиц в псевдооживленном слое как стохастической величины.

Проведены исследования законов распределения времени пребывания частиц в камере при различных способах загрузки и значениях параметров процесса. При сосредоточенном вводе материала для значений критерия Пекле $Pe > 1$ функция плотности распределения является унимодальной и отличается от закона нормальной плотности положительными асимметрией и эксцессом (график 1 рисунка 3.1). При увеличении критерия Пекле закон распределения времени пребывания симметризуется, дисперсия, асимметрия и эксцесс стремятся к нулю, а процесс движения частиц стремится к режиму идеального вытеснения. Для распределений характерно несовпадение моды (времени пребывания, имеющего максимум плотности вероятности) с математическим ожиданием, причем с уменьшением Pe разница возрастает, с ростом Pe мода стремится к m_τ .

При возрастании коэффициента диффузии ($D > 0,01$) для $Pe > 1$ процесс движения частиц стремится к режиму идеального перемешивания, а закон распределения частиц по времени пребывания стремится к экспоненциальному.

В режимах, близких к идеальному перемешиванию, модель (3.1)–(3.4) также дает унимодальную плотность распределения с

двумя ветвями (график 2 рисунка 3.1), однако левая от моды ветвь сосредоточена на узком временном интервале в 1– 2 минуты, и закон распределения без большой погрешности можно считать экспоненциальным.

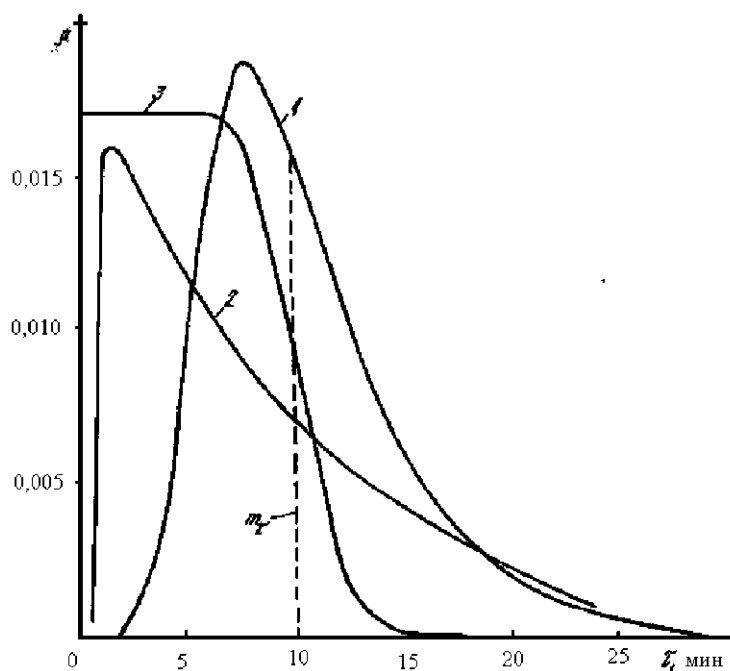


Рис. 3.1 Графики функций плотности распределения времени пребывания частиц в слое для различных значений критерия Пекле:

- 1 – унимодальная плотность распределения, $Pe = 88,9$;
- 2– плотность распределения, близкая к экспоненциальному закону, $Pe = 27$;
- 3– плотность распределения при равномерной загрузке материала для малых коэффициентов диффузии $Pe=88,9$.

При равномерно распределенной загрузке материала для больших коэффициентов диффузии ($D > 0,01$) режим движения частиц соответствует идеальному перемешиванию, а закон распределения частиц по времени пребывания близок к экспоненциальному. При малых же коэффициентах диффузии ($D \leq 0,01$) плотность распределения частиц превращается в функцию, напоминающую \arctg (график 3 рисунка 3.1), причем, чем меньше D , тем длиннее площадка равномерной плотности и распределение стремится к прямоугольному. Проведены исследования вероятностных характеристик времени пребывания в диапазоне значений коэффициентов диффузии, полученных опытным путем для различных материалов, обрабатываемых в псевдооживленном слое [13, 31]. В таблице 3.1 приведены результаты численного исследования вероятностных характеристик времени пребывания

частиц в рабочей камере при различных значениях параметров процесса.

Таблица 3.1

Зависимость вероятностных характеристик времени пребывания частиц от величины коэффициента диффузии

Среднее время пребывания t_r (мин)	Коэфф. диффузии $D \cdot 10^4$, (m^2 / c)			
	1	3	5	10
10	18,8	19,6	17,7	8,6
	2,3	3,7	3,8	3,4
	0,12	0,30	0,23	0,26
20	18,7	22,7	13,3	16,5
	3,8	5,5	4,9	12,1
	0,12	0,23	0,27	0,55
30	23,3	17,8	10,6	5,3
	5,4	6,1	9,5	3,6
	0,19	0,33	0,41	0,55
40	32,4	14,8	8,9	4,4
	12,6	6,3	4,3	3,5
	0,21	0,35	0,45	0,59

В ячейках таблицы первое значение обозначает математическое ожидание, второе – среднеквадратичное отклонение, третье – коэффициент вариации.

Среднее квадратическое отклонение времени пребывания и коэффициент вариации $V = \sigma_r / m_r$ возрастают с уменьшением значения критерия Пекле. Однозначно по критерию Пекле определяется только коэффициент вариации. Дисперсия времени пребывания частиц зависит от величины математического ожидания времени пребывания и коэффициента диффузии. Исследование предела выражения (3.10) для $Pe \rightarrow 0$ при $m_r = \text{const}$, что соответствует неограниченному возрастанию коэффициента диффузии, показывает, что $\sigma_r \rightarrow m_r$, т.е. величина среднего квадратического отклонения ограничивается математическим ожиданием времени пребывания. При этом процесс движения частиц стремится к режиму идеального перемешивания, а закон распределения частиц по времени пребывания стремится к экспоненциальному. При $Pe \rightarrow 0$ дисперсия, асимметрия и эксцесс стремятся к нулю, а процесс движения частиц стремится к режиму

идеального вытеснения. Анализ результатов таблицы 3.7 позволяет сделать вывод, что при уменьшении расходной скорости движения слоя среднее квадратическое отклонение увеличивается, причем быстрее, чем математическое ожидание времени пребывания. Этот факт отражается ростом коэффициента вариации.

В исследуемом диапазоне значений критерия Пекле плотность распределения времени пребывания по характеру близка к нормальному закону, однако отличается положительными асимметрией и эксцессом. При обработке материала в многозонных аппаратах с псевдооживленным слоем вероятностные характеристики времени пребывания могут быть получены в результате моделирования процесса переноса и диффузии частиц последовательно в каждой зоне. Для первой зоны аппарата процесс моделируется системой уравнений (3.1)–(3.3). Для последующих зон в качестве входной характеристики концентрации меченых частиц принимается функция $C^{\circ}(L)$ на выходе из предыдущей зоны. При этом граничное условие (3.2) заменяется следующим:

$$D \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial X} = v(C - C^{\circ}). \quad (3.11)$$

Вычислительный эксперимент по расчету прохождения меченых частиц по всем зонам позволяет получить плотность распределения частиц по времени пребывания во всех зонах и агрегате в целом. В таблице 3.2 представлены результаты вычислительного эксперимента для определения вероятностных характеристик времени пребывания частиц в камере сушилки кипящего слоя конструкции ДКХЗ.

Таблица 3.2

Вероятностные характеристики времени пребывания частиц в зонах сушилки ДКХЗ.

Наименование зоны	Математ. ожидан. и с.к.о.(мин)	Коэффициент вариации	Асимметрия	Эксцесс
Зона I	3,35 ----- 1,8	0,25	0,85	1,15
Зона II	6,7 ----- 1,5	0,23	0,56	0,66
Зона I–II (акт. перемеш.)	11,4 ----- 1,7	0,18	0,39	0,38
Зона III	13,7 ----- 2,1	0,16	0,29	0,26
Зона IV	15,8	0,15	0,22	0,19

	----- 2,4			
--	--------------	--	--	--

При расчете скорость движения материала и коэффициенты диффузии принимались одинаковыми для всех зон. Анализ вероятностных характеристик показывает, что при движении материала из зоны в зону дисперсия времени пребывания частиц нарастает, однако медленнее, чем его математическое ожидание, в связи с чем коэффициент вариации времени пребывания уменьшается. При этом закон распределения стремится к нормальному (асимметрия и эксцесс уменьшаются с увеличением числа пройденных зон).

В таблице над разделительной чертой указана величина математического ожидания, под разделительной чертой указано среднее квадратическое отклонение случайной величины.

В результате исследования установлено, что математическое ожидание времени пребывания частицы в активной зоне (зона I и зона II) составляет более 11 мин, в зоне III – более 13 мин, что подтверждает как результаты моделирования, так и положение о том, что сушка в «кипящем слое» обеспечивает более длительный контакт материала с сушильным агентом по сравнению с барабанными сушилками, трубами-сушилками и другими схемами, и по этой причине является наиболее эффективной современной технологией обезвоживания.

3.4 Исследование температуры и степени обезвоживания частиц в псевдооживленном слое как стохастических величин.

Задача анализа вероятностных характеристик температурного процесса обработки частиц состоит в определении законов распределения, математических ожиданий, дисперсий, центральных и начальных моментов более высокого порядка по заданным вероятностным характеристикам времени пребывания.

Исчерпывающую информацию о случайной величине несет дифференциальный закон распределения исследуемого параметра. Расчет законов распределения представляет собой сложную задачу, в то время как для анализа и практических выводов достаточно иметь информацию о нескольких начальных и центральных моментах случайной величины. Математическое ожидание случайной величины, например, температуры $T(\tau)$, рассматриваемой как функции времени, а также центральные

моменты μ_n n -ого порядка, можно получить, вычислив следующие интегралы [95]:

$$M[T(\tau)] = \int_0^{\infty} T(\tau) \rho(\tau) d\tau$$

$$\mu_n[T(\tau)] = \int_0^{\infty} [T(\tau) - m_\gamma]^n \rho(\tau) d\tau.$$

где M , m - символы математического ожидания случайной величины. В качестве математической модели для расчета процесса нагрева частицы сферической формы и последующего ее обезвоживания, сопровождаемого эндотермической реакцией диссоциации материала, принимаем математическую модель квазистационарного режима обработки дисперсной фазы, движущейся в противотоке газу, которая записывается в цилиндрической системе координат следующей системой уравнений:

$$v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T) \frac{\partial T_s}{\partial X} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk_s \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \alpha_V(T_g - T_s) \quad (3.12)$$

$$v_s \varepsilon C_{\rho g}(T) \frac{\partial T_g}{\partial X} = \alpha_V(T_g - T_s), \quad (3.13)$$

$$0 < X < L, 0 < r < R$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s(r,0)}{\partial X} = v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T_s - T_s^0), \quad (3.14)$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s(r,L)}{\partial X} = v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T_s - T_s^L), \quad (3.15)$$

$$-k_s \frac{\partial T_s(R,X)}{\partial r} = K_{\Sigma}(T_s - T_{окр}), \quad (3.16)$$

$$T_g(L) = T_g^0, \quad (3.17)$$

$$\lim_{r \rightarrow 0} rk \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (3.18)$$

где v_s , v_g - расходные скорости движения материала и газа;

ε - порозность псевдооживленного слоя;

$C_{\rho s}$, $C_{\rho g}$ - объемная теплоемкость материала и газа;

λ_s , k_s - эффективная теплопроводность слоя по координатам x

и r соответственно;

a_V – объемный коэффициент теплообмена между газом и материалом;

K^Σ – суммарный коэффициент тепловых потерь через стенки теплообменника в окружающую среду;

T_s^0, T_s^L – температура загрузки и выгрузки материала;

T_g^0 – температура газа на входе в противоток ($x = L$).

Уравнение (3.12) описывает процесс теплообмена в слое с учетом конвективного теплообмена с газовой средой и эффективной теплопроводности, которая обусловлена переносом тепла за счет перемещения частиц по координатам x и r . Граничное условие (3.16) задает тепловые потери в окружающую среду. Уравнение (3.13) описывает изменение температуры газа $T_g(X, r)$ по координатам вследствие теплообмена с материалом. Граничные условия типа Данквертца [31] на входе в противоток (3.14) и выходе (3.15) позволяют подчеркнуть особенность кипящего слоя, состоящую в отличии температур материала на входе T_s^0 от $T_s(0)$ и на выходе T_s^L от $T_s(L)$. Использование математической модели (3.12)–(3.18) целесообразно для случая, когда значения геометрических размеров реактора L и R являются соизмеримыми величинами. Если же $R < L$, то необходимо рассматривать трехмерную постановку задачи. И, наконец, учитывая малость величин тепловых потерь через кладку и, как следствие, наличие небольших температурных градиентов по координате r , можно свести уравнение (3.12) к одномерному. Это целесообразным становится также и в том случае, когда необходимо знать осредненную температуру материала на выходе.

В простейшей одномерной постановке основные процессы теплообмена описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T)\frac{\partial T_s}{\partial X} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial X^2} + \alpha_V(T_g - T_s) \quad (3.19)$$

$$v_g \varepsilon C_{\rho g}(T)\frac{\partial T_g}{\partial X} = a_V(T_g - T_s) + \frac{K^\Sigma P}{F}(T_g - T_{окр}) \quad (3.20)$$

$$0 < X < L, 0 < t < t_k$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s(r, 0)}{\partial X} = v_s(1-\varepsilon)C_{\rho s}(T_s - T_s^0), \quad (3.21)$$

$$-K_s \frac{\partial T_s(R, X)}{\partial r} = v_s (1 - \varepsilon) C_{\rho s} (T_s - T_s^L), \quad (3.22)$$

$$T_g(L) = T_g^0. \quad (3.23)$$

Характерной особенностью математического моделирования теплообмена в противотоке является тот факт, что известными оказываются, как правило, температуры материала и газа на входе, задаваемые на разных концах зоны теплообмена. При численном интегрировании системы (3.19)–(3.23), начиная в точке $x = 0$, либо в обратном направлении при $x = L$, оказываются неизвестными $T_g(0)$, либо T_s . Целью математического моделирования работы реактора является расчет функции $T_s(X)$, $T_g(X)$, для $X: 0 < X < L$ и значения температуры материала на выходе – для заданных расходных скоростей v_s , v_g . Для расчета требуемых величин необходимо решить некоторую краевую задачу, для чего дополним систему уравнений (3.19)–(3.23) начальным условием для температуры газа $T_g(0)$ в точке $x = 0$, таким, чтобы при интегрировании системы получить равенство рассчитанной в точке $x = L$ температуры газа $T_g^r(L)$ заданной начальным условием (3.23):

$$T_g^r(L) = T_g^0.$$

Определение начального условия $T_g(0)$, для которого выполняется равенство (3.23), сводится к нахождению корня некоторого уравнения, заданного алгоритмически. С этой целью система уравнений аппроксимируется какой-либо конечно-разностной схемой, обеспечивающей достаточно высокую точность расчета искомых функций [41], после чего решение краевой задачи может быть получено одним из численных методов поиска корней алгебраических и трансцендентных уравнений (методы Ньютона, хорд, деление отрезка пополам и др.).

Расчет вероятностных характеристик осуществляется в едином алгоритме интегрирования краевой задачи, на каждом шаге которого накапливаются суммы требуемых величин, умноженных на плотность распределения.

На основе законов распределения частиц по времени пребывания, полученных с помощью диффузионной модели, исследованы вероятностные характеристики температур и степени обезвоживания частиц в псевдооживленном слое. Представляет практический интерес установить, в каких пределах среднего

квадратического отклонения времени пребывания, а значит и при каких значениях коэффициента диффузии, равенство $M[T(\tau)] = T(m_\tau)$ все же можно считать приближенно выполняющимся.

В таблице 3.3 приведены вероятностные характеристики температур и степени обезвоживания частиц в диапазоне значений коэффициентов диффузии, полученных опытным путем для различных материалов, обрабатываемых в псевдооживленном слое [31]. С увеличением коэффициента диффузии растет среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) времени пребывания при неизменном его математическом ожидании ($m_\tau = 40$ мин). При этом изменяются не только дисперсии, но и математические ожидания всех характеристик частицы, что подтверждает нелинейность соответствующих функциональных зависимостей. Степень нелинейности различных характеристик частицы существенно отличается.

Максимальной нелинейностью обладает степень обезвоживания частицы. При $D < 0,0001$ (соответственно $\sigma_\tau \leq 7$ минут) вероятностный расчет с допустимой погрешностью можно заменить детерминированным расчетом температур и степени обезвоживания. При $D > 0,0003$ ($\sigma_\tau \leq 10$ минут) игнорирование случайного характера времени пребывания частиц приводит уже к существенным погрешностям в численной оценке степени обезвоживания частицы.

Проведен вычислительный эксперимент с аппроксимацией плотности распределения времени пребывания, полученной при $D = 0,0003$ (строка 4 таблицы 3.3), нормальной плотностью для одинаковых значений математического ожидания и дисперсии.

Сравнение результатов расчета вероятностных характеристик температур и степени обезвоживания частиц позволяет сделать вывод, что в классе унимодальных законов распределения частиц по времени пребывания математические ожидания характеристик частиц зависят от математического ожидания и дисперсии времени пребывания частиц и практически не зависят от моментов более высокого порядка, тогда как дисперсии зависят еще и от асимметрии и эксцесса. Практически это означает, то при оценке степени обезвоживания по заданным математическому ожиданию и дисперсии времени пребывания частиц и неизвестной плотности распределения, последнюю можно считать нормальной.

Таблица 3.3

Вероятностные характеристики температур и степени обезвоживания частиц при различных значениях коэффициента диффузии и законах распределения времени пребывания.

Коэффициент диффузии m^2 / c	С.к.о. времени пребывания (мин)	Температура поверхности частицы ($^{\circ}C$)	Среднемассовая температура ($^{\circ}C$)	Степень обезвоживания частицы (%)
0,0	0	94,5	62,5	82
0,0001	8,3	95,4	72	81
		----- 4,1	----- 5,3	----- 4,4
0,0003	10,8	95,2	71	80
		----- 5,9	----- 7,8	----- 5,7
Аппроксимация нормальным законом распределения				
0,0003	8,6	95,2	71	82
		----- 7,3	----- 7,5	----- 7,6
0,0005	12,6	95,2	91	80
		----- 8,3	----- 7,9	----- 7,5
0,0010	17,5	95	90	79
		----- 8,2	----- 10,4	----- 9,9
Режим идеального смещения (экспоненциальный закон)				
∞	40,0	98	89	68
		----- 18,2	----- 16,1	----- 13,8

Примечание. В таблице над разделительной чертой указана величина математического ожидания, под разделительной чертой – среднее квадратическое отклонение случайной величины.

Таким образом, на основе вычислительного эксперимента с использованием математических моделей диффузионно-переносного движения, нагрева и обезвоживания частиц исследованы вероятностные характеристики времени пребывания, температур и степени обезвоживания материала в псевдооживленном слое.

Анализ вероятностных характеристик показывает, что при движении материала из зоны в зону дисперсия времени пребывания частиц нарастает, однако медленнее, чем его математическое ожидание, в связи с чем коэффициент вариации времени пребывания уменьшается, при этом закон распределения стремится к нормальному (асимметрия и эксцесс уменьшаются с увеличением числа пройденных зон).

Сравнение результатов расчета вероятностных характеристик температур и степени обезвоживания частиц позволяет сделать вывод, что в классе унимодальных законов распределения частиц по времени пребывания математические ожидания характеристик частиц зависят от математического ожидания и дисперсии времени пребывания частиц и практически не зависят от моментов более высокого порядка, и это позволяет при оценке степени обезвоживания по заданным математическому ожиданию и дисперсии времени пребывания частиц плотность распределения можно считать нормальной.

Установлено, что математическое ожидание времени пребывания частицы в активной зоне (зона I и зона II) составляет более 11 мин, в зоне III – более 13 мин, что подтверждает как результаты моделирования, так и положение о том, что сушка в «кипящем слое» обеспечивает более длительный контакт материала с сушильным агентом по сравнению с барабанными сушилками, трубами-сушилками и другими схемами, и по этой причине является наиболее эффективной технологией обезвоживания.

Раздел 4. Экспериментальные исследования процессов сушки и рекомендации по практическому применению результатов математического моделирования

4.1 Экспериментальные и сравнительные исследования параметров технологических схем и результатов математического моделирования

4.1.1 Сравнительный анализ параметров процесса сушки в «кипящем слое» на предприятии ЦОФ «Колосниковская» и результатов математического моделирования

Для отработки параметров процесса сушки угля в кипящем слое под разрежением ГП «УкрНИИУглеобогащение» проведены исследования, на основании которых был выполнен проект опытно-промышленной установки с топкой на твердом топливе. Проектная производительность установки по испаренной влаге до 10, а по исходному углю до 100 т/ч. Сушильная установка смонтирована на ЦОФ «Колосниковская» и скомпонована с топкой и системой пылеулавливания. Технологическая схема установки показана на рисунке 4.1.

Теплоноситель из слоевой угольной топки 1, оборудованной решеткой БЦРМ 2000×6500 по борову 2 подается под газораспределительную решетку сушильной камеры 3. Влажный материал через шлюзовой затвор 4 с помощью разбрасывателя 5 равномерно распределяется по сечению сушильной камеры. Приведенный в псевдооживленное состояние материал подсушивается и разгружается через шибер донной разгрузки 6 и шлюзовой затвор 7 на конвейер сухого продукта 8.

Отработанный теплоноситель отсасывается высоконапорным дымососом 9 через систему пылеулавливания — разгрузочную камеру 10, сухой пылеуловитель 11 и мокрый пылеуловитель 12. В период розжига топки и во время остановки агрегата выброс горячих газов в атмосферу осуществляется через растопочную трубу 13. Во время остановок сушильная камера отключается от топки с помощью отсекающегошибера 14.

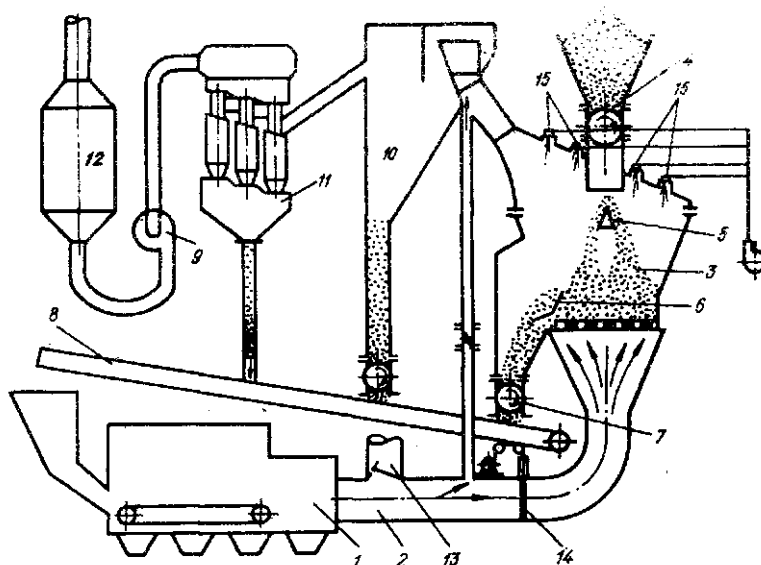


Рис. 4.1 Схема цепи аппаратов сушильной установки ЦОФ «Колосниковская».

Сушильная камера представляет собой сварную конструкцию диаметром 2,5 м, расширяющуюся по высоте. Отношение высоты сепарационной зоны к диаметру камеры принято равным единице. В зоне подвода теплоносителя камера футерована шамотным кирпичом. Газораспределительная решетка провального типа укладывается на опорную металлоконструкцию, состоящую из балок, изготовленных из жаростойкого металла и установленных в обмуровке с зазором для температурного расширения. Для поддержания необходимой высоты слоя и разгрузки высушенного продукта в камере имеется переливающий порог, позволяющий поддерживать высоту слоя 570—800 мм. На уровне газораспределительной решетки установлен поворотный шибер донной разгрузки, предназначенный для удаления слоя угля при остановках сушилки. Во время пуска и остановок в камеру через форсунки 15 передается тонкораспыленная вода.

В качестве шлюзовых затворов на подаче влажного материала и выгрузке продукта использованы скребково-барабанные питатели производительностью 150 т/ч.

Для обеспечения стабильной работы установки существующий дымосос Д15,5 Хабаровского завода «Энергомаш» был реконструирован по современной экономичной модели МО ЦКТИ с загнутыми назад лопатками под углом 40° и узким колесом. Реконструкция предусматривала увеличение напора

дымососа до 900 кгс/м^2 и заключалась в изменении конструктивных элементов колеса, геометрии улитки, всасывающей воронки и ходовой части, а также в увеличении скорости рабочего колеса до 1500 об/мин.

Во время испытаний на сушку подавались флотационный концентрат и смесь флотационного и мелкого концентратов в соотношении 1 : 1. Гранулометрический состав смеси следующий: + 6 мм – 3,5%; –6+3 мм – 12%; –3+1 мм – 28,8%; –1+0,5 мм – 19,4%; –0,5 мм – 36,3%. Испытания подтвердили предусмотренные проектом аэродинамические параметры.

Установка функционировала в режиме работы фабрики в течение тысячи часов, при этом было просушено более 100 тыс. т концентрата. Показатели работы сушильной установки приведены в таблице 4.1.

При исследовании параметров на математической модели показатель влажности соответствует показателю концентрации вещества, распределение поля концентраций определяется в результате моделирования. Данные, полученные в результате моделирования, приведены в табл. 4.2. В колонке «Концентрация» приведена величина концентрации твердой фазы, в скобках указана соответствующая влажность.

Таблица 4.1

Показатели работы сушильной установки

Производительность			влажность, %		температура, град.			разрежение, кгс/м ²			сопротивление, кгс/м ²
по исходному углю, т/ч	по испаренной влаге		до сушки	после сушки	под решеткой	в топке	перед дымососом	в топке	под решеткой	перед дымососом	
	фактическая, т/ч	удельная, т/м ³									
80	11,2	2.24	19,8	6,7	690	700	76	4	18	700	350
110	8.8	1.76	15.6	8,3	550	620	72	5	19	710	390
115	11.1	2.22	16.0	7,0	700	710	75	5	13	680	360
120	9.5	1.90	16,2	9,0	620	660	72	3	17	720	390
130	9,1	1.82	12,5	5.9	600	640	68	5	18	715	350

Таблица 4.2

Результаты моделирования процесса

№ опыта	Концентрация тв. фазы (влажн.), %		Температура, град.		
	до сушки	после сушки	под решеткой	в поле камеры	на выходе из сушилки
1	80(20)	93 (7)	700	90 95 70	75
2	85 (15)	93 (7)	550	75 80 60	70
3	85 (15)	94 (6)	700	90 95 70	75
4	85 (15)	92 (8)	650	80 85 65	70
5	88 (12)	94 (6)	600	75 80 65	70

Сравнение данных таблиц 4.1 и 4.2 показывает, что расхождение результатов моделирования и соответствующих технологических показателей находится в пределах от 6,8% до 10,3%.

Сравнение полученных данных с показателями работы сушильной установки ОФ Днепродзержинского КХЗ, проведенное ГП «УкрНИИУглеобогащение», показывает, что независимо от вида топлива, используемого для получения теплоносителя, и способа его подвода в сушильную камеру удельная производительность установки по испаренной влаге составляет 1,8–2 т/м² по исходному углю – 20–25 т/м², суммарное сопротивление слоя и решетки 350–400 кгс/м², а температура слоя 65–80°.

Таким образом, промышленные испытания установки для сушки угля в кипящем слое на ЦОФ «Колосниковская» подтвердили возможность компоновки сушилок такого типа с топками, работающими на твердом топливе, а полученные в различных условиях одинаковые удельные показатели подтверждают моделируемость этого процесса, т.е. возможность применения детерминированных моделей процесса с распределенными параметрами на основе уравнений математической физики.

4.1.2 Результаты сравнительного анализа параметров для беспровальной сушилки взвешенного слоя на Узловской ЦОФ Технологическая схема установки беспровальной сушки взвешенного слоя приведена на рис. 4.2, технические характеристики – в табл. 4.3.

Автор проекта установки – В.А. Филиппов, руководители внедрения – А.С. Таболин, Э.Ж. Табагари.

Работу установки обеспечивают:

- тяговый дымосос (ВДН) ВМ 17 (Н = 1600 мм, N = 400 квт, n = 1500 об/мин, расход 85000 м³/час);
- пылеуловитель МП – 75.

Предварительный расчет скорости входящих газов производится из следующих соображений:

площадь сечения рабочего аппарата $F = 0,785 \text{ м}^2$, производительность дымососа $P = 85000 \text{ м}^3/\text{час} = 23,6 \text{ м}^3/\text{с}$, тогда необходимая скорость

$$v = F / P = 0,785 / 23,6 = 30 \text{ м/с}.$$

В процессе моделирования задание в качестве граничного условия скорости, меньшей 35 м/с, не позволило получить ожидаемый результат, что говорит об определенной идеализации модели по сравнению с практическими данными.

Таблица 4.3

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТАНОВКИ	
производительность, т/ч	55 – 60
высушиваемый материал: флоконоцентрат, фракции мм	0 ÷ 3,5
сушильный агент: дымовые газы, °С	850 – 910
скорость подачи газа, м/с	25 – 30
влажность обезвоживаемого материала, %	15 – 18
влажность выходного материала, %	8,5 – 9
температура концентрата на выходе из сушилки, °С	80
температура газа, выходящего на группы циклонов, °С	180 – 200
температура отходящих дым. газов, °С	150
температура отходящих дымовых газов после мокрого пылеулавливателя, °С	85 – 90
концентрация пыли (контролируемый параметр), мг/м ³	150 – 180

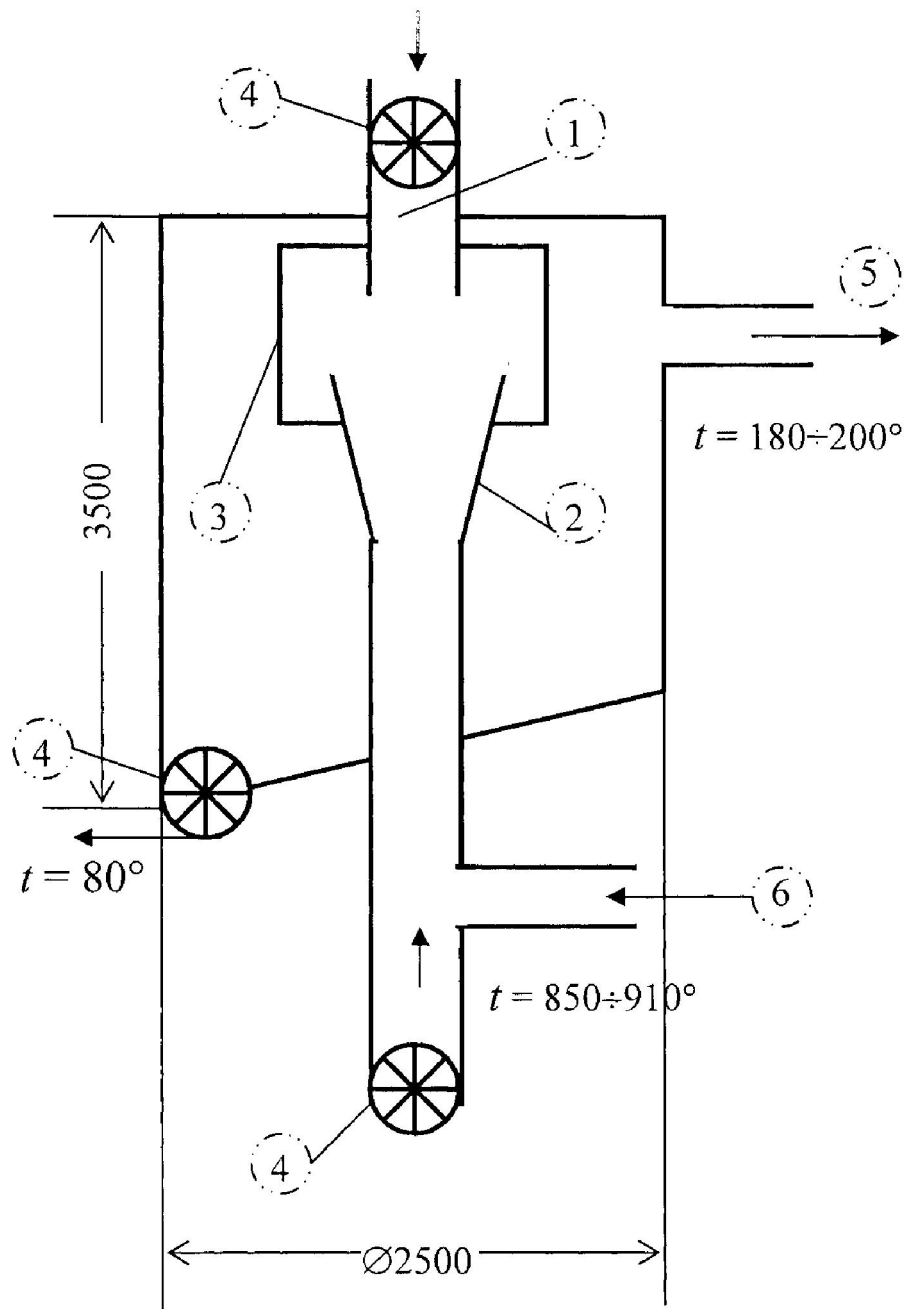


Рис. 4.2 Беспровальная сушка взвешенного слоя (Узловская ЦОФ): проект – Филиппов В.А., внедрение – Таболин А.С., Табагари Э.Ж.

1 – загрузочный желоб со шлюзовым питателем 4 оригинальной конструкции; 2 – диффузор; 3 – цилиндрическая вставка; 4 – шлюзовые питатели сушенки и провала; 5 – газоход на группу циклонов с обратным конусом; 6 – газоход от топки.

Результаты компьютерных экспериментов приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Результаты компьютерных экспериментов

№ опыта	Концентрация тв. фазы (влажн.), %		Температура, град		
	до сушки	после сушки	под решеткой	в поле камеры	на выходе сушилки
1	82(18)	91(9)	900	100 110 85	80
2	85(15)	92(8)	850	95 100 80	75
3	84(16)	92(8)	900	100 95 70	75
4	85(15)	92(8)	850	90 85 75	80
5	88(12)	94(6)	800	85 90 75	80

Расхождение результатов компьютерного моделирования и значений технических параметров находится в пределах 6,5 – 9,7%.

Аналогичные результаты получены для сушильной установки ДКХЗ. Схема установки и технологические характеристики приведены в подразделе 2.1.1, моделирование проводилось в диапазоне температур 500 – 650⁰С, исходная влажность 12 – 15%, конечная 7 – 8%. Расхождение результатов находится в пределах 9,8%.

4.2 Результаты внедрения рекомендаций по применению способа «кипящего слоя» для модернизации сушильного оборудования в условиях предприятия ЧАО «Яновское».

С целью повышения эффективности процесса сушки и сокращения вредных выбросов в атмосферу предприятием принято решение об усовершенствовании режима работы сушильной установки и топчного агрегата на основе применения способа «кипящего слоя».

Достоинством установок с «кипящим слоем» являются высокая интенсивность процесса сушки и почти одинаковая температура кипящего слоя. Кроме того, при использовании сушки в режиме «псевдооживления» сокращаются выбросы в атмосферу окислов углерода, окислов азота, твердых примесей, загрязняющих окружающую среду.

При проектировании установки обычно производятся предварительные расчеты параметров, значения которых уточняются в натурных условиях при подготовке установки к эксплуатации. В частности, при выводе установки Узловской ЦОФ на рабочий режим функционирования потребовалось проведение опытно-промышленных экспериментов в течение более 10 месяцев.

В данной работе предпринята попытка применения разработанных детерминированных математических моделей для предварительного теоретического исследования параметров с целью уменьшить количество экспериментальной работы.

Для исследования параметров были проведены серии компьютерных экспериментов с варьируемыми характеристиками процесса. В табл. 4.5 приведены результаты одной из серий.

Таблица 4.5

Результаты математического моделирования процесса сушки в «кипящем слое» на основе детерминированных моделей.

№ опыта	Скорость подаваемого газа, м/с	Температура, °С						Концентрация твердой фазы (влажность), %		Производительность, т/ч
		Под решеткой	В поле камеры				На выходе	до сушки	после сушки	
1	20	700	60	75	65	75	65	80(20)	88(12)	52
2	25	700	65	75	70	80	75	80(20)	90(10)	58
3	30	700	65	80	75	85	80	80(20)	91(9)	62
4	20	800	65	75	65	75	70	80(20)	89(11)	52
5	25	800	70	80	75	80	70	80(20)	91(9)	55
6	30	800	75	85	75	80	80	80(20)	92(8)	62
7	20	850	65	75	70	75	75	80(20)	89(11)	52
8	25	850	75	80	80	85	75	80(20)	90(10)	55
9	30	850	75	80	80	85	75	80(20)	92(8)	60
10	20	900	75	85	80	85	75	80(20)	90(10)	55
11	25	900	75	85	80	90	85	80(20)	92(8)	60
12	30	900	80	85	85	90	85	80(2)	92(8)	65

В табл. 4.5 приведены результаты серии из 12 компьютерных экспериментов, для реализации которых осуществлялась вариация значений управляющих параметров процесса. Как указывалось выше (раздел 2), на конечный результат влияют 3 технологических параметра, их значения получаются путем численного решения системы уравнений в частных производных. Фактически, математические модели позволяют

реализовать достаточно большое количество экспериментов в течение относительно небольшого промежутка времени, по результатам экспериментов получается обширный объем информации для дальнейшего анализа.

В данном случае наиболее близкими к планируемыми показателям оказались результаты экспериментов №№ 6, 9, 12. Исходя из имеющихся возможностей к дальнейшей реализации приняты значения параметров, полученные по результатам эксперимента № 9.

В результате для дальнейших практических испытаний и последующего внедрения рекомендованы следующие технические характеристики:

- размеры камеры сушилки 3500 x 1000 x 2500 мм, высота слоя 600 мм;
- производительность 60 т/час;
- размер частиц твердой фазы – до 3,5 мм;
- влажность концентрата: на входе 18 – 20%, на выходе – 8–8,5 %;
- температура поступающего из топки газа на входе камеры 850°C;
- скорость подаваемого горячего газа 30 м/с;
- расход подающего тягового дымососа 85000 м³/час;
- температура отходящих газов 180 – 200°C.

Следует отметить, что при внедрении беспровальной сушилки взвешенного слоя на Узловской ЦОФ верификация характеристик процесса проводилась путем натуральных экспериментов, что заняло 11 месяцев исследований с соответствующими техническими изменениями после каждой серии испытаний. Применение предложенных моделей позволило бы сократить срок внедрения до 2 месяцев.

Расчет ожидаемого экономического эффекта произведен на основании ориентировочной стоимости комплектующих для выполнения модернизации технологической схемы с использованием методики, применяемой в работах [53, 77].

Для обеспечения работы модернизируемых установок в «кипящем слое» необходимо дооборудовать их высокопроизводительным газонагнетательным оборудованием и газораспределительными решетками беспровального типа.

По предварительным оценкам, стоимость комплектующих составляет 190500грн.

Определив стоимость комплектующих изделий, рассчитываем общую цену, предварительно рассчитав плановую калькуляцию затрат. Калькуляция по статьям расходов сведена в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Плановая калькуляция затрат на модернизацию.

Наименование статей	Зависимости, %	Затраты, грн	Удельный вес условно постоянных расходов	
			грн.	%
1	2	3	4	5
1. Материальные затраты, комплектующие элементы, полуфабрикаты	расчет	190500	0	0
2. Транспортно-заготовительные расходы	5-7% п. 1	11425	0	0
3. Энергия на технологические цели	15% п. 1	28575	0	0
4. Основная заработная плата производственных рабочих	до 60 % п. 1	95250	85275	90%
5. Дополнительная заработная плата производственных рабочих	до 20 % п. 4	14288	12859	90%
6. Отчисления на социальные мероприятия	37%(п.4+5)×1,15	46608	41947	90%
7. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования	до 60% п. 4	38100	19050	50%
8. Цеховые расходы	до 50% п. 6	47625	38100	80%
9. Общезаводские расходы	до 150% п. 6	71438	57150	80%
Итого заводская себестоимость: СЗ		544613		
10. Внепроизводственные расходы	до 1,0% п. СЗ	5446		
11. Полная себестоимость Сп		550059		

При замене отдельных блоков рассчитываются капитальные затраты по выводимым и вновь вводимым фондам. Расчёты оформлены в виде табл. 4.7.

Таблица 4.7

Расчёт капитальных затрат.

Наименование основных фондов	Кол-во	Цена единицы, грн.	Затраты на ЗИП, до 30%	Транспортно-заготовительные расходы, 5-8% гр.(3+4), грн.	Затраты на монтаж, (50-120%)* Ц, грн.	Балансовая стоимость, грн. Σ 3+4+5+6
1	2	3	4	5	6	7
Система модернизации	1	550059	165000	57200	275000	1047200

Рассчитываем экономию и дополнительные затраты, связанные с внедрением новой системы. Расчёты ведутся по изменяющимся элементам затрат. При работе новой системы происходит экономия затрат на топливо. Среднесуточный расход твердого топлива равен 14,4 т/сутки, что за время функционирования из расчета на год составит $\mathcal{E}_{\text{т}}=1570\text{т}$ при снижении потребления на 12%.

Годовая экономия затрат на топливо

$$\mathcal{E}_T = 0,12 \cdot \mathcal{E}_{\text{т}} \cdot C_T,$$

где C_T – цена топлива, грн./т. (принимаем 510 грн./т.).

$$\mathcal{E}_T = 0,12 \cdot 1750 \cdot 510 = 96,1 \text{ тыс.грн./год.}$$

Изменение годовых амортизационных отчислений определяем исходя из балансовой стоимости вводимых и выводимых основных фондов и действующих норм амортизации по формуле

$$\pm \Delta A = \sum \frac{(B_{\text{cmi}}^{\text{в}} - B_{\text{cmi}}^{\text{в}})}{100} n_{\text{ai}},$$

где $B_{\text{cmi}}^{\text{в}}, B_{\text{cmi}}^{\text{в}}$ – балансовая стоимость вводимых и выводимых основных фондов, грн

n_{ai} - норма амортизации i -й группы основных фондов, %.

$$\Delta A = 25 \cdot (104720) / 100 = 26180 \text{ грн.}$$

$$Z_{\text{м2}} = 0,08 \cdot 104720 = 8380 \text{ грн.}$$

Рассчитав изменения затрат, определяем суммарную экономию по мероприятию замены системы топки:

$$\pm \mathcal{E}_{\text{сум}} = \pm \mathcal{Z}_{\text{м2}} \pm \mathcal{Z}_T \pm \Delta A,$$

$$\mathcal{E}_{\text{сум}} = 56,54 \text{ тыс.грн./год.}$$

Годовой экономический эффект:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_{\text{об}} - E_n \cdot (K_v - K_y),$$

где E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений (0,25);

$\mathcal{E}_{\text{об}}$ - общая экономия по мероприятию (96,1 тыс грн);

K_v, K_y - соответственно стоимость вводимых и выводимых основных фондов.

Срок окупаемости дополнительных капитальных затрат:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\Delta K}{\mathcal{E}_{\text{об}}} \leq 7 \text{ лет}(T_n),$$

где ΔK – дополнительные капитальные вложения, грн

$$\Delta K = K_v - A_n,$$

где A_n - недоамортизированная часть выбываемых основных фондов, грн.

$$A_n = K_y - K_y \cdot \frac{n_a \cdot T_a}{100} - B_p,$$

где T_a - срок амортизации, лет;

B_p - выручка от реализации выбывших основных фондов за вычетом затрат на демонтаж, грн. (принимается до 5% от K_v).

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 56540 - 0,25 \cdot 104720 = 30460 \text{ грн.}$$

Срок окупаемости $1047200/550059 = 1,9$ года.

Таким образом, модернизация системы, основанная на применении «кипящего слоя», является экономически выгодной, затраты окупаются за 1,9 года. Это свидетельствует о целесообразности внедрения рассматриваемых предложений.

4.3 Разработка рекомендаций по практическому применению математических моделей и компьютерных методов при проектировании технологических схем

На современном этапе дальнейшее развитие науки и техники немислимо без всесторонней информатизации и автоматизации процессов. Особенно остро эта проблема стоит при проектировании новых устройств и процессов. Традиционные методы расчета параметров и проектирования носят экстенсивный характер, они были эффективны до определенного момента – момента так называемого «насыщения», когда на первый план выдвигается необходимость перехода к интенсивным методам.

Среди средств интенсификации процессов исследования и проектирования выделяются системы автоматизированного проектирования.

4.3.1 Общая структура системы автоматизированного проектирования технологических схем процесса обезвоживания сыпучих материалов

В настоящее время известно несколько способов и технологических схем обезвоживания влажных сыпучих материалов, предназначенных для обеспечения требуемого качества конечного продукта в ряде отраслей промышленности. Применение способов и схем обезвоживания является завершающей стадией производственного цикла и определяется на стадии проектирования технологии производства.

Однако эффективность процесса не всегда в полной мере отвечает поставленным требованиям. Одной из причин этого является то, что на этапе проектирования предварительная оценка схем весьма затруднена ввиду сложности процесса. Применение математического моделирования позволяет улучшить качество принимаемых проектных решений. С этой целью разрабатывается подсистема автоматизированного проектирования технологических схем, призванная повысить качество проектов за счет эффективного применения компьютерных технологий для реализации трудоемких рутинных функций.

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 автоматизации процесса проектирования с применением методов математического моделирования и ЭВМ.

Классификация основных видов технологии сушки приведена выше в разделе 1 (табл. 1.1, рис. 1.3).

На рис. 4.3 приведена функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования (САПр) технологии процесса сушки.

Как показывает практика организации работ по созданию сушильных агрегатов, наиболее перспективным направлением в технологии является сушка в «кипящем слое».

Сушилка кипящего слоя позволяет увеличить продолжительность сушки материала во много раз и регулировать ее в очень широких пределах. Этот принцип сушки наиболее приемлем для таких материалов, продолжительность сушки которых исчисляется десятками секунд или минутами. Таким образом, сушка материалов в кипящем слое позволяет значительно расширить область применения метода сушки во взвешенном состоянии.

На рис. 4.4 приведена обобщенная блок-схема алгоритма функционирования головной программы.

Блок 1 содержит информацию о составе и свойствах материала, поступающего на сушку. Информация представляется в виде массива или файла с как можно более полным набором характеристик.

В этом же блоке представляется информация о сушильном агенте, за счет воздействия которого создается эффект «псевдооживления».

В блоке 2 помещается информация о тех характеристиках конечного продукта, которые должны быть обеспечены в результате воздействия. Основные из них – это влажность на выходе и производительность аппарата, однако в процессе исследований могут быть рассмотрены и другие показатели.

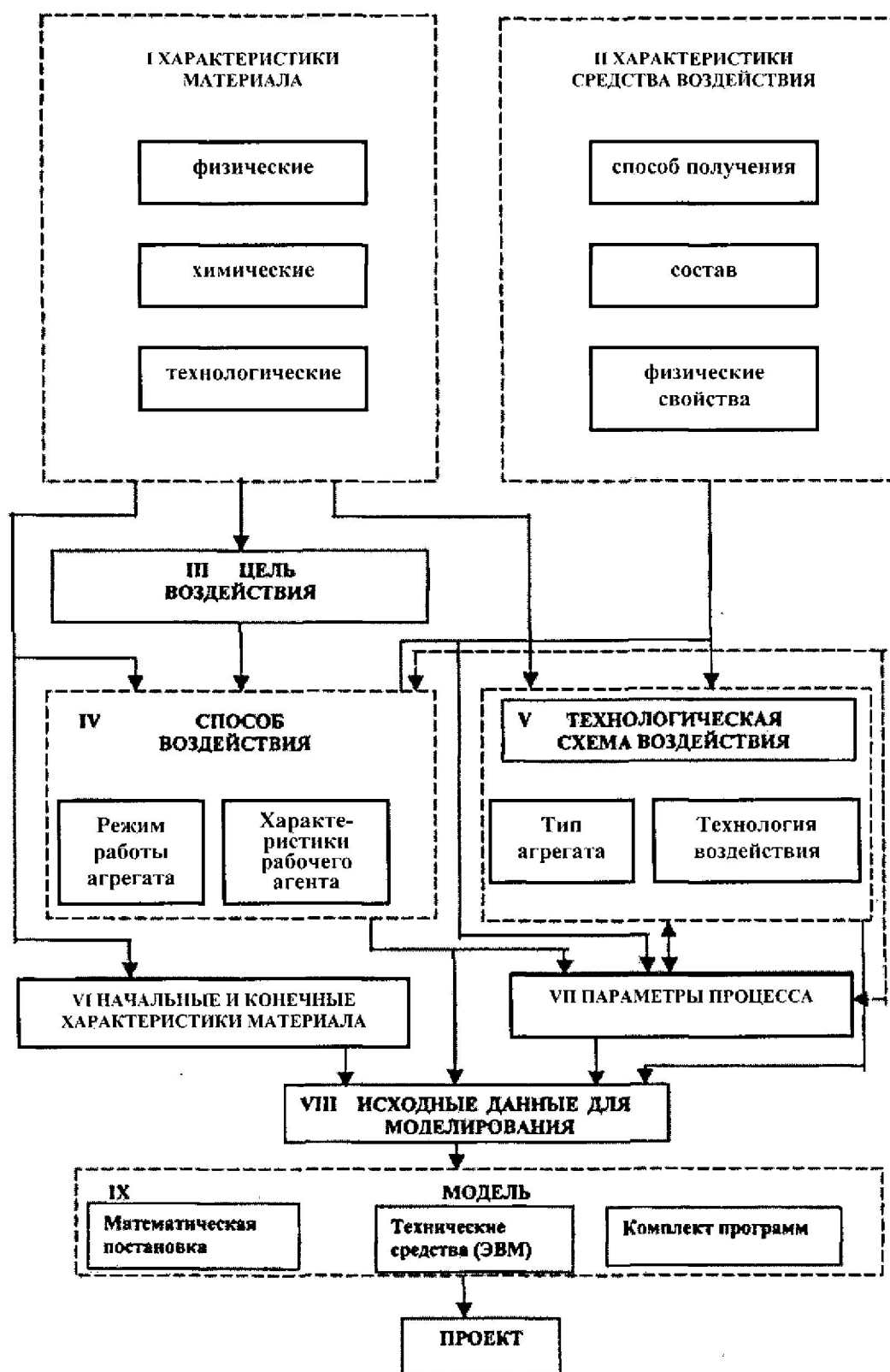


Рис. 4.3 Функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования технологических схем

Блок 3 – основной расчетный блок. Здесь выполняется численная реализация всех математических моделей, включаемых в

предметную область САПр. На данном этапе это математические модели распределения температуры материала в камере сушки, скорости частиц и концентрации обрабатываемого материала.

Как результат работы блока получаются значения указанных параметров и вычисляются все другие величины, характеризующие показатели работы установки.

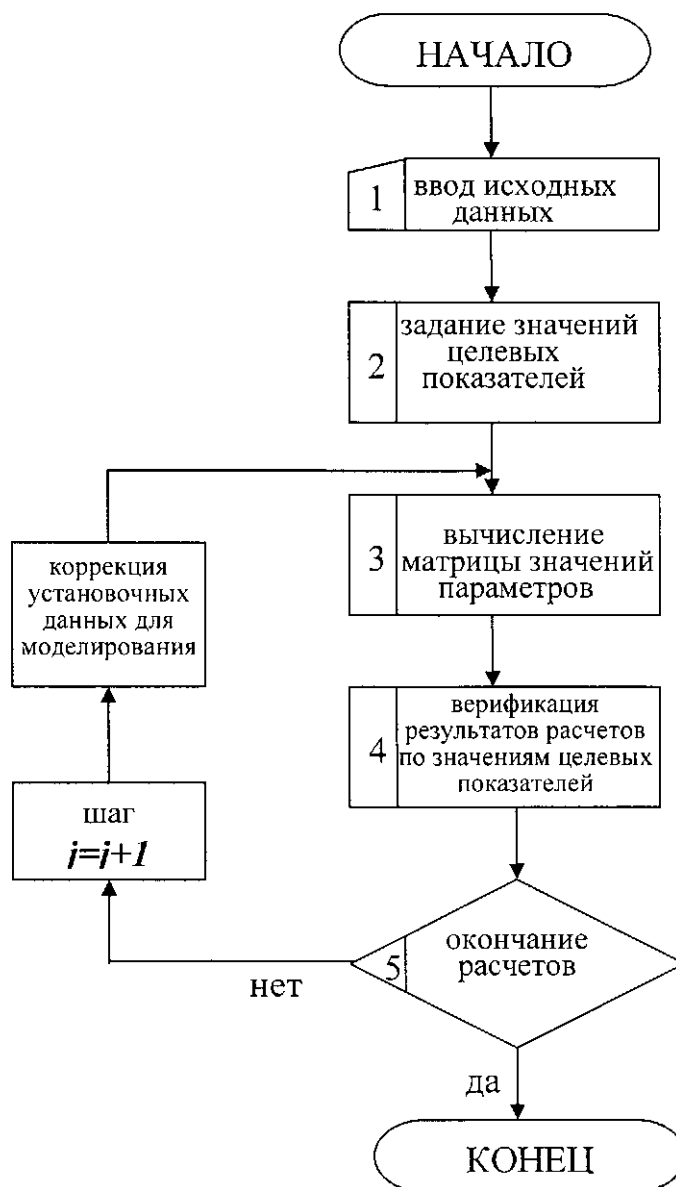


Рис. 4.4 Блок-схема алгоритма головной программы

В блоке 4 выполняется верификация расчетных значений параметров по заданным значениям показателей, определяющих требования к конечному продукту. Верификация может быть построена как по принципу «консесуса», когда отклонение хотя бы одного параметра вызывает необходимость коррекции исходных

данных и повторения моделирования, так и по интегральному принципу с использованием, например, метода наименьших квадратов.

Основным преимуществом системы автоматизированного проектирования является то, что с ее помощью удастся получить достаточно полную информацию о различных вариантах проекта, при этом избежать массы рутинных операций и необходимости проведения значительного количества дорогостоящих экспериментов.

4.3.2 Методические рекомендации по применению теоретических разработок для приближенных расчетов параметров сушки

Рассмотрим один из вариантов упрощенного подхода к расчету параметров сушки.

Рекомендации предназначены для работников служб и подразделений угольных предприятий, выполняющих работы по проектированию и эксплуатации технологических схем и оборудования, которое применяется в целях предварительного извлечения влаги из мелкофракционной угольной массы, предназначенной к дальнейшему использованию, в частности, продаже.

Аппроксимация расчетных соотношений основывается на линеаризации и максимальном упрощении уравнений, описывающих процесс.

Общий подход описан в подразделе 2.2.2 и основывается на введении в рассмотрение масштабирующих (обычно максимальных) значений параметров. Линеаризовав уравнения и построив замкнутую систему масштабирующих соотношений, можно перейти к работе с упрощенными соотношениями.

В частности, если рассмотреть уравнение распределения температуры (2.7) и ввести «характерные» значения показателей, получим формулу для инженерного расчета температуры в текущих точках $T(s)$:

$$T(s) = \frac{\overline{\omega c \rho}}{k} \exp[(\omega c \rho - \alpha) \cdot s] ;$$

здесь: ω – скорость поступающего газа, м/с;
 c – удельная теплоемкость среды, дж/(кг*град);

ρ – плотность текущего вещества, кг/м³;
 k – коэффициент теплопроводности среды,

Вт/(м*град);

α – коэффициент теплообмена, Вт/(м*град);

$\bar{\omega}, \bar{c}, \bar{\rho}, \bar{k}$ – заданные «характерные» (как правило, максимальные) значения соответствующих величин;

ω, c, ρ, α – текущие значения соответствующих параметров, выбираемые при проектировании;

s – линейная координата точки.

Аналогично получаются выражения для других параметров – скорости частиц и концентрации вещества.

По заказу ГП «Дзержинскуголь» разработан нормативный документ: «Регламентные требования к проектированию и расчёту параметров технологии обезвоживания мелкофракционной угольной массы с использованием «кипящего слоя», в котором приведены методики приближенных инженерных расчетов.

Предложенные выкладки являются первой попыткой аппроксимации основных теоретических зависимостей для упрощения процесса проектирования технологической схемы обезвоживания влажной мелкофракционной угольной массы в «кипящем слое». Ввиду сложности физических процессов, происходящих при сушке, их описание основывается на нелинейных уравнениях математической физики, которые не решаются аналитически.

Экономическую оценку проектов установок «кипящего слоя» предлагается осуществлять по упрощенной методике.

Годовая экономическая эффективность от внедрения установки определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{год.}} = (C_1 - C_2) \times V - E \times (K_2 - K_1),$$

где $\mathcal{E}_{\text{год.}}$ – годового экономического эффект, руб;

C_1 и C_2 – себестоимость продукции до и после внедрения установки, руб.;

K_2 и K_1 – капитальные затраты до и после внедрения установки, руб.;

V – годовой объем производства после внедрения установки, т;

E – нормативный отраслевой коэффициент экономической эффективности.

Срок окупаемости капитальных вложений определяется по формуле:

$$T = \frac{K_2 - K_1}{(C_1 - C_2) \times B}, \text{ лет.}$$

Дальнейшей перспективой развития теоретических методов расчета и обоснования параметров процесса сушки в «кипящем слое» является создание компьютерной системы автоматизированного проектирования, основанной на комплексной математической модели, представляющей полный набор уравнений термодинамических и физико-механических процессов.

Результаты экспериментальных исследований можно обобщить следующим образом:

- проведены экспериментальные и сравнительные исследования параметров процесса сушки влажного сыпучего материала в кипящем слое на математических моделях и в натуральных условиях; установлено, что математические модели детерминированного типа, основанные на уравнениях математической физики, с достаточной степенью приближения отражают характер процесса и могут быть использованы при исследовании и проектировании технологических схем (расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования не превышает 10,7%).

- рекомендации по применению математических моделей и обоснованию параметров процесса сушки угля в «кипящем слое» использованы при модернизации сушильного оборудования в условиях предприятия ЧАО «Яновское», в результате определены параметры проекта и показана целесообразность модернизации: расчетный срок окупаемости затрат от 22 месяцев до 2 лет, ожидаемый годовой экономический эффект составляет 30460 грн.

- предложена функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования технологических схем процесса сушки сыпучих материалов.

- разработаны рекомендации по применению математических моделей и аппроксимированных инженерных соотношений для проектирования технологических схем сушки в «кипящем слое».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги исследований, результаты которых изложены в части I, можно сделать следующие выводы.

В результате выполненных исследований предложено новое решение актуальной научно-технической задачи, заключающейся в совершенствовании методов и средств для теоретических исследований и обоснования параметров процесса сушки обогащенного минерального сырья в аппаратах «кипящего слоя», обеспечивающих эффективное функционирование технологических схем и повышение качества их проектирования за счет применения математического моделирования, заменяющего дорогостоящие натурные эксперименты.

Основные научные результаты, полученные в работе, можно сформулировать следующим образом.

1. На большинстве предприятий, использующих процесс сушки, применяемые технологии пока не обеспечивают планируемой эффективности, что приводит к повышенному расходу топлива, как собственного, так и привозного, в том числе импортируемых нефтепродуктов и газа.

Результаты проведенных исследований на ряде обогатительных фабрик показывают, что одним из основных сдерживающих факторов при внедрении прогрессивной технологии сушки в «кипящем слое» является несовершенство имеющегося математического аппарата для исследования процесса и расчета параметров технологических схем. Наиболее эффективным современным средством решения данной задачи является метод математического моделирования с применением детерминированных математических моделей, основанных на уравнениях математической физики.

2. Разработана математическая модель распределения температуры в рабочей области аппарата при сушке обогащенного угля и других сыпучих материалов в «кипящем слое», компьютерная реализация которой позволяет рассчитывать распределение температуры в сечении камеры сушилки. Предложенная модель дает возможность исследовать влияние на распределение температуры таких параметров, как плотность газораспределительной решетки, температура поступающих газов, геометрические размеры сушильного аппарата, и обосновывать их

рациональные значения при проектировании технологического оборудования.

3. Разработана математическая модель для исследования поля скоростей частиц обезвоживаемого материала. Численная реализация модели позволяет выполнять расчет поля скоростей частиц высушиваемого материала в рабочем объеме агрегата. Варьируя начальные и граничные условия и рассматривая результаты моделирования распределения скорости совместно с распределением температуры для тех же условий, исследователь получает возможность подбора параметров, наиболее приближенных к оптимальным для заданных технических характеристик исследуемого или проектируемого оборудования

4. Разработана математическая модель для исследования поля концентрации вещества в сечении камеры сушилки, являющейся функцией двух пространственных координат и времени. Коэффициентами уравнения распределения концентрации (управляющими параметрами) являются величины температуры и скорости в соответствующих точках и коэффициента диффузии.

Комплекс указанных величин и определяет результат моделирования, представляющий информацию для принятия окончательных научных выводов или проектных решений при исследовании и модернизации технологии сушки в «кипящем слое».

5. Установлено, что математическое моделирование процесса сушки в «кипящем слое» позволяет получить расширенную информацию об основных технологических характеристиках процесса в виде численных данных о распределении температуры, скорости частиц, концентрации высушиваемой массы по всему сечению аппарата и обосновать параметры технологии (температура сушильного агента 850–900°C, скорость подачи 25–30 м/с для аппаратов с рабочей длиной камеры до 3500 мм), при которых обеспечивается стабильное функционирование оборудования по сушке угля фракций 0÷3,5 мм с производительностью 55–60 т/ч и снижением влажности с 15–18% до 8,5–9%.

6. Получили дальнейшее развитие методы теоретического исследования процесса сушки влажной сыпучей массы, позволяющие обосновать новые пути решения задач проектирования технологического оборудования с применением системы автоматизированного проектирования, а также способы

модернизации действующих сушилок, что позволило рекомендовать усовершенствование технологических характеристик (размер камеры 3500x1000x2500 мм, высота слоя 600 мм, скорость подаваемого агента 30 м/с, температура 850°C), которое обеспечивает повышение экономической эффективности до 15% при производительности 60 т/ч и снижении влажности с 18–20% до 8–8,5%.

7. Разработаны критериальные модели для оперативного прогнозного расчета скорости «кипящего слоя» и потери давления в слое. Модели идентифицированы с применением метода Монте-Карло и рекомендованы к использованию на практике.

8. Разработана функционально-логическая схема системы автоматизированного проектирования технологических схем процесса сушки обогащенного угля и других сыпучих материалов.

9. Разработана методика проектирования технологической схемы обезвоживания в аппаратах «кипящего слоя», основанная на инженерных соотношениях, аппроксимирующих теоретические положения. Методика использована при составлении утвержденного нормативного документа.

10. Проведены сравнительные экспериментальные исследования параметров процесса сушки влажного сыпучего материала в «кипящем слое» на математических моделях и в натуральных условиях. Установлено, что математические модели детерминированного типа, основанные на уравнениях математической физики, с достаточной степенью приближения отражают характер процесса и могут быть использованы при исследовании и проектировании технологических схем (расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования не превышает 10,7%).

11. На основе имитационного эксперимента с использованием математических моделей диффузионно-переносного движения, нагрева и обезвоживания частиц исследованы вероятностные характеристики времени пребывания, температуры и степени обезвоживания материала в псевдооживленном слое. При этом установлено, что математическое ожидание времени пребывания частицы в активной зоне составляет от 11 до 13 мин, что подтверждает как результаты моделирования, так и положение о том, что сушка в «кипящем слое» обеспечивает более длительный контакт материала с

сушильным агентом по сравнению с другими агрегатами, и по этой причине является наиболее эффективной современной технологией обезвоживания.

12. Рекомендации по применению математических моделей и обоснованию параметров использованы при модернизации сушильного оборудования с использованием «кипящего слоя» в условиях ЧАО «Яновское», в результате показана целесообразность модернизации, а именно: расчетный срок окупаемости предполагается от 22 месяцев до 2 лет, ожидаемый годовой экономический эффект составляет 30460 грн.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ЧАСТИ I

1. Ковалко М.П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М.П. Ковалко, С.П.Денисюк. - К: Техніка, 1998.– 726 с.
2. Кравцов В.В. Экономическое использование угля в теплоэнергетике / В.В. Кравцов, А.Г. Махмудов, А.В. Харченко.– Донецк: ДонГТУ, 1999.– 320 с.: илл.
3. Сушилки «кипящего слоя» в США: Обзор / Благов И.С., Филиппов В.А. – М: ЦНИЭИУголь, 1978. – 55с.: илл.
4. Филиппов В.А. Конструкция, расчеты и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья / В.А. Филиппов –[2-е изд., перераб. и доп.] – М.: «Недра», 1989. – 309 с.: илл., табл.
5. Сороковая Н.Н. Моделирование тепло- и массопереноса при обезвоживании пористых тел с целью оптимизации процесса сушки: Дисс. канд. техн. наук: 05.14.06/ ИТТФ НАНУ / Сороковая Н.Н. – К., 2003. – 170с.
6. Махорин К.Е. Сжигание топлива в псевдооживленном слое / К.Е. Махорин, П.А. Хинкис – К.: Наукова думка, 1989. – 204 с.: илл.
7. Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном (кипящем) слое / С.С. Забродский - М.–Л., Гоеэнергоиздат, 1963. – 488 с.: ил.
8. Беляев А.А. Сжигание низкокалорийных сернистых углей в кипящем слое / А.А Беляев – М.: Бюлл. иформ. ЦНИЭИУголь, 1984. – 64 с.
9. Филиппов В.А. Технология сушки и термоаэроклассификации углей / В.А. Филиппов – М: «Недра», 1987.– 286 с.: илл.
10. Филиппов В.А. Техника и технология сушки угля / В.А. Филиппов – М: «Недра», 1975.– 287 с.: илл.
11. С.Г. Дулиенко Динамика конверсии днепровского бурого угля в кипящем слое / С.Г. Дулиенко, А.В. Косячков, Н.В. Чернявский //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2005, - № 5. – С. 3 – 12
12. Павлюк Е.Ю. Переходные процессы в кипящем и циркуляционном кипящем слое: Дисс...канд. техн. наук: 05.14.04 / Павлюк Е.Ю. – Екатеринбург, 2002 – 174 с.

13. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов: Монография / В.Н. Ткаченко – Киев: «Наукова думка», 2008.– 243 с.

14. Забродский С.С. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем (общие вопросы разработки и исходные закономерности) / С.С. Забродский – М., «Энергия», 1971 г. – 328 с.: илл.

15. Тарабаева И.В. Математическое моделирование и исследование параметров процесса сушки увлажненной горной массы в кипящем слое / И.В. Тарабаева, В.Н. Павлыш // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: 9-й Международный научно-практический семинар: Известия ТТИ ЮФУ – ДонНТУ.– Таганрог – Донецк, 2008.– Т.1. - С. 124 – 131.

16. Бородуля В.А. Математические модели химических реакторов с кипящим слоем / В.А. Бородуля, Ю.П. Гупало –Минск: «Наука и техника», 1976.– 208 с.: илл.

17. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман; пер. с англ. – М.: Мир, 1984.– 541 с.: илл.

18. Псевдооживление / В. Г. Айнштейн, А. П. Баскаков, Б. В. Берг и др. — М.: Химия, 1991. – 400 с.: илл.

19. Бородуля В. А. Сжигание твердого топлива в псевдооживленном слое / В.А. Бородуля, Л. М. Виноградов –Минск: «Наука и техника», 1980.– 192 с.

20. Корчевой Ю.П. Расчет выгорания частиц твердого топлива в кипящем слое с учетом внутрипористого реагирования / Ю.П. Корчевой, В.П. Пацков, В.Б. Редькин, А.Ю. Майстренко // Теплообмен в дисперсных системах: Т. 5.– Минск. АНК "ИТМО им. А.В. Пылова", АНБ,–1992.– С. 168–170.

21. Бубенчиков А.М. Математическое моделирование аэродинамики и теплопереноса в устройствах с циркулирующим кипящим слоем / А.М. Бубенчиков, А.В. Старченко, В.В. Стропус // Теплоэнергетика. - 1995, - № 9. – С. 37–41.

22. Рохман Б.Б. Инженерная методика расчета выгорания твердых топлив в реакторе с циркулирующим кипящим слоем применительно к пилотной установке по технологии фирмы "Лурги" / Б.Б. Рохман, А.А. Шрайбер, Н.В. Чернявский // Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 4. – С. 40 – 47.

23. Тодес О.М. Аппараты с кипящим зернистым слоем / О.М. Тодес, О.Б. Цитович. - Л.: «Мир», 1981. - 192 с.: илл.

24. О результатах разработки аналитических и численных методов оценки макрокинетических характеристик процессов термохимической переработки одиночных топливных частиц в кипящем слое / [Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Пацков В.П. и др.] – Киев:, 1994. – 358 с.

25. Бородуля В.А. Тепломассообмен и кинетика горения твердого топлива в кипящем слое / Бородуля В.А., Пальченко Г.И., Васильев Г.Г., Дрябин В.А., Галерштейн Д.М. // Проблемы тепло- и массообмена в современной технологии сжигания и газификации твердого топлива: материалы международной школы-семинара: – Минск, 1988, Т. 2. – С. 3 – 23.

26. Майстренко А.Ю. Горение и газификация высокозольных углей в кипящем слое: дисс. канд. техн. наук: 05.14.06 / Майстренко А.Ю. – М.,ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, 1991. – 270 с.: илл.

27. И. Девидсон Псевдоожигание. / И. Девидсон, Д. Харрисон; пер. с англ. В. Г. Айнштейна, Э. Н. Гельгерина, В. Л. Новобратского; под ред. проф. Н. И. Гельгерина. – М.: «Химия», 1974. – 376 с.

28. Ейтс Дж. Основы механики псевдоожигания / Дж. Ейтс; пер. с англ. — М.: Мир, 1986. – 288 с.: илл.

29. Филиппов В.А. Устройство, эксплуатация и ремонт оборудования сушильных установок / В.А. Филиппов, Ю.И. Слюсарев – М.: «Недра», 1990. – 191 с.: илл.

30. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов– М.: Наука, 1976. – 498 с.

31. Кафаров В.В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В.В. Кафаров, М.Б. Глебов– М.: «Высшая школа», 1991.– 399 с.: илл.

32. Попырин Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / Л. С. Попырин - М.: Энергия, 1978.- 278 с.

33. Кузнецова Н.С. Сушка сыпучих материалов в псевдоожиганном слое с переменным полем температур и скоростей / Н.С. Кузнецова, Г.Л. Грошев, А.Н. Лабутин // – Химическая промышленность - вып. 6, 1979. – 42с.

34. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков – М: «Высшая школа», 1950.– 417 с.
35. Лыков А.В. Сушка в химической промышленности / А.В. Лыков – М: Химия, 1970. – 432 с.: илл.
36. Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В., Палкин С.В. Тепломассообмен: Монография / – Донецк: «Норд-Пресс», 2006.– 298 с.
37. Календерьян В.А. Температурное поле в сушке с движущимся плотным слоем при комбинированном подводе тепла / В.А. Календерьян, В.В. Корнараки // – Химическая промышленность - вып. 6, 1979. – 55 с.
38. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер – М: «Мир», 1975.– 648 с.: илл.
39. Каханович В. С. Измерение расхода вещества при переменных параметрах / В. С. Каханович – М.: «Энергия», 1970. - 188 с.
40. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: в 2-х т: – Киев: «Наукова думка», 2003. Т.1/ Ю.М. Мацевитый. - 406 с. Т.2/ Ю.М. Мацевитый. - 392 с.
41. Самарский А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабишевич – М.: Эдиториал УРСС, 2004.– 480 с.: илл.
42. Рубин Ю.М. Сушка угля в кипящем слое с топкой на твердом топливе на ЦОФ «Колосниковская» / Ю.М Рубин, Ю.А Марголин, П.А. Белоцерковский // Обогащение и переработка углей: научно-технический реферативный сборник № 3 (186).– М., 1977.– С. 4 – 6.
43. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / [Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г.] – М.: «Наука», 1983.– 198 с.: илл.
44. Albertos P.P. Sala Piqueras. Iterative Identification and Control. Advances in Theory and Applications.– Springer-Verlag, Berlin, 2002.– 309 с.
45. Litvinchev I.S. Investigation of multi-dimensional problems in the control of heat transfer//Mathematical modeling and computational experiment. J.Wiley: New York, 2, v. 1, 1993.– p. 119 – 129.
46. Mayne D.Q., Rawlings J.B., Rao C.V., Sokaert P.O.M. Constrained model predictive control: Stability and optimality. Automatica, 36, 2000, p. 789 –814.

47. Qin S.J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology// Control engineering practice 11 (2003), p. 733 – 764.

48. Tkachenko V.N. Research of the probabilistic characteristics of a response time and temperatures of particles in fluidized bed on the basis of computing experiment // Book of abstracts of 9-th conference of the European consortium for mathematics in industry. Copenhagen: Technical university of Denmark, 1996, p. 642 – 643.

49. Справочник по обогащению углей. / И.С. Благов, А.Н. Коткин, Н.А. Самылин; под ред. И.С. Благова – М.: «Недра», 1974.– 488 с.: илл.

50. Руководство по проектированию угольных шахт. Государственный нормативный акт об охране труда. – Киев. 1994. – 311 с.: илл.

51. Долгий В.Я. Показатели качества углей, добытых на шахтах Украины / В.Я. Долгий, А.А. Кривченко А.А., М.Д. Шамало, В.А. Долгая В.А. // Уголь Украины. - 1999. – №3.– С. 18 – 22.

52. Майстренко А.Ю. Кинетика взаимодействия коксов энергетических углей с газами-реагентами CO₂ и O₂ в кипящем слое под давлением / А.Ю. Майстренко // Экотехнологии и ресурсосбережение. - 1997. - № 2. – С. 3–9.

53. Гавриленко Б.В. Повышение эффективности работы шахтных котельных установок с топками кипящего слоя / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Известия горного института, вып. 2. – Донецк, 2000. – С. 104 – 107.

54. Мунц В.А. Топка с кипящим слоем как объект регулирования / В.А. Мунц, Н.Ф. Филипповский, А.П. Баскаков // Теплоэнергетика. - 1998. - №6, .– С. 19 – 23.

55. Гарковенко Є.Є. Обґрунтування параметрів процесів зневоднення кеку тонких вугільних шламів: дисс. ...канд. техн. наук: 05.15.11. / Гарковенко Є.Є. – Днепропетровск, 2001.– 146 с.

56. Погорелов О.А. Математические модели флотации и алгоритмы оптимального управления процессом: дисс. ...докт. техн. наук: 05.13.07. / Погорелов О.А. – Донецк, 2011. – 298 с.

57. Радованович М. Сжигание топлива в псевдоожиженном слое / М. Радованович. – М.: Энергоатомиздат, 1990 – 248 с.: илл.

58. Крылов В.И. Вычислительные методы / В.И. Крылов, В.В. Бобков, Н.М. Монастырный. – М: Наука, 1976. – 671 с.

59. Проектирование, монтаж и эксплуатация тепломассообменных установок: учеб. пособие [для студ. высш. учеб. зав.] / А. М. Бакластов, В. А. Горбенко, П. Г. Удыма; под ред. А. М. Бакластова.— М.: Энергоиздат, 1981.—336 с.: илл.

60. Walter E., Pronzato I. Identification of parametric models from experimental data. London; Berlin; New York: Springer-Verlag, 1997.— 331 p.

61. Парахин Н.Ф., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Сжигание и термическая обработка топлива: учебное пособие: [для студ. высш. учеб. зав.] / Парахин Н.Ф., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. — Донецк: РИА ДонГТУ, 1999.— 268 с.

62. Тарабаева И.В. Математическое моделирование процесса обезвоживания увлажненной горной массы. / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Физико-технические проблемы горного производства: сборник научных трудов.— вып. 12.— Кинетика и термодинамика физических процессов в горном массиве.— Донецк, 2009.— С. 103–107.

63. Wang H., Li G., Lei Y., Shao Y., Dai Q., Wang J. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature. // The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ) International, vol. 45 (2005), No 9, pp. 1291–1296.

64. Федоров И.М. Теория и расчет процесса сушки во взвешенном состоянии. / И.М. Федоров; под ред. проф. Михайлова В.М. — Л.: ГЭИ, 1955.— 175 с.: илл.

65. Гавриленко Б.В. Математическая модель топки кипящего слоя шахтного автономного воздухоподогревателя в нестационарных условиях / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Проблеми експлуатації обладнання шахтних установок. Донецьк, 2005. — С. 297 – 304.

66. Котлы и топки с кипящим слоем./ [А.П. Баскаков, В.В. Мацнев, И.В. Распопов и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1995.— 352 с.: илл.

67. Тарабаева И.В. Расчет параметров машин, осуществляющих сушку в «кипящем слое». / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Международный сборник научных трудов: «Прогрессивные технологии и системы машиностроения».— Донецк, 2005. - Вып. 30— С. 176 – 181.

68. Тарабаева И.В. Математическое моделирование процесса сушки при переработке углей. / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Гірничо-електромеханічна» / Донец. нац. техн. ун-т.– Донецьк, ДонНТУ, 2005. -Вип.94.– С. 165 – 171.

69. Топал О.И. Кинетика и динамика выгорания высокозольного энергетического угля в кипящем пласте под давлением: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / Топал О.И.; НАН Украины, ін-т газа. – К., 2000. – 19 с.

70. Гавриленко Б.В. Моделирование процесса сжигания твердого топлива в кипящем слое в нестационарных условиях / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів: збірник наукових праць за матеріалами V міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів і студентів, 16–19 травня 2005 р. / Донец. нац. техн. ун-т.– Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 29 – 32.

71. Тарабаева И.В. Математическое моделирование динамических характеристик процесса сушки обогащенных углей. / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Вісник Криворізького державного технічного університету/ Криворізький держ. техн.. ун – т.–Кривий Ріг, 2006. – Вип.. 14.– С. 170 – 174.

72. Baron R. E., Hodges J. L., Sarofim A. F. Mathematical model for predicting efficiency of fluidized bed steam generators // AIChE Symp. Ser.-1978.-74, N 176.—P. 120—125.

73. Тарабаева И.В. Расчет параметров процесса сушки обогащенной горной массы на основе критериальных моделей / И.В. Тарабаева // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Гірничо-електромеханічна» / Донец. нац. техн. ун-т.– Донецьк, ДонНТУ, 2006.– Вип.104.– С. 206–210.

74. Тарабаева И.В. Исследование процесса распределения вещества в рабочем пространстве сушильного аппарата методом математического моделирования / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Международный сборник научных трудов: «Прогрессивные технологии и системы машиностроения».– Донецк, 2006. - Вып. 32.–С. 182–185.

75. Гавриленко Б.В., Неежмаков СВ. Критерии управления тепловой производительностью котлоагрегата с топкой кипящего слоя при рециркуляции дымовых газов / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // материалы международной молодежной научной

конференции «Севергеозкотех-2004», (Ухта, 17–19 марта 2004 г.) / Ухтинский гос. техн. ун-т. – Ухта: УГТУ, 2004.– С. 83 – 84.

76. Тарабаева И.В. Математическое моделирование и расчет параметров технологического процесса обезвоживания влажной сыпучей массы в «кипящем слое» / В.Н. Павлыш, И.В. Тарабаева // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров: сборник трудов IV Международной научно-методической конференции, (г. Хаммаммет (Тунис), 28 октября – 6 ноября 2010 г.)– Донецк: ДонНТУ, 2010.– С. 215 – 218.

77. Симонов Н.Ф. О подготовке угольной шихты к коксованию на основе избирательного измельчения с пневматической сепарацией в кипящем слое / Н.Ф. Симонов, С.П. Федак // «Кокс и химия». - 2004. - № 7.– С 12 – 18.

78. Гавриленко Б.В., Совершенствование системы автоматизированного управления топкой низкотемпературного кипящего слоя / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Гірничо-електромеханічна» / Донец. нац. техн. ун-т.– Донецьк, ДонНТУ, 2006.– Вип.104.–С.36-41.

79. Джонсон Н., Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н.Джонсон, Ф. Лион - М.: Финансы и статистика, 1980. - 603 с.: илл.

80. Ротач В.Я. Теория автоматического управления тепло-энергетическими процессами: учебник для вузов / В.Я. Ротач – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с, ил.

81. Латышев В.П. Технология производства горючих газов из бурых углей в газогенераторе кипящего слоя / В.П. Латышев В.П., С.В. Мельник // Вести ИрГТУ. - 2004. - № 3.– С. 115 – 117.

82. Неежмаков СВ. Динамические характеристики средств контроля температуры кипящего слоя / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів: збірник наукових праць за матеріалами IV міжнар. наук.-техн. конф. аспірантів і студентів, 11–14 травня 2004 р. / Донец. нац. техн. ун-т.– Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 402 – 405.

83. Киричков В.Н., Сильвестров А.Н. Построение адаптивных моделей динамических объектов по данным эксперимента / В.Н. Киричков, А.Н. Сильвестров А.Н. - К.: Вища школа, 1985. – 68 с.

84. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2003.– 608 с: илл.

85. Дьяконов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем: специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов – СПб.: Питер, 2002. – 448 с: илл.
86. Долинский А.А. Оптимизация процессов распылительной сушки / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий – Киев: Наукова думка, 1984.- 240 с.
87. Ануфриев И.Е. Самоучитель MATLAB 5.3/б.х. / И.Е. Ануфриев - СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 736 с: илл.
88. Бэк Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности / Дж. Бэк, Б. Блэкуэлл, Ч. Сент-Клэр мл. – М.: Мир, 1989.– 310 с: илл.
89. Вабишевич П.Н. Численные методы решения задач со свободной границей / П.Н. Вабишевич – Изд. Московского университета, 1987.– 164 с.
90. Певзнер Л.Д. Теория систем управления / Л.Д. Певзнер - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2002. - 472 с.
91. Батицкий В.А. Автоматизация производственных процессов и АСУ ТП в горной промышленности / В.А. Батицкий, В.И. Куроедов, А.А. Рыжков —[2-е изд., перераб. и доп.]—М.: Недра, 1991.— 303 с: илл.
92. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / М. Сингх, А. Титли; пер. с англ. А. В. Запорожца. - М.: Машиностроение, 1986.– 496 с.
93. Демченко В.Ф. Сравнительный анализ разностных схем для уравнения конвективной диффузии / В.Ф. Демченко, С.А. Вакуленко: В кн. «Процессы тепло- и массопереноса вязкой жидкости»— Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.— С. 91 – 104.
94. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем / А.Г. Александров - М.: Машиностроение, 1986.– 272 с, ил.
95. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / И.П. Мухленов, Б.С. Сажин, В.Ф. Фролов; под ред. И.П. Мухленова - Л.: Химия, 1986. - 352 с.
96. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель – М.: Наука, 1969.– 576 с.
97. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В.М. Кунцевич – Киев: Наукова думка, 2006.– 267 с: илл.

98. Гавриленко Б.В. Получение параметров кипящего слоя при регулировании тепловой производительности топки / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Гірничо-електромеханічна» / Донец. нац. техн. ун-т.– Донецьк, ДонНТУ, 2001. - С. 106 - 108.

99. Гавриленко Б.В. Регулирование тепловой производительности котлоагрегата с топкой кипящего слоя в условиях рециркуляции дымовых газов / Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // матеріали Міжнародної конференції з управління «Автоматика 2002», (Донецьк, 16-20 вересня 2002 р.). - Донецьк, 2002. - Т 1. - С. 190.

100. Ткаченко В.Н. Планирование теплофизического эксперимента по нагреву массивных тел в технологическом потоке / В.Н. Ткаченко // Электронное моделирование. - 1997. – Т. 1.– с. 64 – 70.

101. Ткаченко В.Н. Численный анализ вероятностных характеристик температурных процессов обработки материала в псевдооживленном слое / В.Н. Ткаченко // Инженерно-физический журнал. - 1997, - Т. 70.– С. 924 –929.

102. Ткаченко В.Н. Моделирование тепловых процессов в автоматизированных системах обработки информации / В.Н. Ткаченко // Вісник Донецького національного університету, серія А: Природничі науки. – 2002. - № 2.– С. 379 – 383.

103. Ткаченко В.Н. Параметрическая идентификация нелинейных систем в условиях бифуркации / В.Н. Ткаченко, А.В. Ткаченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Обчислювальна техніка і автоматика» / Донец. нац. техн. ун-т.– Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія «Гірничо-електромеханічна» / Донец. нац. техн. ун-т.– 2004. .– вып. 74. .– С. 25 – 31.

104. Руденко К.Г. Обезвоживание и пылеулавливание / К.Г. Руденко, М.М. Шемаханов – М.: Недра, 1981.–350 с: илл.

105. Хаджиогло А.В. Сушка угля в кипящем слое / А.В. Хаджиогло, А.М. Степаненко – «Металлургия», 1971.– 208 с: илл.

106. Чуянов Г.Г. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды / Г.Г. Чуянов – М.: Недра, 1987.– 260 с : илл.

ЧАСТЬ II

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ

Раздел 1. Исследование технологических схем механического обезвоживания осадков шламовой крупности и методов расчета их параметров

1.1 Общая постановка задачи модификации параметров процесса механического обезвоживания шламовых осадков.

Повышение эффективности обезвоживания осадков шламовой крупности достигается за счет увеличения скорости удаления жидкости, снижения конечной влажности материала и производственных площадей, занимаемых оборудованием, на котором выполняется обезвоживание, повышения производительности аппаратов, уменьшения их стоимости и в целом затрат на процесс [1]. Многими исследованиями, которые проводились ранее и продолжают выполняться и в настоящее время, установлены направления совершенствования механического обезвоживания путем добавления к пульпе поверхностно-активных веществ, прогрева осадка паром, продувания сжатым воздухом, добавкой специальных присадок, механического воздействия на осадок и другими методами [2-7].

Проблемы, возникающие при обезвоживании осадков шламовой крупности, остаются актуальными и в настоящее время, особенно в условиях рыночных отношений, когда предприятия стремятся снизить затраты на передел сырья и выпускать продукты, соответствующие требованиям потребителей не только по содержанию горючей массы, но и по влажности. При этом механические методы обезвоживания являются наиболее низкозатратными и достаточно эффективными [7].

Обезвоживание шламовых продуктов обогащения выполняется в две стадии – механическими и термическими (для концентратов) методами. Для этого чаще всего используют фильтрование под действием разницы давлений и сушку. Последний процесс среди всей технологии углеобогащения является наиболее дорогостоящим и экологически небезопасным. В

связи с этим отечественные и зарубежные исследования направлены на повышение эффективности механических методов обезвоживания, в ходе которых установлены зависимости скорости удаления влаги от свойств поровой структуры осадков, являющиеся основой теории фильтрации.

При этом существуют проблемы, связанные со строением поровой среды осадков, так как исследование ее представляет собой сложную задачу. Наибольшие трудности возникают при обезвоживании шламовых осадков, имеющих высокоразвитую поверхность частиц, и обусловленные наличием капиллярных явлений, а также особыми свойствами жидкости в тонких каналах.

Исследование структуры осадков на микроуровне позволяет более глубоко понимать сложные явления, протекающие в этой среде, и на этой базе совершенствовать технологию обезвоживания.

Таким образом, исследование и оптимизация параметров, влияющих на повышение скорости фильтрации, является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит снизить влажность товарных продуктов углеобогащения. Важное место в комплексе средств решения данной задачи занимает метод математического моделирования.

Для обоснования модифицированных параметров процесса в работе поставлены и решены следующие основные задачи:

- исследование процессов, происходящих в порах осадков на микроуровне;
- моделирование изменения поровой структуры осадков при приложении сдвига с различной скоростью;
- разработка рекомендаций по повышению эффективности обезвоживания при механическом воздействии на осадок;
- разработка методики оценки фильтруемости осадков;
- проведение промышленных испытаний для верификации и внедрения результатов разработок.

1.2 Анализ результатов исследований фильтрования осадков шламовой крупности

Большинство экспериментаторов применяют классические подходы, уподобляя процесс обезвоживания фильтрации в грунтах. Так, в работах [8-12] рассматривается обезвоживание тонких осадков фильтрованием в фильтр-прессах. В качестве

теоретической базы принято известное и широко используемое дифференциальное уравнение Сперри-Кармана:

$$dV / dt = \Delta P / \mu(r_{oc}\alpha V + R_{\phi}), \quad (1.1)$$

где V - объем фильтрата, снимаемый с единицы площади фильтровальной поверхности;

t - время фильтрования;

ΔP – перепад давления по обе стороны фильтрующей перегородки;

μ – динамическая вязкость жидкости;

r_{oc} - удельное сопротивление слоя осадка единичной толщины;

α - удельный объем осадка;

R_{ϕ} - сопротивление фильтрующей перегородки.

Автор отмечает, однако, что пористая перегородка делает процесс фильтрации отличным от процесса естественного фильтрования, как это происходит в грунтах. Далее рассматривается основное уравнение фильтрования для несжимаемых и сжимаемых осадков и определяется максимальное давление, при котором можно пренебречь сопротивлением фильтровальной ткани. В приведенных работах указывается на эффективность применения ленточных фильтр-прессов, но отличия работы этого оборудования от камерных прессов не рассматриваются. Следует подчеркнуть, что в таких аппаратах применено приложение сдвиговых деформаций к осадку.

Этим же автором [8] отмечается неудовлетворительная согласованность капиллярной модели течения ньютоновской жидкости через пористую среду, представленную как серию цилиндрических капилляров одинакового размера, с результатами практики. Поэтому предлагается использовать синусоидальную модель пористой среды, когда каждая пора представляется как канал с чередующимися сужениями и расширениями аналогично четочным капиллярам, и параметры ее описываются уравнением:

$$S = S_{min} (1 + b \sin x) / (1 - b) . \quad (1.2)$$

Здесь S – сужение или расширение поры,

b – параметр поры,

x – расстояние от оси поры.

Параметр b может быть определен из зависимости:

$$b = (S_{max} - S_{min}) / (S_{max} + S_{min}) . \quad (1.3)$$

Исходя из предположения, что максимальный параметр поры должен равняться параметру твердой частицы, определена зависимость для параметра b в виде:

$$b = (S_p - S_{min}) / (S_p + S_{min}) , \quad (1.4)$$

где S_p - параметр твердой частицы.

Из сопоставления полученных зависимостей с законом Пуазейля автор приходит к выводу, что значение параметра Рейнольдса для течения жидкости в различных по структуре пористых средах отличается только величиной константы, которая зависит от пористости среды, извилистости пор и параметра b . Последний связан с параметрами твердой фазы и расширениями и сужениями поры.

Однако, в данном цикле работ не уделяется внимания изменению параметров пористой среды при использовании механического воздействия на осадок, каким может быть применение сдвига для интенсификации процесса удаления влаги из осадка.

Автор работы [13] считает, что в капиллярно-пористом теле растворенные в воде газы могут выделяться внутри пористой среды и снижать ее проницаемость. Поэтому с течением времени проницаемость осадка снижается, и скорость фильтрации не всегда пропорциональна перепаду давлений, как это описывает закон Дарси. В публикации предложена эмпирическая зависимость изменения проницаемости от времени фильтрования и перепада давления. Исследования показали, что при перепаде до 1МПа и времени фильтрования менее 5000с (1час 24мин.) влиянием выделения растворенных газов можно пренебречь. При этом приняты определенные допущения и не рассматриваются более сложные зависимости для сжимаемых осадков.

В работе [14] описана конструкция, принцип действия и результаты экспериментов на осадительно-фильтрующей шнеко-толкающей центрифуге. Приведено уравнение для полного давления, сжимающего осадок в первом периоде центробежной

фильтрации, а также выражение для среднего коэффициента проницаемости сжимаемых осадков, показана зависимость интенсивности уплотнения угольных осадков от фактора разделения. Автор приходит к выводу о том, что частицы обезвоженного осадка связаны между собой поверхностными пленками влаги (силами сцепления), что придает осадку определенную прочность, обуславливает его сопротивление сдвигу за счет внутреннего трения и сцепления между частицами скелета осадка. Полное сопротивление сдвигу составляет сумму сил внутреннего трения и сцепления (липкости), действующих на поверхности сдвига. Деформация сдвига в осадке возникает при перемещении его шнеком центрифуги.

Сцепление возникает из-за капиллярного давления жидкости в осадке, которое прижимает частицы друг к другу и создает механическую связь между ними. На сцепление сильно влияют адсорбционные силы, возникающие внутри тончайших пленок, расположенных у поверхности частиц.

В работе получена зависимость извлечения твердой фазы в осадок нового типа осадительной центрифуги и влажности осадка от содержания класса с размером менее 74 мкм в питании (рис. 1.1).

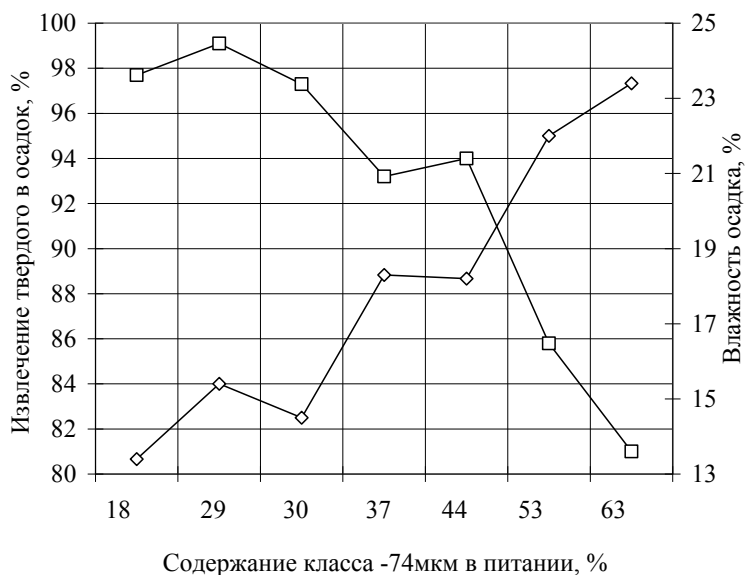


Рис. 1.1. Параметры осадка угольного шлама при различном содержании тонких классов в питании по данным [11]

В этой же работе сделан вывод о замедлении относительного сжатия осадка угольного концентрата при увеличении фактора

разделения в центрифуге выше 200. Следовательно, к осадку необходимо прикладывать другие методы механического воздействия для повышения эффективности его обезвоживания, например сдвиг. Автор предлагает уравнение, с помощью которого можно определять коэффициент сдвига:

$$tg\psi = \tau / \sigma_n = tg\varphi (1 + \sigma_0 / \sigma_n), \quad (1.5)$$

где $tg\psi$ – коэффициент сдвига;
 τ – сдвигающее напряжение;
 σ_n – нормальное напряжение;
 φ – угол трения осадка по стенке ротора;
 σ_0 – липкость осадка.

Вместе с тем в данных работах не учитывается влияние сдвиговых деформаций на скорость обезвоживания осадка.

Цикл работ [15, 16] направлен на определение зависимости кинетики фильтрования от толщины и свойств гидратных пленок на поверхности тонких гидрофильных и гидрофобных частиц. Используя уравнение Кармана и закон Дарси, автор путем определения снижения проницаемости осадка в ходе фильтрации воды оценивает на этой базе изменение толщины гидратной пленки. Это позволило прийти к выводу о возможном структурировании диполей воды на значительном расстоянии от поверхности твердых частиц, благодаря наличию противоионов в гидратном слое. Толщина гидратной пленки может изменяться при введении в раствор различных ионов. Гидрофобный тонкодисперсный антрацит более резко снижал проницаемость, чем гидрофильный дистен. Автор предполагает, что толщина гидратной оболочки на поверхности гидрофобных частиц обусловлена структурированием воды из-за наличия водородных связей между молекулами воды.

Авторы публикаций [17-20] исследовали удаление влаги из мела прессованием, результатом чего явились экспериментальные кривые зависимости влажности мела от давления. Сделан вывод о том, что количество, диаметр и расположение отверстий для отвода влаги в днище камеры прессования не влияет на кинетику обезвоживания и конечную влажность при соблюдении их суммарной площади. Повышение давления более 5-6 МПа мало

влияет на влажность осадка, но приводит к повышению энергоемкости процесса.

В работе [19] рассматривается уравнение диффузии влаги в трубке постоянного сечения, заполненной пористой средой.

$$\partial C/\partial t = I(x, t) + (D/c) (\partial^2 C/\partial x^2) . \quad (1.6)$$

Здесь C – влажность материала;

t – время;

$I(x, t)$ – функция поглотителей влаги внутри трубки в сечении x в момент времени t ;

D – коэффициент диффузии;

c – коэффициент пористости.

При решении данного уравнения авторы приняли допущение о постоянном значении коэффициента диффузии D и концентрации влаги C в любом сечении трубки в начальный момент.

Однако, такие допущения справедливы только для узкого диапазона изменения параметров обезвоживания и отдельных частных случаев. Кроме того, делается вывод о том, что удаление влаги происходит в основном за счет прессования осадка мела при нагружении и частично от диффузии влаги, хотя оба эти процесса взаимосвязаны – нагружение и вызывает отчасти перемещение влаги в канале.

Авторы работ [21-24] отмечают положительное влияние на обезвоживание осадков в осадительных центрифугах типа ОГШ-461Л-01 возможности регулирования соотношения скоростей ротора и шнека. При этом увеличение скорости вращения шнека при обезвоживании высокозольного шлама (отходы обогащения углей марки К) способствовало повышению производительности машины на 30% и мало влияло на влажность осадка при пониженной скорости вращения осадительного ротора. Для флотоконцентрата скорость вращения ротора должна быть повышенной (примерно на 31%), а скорость вращения шнека пониженной от нормальной, что приводит к снижению влажности осадка на 2-3% за счет увеличения времени пребывания осадка в роторе. Но, видимо, не только время пребывания осадка в роторе сказывается положительно.

Можно предположить, что такой эффект вызван увеличением фактора разделения в 1,7 раза по сравнению с обезвоживанием

шлама и соответственно большим уплотнением осадка флотоконцентрата. Шнек при этом перемещается в 1,3 раза быстрее и вызывает в плотном осадке более быстрый сдвиг. Однако, данное предположение необходимо подтвердить результатами исследований.

В публикациях [25, 26] рассматривается течение жидкости в щели колосникового сита как течение в плоском диффузоре, т.к. высота колосника намного превышает ширину входной щели. Автор делает вывод о значительном влиянии вязкости жидкости на процесс удаления влаги, особенно для тонкоячеистых сит, где каналы для истечения можно уподобить порам в тонкодисперсном осадке. Выполнен анализ уравнений неустановившегося движения вязкой жидкости в канале переменного сечения и установлена аналогия свободных течений в щели с параллельными стенками и в диффузоре с малым углом раствора. Однако, на грохоте имеются динамические воздействия в виде направленных колебаний, что не позволяет использовать данные уравнения для исследования фильтрации при наложении сдвига.

Авторы работ [27-30] рассматривают процесс удаления влаги при обезвоживании как переход зернистой среды из суспензионного состояния в осадок, имеющий более плотное сложение, при котором происходит изменение потенциальной энергии среды. При этом потенциальная энергия суспензии E_c снижается, а потенциальная энергия осадка E_{oc} растет до максимального значения.

Потенциальная энергия суспензии оценивалась по соотношению [32]:

$$E_c = 0.5 h_c V_c / \delta (1 - m_c). \quad (1.7)$$

Соответственно, потенциальная энергия осадка определялась как:

$$E_{oc} = 0.5 h_{oc} V_{oc} / \delta (1 - m_{oc}). \quad (1.8)$$

Здесь h_c , h_{oc} – высота слоя суспензии и осадка, соответственно;

V_c , V_{oc} – объемы суспензии и осадка, соответственно;

δ – плотность твердой фазы осадка;

m_c , m_{oc} – порозность суспензии и осадка, соответственно.

Анализируя полученные зависимости процесса фильтрования осадка с энергетических позиций, авторы приходят к выводу о прямо пропорциональной зависимости энергосодержания суспензии от удельной скорости его нарастания, которая определяется как:

$$A = C_1 / P^{0.6}, \quad (1.9)$$

где C_1 – постоянный коэффициент,

P – гранулометрический параметр [29].

Гранулометрический параметр, от которого зависит скорость процесса, определяется по гранулометрическому составу твердой фазы осадка как отношение среднего диаметра частиц, составляющих скелет осадка, и среднего диаметра частиц заполнителя.

Следует отметить, что авторы используют фундаментальный подход с энергетических позиций к проблеме повышения эффективности механического обезвоживания. Однако, в данных работах не рассматриваются методы воздействия на осадок путем приложения сдвиговых полей и изменение энергетического состояния при этом.

В ранних работах по теории обезвоживания фильтрация рассматривается как процесс, который может быть описан линейным законом при определенном интервале чисел Рейнольдса [32]:

$$w = \Delta P d^2 m^3 / (1-m)^2 144 h \mu . \quad (1.10)$$

Здесь w – скорость фильтрации;

ΔP – перепад давления;

d – размер частиц;

m – пористость;

h – высота пористого слоя;

μ – вязкость жидкости.

В работе указывается, что фильтрование с отклонением от линейного закона фильтрации происходит при превышении числа Рейнольдса более критического. Такое фильтрование характерно для движения жидкости в крупнозернистых пористых средах при крупности частиц более 1мм. В диапазоне значений чисел Рейнольдса $Re = 0.016-5.7$, характерного для исследуемой

крупности осадков, полностью сохраняется линейный закон фильтрации.

В цикле работ [33-35] опубликованы результаты исследования кинетики выделения фильтрата при фильтровании илосодержащих шламов и на этой базе сделаны выводы о возможности применения закона Дарси и обобщенного уравнения фильтрования для зернистых сред, имеющих различную проницаемость, в определенных пределах. Авторы установили значения начального градиента λ и его независимость от перепада давления. Для описания процесса фильтрования предложена экспоненциальная зависимость:

$$h(t) = h_m (1 - e^{-kt}), \quad (1.11)$$

где h_m – толщина осадка,

k, t – параметры процесса фильтрования.

Принятая обобщенная модель учитывает инерционные и вязкостные потери при высокой скорости фильтрования в начальный период времени. При фильтровании труднофильтруемых осадков (при малых скоростях процесса) модель учитывает потери, вызванные начальным градиентом. В ходе преобразований параболического закона фильтрования с целью приведения его к форме, удобной для экспериментального анализа, предложено уравнение, имеющее вид:

$$(\Delta P / h u) - (\lambda / u) = b + a + u. \quad (1.12)$$

Здесь u – мгновенная скорость фильтрования;

b – параметр, пропорциональный вязкости жидкости;

a – коэффициент, учитывающий инерционные потери.

В работе [35] определены параметры обобщенной модели процесса фильтрования, которые хорошо согласуются с данными экспериментов.

Следует отметить, что в перечисленных работах не содержится сведений об изменении параметров процесса при структурных изменениях тонкодисперсных осадков в условиях динамического воздействия на осадок.

В работах последних лет зарубежных авторов [36-39] опубликованы результаты трехмерного моделирования порового

пространства тонкодисперсных угольных осадков с помощью метода Латисса-Больцмана. Авторы показывают применимость этого метода для исследования течения жидкости при фильтрации в порах сложной конфигурации при крупности частиц менее 0,85мм (20 меш).

Публикации [38-42] посвящены исследованию фильтрации тонких угольных концентратов и отходов флотации с помощью фильтр-прессов. Указанные работы содержат технологические параметры регулирования результатов фильтрования при избыточном давлении. Определены зависимости влажности кека от времени и давления фильтрования, содержания твердого в питании, приведено изменение производительности пилотной установки для различных условий.

Автор работы [42] также уделяет внимание технологии обезвоживания с помощью фильтр-прессов, которые используются для фильтрования наиболее тонких и труднофильтруемых осадков, таких как угольные, глинистые и другие.

В работе [43] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по проверке линейного закона фильтрации на зернистых пористых средах и уделено внимание анализу влияния структуры пористой среды на гидродинамику удаления жидкости.

Авторы публикаций [44, 46, 48] рассматривают электрокинетические явления и методы предварительной электрохимической обработки шламового осадка для повышения скорости удаления влаги из осадка при фильтрации. Приведены результаты экспериментальных исследований и зависимости влажности осадка от соотношения угля и воды в питании. Показано, что при увеличении массового количества твердого в пульпе скорость фильтрации снижается при одновременном повышении влажности осадка. Авторы приходят к выводу о сложной зависимости этих параметров от времени электролиза, т.к. на экспериментальных кривых чередуются максимальные и минимальные значения и имеются два пика.

Результаты исследований, приведенные в работах [49-51], посвящены обезвоживанию тонких осадков в центробежном поле с применением нового типа оборудования – гипербарических центрифуг, в которых в дополнение к центробежной фильтрации применяется продувка осадка сжатым воздухом. Такое воздействие

способствует значительному снижению влажности тонких угольных осадков даже при высоком содержании шламов с крупностью менее 44мкм.

Авторы приводят результаты испытаний лабораторной, пилотной и промышленной установки периодического действия, которые представлены нами в графической форме на рис. 1.2 при факторе разделения 1500 для проб А, В, и С с продувкой сжатым воздухом и без нее. Эти пробы отличаются содержанием частиц менее 44мкм, что показано на выноске справа. При увеличении фактора разделения в центрифуге до 2700 может быть достигнуто максимальное снижение влажности осадков, полученных из предварительно сгущенной пульпы (содержание твердого 45-70%) до 6,18, 6,55 и 15,5% для проб А, В и С, соответственно.

Авторы приходят к выводу, что увеличение содержания класса менее 25 мкм в питании до 46% и выше не позволяет получить осадок с влажностью менее 20%.

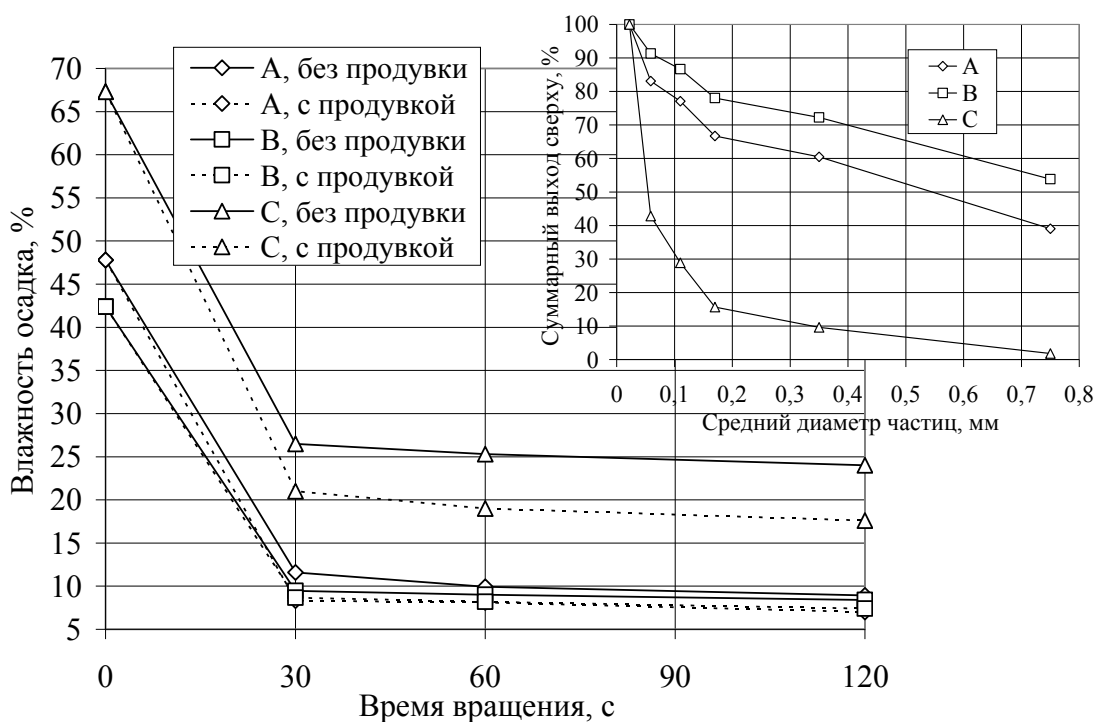


Рис. 1.2. Влажность угольных осадков при различном содержании класса -44мкм в питании по данным [44]

Следует обратить внимание на то, что результаты исследований, представленные в этих источниках, получены при изучении процесса фильтрования на макроуровне, что

недостаточно для полного анализа процессов, происходящих в поровой среде осадков.

В публикации [55] указывается на необходимость исследования интенсивности сжимаемости концентратных угольных осадков для повышения эффективности обезвоживания их фильтрованием. Автор из рассмотрения уравнений для давления, развиваемого жидкостью в центробежном поле, и Сперри-Кармана для скорости фильтрации получает зависимость кинетики фильтрования жидкости в роторе при постоянном сопротивлении:

$$\ln \frac{V_n (2r_p S - V)}{V (2r_p S - V_n)} = \frac{r_p \rho_{жс} n^2 t}{90 \mu R}. \quad (1.13)$$

Здесь V_n – начальный объем продукта в роторе;

r_p – радиус ротора;

S – поверхность фильтрования в роторе;

V – объем продукта, находящегося в роторе в момент времени t ;

$\rho_{жс}$ – плотность жидкой фазы;

n^2 – число оборотов фильтрующего ротора;

μ – вязкость жидкой фазы;

R – сопротивление осадка, равное произведению удельного сопротивления осадка на его толщину.

На основе экспериментальных данных и расчетов по уравнению (1.13) определены зависимости удельного сопротивления осадков углей марок Г и Ж от толщины осадка и содержания класса менее 500мкм при факторе разделения 364. Далее автор вводит понятие интенсивности уплотнения осадка U , которое показывает, на какую величину изменяется пористость осадка за одну секунду (в %), и приводит результаты исследования изменения этого параметра для угольных осадков различного вещественного состава (рис. 1.3).

Исследования позволили прийти к выводу о незначительном влиянии фактора разделения на уплотнение осадков флотационных концентратов и отходов в исследованном диапазоне изменения (от 157 до 364). Более важным параметром является в данном случае вещественный состав осадков, который определяет смачиваемость поверхности частиц и их способность удерживать воду в порах осадка.

Для осадков, сформированных из флотационного концентрата, время уплотнения значительно меньше, чем для осадков отходов флотации.

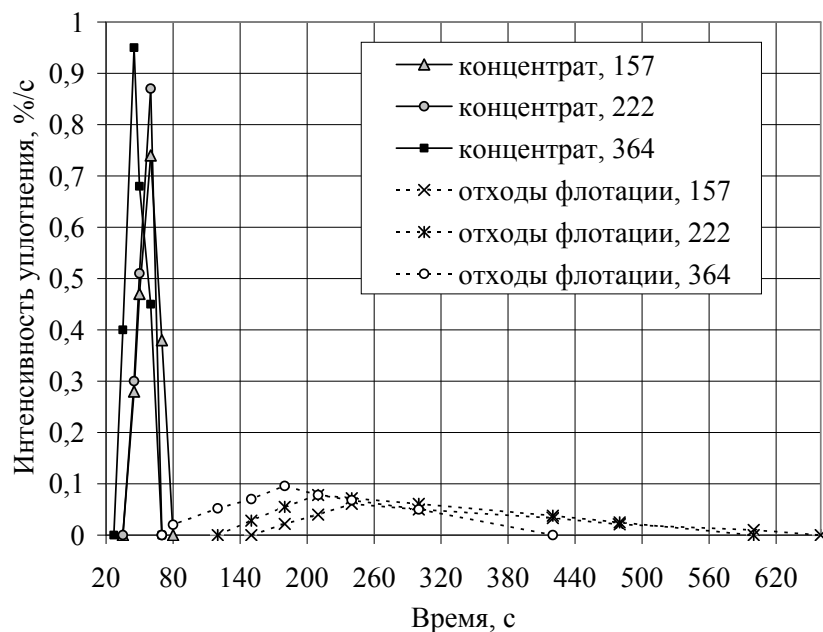


Рис. 1.3. Интенсивность уплотнения угольных осадков в зависимости от вещественного состава и фактора разделения по данным [45]

Следует подчеркнуть, что данные оригинальные исследования вызвали ряд противоречий, к которым относятся следующие. С одной стороны уплотнение осадка в роторе под действием центробежного поля приводит к «выдавливанию» жидкости из порового пространства и повышению степени обезвоживания, а с другой стороны увеличивает сопротивление осадка перемещению жидкости за счет снижения его пористости.

В таком случае положительным эффектом может быть приложение сдвига к осадку при перемещении его шнеком по поверхности ротора. Однако, этот вопрос в данных исследованиях не рассматривался.

В работе [56] отмечается, что изменение структурно-механических свойств исходной суспензии происходит в результате выделения из нее воды. Авторы относят к основным реологическим свойствам суспензии вязкость, упругость и пластичность. Упругие свойства суспензии связываются с присутствием в ней растворенных воздушных пузырьков. Слой осадка рассматривается как вязкопластический, так как воздух удаляется при обезвоживании.

При этом в высококонцентрированной суспензии возникает пространственная структура, оказывающая определенное сопротивление сдвигу. Деформации вязкопластического материала вызывают напряжения, определяемые по соотношению:

$$\tau = \eta\varepsilon + \tau_c . \quad (1.14)$$

Здесь τ – касательные напряжения в осадке;

η – коэффициент вязкости;

ε – скорость деформации;

τ_c – напряжение сдвига (предел текучести).

Однако, авторы публикации не рассматривают перераспределение напряжений и деформаций в осадке при его механическом обезвоживании.

Цикл работ [57-60] направлен на изучение обезвоживания горной массы. Авторы отмечают, что основным фактором, влияющим на ускорение истечения жидкости из осадка, является не количество поровых каналов, а увеличение их эффективного поперечного сечения. К аналогичным выводам приходит и автор работы [61]. В ходе исследований было установлено, что при увеличении размера отверстия, которым заканчивается пора в осадке и через которое происходит фильтрация, скорость и качество обезвоживания повышаются при прочих равных условиях. К важным показателям отнесены также физико-механические свойства обезвоживаемого материала и условия окружающей среды.

В публикациях [62-68] отмечается, что на выходе из поры могут иметь место тонкие и устойчивые пленки жидкости, состояние которых зависит от гидрофобности или гидрофильности окружающего жидкость материала. В результате аналитических и экспериментальных исследований получен вывод о значительном влиянии колебаний сетки грохота на динамику опускания жидкости в поровом канале. Следует отметить, что при тонком обезвоживающем грохочении в осадке возникают механические напряжения, вызывающие сдвиг частиц друг относительно друга за счет динамического воздействия.

Расчеты показали, что несмачиваемые сетки удерживают более толстые слои жидкости. На смачиваемой сетке жидкость может переходить в пленки под сеткой при слиянии двух менисков.

Кроме того, в капилляре поры могут находиться более тонкие частицы, которые также оказывают влияние на скорость удаления воды. Авторы приводят зависимости для условий равновесия тонких частиц в слоях жидкости для различных исходных данных – для слоев жидкости переменной толщины, смачивающих частицу, и для среднего слоя жидкости, не смачивающей частицу. При этом установлена значительная роль менисков жидкости в поровых каналах осадков при обезвоживании, особенно для каналов переменного сечения, в которых возникают гистерезисные явления, как отмечается в работах [65-67]. Модель канала с переменным сечением показана на рис. 1.4 [62].

Получено уравнение перемещения жидкости в канале сложного сечения с мелкопористой сеткой на выходе:

$$\left[r_{ch}^2 \frac{d^2 h}{dr^2} + 2r_{ch} \frac{dr_{ch}}{dh} \left(\frac{dh}{dr} \right)^2 \right] - \int_0^h \frac{dS}{r_c^2} + \frac{gh}{a} T^2 + 8 \frac{\nu T}{a^2} r_{ch}^2 \frac{dh}{d\tau} \cdot \int_0^h \frac{d\xi}{r_{ch}^4} +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{co}^4 - r_{ch}^4}{r_{co}^4} \left(\frac{dh}{dr} \right)^2 - 2 \frac{\sigma T^2}{\rho a^3 r_{ch}} \cdot \frac{\theta}{(1+\theta^2)^{1/2}} = -k \frac{T}{a} \cdot \frac{dh}{dr} - \frac{T^2}{a^2} \cdot \frac{p_a - p_b}{\rho}.$$

(1.15)

Здесь $r = t/T$; $\xi = x/a$; $r_c = R_c/a$; $h = H/a$;

t – время;

T – масштаб времени;

x – координата;

a – линейный масштаб (средний радиус капилляра);

$R_c = a[1 + \varepsilon \sin(2\pi f \xi)]$ – текущий радиус капилляра в точке контакта стенки с мениском;

ε – безразмерная амплитуда;

r_{co} – безразмерный радиус на нижнем срезе канала;

g – ускорение свободного падения;

ν – кинематический коэффициент вязкости;

$\theta = \text{tg}\gamma$; γ – угол сопряжения кривой смачивания с горизонтом.

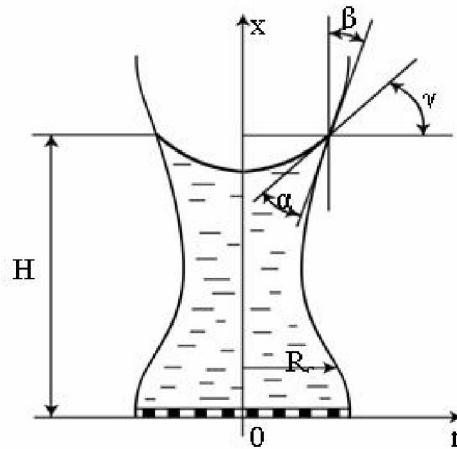


Рис. 1.4. Перемещение мениска жидкости в поровом канале переменного сечения [52]

Из разработанной авторами сложной математической модели движения мениска жидкости в поровом канале, имеющем переменное сечение, что соответствует реальным порам в осадке, следует, что процесс удаления жидкости зависит от волнистости канала, аналогично процессу в четочных капиллярах. В зависимости от этого показателя мениск жидкости может опускаться до самого выхода из поры или задерживаться в поровом пространстве капиллярными силами. Высота слоя жидкости при этом зависит от поверхностного натяжения и угла смачивания.

Несмотря на значительный объем экспериментальных и теоретических исследований данные работы не содержат сведений об исследовании процессов, происходящих на микроуровне, особенно при возникновении сдвиговых деформаций в осадке.

В ряде случаев для повышения эффективности обезвоживания добавляют поверхностно-активные вещества [69-75], прогревают осадок паром (для вакуумного фильтрования) [2, 74-78]. При этом повышается скорость перемещения воды в порах осадка за счет снижения потерь напора на трение, которые определяются из выражения [69]:

$$\Delta h_{тр} = [h_{полн.} - (\Delta h_{вх.} + \Delta h_{скор.})] \Gamma_{\phi}, \quad (1.16)$$

где $\Delta h_{тр}$ – потери напора на трение;

$h_{полн.}$ – полный напор;

Δh_{ex} , $\Delta h_{скор.}$ – потери напора на входе в пору и на создание скорости;

Γ_{ϕ} – фактор гидрофобизации, который определяется как отношение скорости движения воды в капилляре до и после гидрофобизации.

Уравнения скорости движения воды в гидрофобном и гидрофильном капилляре имеют вид:

$$V_{z-фоб} = (d^2 \rho / 32\mu l) \Delta h_k + V_{ск.} - (d^2 f_{тр} V_{ск.} / 32\mu); \quad (1.17)$$

$$V_{z-фил} = d^2 \rho / 32\mu l. \quad (1.18)$$

Здесь $V_{z-фоб}$, $V_{z-фил}$ – скорость движения воды в гидрофобном и гидрофильном капиллярах, соответственно;

d , l – диаметр и длина капилляра, соответственно;

ρ , μ – плотность и вязкость жидкости;

Δh_k – потери напора по длине капилляра;

$V_{ск.}$ – скорость скольжения воды по стенке капилляра;

$f_{тр}$ – коэффициент трения скольжения воды по стенке капилляра.

Автор работы [69] считает, что для оценки гидрофобно-гидрофильного баланса угольной поверхности необходимо определять ее электрохимический и электрокинетический потенциал и учитывать структурные особенности гидратных пленок в поровой среде осадка.

Рядом авторов [77-81] подчеркивается, что при формировании осадка на фильтрующей поверхности происходит его уплотнение, вызывающее перестройку и консолидацию осадка. Однако, этим свойствам осадка не уделено достаточно внимания. Следует отдельно отметить работу [78], в которой автор рассматривает консолидацию и уплотнение осадка у дна сгустителя при его сгущении в сфлукулированном состоянии. В работе приведено экспериментальное уравнение регрессии для плотности уплотненного осадка в зависимости от содержания класса -63мкм, имеющее следующий вид:

$$\rho = 0,013 d + 0,768, \quad (1.19)$$

где d – содержание в осадке класса менее 63мкм.

При всех достоинствах работе, в ней не выполнялись исследования процесса консолидации и изменения таких важных параметров как пористость осадка при действии нормальных нагрузок от его вышележащих слоев и сдвигающих усилий гребков фермы сгустителя.

В публикациях [79-84] приведены результаты исследования процессов обезвоживания тонких угольных и глинистых осадков фильтрованием на ленточных прессах, гипербарфильтрах, мембранных прессах и других типах высокоэффективного оборудования. Современные разработки направлены на повышение скорости удаления влаги путем различного воздействия на осадок механических сил, в качестве одной из которых используются сдвиговые усилия, например, в ленточных прессах. При этом в перечисленных работах не содержится сведений об изменении структуры осадка и его проницаемости в указанных процессах.

В работах [85-87] приведены результаты исследования реологических свойств высококонцентрированных угольных суспензий, содержащих илистые тонкодисперсные шламы. Авторы выполнили оригинальные исследования, которые позволили получить зависимость модуля упругости системы от разжиженности, угловых деформаций от времени, пластических свойств от содержания твердого в такой коллоидной системе как суспензия с высоким содержанием илистых частиц.

В публикациях указывается, что рост сдвиговых напряжений приводит к снижению эффективной вязкости суспензии после достижения предела текучести, при чем снижение происходит скачкообразно. Этот скачок свидетельствует о полном разрушении структуры материала, характеризуется второй стадией течения. На первой стадии течения эффективная вязкость суспензии наибольшая и течение такой суспензии происходит медленно без разрушения структуры. При поддержании роста напряжений сдвига эффективная вязкость падает до минимального значения, и течение суспензии соответствует течению ньютоновской жидкости.

В работе [86] приведены результаты исследования изменения структурно-реологических свойств суспензии в зависимости от способа ее нагружения. Используя модель Ф.Н. Шведова, авторы получили реологическое уравнение илосодержащего шлама. Это уравнение связывает параметры деформации материала, мгновенного и длительного модуля упругости с коэффициентом пластичности, касательным напряжением и временем релаксации:

$$En\varepsilon + H\varepsilon = n\tau + \tau - (HP_m / k_n) . \quad (1.20)$$

Здесь E – мгновенный модуль упругости,

n – время релаксации,

ε - деформация материала,

H – длительный модуль упругости,
 τ – касательное напряжение,
 P_m – предел текучести,
 k_n – коэффициент пластичности.

Анализ полученной зависимости позволил получить графики зависимости деформации от времени при постоянной нагрузке, при равномерном увеличении нагрузки, а также изменение напряжения при равномерном увеличении деформации. Авторы определили соотношение между деформацией и напряжением для рассматриваемой реологической модели при действии мгновенного импульса, приложенного к материалу, и установили, что при этом деформация резко изменяется на определенную величину, а затем постепенно уменьшается. Сделан вывод о том, что указанные зависимости характеризуют равновесное состояние материала и могут быть использованы для управления его структурно-реологическими свойствами с помощью механических воздействий.

В рассмотренных работах сделан вывод об определяющем влиянии содержания твердого в суспензии на ее прочностные свойства: при росте концентрации твердого значение относительной деформации, при которой происходит разрушение структуры суспензии, снижается. Авторы установили линейный характер зависимости прочности структуры суспензии от скорости деформирования.

Ценность полученных сведений о свойствах угольных суспензий является несомненной, при этом следует отметить их качественный характер и отсутствие численных данных по параметрам рассматриваемой реологической модели. Кроме того, исследования реологических свойств выполнены для высококонцентрированных суспензий, которые еще не являются твердыми осадками, которые приняты объектом изучения в данной работе.

Большой цикл работ [88-95] выполнен по изучению моделирования эволюции порового пространства осадков в процессах механического обезвоживания и исследованию физических явлений, способствующих увеличению проницаемости осадков, а также по исследованию процессов, происходящих в поровой среде осадков на микроуровне. В ряде этих исследований принимала участие и автор данной работы.

В публикациях [88-91] отмечается, что имеют место различные способы моделирования поровой среды осадков. Наибольшее распространение получила модель, представляющая поровую среду в виде разветвленной сети каналов и расширений. В модели используется простой шар, представляющий пору, и трехмерные периодически повторяющиеся палочные кубические сети. Цилиндры в данном случае моделируют узкие протоки (щели или горловины) пор. Данная модель обеспечивает результаты, близкие к полученным экспериментальным путем. При моделировании такую поровую среду можно представить в виде графа с источником и стоком. Вершины графа соответствуют отдельным порам поровой среды. Кроме свойств графа-модели, важным является изучение течения жидкости в отдельной поре, для чего может быть использовано неоднородное дифференциальное уравнение.

Коэффициент фильтрации, определяет скорость удаления влаги и представляет наибольший интерес для исследования. Для этой цели была создана экспериментальная установка и выполнено тарирование установки при протекании воды через слой осадка и постоянном статическом воздействии на осадок путем его механического пригружения. После этого выполнялось динамическое воздействие на осадок путем наложения сдвиговых полей, что привело к изменению скорости фильтрации воды и деформаций осадка. Установлено повышение скорости фильтрации в три раза по сравнению со средними данными тарирования установки за счет изменения структуры порового пространства осадка.

В ходе исследований, представленные в работах [92-95], выполнен анализ процесса фильтрации под действием перепада давлений для более простого случая - переноса жидкой фазы для одиночной не разветвляющейся поры, находящейся в слое осадка. Автор рассматривает частный случай решения линейного дифференциального уравнения переноса вещества в поровой среде осадка:

$$D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \partial P / \partial t . \quad (1.21)$$

Здесь D - диффузионный фактор, определяемый из соотношения:

$$D = C P / \mu t , \quad (1.22)$$

где C – проницаемость пористой среды;

P – давление;

μ – вязкость;

m – пористость.

Оговаривая определенные допущения, принятые при решении данного уравнения, и устанавливая входные и выходные условия по краям поры, автор получил характер изменения давления по длине поры в зависимости от времени. Это позволило прийти к выводу о том, что процесс фильтрования протекает в основном в неустановившемся режиме. Для смещения процесса в сторону стабилизации рекомендуется увеличивать или восстанавливать проницаемость по длине поры, что будет способствовать повышению скорости фильтрации.

В других исследованиях этого же автора сделан вывод о положительном влиянии приложения сдвига к осадку с целью интенсификации удаления влаги из него [93, 94]. На экспериментальной установке для изучения влияния механического воздействия на уплотненный осадок было получено, что при наложении сдвиговых полей в твердом скелете образца происходит незначительное разуплотнение, зафиксированное часовыми индикаторами. При этом нормальные деформации изменяют знак с положительного на отрицательный и имеют значение порядка – (0,0025-0,12)мм. Автор приходит к выводу об изменении структуры осадка при таком воздействии, что способствует повышению скорости фильтрации за счет освобождения влаги из раскрывшихся тупиковых каналов-ловушек.

В публикациях [95, 96] представлены результаты численного моделирования кинетики взаимодействия фаз и истечения жидкости при фильтровании с помощью компьютерной модели, базирующейся на методе дискретных элементов. При моделировании определялось изменение координат центра тяжести каждого из элементов, моделирующих жидкость, скорость их перемещения в различных направлениях. Полученные данные обрабатывались программой Vectors, позволяющей на условном графическом изображении модели выделить участки, имеющие одинаковое направление и величину скорости перемещения.

Результаты обработки данных свидетельствуют о том, что в жидкости формируются условно называемые кластерами участки с общим направлением перемещения. В различные моменты времени

происходит переформирование или перестройка кластеров – одни кластеры исчезают, на их месте появляются другие с иным преимущественным направлением перемещения. Удаление жидкости из поровой среды осадка происходит как бы поочередно – на одних участках влага удаляется относительно свободно, на других в этот же момент времени она задерживается в тупиковых каналах. Аналогичные процессы происходят по всей площади модели. При переформировании структуры осадка происходит изменение сети каналов, тупиковые каналы становятся проводящими, и влага может удаляться более полно. Автор приходит к выводу о необходимости динамического воздействия на осадок, которое ускорит процесс переформирования кластеров. Для этой цели может использоваться приложение сдвига для повышения эффективности обезвоживания.

Доказывая в ходе теоретических и экспериментальных исследований положительное влияние сдвига на повышение скорости удаления влаги из тонкодисперсных осадков автор, однако, не уделяет внимания выявлению его оптимальных параметров, способствующих повышению эффективности механического обезвоживания осадков.

Изложенный выше обзор работ в области механического обезвоживания тонких труднофильтруемых осадков и анализ теоретических и экспериментальных исследований показал, что процессы перемещения жидкости в порах осадка исследованы недостаточно полно. Авторы расходятся во мнениях при изучении влияния различных параметров на изменение поровой структуры осадков и течение через них газа и жидкой фазы.

Отсутствуют в большинстве случаев количественные параметры и оценка напряжений и возникающих деформаций в осадках при приложении различных механических воздействий. При этом многие авторы указывают на имеющие место резервы улучшения процесса фильтрации и повышение его эффективности путем именно механического действия на осадок, как наиболее реализуемого и относительно недорогого.

Раздел 2. Исследование характеристик осадков, определяющих эффективность процесса механического обезвоживания

Современное состояние техники добычи углей привело к тому, что в рядовом угле, поступающем на обогащение, содержится около трети частиц шламовой крупности, как правило, с зольностью 25-30% [4]. Следовательно, предприятия сталкиваются с необходимостью использовать несколько стадий обезвоживания для доведения шламовых продуктов до необходимой влажности. Наиболее дешевым и широко применяемым методом является механическое обезвоживание. Для этих целей используется большое разнообразие оборудования с различными принципами действия, среди которых преобладает фильтрование.

Анализ исследований последних лет, приведенный в разделе 1, показал, что тонкодисперсные осадки активно взаимодействуют с водой, удерживают значительные ее количества благодаря высокоразвитой поверхности частиц и действующим капиллярным и электростатическим силам. В связи с тем, что крупность частиц небольшая, осадки имеют высокое сопротивление протеканию воды в поровом пространстве.

В процессе фильтрования в поровом пространстве осадка происходит взаимодействие всех трех фаз [8, 96, 97]. В результате многочисленных зарубежных и отечественных исследований установлены фундаментальные закономерности этих сложных взаимодействий [1-3, 29, 33]. Все усилия направлены на повышение скорости выведения влаги из пористой среды осадка, чему часто препятствуют микропузырьки воздуха, адсорбированные на поверхности частиц, что приводит к закупорке тонких пор [13].

В разветвленной сети пор в осадке протекают довольно сложные процессы, что вызывает необходимость исследования свойств осадков на микроуровне. Это позволит определить пути повышения эффективности процесса фильтрования.

2.1. Исследование перемещения фронта разделения газообразной и жидкой фаз в пористой среде осадка

При рассмотрении процессов, происходящих в объеме осадка в ходе удаления влаги, сложно учесть свойства отдельных пор,

имеющих переменный диаметр по длине, чередование сужений и расширений, тупиковые участки. Поэтому многие исследователи используют интегральный подход, при котором выполняется аналитическое моделирование перемещения фронта раздела фаз – жидкости и газа в поровой среде осадка, являющийся одной из определяющих составляющих механического обезвоживания при фильтровании.

Аналитическое исследование производится для условий, когда направление перемещения жидкости в порах совпадает с направлением градиента действующей силы, что имеет место во многих случаях фильтрации и, в частности, на ленточных вакуум-фильтрах (рис. 2.1).

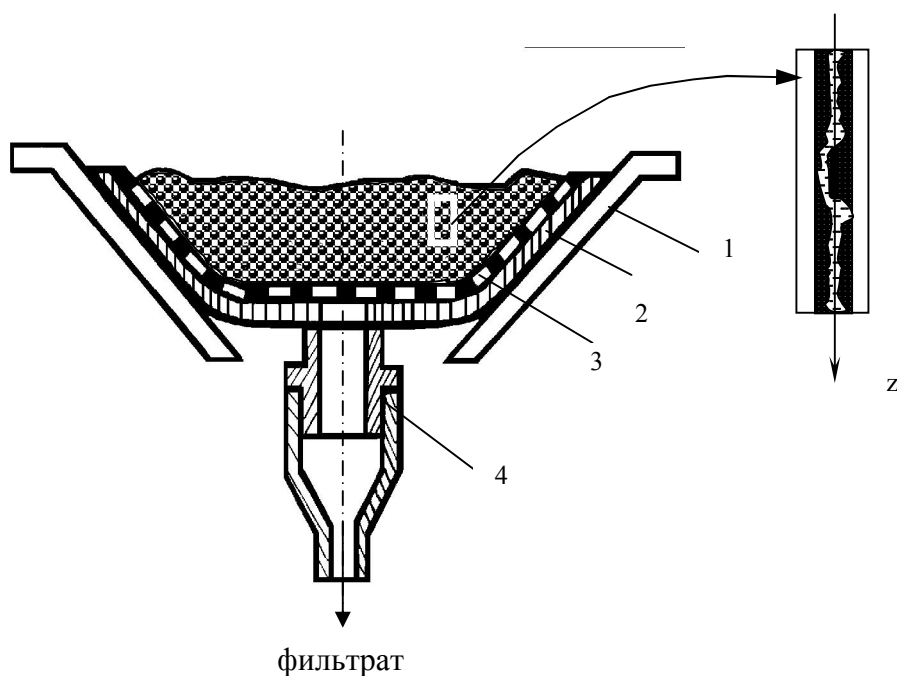


Рис. 2.1. Поперечный разрез ленточного фильтра (справа показана пора в объеме осадка):

1 – поддерживающий желоб, 2 - прорезиненная лента с отверстиями вдоль оси, 3 – фильтровальная ткань, 4 – отвод фильтрата

При исследовании этого процесса приняты следующие допущения:

1) суспензия имеет концентрацию твердой зернистой фазы, при которой отсутствует ее расслоение по высоте; 2) процесс удаления влаги рассматривается как движение воды в пористом теле под действием градиента давления на разных концах поры;

- 3) температура в ходе процесса не изменяется;
- 4) пористая среда является несжимаемой и имеет постоянную проницаемость;
- 5) скорость движения ленты фильтра постоянна.

Поэтому вытеснение воды из пор воздухом может рассматриваться подобно вытеснению при действии поршня.

При этом поршень перемещается вдоль вертикальной оси z , как показано на рис. 2.2, и задача аналитического исследования может рассматриваться как одномерная.

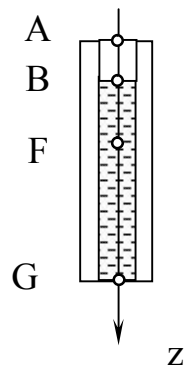


Рис. 2.2. Вытеснение воды из пористого тела поршневым способом

Необходимо определить изменение положения границы раздела фаз вода – воздух с течением времени $h_i = h(\tau)$.

Начальный момент времени соответствует положению точки А, когда время $\tau = 0$, горизонтальная координата $x = 0$ при постоянстве скорости движения ленты и фильтровальной ткани. В этот момент $P_A = P_0 = 0,1 \text{ МПа}$ (1атм). Наличие градиента давлений между точками А и G, где $P_G < 0,1 \text{ МПа}$, вызывает вытеснение жидкости воздухом. Процесс происходит в стационарных условиях. В момент времени, соответствующий положению точки В, давление имеет значение $P_B = P_0$ и высота уровня жидкости в поре равна $h_0 = h(\tau)$. В точке F имеют место текущие значения параметров: $h_i = h(\tau)$, $P_F = P_i$, в конце процесса в точке G соответственно h_G и $P_G = P_l < 0,1 \text{ МПа}$.

В общем случае перенос вещества в пористой среде описывается уравнением вида:

$$\text{div} [\delta C / \mu (\Delta P + \delta \Delta H)] = \partial m \delta / \partial \tau, \quad (2.1)$$

где δ – плотность вещества;

C – проницаемость пористой среды осадка;

μ – вязкость воды;

m – пористость среды;

ΔP – градиент давления;

ΔH – изменение энтальпии;

τ – время.

Для области движения воздуха в соответствии с принятыми допущениями ($\Delta H = 0$, $C = const$, $m = const$) уравнение (2.1) для фильтрации газа будет иметь вид [3]:

$$\partial/\partial z (\delta(\partial P/\partial y)) = (m \mu/C) (\partial\delta/\partial\tau). \quad (2.2)$$

При постоянной температуре $T = const$, $\Delta H = 0$ и справедливо следующее соотношение:

$$P/P_0 = (\delta/\delta_0)^\eta, \quad (2.3)$$

где η – отношение удельных теплоемкостей. При изотермическом процессе считают, что $\eta = 1$.

С учетом значения δ_0 , выделенного из соотношения (2.3), уравнение (2.2) будет иметь вид:

$$\partial P/\partial\tau = K_1 \partial/\partial z(\delta(\partial P/\partial z)). \quad (2.4)$$

Здесь K_1 – коэффициент, содержащий постоянные величины. $K_1 = C/\mu m$.

Нелинейное уравнение (2.4) решается путем его линеаризации, для чего текущее значение давления P заменяется средним значением P_{cp} , являющимся постоянным. Тогда уравнение (2.4) может быть приведено к линейному виду:

$$K_2 \partial^2 P/\partial z^2 = \partial P/\partial\tau, \quad (2.5)$$

где K_2 – коэффициент, содержащий постоянные величины. $K_2 = CP_{cp}/\mu m$.

В уравнении (2.5) необходимо учесть начальные и граничные условия. Тогда можно записать:

$$K_2 \partial^2 P / \partial z^2 = \partial P / \partial \tau, \quad 0 \leq z \leq h_0, \tau > 0, \quad (2.6)$$

$$\text{при } \tau = 0: \quad P = P_0, \quad \partial P / \partial \tau = 0, \quad (2.7)$$

$$\text{при } z = 0: \quad P = P_0; \quad \text{при } z = h: \quad P = P_1. \quad (2.8)$$

На границе раздела воздух – вода получим:

$$z = h_B, \quad P_B^+ = P_B^- \quad (2.9)$$

$$(C/\mu_{\text{в-х}}) (\partial P^+ / \partial z) |_{z=h_B} = -m (dh_B/d\tau); \quad (2.10)$$

$$(C/\mu_{\text{вода}}) (\partial P^- / \partial z) |_{z=h_B} = -m (dh_B/d\tau). \quad (2.11)$$

После интегрального осреднения правой части уравнения (2.6) по координате z можно записать:

$$K_2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{h_B} \int_0^{h_B} \frac{\partial P}{\partial \tau} dz = K_2 f(\tau), \quad 0 \leq z \leq h_B, \quad \tau > 0, \quad (2.12)$$

Отсюда получено:

$$d^2 P / dz^2 = f(\tau), \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{h_B} \int_0^{h_B} \frac{\partial P}{\partial \tau} dz = f(\tau), \quad (2.14)$$

Выражение (2.14) после двойного интегрирования в пределах от z до h_B с использованием принятых граничных условий приходит к виду:

$$P(z, \tau) = P_B + K \frac{dh_B}{d\tau} (h_B - z) + \frac{1}{2} f(\tau) (h_B - z)^2. \quad (2.15)$$

Здесь $K = m\mu_{\text{в-х}} / C$.

Функция $f(\tau)$, вид которой неизвестен, может быть определена из начальных условий, когда $z = 0$, $P = P_A$:

$$f(\tau) = \frac{2}{h_B^2} (P_A - P_B - K \frac{dh_B}{d\tau} h_B). \quad (2.16)$$

Подстановка выражения (2.16) в уравнение (2.15) позволяет получить зависимость для изменения давления:

$$P(z, \tau) = P_B + K \frac{dh_B}{d\tau} (1 - \frac{z}{h_B}) z + (P_A - P_B) (1 - \frac{z}{h_B})^2. \quad (2.17)$$

Равенство (2.14) может быть преобразовано с учетом полученных выражений (2.16) и (2.17), что дает возможность получить дифференциальное уравнение второго порядка для границы раздела воздух-вода:

$$\begin{aligned} \frac{K h_B^2}{6} \frac{d^2 h_B}{d\tau^2} + [(P_A - P_B) \frac{1}{3} + 2K_2 K] \frac{dh_B}{d\tau} + \frac{K h_B}{3} (\frac{dh_B}{d\tau})^2 + \\ + \frac{2}{3} h_B \frac{dP_B}{d\tau} = \frac{2K_2}{h_B} (P_A - P_B). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Уравнение фильтрации жидкости (вторая фаза) и граничные условия для движения несжимаемой жидкости будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \partial P / \partial z = 0, \\ \text{при } z = h \quad P = P_G; \quad \text{при } z = h_B \quad P_B^+ = P_B^-, \quad \frac{\partial P^-}{\partial z} \Big|_{z=h_B} = -K_3 \frac{dh_B}{d\tau}, \end{aligned} \quad (2.19)$$

где $K_3 = m\mu_{\text{вода}} / C$.

Такая задача будет иметь решение в виде функции

$$P = P_G + K_3 \frac{dh_B}{d\tau} (h - z). \quad (2.20)$$

При $z = h_B$ получим зависимость следующего вида:

$$P_B = P_G + K_3 \frac{dh_B}{d\tau} (h - h_B). \quad (2.21)$$

Положение границы раздела фаз воздух – вода и давления на ней может быть определено путем совместного решения уравнений (2.18) и (2.21). Предварительно уравнение (2.18) для границы раздела воздух – вода упрощается при условии пренебрежения первым и третьим его членами вследствие их малости. При этом точность остается в допустимых пределах.

Первый член уравнения (2.18) описывает инерционные силы, которые в данном случае незначительны. Третий член этого уравнения представляет собой скорость движения границы раздела воздух-вода во второй степени, которая также является величиной, имеющей небольшой порядок. С учетом этого уравнение (2.18) имеет другой вид и с учетом выражения (2.21) может быть получено дифференциальное уравнение второго порядка относительно h_B :

$$0,66K_3 h_B^2 (h - h_B) \frac{d^2 h_B}{d\tau^2} + \{[0,33(P_A - P_G) + 2K_2 K] h_B + 2K_2 K_3 (h - h_B)\} \frac{dh_B}{d\tau} - [0,33K_3 h_B (h - h_B) + 0,66K_3 h_B^2] \left(\frac{dh_B}{d\tau}\right)^2 = 2K_2 (P_A - P_G). \quad (2.22)$$

В данном уравнении пренебрежимо малыми являются первый и третий члены, их так же можно не учитывать без потери точности. В ходе упрощения получено уравнение первого порядка:

$$\frac{dh_B}{d\tau} = \frac{6K_2 \Delta P}{[\Delta P + 6K_2 (K - K_3)] h_B + 6K_2 K_3 h}. \quad (2.23)$$

С целью упрощения полученного уравнения комплексы выражений, содержащих постоянные величины, могут быть обозначены как:

$$a = \Delta P + 6K_2 (K - K_3), \quad b = 6K_2 K_3 h, \quad \Delta P = P_A - P_G \quad (2.24)$$

После интегрирования получено уравнение второй степени вида:

$$0,5 a h_B^2 + b h_B = 6 K_2 \Delta P \tau + c_0. \quad (2.25)$$

Здесь c_0 – постоянная интегрирования, которая определяется из начальных условий: при $\tau = 0, h = 0, c_0 = 0$.

С учетом того, что значение коэффициента K_3 значительно превышает значение коэффициента K , так как $\mu_{вода} \gg \mu_{в-х}$, для расчета положения границы раздела фаз воздух – вода получаем следующую зависимость:

$$h_B = \frac{-6 K_2 K_3 h}{\Delta P + 6 K_2 (K - K_3)} + \sqrt{\left[\frac{6 K_2 K_3 h}{\Delta P + 6 K_2 (K - K_3)} \right]^2 + \frac{12 K_2 \Delta P \tau}{\Delta P + 6 K_2 (K - K_3)}}. \quad (2.26)$$

Максимальное время обезвоживания слоя осадка τ_{max} можно определить путем вычисления параметра h_B . Этот момент имеет место тогда, когда h_B достигает значения h_G [3]. Для выполнения расчетов необходимо знать значения проницаемости и пористости исследуемого осадка. Эти параметры определяются в ходе исследования гидродинамических характеристик его поровой среды, способом укладки частиц в осадке и гранулометрическим составом материала, слагающего осадок.

2.2. Исследование гидродинамических характеристик осадков углеобогащения

По данным работ [32, 97, 98] можно сделать вывод о том, что распределение частиц по крупности во многих угольных шламах Донбасса не имеет значительных отличий, особенно для углей одой и той же марки. Как правило, количество материала с крупностью более 0,5мм незначительно. Примерно половина зерен представлена частицами с размером менее 0,2мм, из которых около 40% имеют крупность менее 200 мкм. Для исследования

фильтрационной способности флотационных угольных шламов были приняты концентраты ЦОФ Киевская и Свято-Варваринская, которые обогащают угли для коксования, а также шлам марки Г ООО «Моспинское УПП» (сгущенный продукт ГЦ-1000). В табл. 2.1. показан гранулометрический состав этих продуктов.

Таблица 2.1.

Гранулометрический состав флотационных концентратов и шлама

Классы крупности, мм	Выход, %		
	Киевская ЦОФ	Свято-Варваринская ЦОФ	Моспинское УПП
0,50-1,0	5,4	3,7	47,4
0,25-0,50	23,7	18,5	10,3
0,125-0,25	21,4	22,6	14,7
0,063-0,125	18,9	20,8	12,4
0-0,063	30,6	34,4	15,2
Итого	100,0	100,0	100,0

Зольность флотационных концентратов находится в пределах 10-14%, зольность шлама составляет 40-44%.

Многие исследователи [1, 2, 28, 32] рассматривают процесс фильтрования как гидродинамический, определяющее значение в котором имеет сопротивление осадка перемещению жидкой и газообразной фаз при прочих равных условиях. При этом принято, что удельное сопротивление осадка обратно пропорционально его проницаемости.

Для определения проницаемости осадка обычно используют известное уравнение Дарси [32]:

$$w = K_w j, \quad (2.27)$$

где K_w – коэффициент фильтрации, представляющий собой удельную скорость фильтрации воды, $K_w = V / S \tau$;

j – гидравлический градиент.

Здесь V – объем воды, протекающей через слой осадка сечением S за время τ .

Гидравлический градиент связан со следующими параметрами:

$$j = \Delta P / \gamma h, \quad (2.28)$$

где ΔP – градиент давления;

γ – удельный вес воды;

h – толщина слоя осадка.

Отсюда для коэффициента фильтрации можно записать:

$$K_w = w \gamma h / \Delta P = w \delta g h / \Delta H \delta g = w h / \Delta H. \quad (2.29)$$

Здесь δ – плотность материала осадка;

g – ускорение свободного падения;

ΔH - потери напора при движении воды в порах осадка.

Известно, что скорость фильтрации можно представить в виде соотношения:

$$w = C \Delta P / \mu h. \quad (2.30)$$

Здесь C – проницаемость осадка;

μ - вязкость воды.

С учетом соотношений (2.29) и (2.30) получено:

$$C = K_w \mu / \delta g. \quad (2.31)$$

Водопроницаемость зернистых осадков в лабораторных условиях определялась экспериментально по стандартной методике с помощью измерения пьезометрического напора ΔH и скорости фильтрации воды через слой исследуемого осадка. Схема установки представлена на рис. 2.3.

При выполнении экспериментов исследуемый материал помещался в цилиндрический сосуд на сетку, расположенную в нижней части сосуда. Сбоку установлены пьезометрические трубки, по которым отсчитываются потери напора. Сверху в цилиндр подавалась вода с постоянной скоростью протекания через слой осадка, что регулируется подачей воды, переливом и краном в нижней части сосуда. Объем воды, прошедшей через слой осадка, регистрировался с помощью измерительного сосуда, в котором установлены датчики уровня. Датчики связаны с электрическим секундомером ЭС-2. Расстояние L между концами датчиков подобрано таким, чтобы секундомер отключался при достижении объема отфильтрованной воды в 1200 см^3 .

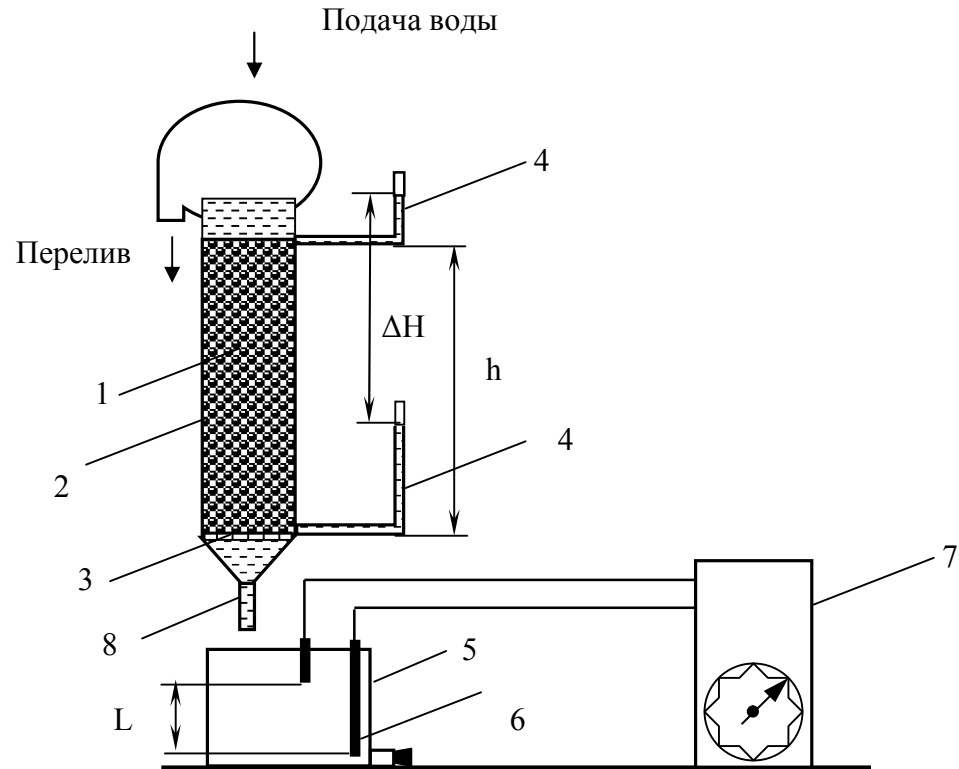


Рис. 2.3. Экспериментальная установка для исследования водопроницаемости осадков:

- 1 – сосуд, 2 – слой осадка, 3 – сетка, 4 – пьезометрические трубки,
 5 – измерительная емкость, 6 – датчики уровня,
 7 – электрический секундомер, 8 – сменная насадка

Отсчет потерь напора по пьезометрическим трубкам производился в установившемся режиме. Измерения дублировались и находились средние значения. Температура воды в ходе измерений постоянна, поэтому при вычислениях принята постоянная ее вязкость. Высота слоя материала в цилиндре составляла 510мм.

По данным измерений определяется скорость фильтрации по формуле:

$$w = V / S \tau, \quad (2.32)$$

где V – объем отфильтрованной воды, м^3 ;

S – площадь сечения осадка, через которое проходит вода, м^2 ;

τ – время, с.

На основе полученных данных определяется коэффициент фильтрации по соотношению (2.29) и проницаемость осадка по соотношению (2.31). Результаты исследования для зернистых

материалов при разных диаметрах калиброванных отверстий в сменной насадке приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

Определение проницаемости зернистых материалов

Материал, крупность	Показания пьезометрических трубок, Н, см	Время работы секундомера, τ, с	Проницаемость, $S \times 10^{14}$, м ²
Насадка с диаметром отверстия $d = 3$ мм			
уголь 1-3мм	22,0	1375	292
уголь 3-6мм	25,5	1053	329
уголь 6-13мм	26,0	614	553
Насадка с диаметром отверстия $d = 5$ мм			
уголь 1-3мм	25,0	520	245
уголь 3-6мм	24,5	482	269
уголь 6-13мм	25,5	296	421
Насадка с диаметром отверстия $d = 8$ мм			
уголь 1-3мм	23,0	265	204
уголь 3-6мм	22,8	175	311
уголь 6-13мм	24,1	105	491
Насадка с диаметром отверстия $d = 3$ мм			
порода 1-3мм	29,3	1699	177
порода 3-6мм	30,0	1280	230
порода 6-13мм	28,4	801	388
Насадка с диаметром отверстия $d = 5$ мм			
порода 1-3мм	25,8	652	189
порода 3-6мм	27,0	540	218
порода 6-13мм	27,5	344	336
Насадка с диаметром отверстия $d = 8$ мм			
порода 1-3мм	24,0	294	176
порода 3-6мм	24,2	203	253
порода 6-13мм	25,0	165	301

После этого выполнялись эксперименты по исследованию фильтруемости тех же проб осадков, для чего использована стандартная лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 2.4.

Анализ данных позволяет заключить, что для угольного материала проницаемость колеблется в пределах $(204-553) \times 10^{-14}$ м², для породы $(177-388) \times 10^{-14}$ м² в зависимости от крупности. Для зернистых породных материалов проницаемость ниже, чем для угольных, что объясняется различием в смачиваемости частиц угля и породы.

Методика проведения экспериментов по исследованию фильтруемости осадков также стандартная – определяется

количество фильтрата, выделившегося в зоне фильтрования и в зоне просушки.

По данным измерений вычисляются константы фильтрования и проницаемость осадков углеобогащения. Для проведения исследований суспензия приготавливалась с постоянным содержанием твердого, которое составляло во всех экспериментах 320 кг/м^3 . Гранулометрический состав подбирался искусственно из рассеянных на классы проб шламов – флотационных и сгущенного продукта ГЦ-1000.

Подготовленная суспензия помещалась в емкость с мешалкой и запускался вакуум-насос. Фильтровальный элемент с сеткой, имеющей ячейки $0,26 \times 0,26 \text{ мм}$, опускался в суспензию при достижении определенного разрежения под сеткой.

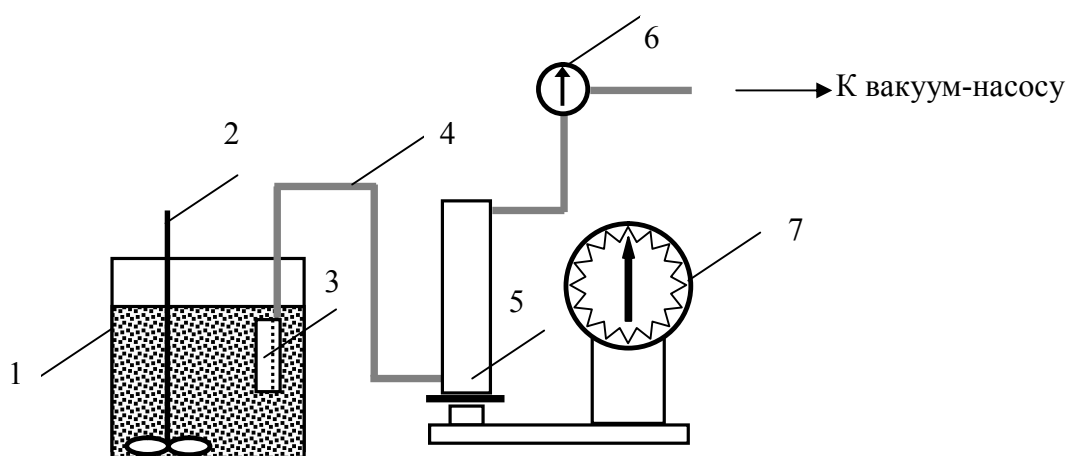


Рис. 2.4. Установка для исследования фильтруемости осадков:

- 1 – сосуд с суспензией, 2 – мешалка, 3 – фильтровальный элемент,
4 – соединительные шланги, 5 – ресивер для фильтрата,
6 – вакуумметр, 7 – весы

Первой фазой фильтрования был набор осадка на фильтровальную сетку в течение 50с, второй фазой являлась просушка осадка при том же значении времени, для чего фильтровальный элемент извлекался из объема суспензии и выдерживался на воздухе при продолжении действия разрежения. Перепад давления установлен равным 67 КПа. В течение всего цикла фильтрования ресивер заполнялся фильтратом, объем которого регистрировался визуально по показаниям весов. Опыты дублировались и определялись средние значения показателей.

Фундаментальные исследования по фильтрации содержат сведения о классификации процессов фильтрования на следующие типы: фильтрование с образованием несжимаемого осадка, фильтрование с формированием сжимаемого осадка, фильтрование с полным или частичным закупориванием пор фильтрующей перегородки, а также фильтрование с закупориванием пор промежуточного вида [1, 2, 32]. В разных случаях вид экспериментально полученной зависимости в координатах V , τ/V отличается.

После измерений на основе экспериментальных данных построена зависимость в координатах V , τ/V , являющаяся прямой линией. Это свидетельствует о том, что фильтрование указанных проб флотоконцентратов принадлежит к типу фильтрования на недеформируемой перегородке, образующийся осадок относится к несжимаемым. Для такого вида фильтрования справедливо следующее известное соотношение между его параметрами:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\mu V_{oc}}{2C \Delta P V S^2} V + \frac{\mu h}{C \Delta P S} \quad (2.33)$$

Здесь V_{oc} – объем осадка.

В этом случае проницаемость осадка определяется соотношением (2.31), параметры которого вычисляются на основе полученных экспериментальных данных. Результаты расчетов при постоянных значениях диаметра фильтровального элемента, равного 70мм, суммарного времени фильтрования и просушки, равного 100с, представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Экспериментальное определение проницаемости осадков

№ пробы	Вес фильтрата, г			Вес осадка, г	Проницаемость, $S \times 10^{14}$, м ²
	фильтрование	просушка	всего		
P = 67 КПа, $\tau = 50+50$с, уголь					
1	105	15	120,0	60,0	1,99
2	180	10	190,0	65,0	3,41
3	300	40	340,0	63,0	5,40
4	310	50	360,0	68,0	6,58
5	570	48	618,0	68,0	11,31
6	720	65	785,0	65,0	14,03
7	880	60	940,0	67,0	17,60

Продолжение таблицы 2.3.

№ пробы	Вес фильтрата, г			Вес осадка, г	Проницаемость, $C \times 10^{14}$, м ²
	фильтрование	просушка	всего		
8	990	86	1076,0	67,0	20,13
9	1185	80	1265,0	67,0	23,69
10	1610	80	1690,0	68,0	32,39
11	1700	80	1780,0	68,0	34,84
12	1700	52	1752,0	72,0	37,26
13	1825	50	1875,0	72,0	39,82
14	1840	50	1890,0	73,0	42,55
15	1970	70	2040,0	75,0	48,66
16	2250	75	2325,0	75,0	55,30
P = 67 КПа, τ = 50+50с, порода					
1	180	20	200,0	20,0	1,40
2	95	10	105,0	20,0	0,71
3	110	20	130,0	20,0	0,87
4	85	15	100,0	20,0	0,63
5	105	10	115,0	21,0	0,73
6	56	10	66,0	21,0	0,45
7	51	10	61,0	20,0	0,39
8	55	6	61,0	21,0	0,41
9	85	14	99,0	20,0	0,59
10	65	15	80,0	20,0	0,52
11	45	15	60,0	20,0	0,36
12	75	10	85,0	10,0	0,18

На основании результатов исследований можно заключить, что для флотационных концентратов проницаемость изменяется в пределах $(1,99-55,3) \times 10^{-14}$ м², для рядового шлама – $(0,18-1,4) \times 10^{-14}$ м² в зависимости от гранулометрического состава смеси. При преобладании зернистых фракций крупности гидрофобных угольных частиц проницаемость выше, чем для тонких гидрофильных частиц.

2.3. Определение необходимого максимального времени фильтрования для различных условий

Исходя из теоретических предпосылок, изложенных в п. 2.1, максимальным временем, необходимым для удаления воды из порового пространства осадка, принято время, за которое вода доходит до края поры, связанного с атмосферой. Это время может

быть определено путем подстановки в уравнение (2.26) параметров осадка, определенных экспериментально (см. п. 2.3). Исследование уравнения выполнено для следующих параметров. Перепад давления задан в пределах от 30 до 80 КПа, толщина осадка изменялась от 10 до 30 мм, что соответствует реальным условиям фильтрования. Значения проницаемости приняты на основании данных, полученных экспериментально (см. табл. 2.3), вязкость воздуха принималась равной $1,79 \times 10^{-5}$ Па·с и жидкости (воды) – $100,2 \times 10^{-5}$ Па·с. По данным исследований, проводившихся ранее, пористость угольных осадков изменяется в пределах от 0,32 до 0,59 в зависимости от гранулометрического состава твердой фазы [32, 99, 100].

Для времени τ были заданы различные значения. Тот момент времени, когда расчетное значение высоты нахождения в поре границы раздела вода-воздух совпадает со значением высоты осадка, принято за максимальное время обезвоживания τ_{max} . Это время соответствует достижению минимальной влажности осадка, которая может быть получена при механическом обезвоживании, равной $W^*_{min} = 8\%$. За максимальную влажность принято значение $W^*_{max} = 35\%$. Отсюда среднее значение влажности $W^*_{cp} = 21\%$ будет соответствовать времени, когда высота раздела вода-воздух достигнет половины высоты осадка, обозначенному как τ_{cp} .

Результаты исследования соотношения (2.26) для угольных осадков представлены в графической форме на рис. 2.5-2.10.

Анализ графиков, представленных на рис. 2.5-2.10, полученных на базе аналитического моделирования, позволяет заключить, что на каждом графике имеют место три характерных участка изменения функции в зависимости от изменения параметра (проницаемости от низкой до высокой).

Осадки с высокой проницаемостью $(32,4-55,3) \times 10^{-14}$ м² имеют практически прямолинейную зависимость τ_{max} от проницаемости, при этом максимальное время обезвоживания находится в пределах 80-30с. К осадкам с такими свойствами относятся зернистые угольные шламы, содержащиеся в подрешетных водах мокрой классификации или гравитационного отделения, сгущенные продукты гидроциклонов. На этом участке снижение необходимого максимального времени обезвоживания мало зависит от толщины осадков и их проницаемости в исследованном интервале изменения этих параметров.

Для осадков со средней проницаемостью $(14-23,7) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ характерно повышение τ_{max} до величин 400-150с. Средняя проницаемость присуща осадкам с незначительным содержанием тонких частиц (крупностью менее 100мкм).

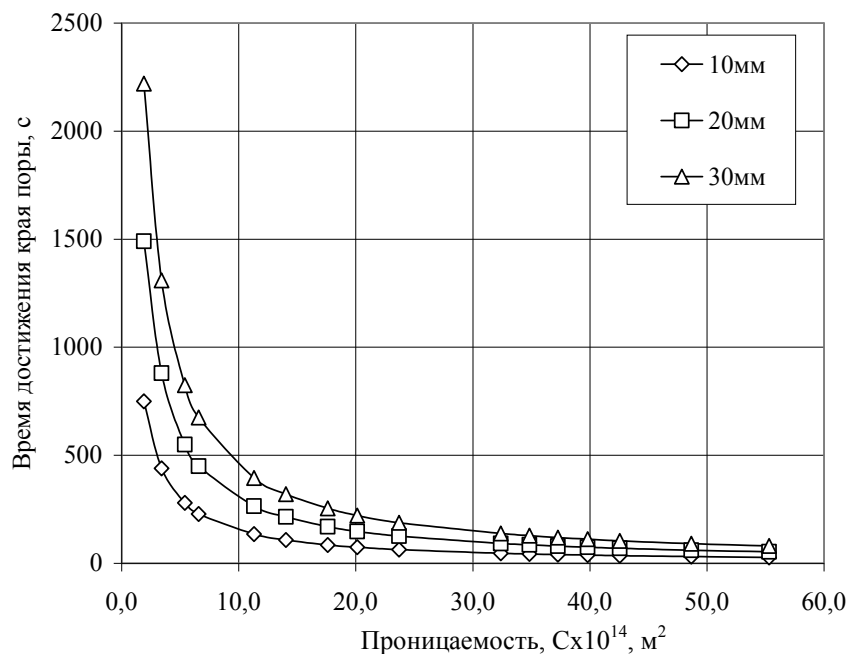


Рис. 2.5. Максимальное время обезвоживания осадка толщиной 10-30мм при перепаде давлений 30КПа

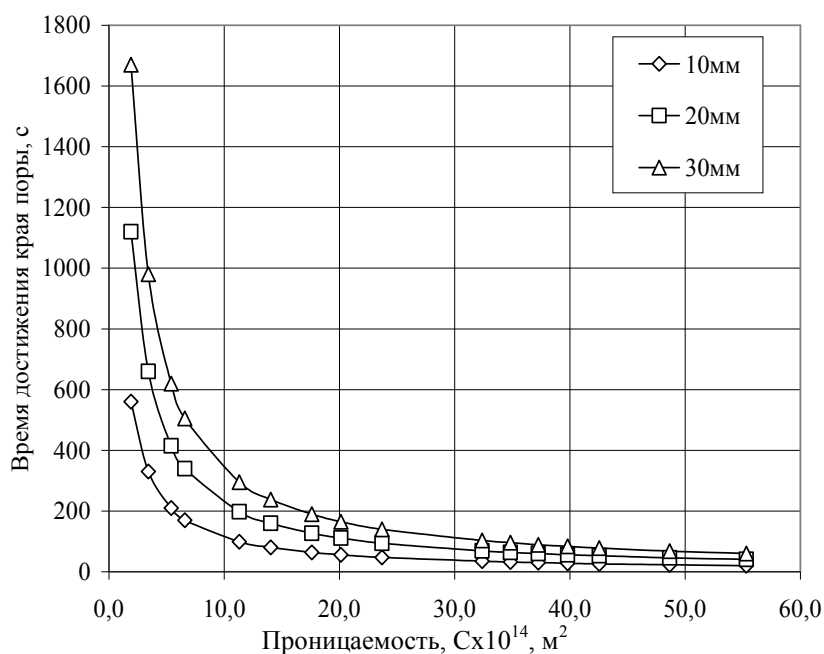


Рис. 2.6. Максимальное время обезвоживания осадка толщиной 10-30мм при перепаде давлений 40КПа

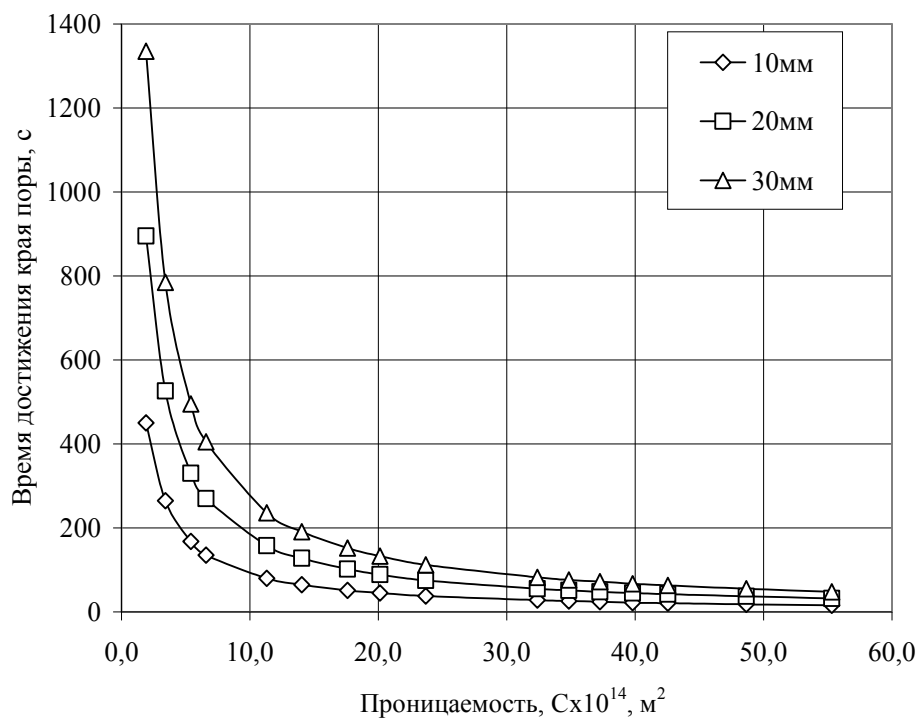


Рис. 2.7. Максимальное время обезвоживания осадка толщиной 10-30мм при перепаде давлений 50КПа

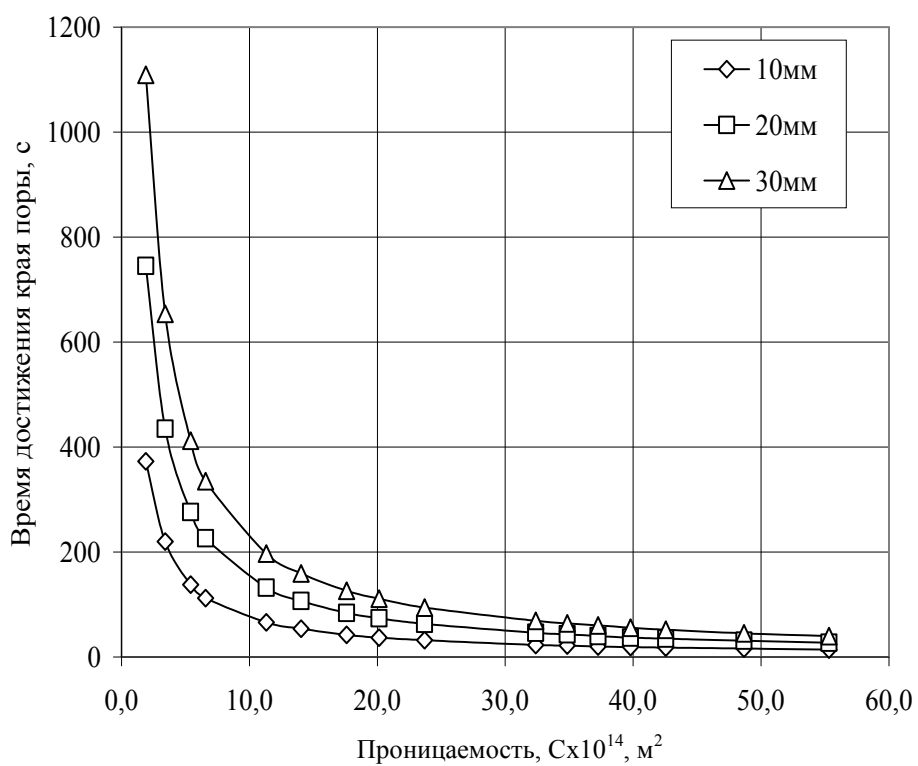


Рис. 2.8. Максимальное время обезвоживания осадка толщиной 10-30мм при перепаде давлений 60КПа

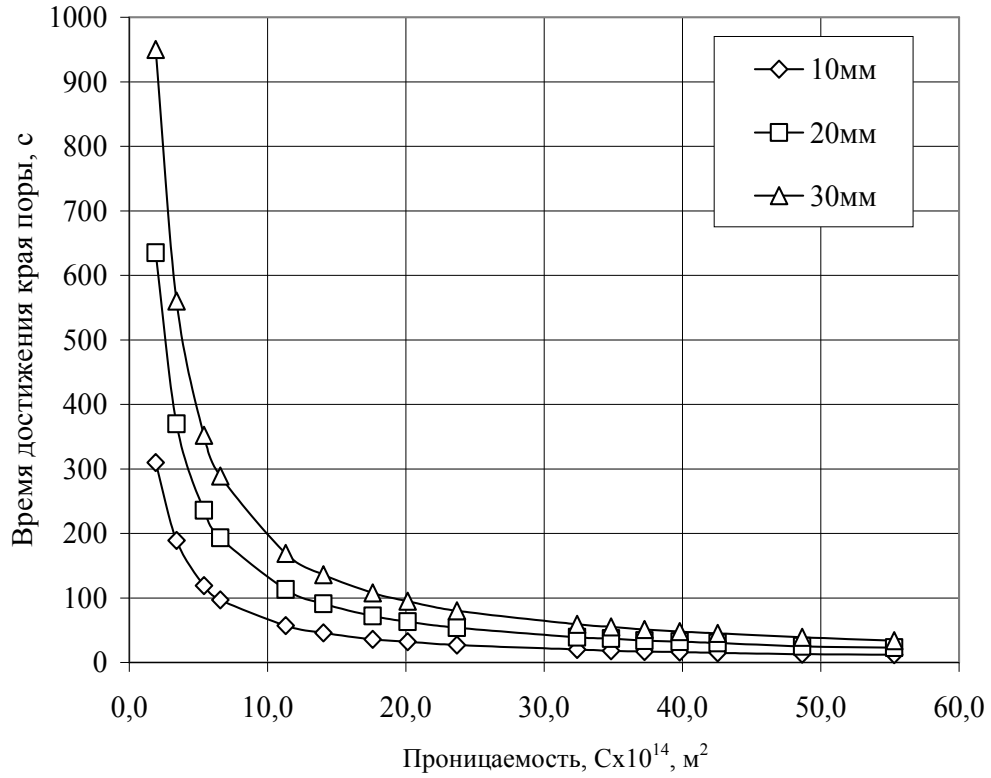


Рис. 2.9. Максимальное время обезвоживания осадков толщиной 10-30мм при перепаде давлений 70КПа

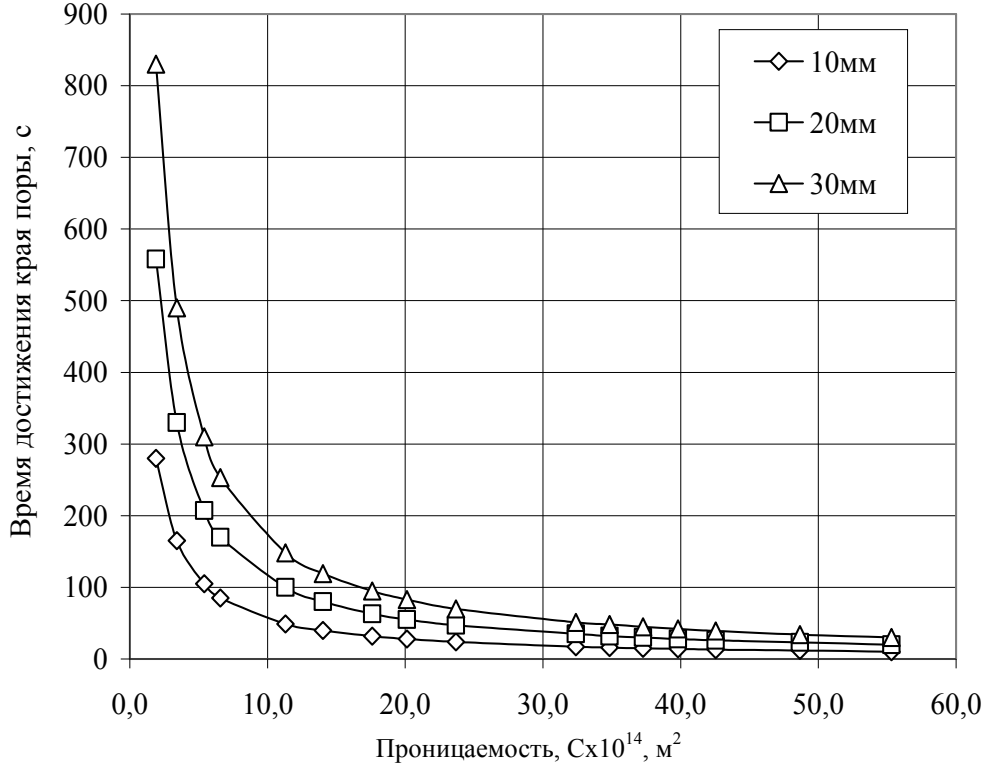


Рис. 2.10. Максимальное время обезвоживания осадка толщиной 10-30мм при перепаде давлений 80КПа

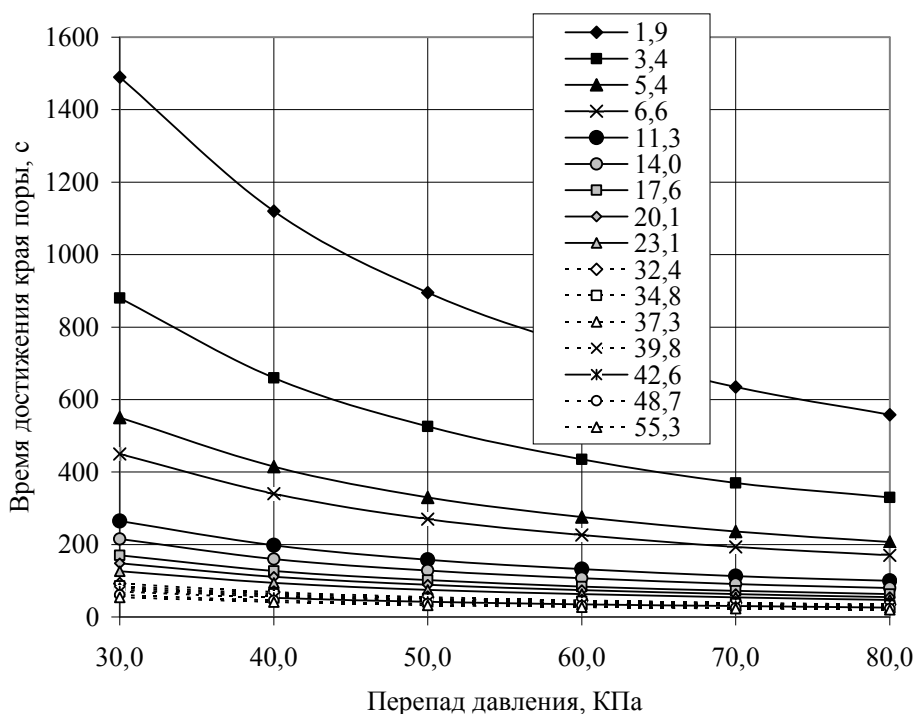


Рис. 2.11. Изменение максимального времени обезвоживания для осадков различной проницаемости (толщина осадка 20мм)

Для осадков с низкой проницаемостью $(1,99-11,3) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ максимальное время обезвоживания, т.е. время достижения края поры, имеет наибольшие значения и изменяется в пределах от 2220 до 830с при увеличении приложенного перепада давлений. Низкой проницаемостью обладают осадки с высоким содержанием (более 30%) тонких или глинистых частиц, например, отходы флотации. Для таких материалов характерно резкое изменение времени перемещения границы вода-воздух в поровой среде осадка при изменении его проницаемости.

На рис. 2.11 показано изменение теоретически полученного максимального времени обезвоживания в зависимости от приложенного перепада давлений для осадков с различной проницаемостью.

Для сравнения выбран осадок средней толщины, равной 20мм. Аналогичный вид имеют зависимости для тонких осадков (толщина 10мм) и имеющих большую толщину (30мм). Из графика видно, что для осадков с высокой проницаемостью значения времени достижения края поры границей раздела фаз невелики и практически линейно зависят от приложенного перепада давлений. Особенно ярко это проявляется для осадков небольшой толщины.

В табл. 2.4 показаны регрессионные выражения зависимости максимального времени обезвоживания от проницаемости угольных осадков, а в табл. 2.5 – от приложенного перепада давления.

Таблица 2.4

Зависимость необходимого времени обезвоживания от проницаемости осадков при различном перепаде давлений

Перепад давлений, КПа	Высота осадка, мм	Регрессионная зависимость	Параметр аппроксимации, R ²
1	2	3	4
30	10	$\tau = 1474,6 C^{-0,994}$	0,9998
	20	$\tau = 2915,5 C^{-0,993}$	0,9999
	30	$\tau = 4354 C^{-0,993}$	0,9998
40	10	$\tau = 1103,5 C^{-0,996}$	0,9998
	20	$\tau = 2187,3 C^{-0,993}$	0,9999
	30	$\tau = 3269,7 C^{-0,995}$	0,9999
50	10	$\tau = 889,0 C^{-0,998}$	0,9997
	20	$\tau = 1747,6 C^{-0,993}$	0,9999
	30	$\tau = 2612,3 C^{-0,994}$	0,9999
60	10	$\tau = 716,3 C^{-0,983}$	0,9998
	20	$\tau = 1451,1 C^{-0,992}$	0,9999
	30	$\tau = 2172,7 C^{-0,993}$	0,9998
70	10	$\tau = 617,4 C^{-0,989}$	0,9995
	20	$\tau = 1244,8 C^{-0,994}$	0,9997
	30	$\tau = 1861,1 C^{-0,993}$	0,9999
80	10	$\tau = 548,9 C^{-0,994}$	0,9997
	20	$\tau = 1097,2 C^{-0,995}$	0,9998
	30	$\tau = 1631,6 C^{-0,994}$	0,9998

Как следует из данных табл. 2.4 все зависимости имеют вид степенной функции, при этом показатель степени при аргументе (проницаемости) близок к единице. Следовательно, с достаточным приближением можно считать зависимость максимального времени обезвоживания от проницаемости осадка различной толщины и перепада давлений гиперболической.

Таблица 2.5

Зависимость необходимого времени обезвоживания от перепада давлений для осадков различной проницаемости при толщине 20мм

Проницаемость осадка, $S \times 10^{14}, \text{ м}^2$		Регрессионная зависимость	Параметр аппроксимации, R^2
1	2	3	4
Низкая	1,9	$\tau = 45438 \Delta P^{-1,004}$	0,9999
	3,4	$\tau = 27371 \Delta P^{-1,01}$	0,9996
	5,4	$\tau = 16461 \Delta P^{-0,999}$	0,9999
	6,6	$\tau = 13383 \Delta P^{-0,997}$	0,9999
	11,3	$\tau = 7842,5 \Delta P^{-0,997}$	0,9998
Средняя	14,0	$\tau = 6609 \Delta P^{-1,008}$	0,9999
	17,6	$\tau = 5348,9 \Delta P^{-1,01}$	0,9999
	20,1	$\tau = 4589 \Delta P^{-1,009}$	0,9999
	23,1	$\tau = 3780 \Delta P^{-1,001}$	0,9999
Высокая	32,4	$\tau = 2709,8 \Delta P^{-0,995}$	0,9995
	34,8	$\tau = 2564 \Delta P^{-0,999}$	0,9997
	37,3	$\tau = 2432 \Delta P^{-1,004}$	0,9999
	39,8	$\tau = 2292,5 \Delta P^{-1,006}$	0,9999
	42,6	$\tau = 2183,8 \Delta P^{-1,0099}$	0,9998
	48,7	$\tau = 1944,7 \Delta P^{-1,016}$	0,9967
	55,3	$\tau = 1712 \Delta P^{-1,0148}$	0,9996

Данные табл. 2.5 позволяют установить обратно пропорциональную гиперболическую зависимость между приложенным перепадом давлений и максимальным временем обезвоживания. Была выполнена проверка наличия линейной связи между этими параметрами для осадков высокой проницаемости (см. рис. 2.11). В принципе линейная зависимость так же имеет высокую степень аппроксимации – значения показателя R^2 находились в пределах 0,9174-0,9278. Но для гиперболической зависимости этот показатель получен более высоким и близким к единице (табл. 2.5).

На рис. 2.12, 2.13 представлена взаимосвязь времени достижения края поры границей раздела фаз вода-воздух и

влажности осадков различной проницаемости и при действии разных перепадов давления (осадок толщиной 20мм).

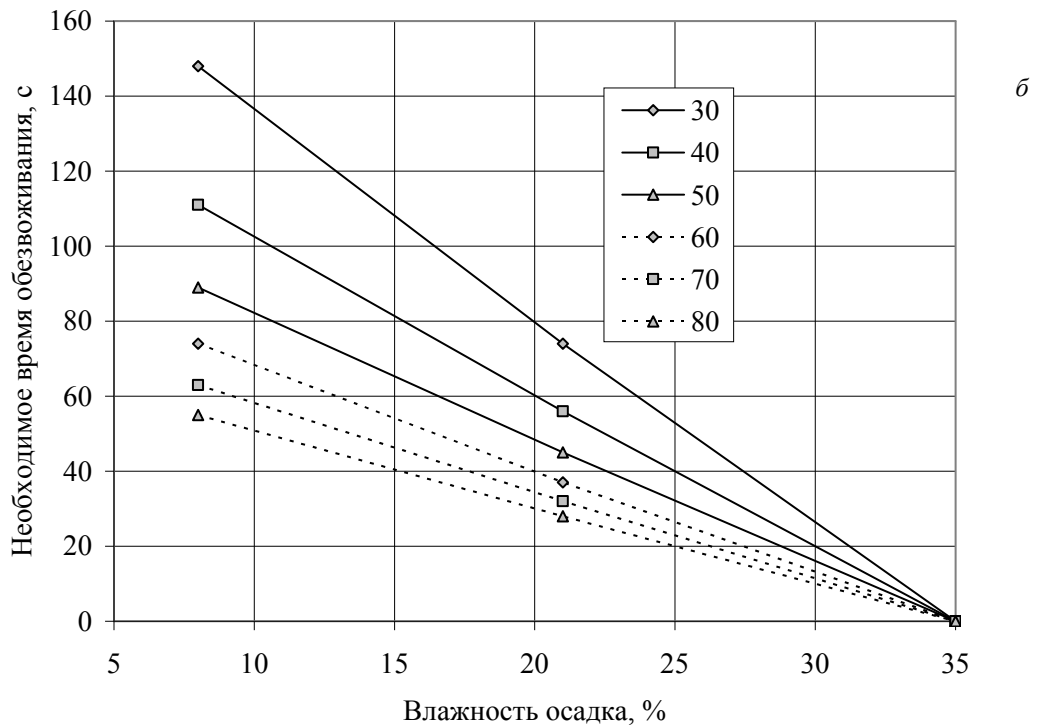
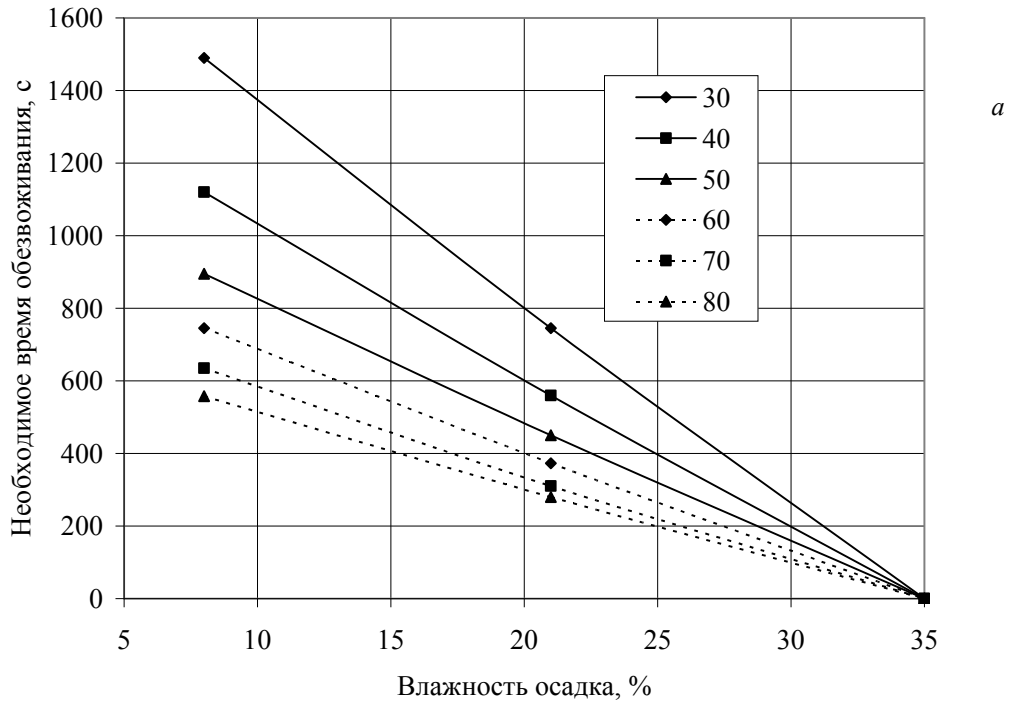


Рис. 2.12. Связь влажности и необходимого времени обезвоживания осадков при перепадах давления 30-80КПа: *а* – низкой проницаемости, *б* – средней проницаемости (толщина осадка 20мм)

Данные рис. 2.12 и 2.13 позволяют заключить, что для осадков низкой и средней проницаемости характерна линейная зависимость между влажностью осадка и временем, необходимым для достижения границы раздела вода-воздух края поры, принятым за максимальное время обезвоживания.

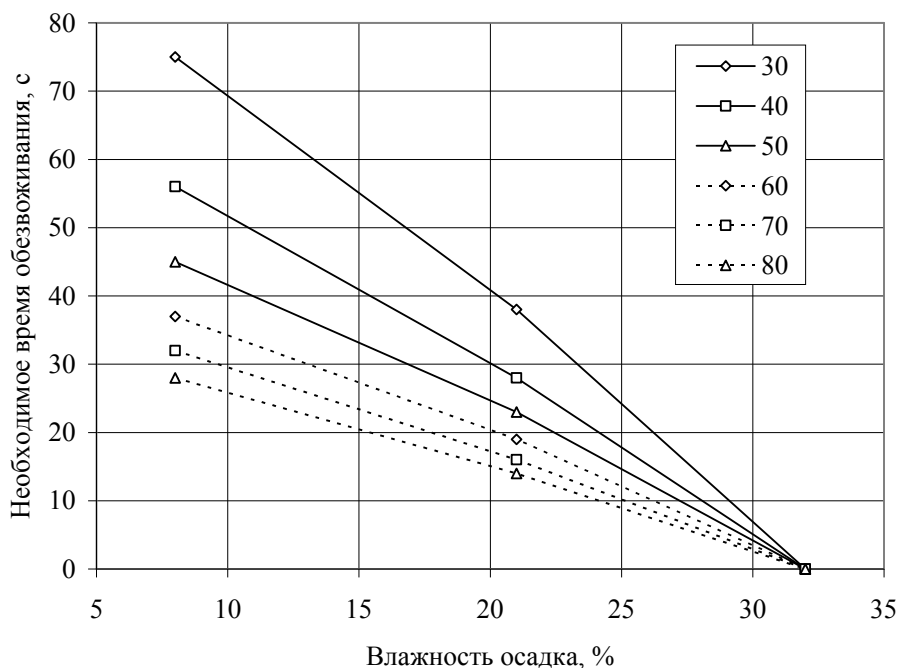


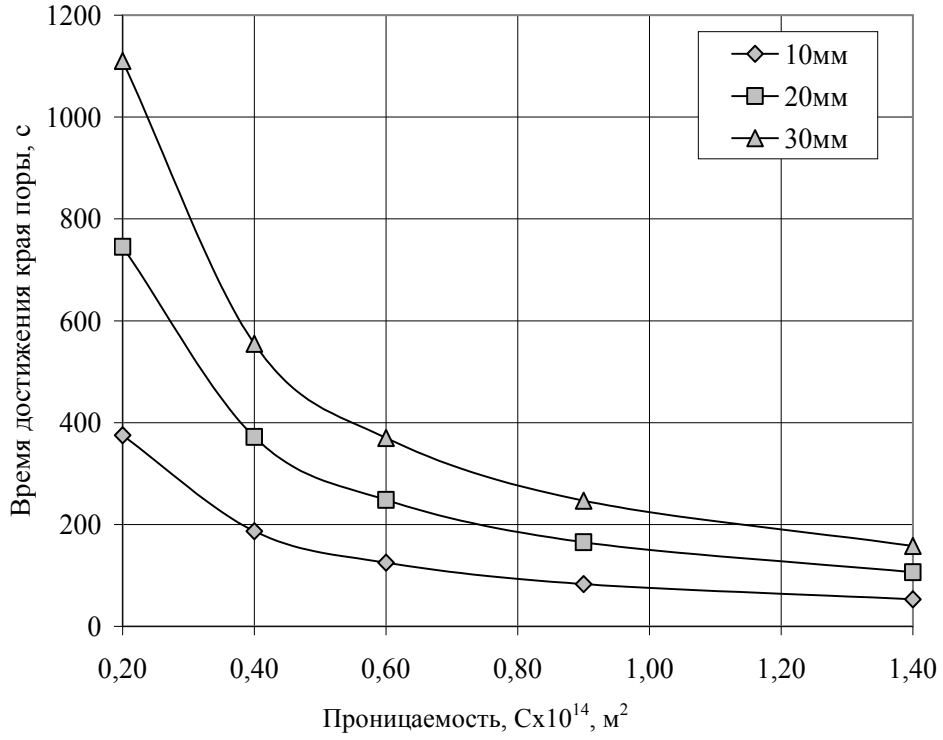
Рис. 2.13. Связь влажности и необходимого времени обезвоживания осадков с высокой проницаемостью при перепадах давления 30-80 КПа (толщина осадка 20 мм)

Для осадков высокой проницаемости $C = (32,4-55,3) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ зависимость между влажностью осадка и максимальным временем обезвоживания имеет вид полинома второй степени.

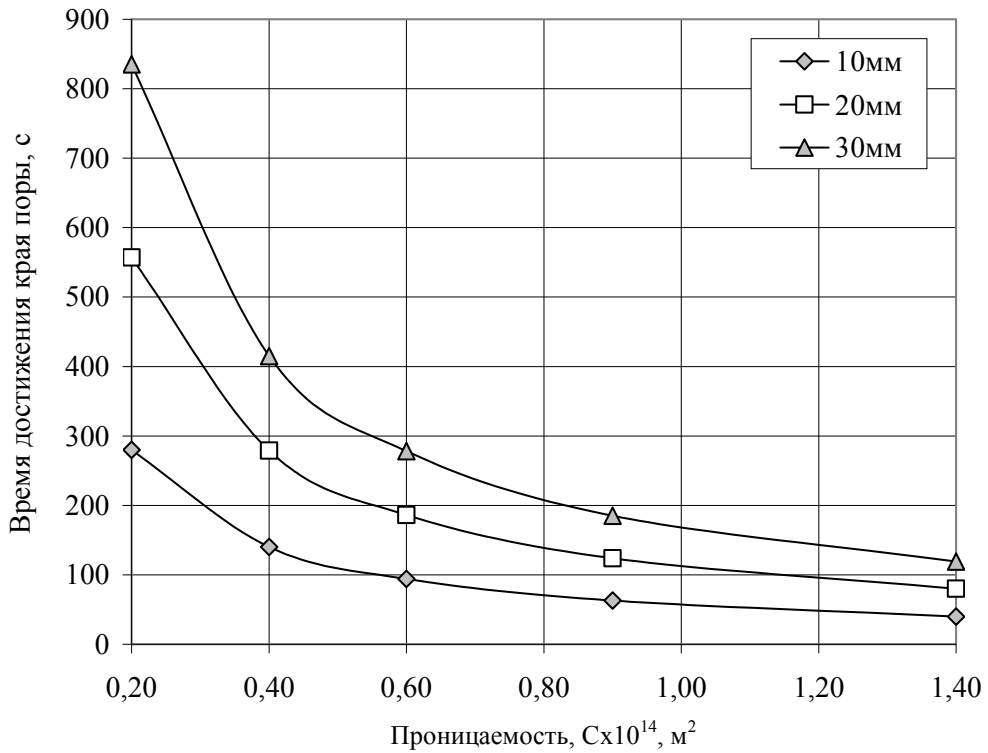
Установлено, что при увеличении перепада давлений от 60 до 80 КПа разница в значениях максимального времени обезвоживания осадков разной проницаемости снижается (см. пунктирные линии на рис. 2.12 и 2.13).

Для обезвоживания шламовых продуктов высокой зольности (породных) используются в настоящее время фильтр-прессы различных конструкций, в которых создается давление 0,7-1,5 МПа. В соответствии с этим для исследования обезвоживания породных шламов принят перепад давлений 0,6-1,4 МПа [98].

Результаты расчетов по уравнению (2.26) представлены в графической форме на рис. 2.14-2.17.



a



б

Рис. 2.14. Зависимость времени обезвоживания от проницаемости осадков толщиной 10-30мм при перепаде давлений:
a – 0,6 МПа, *б* – 0,8 МПа

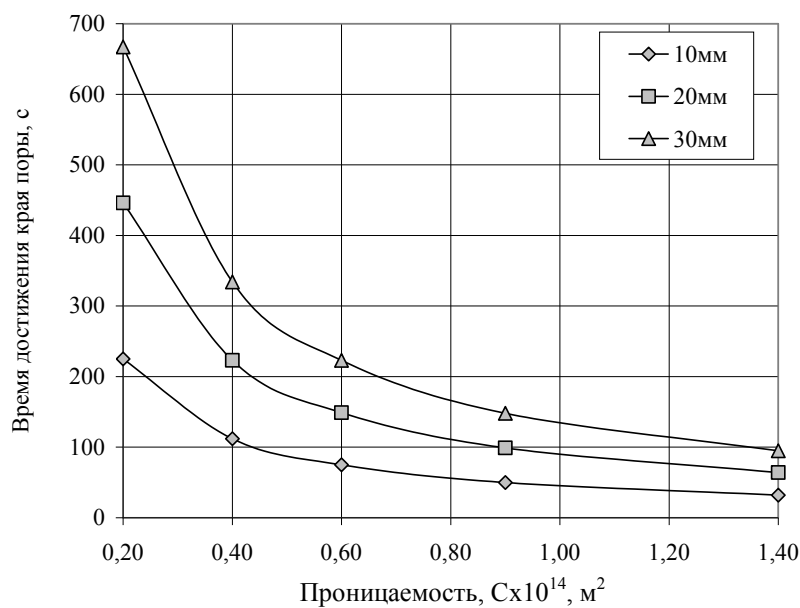


Рис. 2.15. Зависимость времени обезвоживания от проницаемости осадков толщиной 10-30мм при перепаде давлений 1 МПа

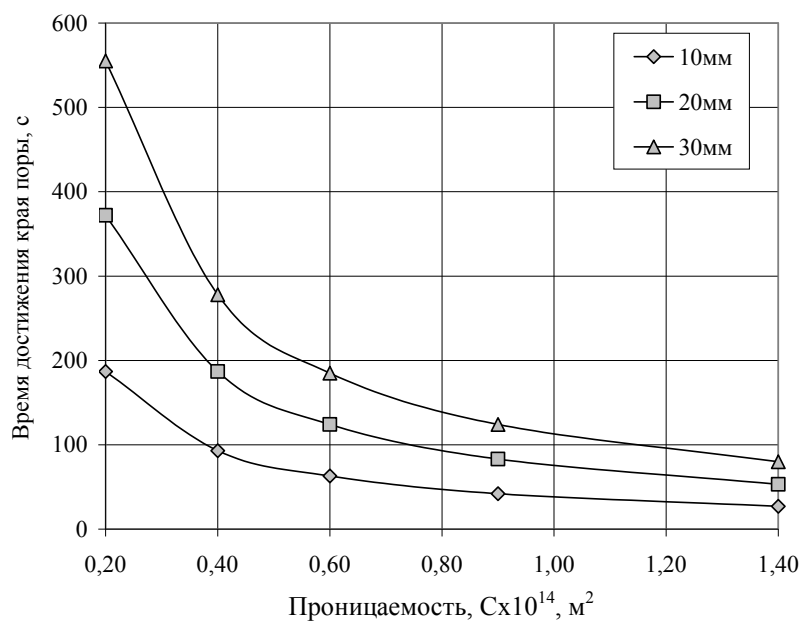


Рис. 2.16. Зависимость времени обезвоживания от проницаемости осадков толщиной 10-30мм при перепаде давлений 1,2 МПа

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что время достижения края поры снижается со 1110-375с до 158-53с в зависимости от толщины слоя осадка и его проницаемости при перепаде давления 0,6МПа.

Все рассмотренные осадки имеют низкую проницаемость, значения которой находятся в пределах $(0,2-1,4) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ (см. данные табл. 2.3). Тем не менее, высокий перепад давлений частично компенсирует этот недостаток, и зависимости времени достижения границей раздела фаз вода-воздух края поры имеют вид, аналогичный для осадков с более высокой проницаемостью.

На графиках также можно выделить участки, имеющие общий вид кривых: при проницаемости $(0,2-0,6) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ и $(0,8-1,4) \times 10^{-14} \text{ м}^2$. Таких участков два, в отличие от угольных осадков.

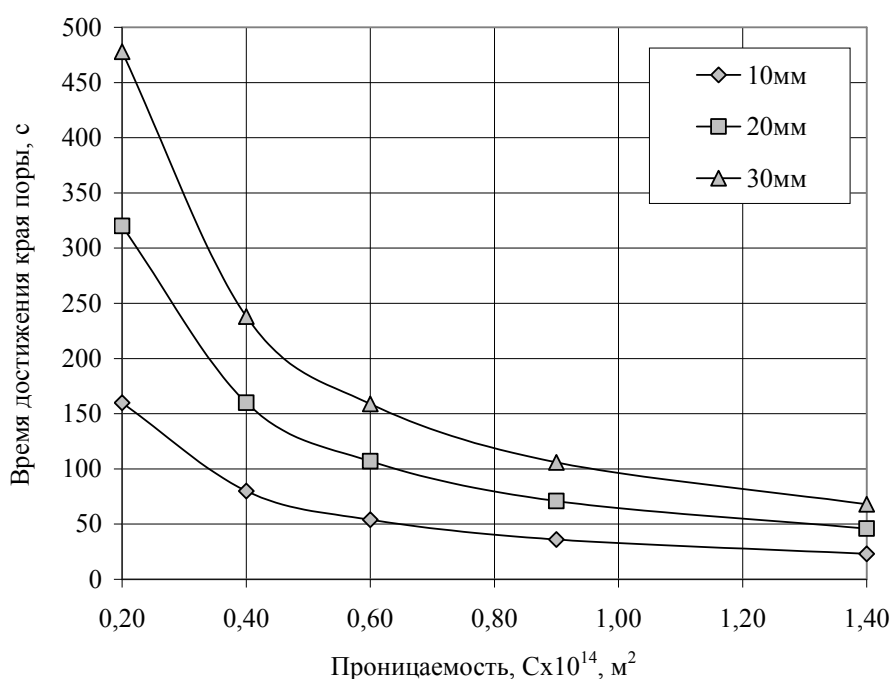


Рис. 2.17. Зависимость времени обезвоживания от проницаемости осадков толщиной 10-30мм при перепаде давлений 1,4 МПа

На первом участке при $C = (0,2-0,6) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ вид графика приближается к гиперболе, на втором при $C = (0,8-1,4) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ — к прямой линии. В целом максимальное время обезвоживания в зависимости от проницаемости породных осадков описывается степенной функцией, о чем свидетельствуют данные табл. 2.6.

В связи с тем, что степень при аргументе близка к единице, можно установить обратно пропорциональную гиперболическую связь между указанными параметрами с высокой степенью аппроксимации.

Таблица 2.6

Зависимость максимального времени обезвоживания от проницаемости породных осадков при различном перепаде давлений

Перепад давлений, МПа	Высота осадка, мм	Регрессионная зависимость	Параметр аппроксимации, R ²
0,6	10	$\tau = 74,5 C^{-1,005}$	0,9999
	20	$\tau = 148,5 C^{-1,002}$	0,9999
	30	$\tau = 221,8 C^{-1,001}$	0,9999
0,8	10	$\tau = 56,3 C^{-0,997}$	0,9999
	20	$\tau = 111,8 C^{-0,998}$	0,9999
	30	$\tau = 166,5 C^{-1,001}$	0,9999
1,0	10	$\tau = 44,9 C^{-1,001}$	0,9999
	20	$\tau = 89,4 C^{-0,998}$	0,9999
	30	$\tau = 133,3 C^{-1,002}$	0,9999
1,2	10	$\tau = 37,8 C^{-0,999}$	0,9999
	20	$\tau = 74,4 C^{-1,001}$	0,9999
	30	$\tau = 111,6 C^{-0,996}$	0,9999
1,4	10	$\tau = 32,3 C^{-0,995}$	0,9999
	20	$\tau = 64,2 C^{-0,998}$	0,9999
	30	$\tau = 95,3 C^{-1,002}$	0,9999

На рис. 2.18 представлена зависимость максимального времени обезвоживания от приложенного перепада давления при различной проницаемости осадка толщиной 10мм. Для осадков другой толщины графики имеют аналогичный вид (рис. 2.19, 2.20).

Анализ данных исследования позволил установить, что для осадков с низкой проницаемостью, содержащих тонкие илистые частицы, соблюдаются в целом полученные ранее закономерности зависимости максимального времени обезвоживания от проницаемости, перепада давлений и толщины осадка. Регрессионные зависимости связи времени и перепада давлений для осадков различной толщины и проницаемости представлены в таблице 2.7.

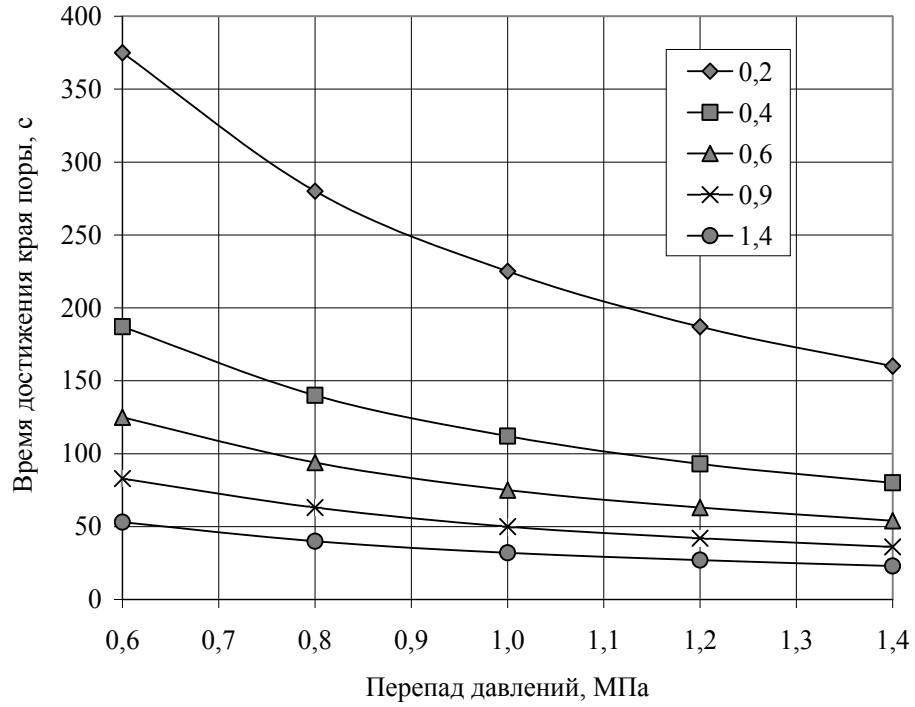


Рис. 2.18. Связь необходимого времени обезвоживания с перепадом давлений в зависимости от проницаемости при толщине осадка 10мм

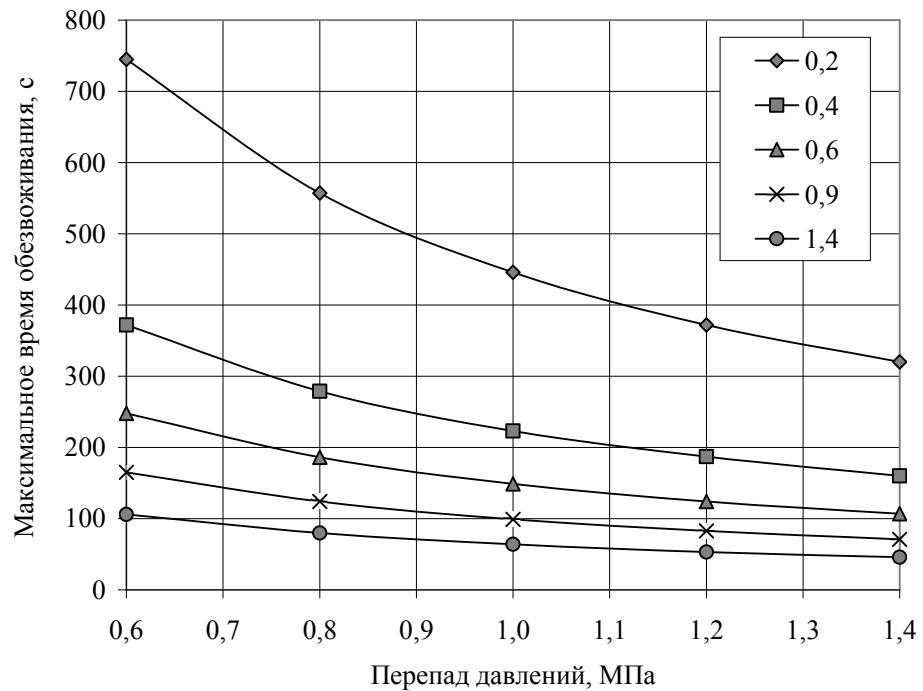


Рис. 2.19. Связь необходимого времени обезвоживания с перепадом давлений в зависимости от проницаемости при толщине осадка 20мм

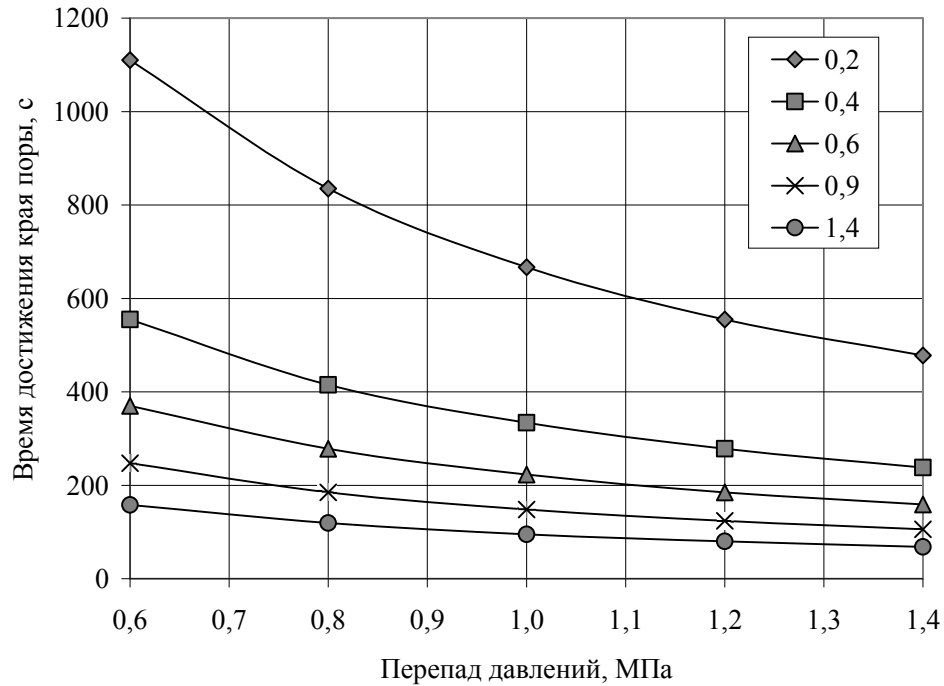


Рис. 2.20. Изменение необходимого времени обезвоживания осадков с различной проницаемостью в зависимости от перепада давлений при высоте осадка 30мм

Таблица 2.7

Зависимость времени обезвоживания осадков от перепада давлений

Высота осадка, мм	Проницаемость, $C \times 10^{14}, \text{ м}^2$	Регрессионная зависимость	Параметр аппроксимации, R^2
1	2	3	4
10	0,2	$\tau = 224,5 \Delta P^{-1,003}$	0,9999
	0,4	$\tau = 111,9 \Delta P^{-1,0037}$	0,9999
	0,6	$\tau = 75,3 \Delta P^{-0,9903}$	0,9999
	0,9	$\tau = 50,2 \Delta P^{-0,9883}$	0,9999
	1,4	$\tau = 32,1 \Delta P^{-0,9819}$	0,9999
20	0,2	$\tau = 446,6 \Delta P^{-0,9977}$	0,9999
	0,4	$\tau = 223,6 \Delta P^{-0,9944}$	0,9999
	0,6	$\tau = 149,1 \Delta P^{-0,9942}$	0,9999
	0,9	$\tau = 99,3 \Delta P^{-0,9944}$	0,9999
	1,4	$\tau = 63,9 \Delta P^{-0,9913}$	0,9998

Продолжение табл. 2.7

1	2	3	4
30	0,2	$\tau = 667,3 \Delta P^{-0,997}$	0,9999
	0,4	$\tau = 333,2 \Delta P^{-0,9971}$	0,9999
	0,6	$\tau = 222,4 \Delta P^{-0,998}$	0,9999
	0,9	$\tau = 148,3 \Delta P^{-0,9964}$	0,9999
	1,4	$\tau = 95,3 \Delta P^{-0,9916}$	0,9999

Данные табл. 2.7 свидетельствуют о гиперболической зависимости между временем и перепадом давлений. В принципе эта зависимость может подчиняться и линейному закону, однако параметр аппроксимации, имеющий достаточно высокое значение и находящийся в пределах 0,9376-0,9428, все-таки ниже, чем для степенной функции.

Из данных, приведенных на рис. 2.18-2.20 следует, что максимальное время обезвоживания, полученное в ходе аналитического исследования, снижается для тонких осадков (10мм) с 375 до 160с для осадков с наиболее низкой проницаемостью. Для осадков с большей проницаемостью, составляющей $1,4 \times 10^{-14} \text{ м}^2$, при увеличении перепада давлений с 0,6 до 1,4МПа необходимое время обезвоживания снижается с 53 до 23с, т.е. в два раза.

Для осадков, имеющих большую толщину, составляющую 30мм как в фильтр-прессах камерного типа, время обезвоживания при низкой проницаемости снижается при том же повышении перепада давлений со 1110с до 478с. Осадки с более высокой проницаемостью требуют для обезвоживания от 158с до 68с.

При увеличении перепада давлений разброс между значениями времени перемещения границы раздела фаз вода-воздух в поровом пространстве осадка снижается.

2.4. Исследование влияния проницаемости осадков на перемещение влаги в порах

Трудности, возникающие при обезвоживании тонкодисперсных осадков, связаны не только со свойствами твердой фазы, но и со специфическими свойствами, которые приобретает вода в тонких капиллярах [101, 102].

Одним из механических способов обезвоживания тонких осадков является фильтрование под действием избыточного давления в фильтр-прессах. При этом осадок находится под воздействием атмосферного давления со стороны фильтровальной ткани, а со стороны поступления суспензии – под избыточным давлением, создаваемым насосами.

Исследование сложных процессов перемещения влаги в осадках сопряжено с определенными трудностями. В связи с этим часто принимают определенные допущения и упрощения, в частности считают, что жидкость смачивает поверхность частиц; смачивающая жидкость перемещается в виде пленки, которая касается поверхности твердой фазы. В реальных условиях в поровой среде осадка протекают более сложные процессы. Это связано с тем, что часть влаги содержится капиллярными силами в тонких и в изолированных порах. Величина капиллярных сил зависит от кривизны поверхности разделения жидкой и воздушной фаз. Исследователи обычно представляют капиллярность как функцию фазового насыщения поровой среды. Эта функция не является однозначной, что вызывает трудности при ее использовании для конкретных расчетов.

Наибольшее распространение получила модель, которая изображает поровую среду как развитую сеть каналов и расширений [67]. Расширения представляют в виде шариков, а каналы - в виде цилиндров. Такую сеть можно считать неполным ориентированным мультиграфом [3]. При этом вершины графа соответствуют отдельным порам. Классификация пор по размерам относит поры диаметром более 0,1 мкм к макропорам, 0,01-0,1 мкм – к переходным, до 0,01 мкм (100 Å) - к ультрапорам. В свою очередь макропоры делятся на субмикропоры (от 0,1 до 1 мкм), микропоры (1-100 мкм) и видимые поры – более 100 мкм. В данном исследовании рассматриваются макропоры, основную часть которых составляют видимые поры в осадке.

Для анализа перемещения жидкой фазы принята единичная сквозная пора, расположенная в слое осадка. По длине поры выделено несколько участков под номерами 1-11. Схема расчетной модели приведена на рис. 2.21.

Участок 1 соответствует выходу из поры в атмосферу через слой фильтровальной ткани, следующие за ним участки постепенно

удаляются в сторону подачи суспензии под напором и последний участок №11 соответствует входу в пору.

Для рассмотрения процесса переноса влаги в поре с переменной проницаемостью принято известное дифференциальное уравнение переноса вещества в пористой среде, которое в общем случае имеет вид:

$$\frac{\partial [P(x, y, t)]}{\partial t} = \frac{\partial [Dx(x, y, t) * \partial P(x, y, t) / \partial x]}{\partial x} + \frac{\partial [Dy(x, y, t) * \partial P(x, y, t) / \partial y]}{\partial y} + ps(x, y, t). \quad (2.34)$$

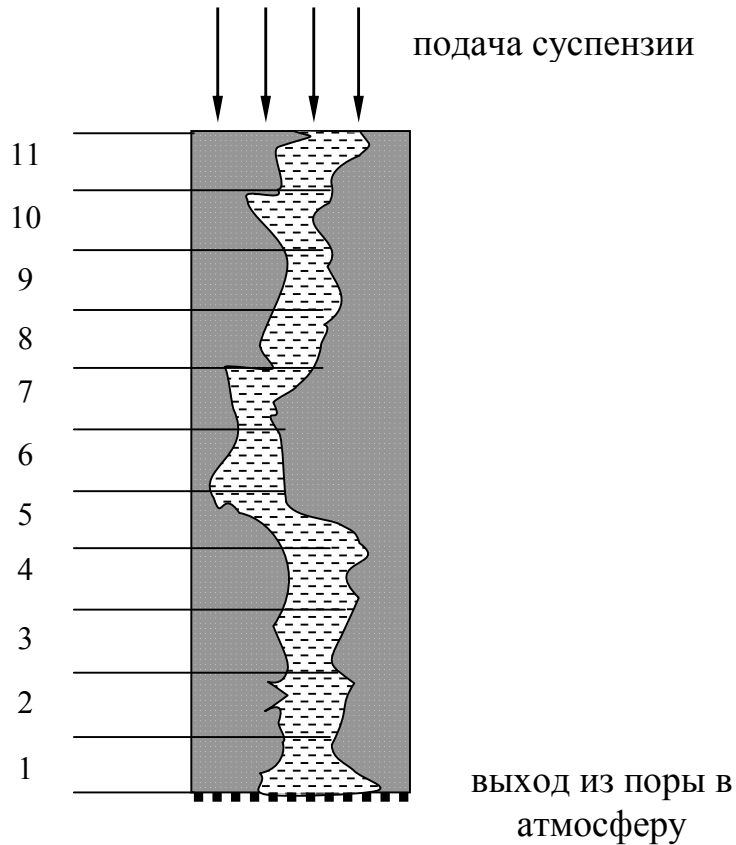


Рис. 2.21. Схема единичной поры в слое осадка

Здесь $P(x, y, t)$ – давление жидкости, находящееся в зависимости от координат пространства и времени;

$D_x(x,y,t)$ и $D_y(x,y,t)$ – коэффициенты диффузии, зависящие от координат пространства и времени;

$ps(x, y, t)$ – внешний источник давления.

Частным случаем данного уравнения является следующее:

$$\frac{D d^2 P}{dx^2} = \frac{dP}{dt}, \quad (2.35)$$

где D – диффузионный фактор.

Диффузионный фактор D связан с проницаемостью поровой среды осадка и определяется из соотношения:

$$D = \frac{CP}{m\mu}, \quad (2.36)$$

где C – проницаемость пористой среды осадка;

P – давление;

m – пористость осадка;

μ – вязкость жидкости.

Далее использованы подходы, более подробно изложенные в работах [90, 91]. Для исследования процесса удаления влаги из осадка в неустановившемся режиме методом конечных разностей найдено решение нестационарного дифференциального уравнения (2.35) потока жидкости сквозь поровую среду осадка, имеющего переменную проницаемость по толщине. При этом считается, что исходная суспензия, направляемая на обезвоживание может рассматриваться как жидкая текучая среда.

В связи с тем, что жидкость имеет конечную вязкость, давление на выходе из поры падает в течение некоторого времени по экспоненте. В аппаратах, применяемых для механического обезвоживания, скорость подачи пульпы обычно соответствует скорости удаления жидкости. Поэтому давление на входе в пору растет так же по экспоненте, но этот процесс происходит

медленнее, чем на выходе из поры. С течением времени давление на выходе падает до атмосферного давления в ходе фильтрации жидкости. Условно атмосферное давление принято за ноль.

Изменение давления на выходе из поры определялось по зависимости:

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{20}\right). \quad (2.37)$$

Изменение давления на входе в пору вычислено как:

$$P(t) = 0.5 + \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-t}{30}\right)}. \quad (2.38)$$

Толщина осадка принята равной 30мм, что соответствует условиям фильтрования в фильтр-прессах. Диффузионный фактор имел постоянное значение и определялся по зависимости [104]:

$$D(i) = \frac{0,1}{i^2}, \quad (2.39)$$

где i – номер участка в поре.

Результаты расчетов представлены графически на рис. 2.22.

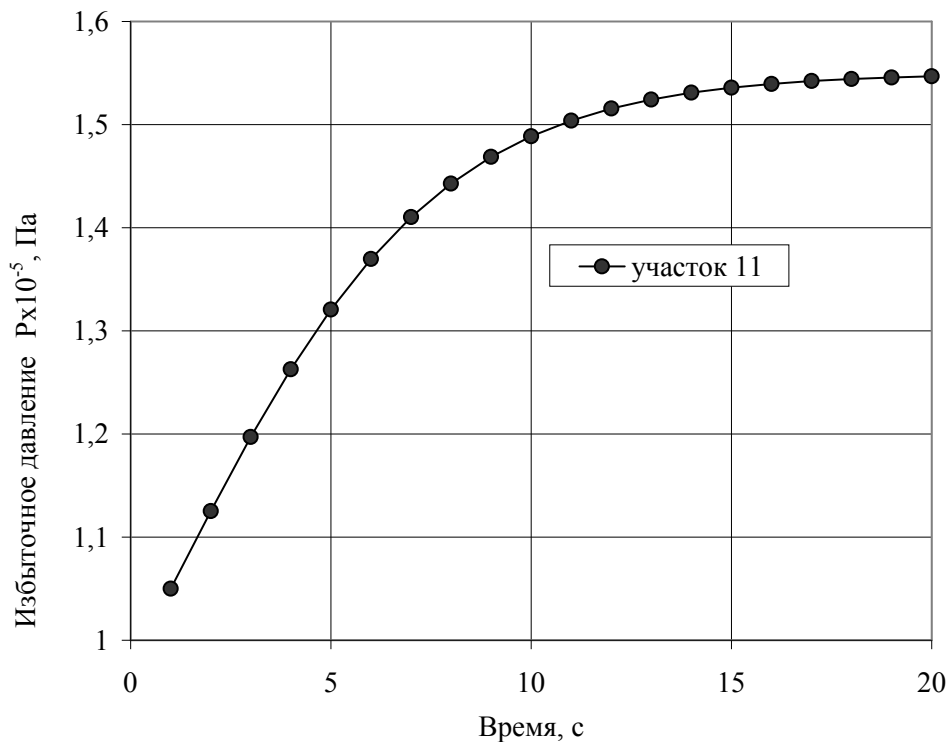


Рис. 2.22. Избыточное давление на входе в пору (участок 11)

Из графика рис. 2.22 следует, что на входе в пору давление постоянно растет за счет нагнетания суспензии.

На рис. 2.23-2.24 приведены графики изменения избыточного давления на участках, удаленных от входа в пору.

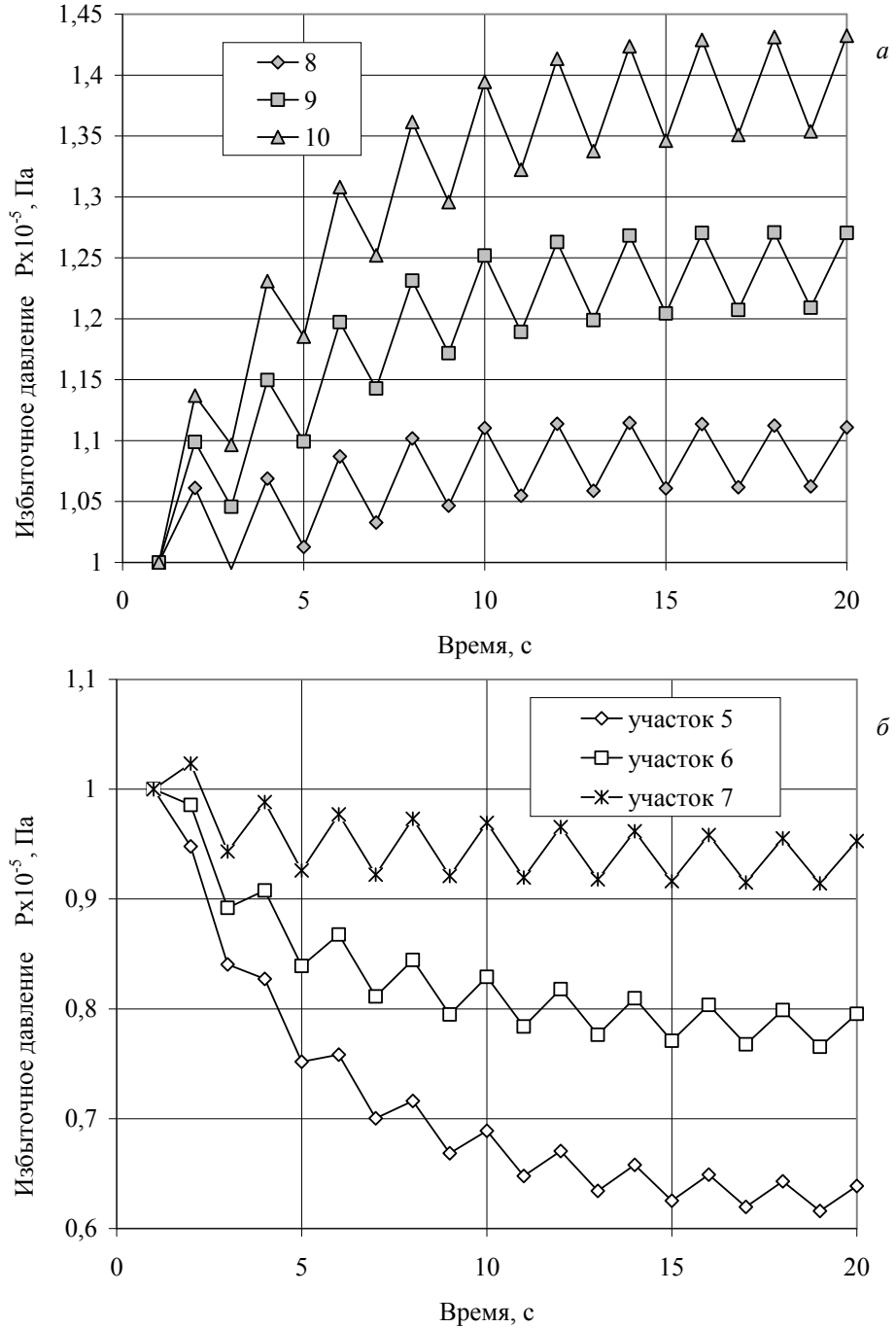


Рис. 2.23. Избыточное давление на разных участках поры:
 а – участки 8-10, б – участки 7-5

Данные позволяют заключить, что при высоком значении диффузионного фактора и проницаемости осадка, которые приняты для исследования, на участках 9 и 10 еще отмечается рост давления. То же относится и к участку 8. Все эти участки расположены ближе ко входу в пору. При этом имеют место колебания значений избыточного давления, хотя в целом давление на участках с течением времени продолжает увеличиваться. Отсюда следует вывод о возникновении в поре колебательных процессов [105] при высокой проницаемости осадка.

Из данных рис. 2.23, б видно, что на участках 5, 6 и 7, расположенных в средней части поры на равном удалении от входа (нагнетания суспензии) и выхода из поры (связь с атмосферой) продолжают развиваться колебательные процессы и избыточное давление в поре имеет переменные значения в течение небольших отрезков времени.

При этом на участке 7 избыточное давление еще увеличивается в начальный момент, затем происходит снижение его значения на общем фоне колебаний.

На рис 2.24 представлено падение избыточного давления на участках поры, расположенных ближе к выходу из нее.

Из данных рис. 2.24 следует, что на участке выхода 1 колебания давления отсутствуют, идет плавное его снижение до атмосферного, условно принятого за ноль. На соседнем с ним участке 2 колебания избыточного давления начинают развиваться постепенно с течением времени и являются незначительными. На участке 3 колебания выше и появляются довольно быстро – на четвертой секунде. На участке 4 амплитуда колебаний продолжает расти и колебания проявляются уже с самой первой секунды.

Из приведенных данных следует, что чем ближе расположен участок ко входу в пору, тем больше разница между соседними значениями избыточного давления. Сравнение разницы в соседних значениях избыточного давления на участках 1 (выхода из поры) и 11 (входа в пору) представлены на рис. 2.25, а для остальных участков – на рис. 2.26.

Из данных рис. 2.26 следует, что максимальная амплитуда колебаний давления характерна для участка 10, расположенного близко ко входу в пору. На соседнем с ним участке 9 амплитуда снижается и минимальная амплитуда колебаний давления имеет место на участке 2, расположенном близко к выходу из поры. В

целом колебания давления на различных участках поры стремятся к затуханию с течением времени.

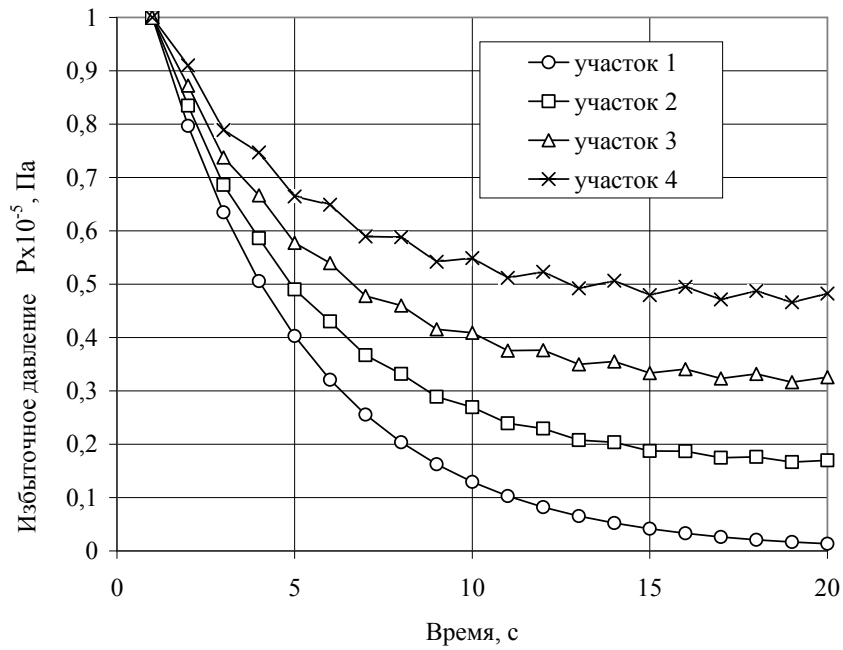


Рис. 2.24. Избыточное давление на разных участках, расположенных ближе к выходу из поры

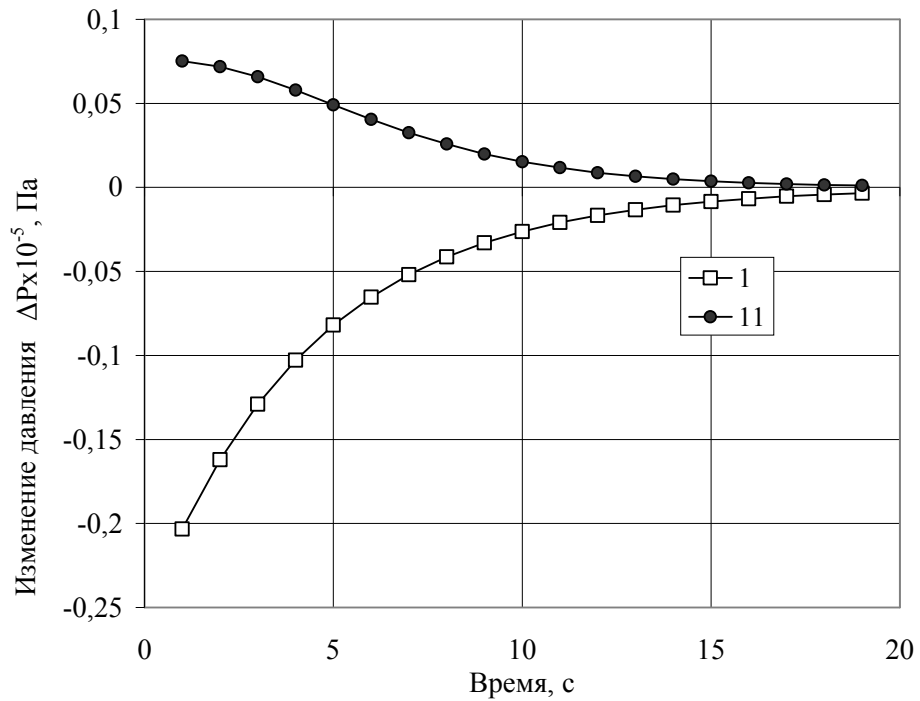


Рис. 2.25. Разница в избыточном давлении на входе в пору (участок 11) и на выходе из нее (участок 1)

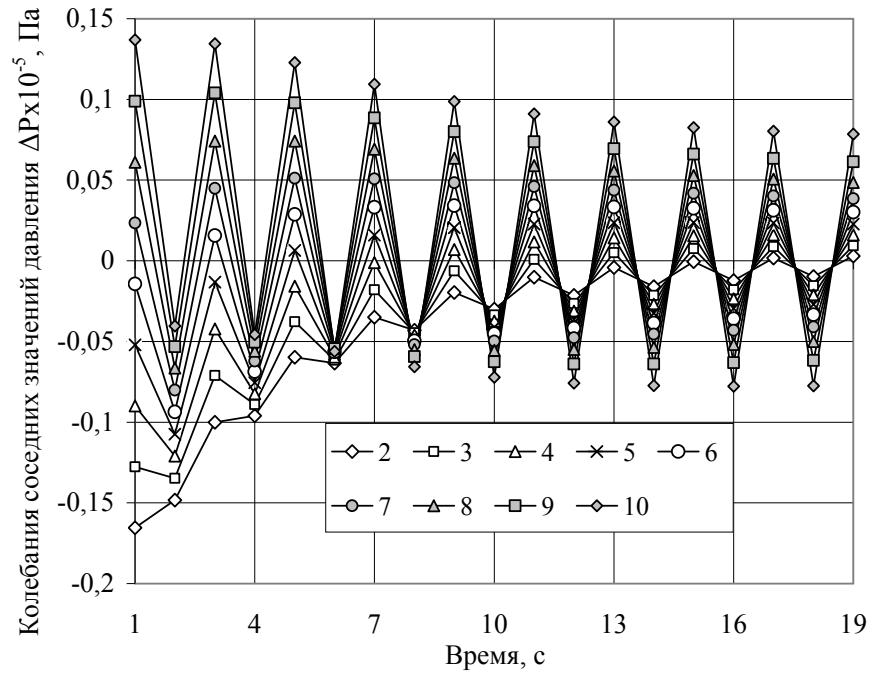


Рис. 2.26. Колесания соседних значений давления по длине поры

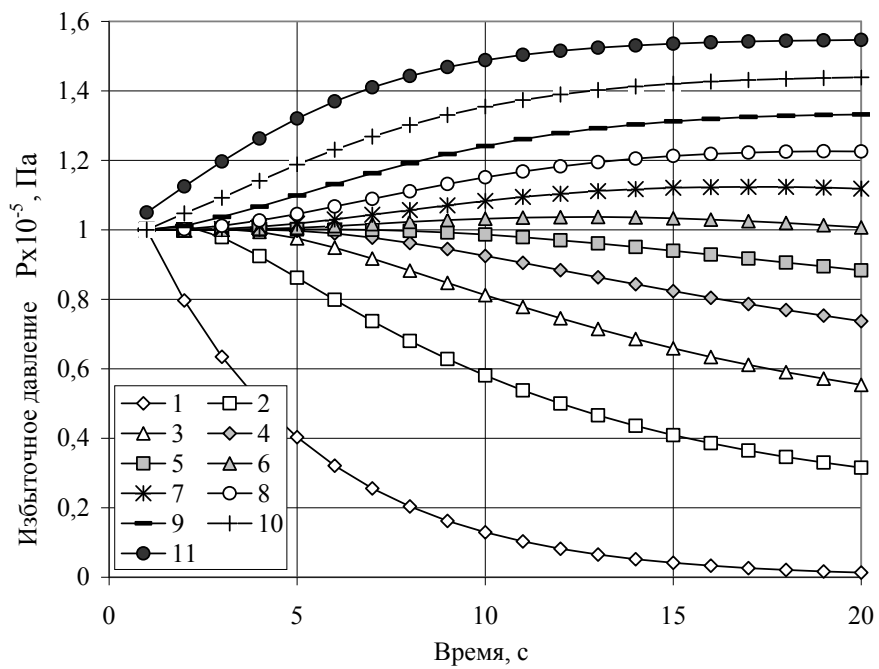


Рис. 2.27. Избыточное давление в поре для осадков с низкой проницаемостью

Обнаруженное изменение избыточного давления по длине поры при высокой проницаемости осадка еще раз подчеркивают сложность протекающих в поре процессов даже при принятых упрощениях.

Осадки с низкой проницаемостью имеют минимальное значение диффузионного фактора, который определялся по линейной зависимости:

$$D = i \cdot 10^{-7} . \quad (2.40)$$

На рис. 2.27 показаны результаты расчетов при минимальном значении диффузионного фактора для осадков с низкой проницаемостью.

Данные рис. 2.27 позволяют прийти к заключению, что от входа в пору, где происходит нагнетание суспензии, до середины поры давление продолжает повышаться, но менее интенсивно. На участке б еще наблюдается некоторое небольшое повышение давления, исчезающее с течением времени. Для участков, расположенных в средней части поры, характерно падение напора, которое продолжается до выхода из поры в атмосферу. Таким образом, потери напора проявляются неоднозначно по длине поры и с течением времени. Изменение избыточного давления в поре при низкой проницаемости осадков имеет монотонный характер.

Таким образом, выполненные аналитические исследования перемещения границы раздела фаз вода-воздух в пористой среде осадка с применением модельных решений привело к установлению следующих основных закономерностей:

- анализ уравнения переноса вещества в пористой среде для случая тонкодисперсных осадков позволил получить зависимость для определения положения границы раздела фаз в поре осадка, которая имеет вид:

$$h_B = \frac{-6 K_2 K_3 h}{\Delta P + 6 K_2 (K - K_3)} + \sqrt{\left[\frac{6 K_2 K_3 h}{\Delta P + 6 K_2 (K - K_3)} \right]^2 + \frac{12 K_2 \Delta P \tau}{\Delta P + 6 K_2 (K - K_3)}} .$$

- на основании результатов экспериментальных исследований получены такие основные гидродинамические характеристики различных осадков, как проницаемость и коэффициент

фильтрации, которые были использованы при анализе уравнения, определяющего положение границы раздела фаз в порах осадка;

- в ходе анализа данного уравнения определено максимальное время, необходимое для обезвоживания тонкодисперсных осадков с различной проницаемостью;

- установлено, что для осадков с высокой проницаемостью время достижения края поры границей раздела фаз невелико и практически линейно зависит от приложенного перепада давлений, что особенно ярко проявляется для осадков небольшой толщины;

- получены регрессионные зависимости необходимого времени обезвоживания от проницаемости осадков, перепада давлений и толщины осадков, имеющие вид гиперболы;

- установлено, что для угольных осадков низкой и средней проницаемости характерна линейная зависимость между влажностью осадка и временем, необходимым для достижения границей раздела вода-воздух края поры, принятым за максимальное время обезвоживания; для осадков высокой проницаемости $C = (32,4-55,3) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ зависимость между влажностью осадка и максимальным временем обезвоживания имеет вид полинома второй степени;

- высокозольные осадки имеют низкую проницаемость, значения которой находятся в пределах $(0,2-1,4) \times 10^{-14} \text{ м}^2$; значительный перепад давлений, применяемый в фильтр-прессах, частично компенсирует этот недостаток, и зависимости времени достижения границей раздела фаз вода-воздух края поры имеют вид, аналогичный для угольных осадков с более высокой проницаемостью;

- на графиках, иллюстрирующих результаты исследований, можно выделить два участка, имеющих общий вид кривых: при проницаемости $(0,2-0,6) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ и $(0,8-1,4) \times 10^{-14} \text{ м}^2$; на первом участке при $C = (0,2-0,6) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ вид графика приближается к гиперболе, на втором при $C = (0,8-1,4) \times 10^{-14} \text{ м}^2$ – к прямой линии;

- в целом максимальное время обезвоживания в зависимости от проницаемости породных осадков описывается степенной функцией; в связи с тем, что степень при аргументе близка к единице, можно установить обратно пропорциональную гиперболическую связь между указанными параметрами с высокой степенью точности аппроксимации;

- получены регрессионные зависимости времени обезвоживания осадков от перепада давлений, имеющие вид гиперболы;

- для осадков с высокой проницаемостью характерно наличие колебаний избыточного давления по длине поры, которые развиваются постепенно с течением времени; максимальная амплитуда колебаний давления характерна для участков, расположенных близко ко входу в пору, а на участках, находящихся близко к выходу из поры, амплитуда колебаний избыточного давления наиболее низкая;

- в целом колебания давления на различных участках поры стремятся к затуханию с течением времени, избыточное давление изменяется в пределах $(1-1,45) \cdot 10^5$ Па и $(0,6-1) \cdot 10^5$ Па, в результате чего потери напора проявляются неоднозначно по длине поры и с течением времени;

- изменение избыточного давления в поре при низкой проницаемости осадков имеет монотонный характер.

Раздел 3. Имитационное моделирование изменения поровой структуры осадков при механическом воздействии

Повышение эффективности обезвоживания тонкодисперсных осадков достигается за счет увеличения скорости удаления жидкости, снижения конечной влажности материала и производственных площадей, занимаемых оборудованием, на котором выполняется обезвоживание, повышения производительности аппаратов, уменьшения их стоимости и в целом затрат на процесс [98]. Многими исследованиями, которые проводились ранее и продолжают выполняться и в настоящее время, установлены направления совершенствования механического обезвоживания путем добавления к пульпе поверхностно-активных веществ, прогрева осадка паром, продувания сжатым воздухом, добавкой специальных присадок, механического воздействия на осадок и другими методами [99-121].

В ходе исследований установлено, что наименее расходным по денежным средствам является приложение к поровой среде осадка механического воздействия различного вида [93, 96, 104, 111]. В основном наиболее эффективно использование вибрации и сдвиговых деформаций. Ниже приведены результаты, направленные на дальнейшее изучение изменения состояния осадков при возникновении сдвиговых деформаций и развитие представлений о процессах, происходящих в поровой среде осадка на микроуровне.

3.1. Методика имитационного моделирования изменения поровой структуры осадков на микроуровне

Для исследования сложных процессов, происходящих в порах осадка при протекании жидкости в них, используют не только аналитические методы. В современных условиях с бурным развитием компьютерных технологий появилась возможность широко применять численные методы моделирования, которые позволяют более детально изучать многие явления. Один из таких методов использован в данной работе.

В соответствии с разработанной методикой [32] частицы в осадке представляются в виде сферических элементов, которые

взаимодействуют друг с другом. В основу численного моделирования положены базовые разработки, опубликованные в работе [124]. Данная модель многократно опробована и подтверждено, что получаемые в результате данные соответствуют реальным процессам, происходящим при взаимодействии фаз в различных способах их разделения [77, 113-117, 125-128].

Основной элемент модели – взаимодействие двух дискретных частиц – показан на рис. 3.1.

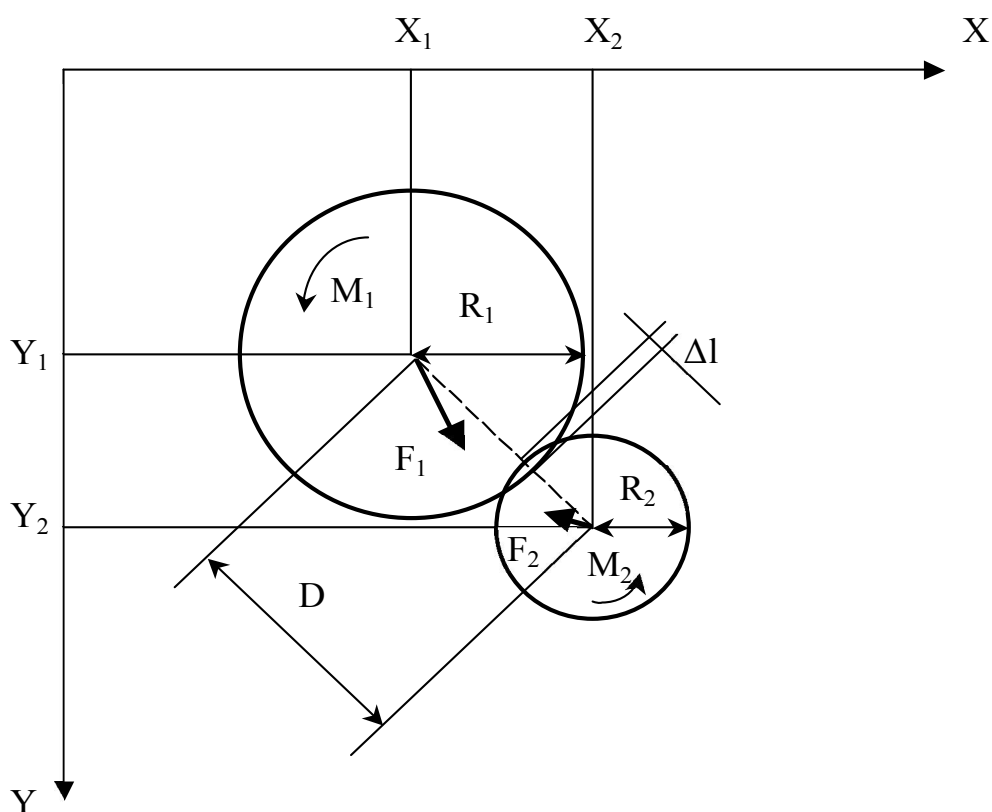


Рис. 3.1. Базовая схема взаимодействия двух элементов

Работа компьютерной программы основана на законах механики и теории упругости.

Использованы второй и третий законы Ньютона и закон Гука. Достоверность результатов моделирования обеспечивается соблюдением динамического, кинетического и геометрического подобия.

Для выполнения динамического подобия используется масштаб, соответствующий подобию сил, скоростей и ускорений, имеющих место в природе и в модели. Подобие траекторий

движения обеспечивает кинетическое подобие, что достигается постоянным соотношением между скоростями и ускорениями взаимодействующих элементов в модели и натуре. Кроме того, поддерживается масштаб по времени при выполнении итераций и начальное состояние системы и направление протекания процессов в модели соответствуют таким же в натуре.

Для выполнения условия геометрического подобия приняты определенные соотношения для размеров частиц природы и модели.

В ходе взаимодействия элементов учитываются свойства каждого элемента: размеры в определенном масштабе и плотность вещества. Это дает возможность исследовать взаимодействие и движение различных фаз. Фазы могут перемещаться независимо одна от другой или взаимодействовать при касании или прижатии.

Для задания размеров элементов вводятся значения их радиусов R_1 и R_2 в определенном масштабе. В исходном файле задаются следующие параметры: начальная скорость элемента в горизонтальном и вертикальном направлении (вдоль осей X и Y), начальная скорость вращения, соответствующие этим скоростям приращения (ускорения). Кроме того, вводится целый ряд коэффициентов, которые отражают свойства среды и элементов: коэффициенты трения качения и скольжения, вязкостного сопротивления (внешнего для среды и внутреннего), сопротивления кручению (внешнего и внутреннего), касательной и нормальной жесткости, жесткости на изгиб. Исследователь вводит определенные параметры, позволяющие установить режим контакта элементов, режим адгезии и расстояние, на котором адгезионное взаимодействие способствует образованию комплексов элементов. Каждому элементу в программе присваивается порядковый номер, который облегчает затем обработку полученных в результате итераций и расчетов данных о перемещении центра тяжести элемента и углах поворота его радиуса.

Заданные начальные условия приводят с течением времени к возникновению сил F_1 и F_2 , вызывающих перемещение частиц в пространстве, их столкновение и взаимодействие в прямоугольной системе координат X - Y . Столкновение частиц приводит в соответствии с законом Ньютона к проявлению действия моментов M_1 и M_2 и к вращению элементов.

Особенностью модели является нехарактерное расположение оси ординат Y . Это связано с тем, что первоначально модель была разработана для исследования перемещения массивов пород в горном деле при ведении добычных подземных работ.

В соответствии с законом всемирного тяготения каждому элементу присуще постоянно действующее в вертикальном направлении ускорение силы тяжести g – ускорение свободного падения. При столкновениях элементов возникает момент движения, который приводит к увеличению скорости или ее уменьшению, что приводит к торможению частиц.

На каждый из элементов действуют соответствующие силы: сила тяжести; сила Архимеда; сопротивление среды, в которой происходит движение; силы, возникающие при взаимодействии элементов.

В ходе имитационного моделирования циклически выполняется перебор параметров всех элементов в последовательности увеличения их порядкового номера, присвоенного в файле исходных данных. При выполнении одной итерации, длительность которой по отношению к реальному времени также задается в исходном файле и соответствует одному циклу работы программы, параметры перемещения элементов – силы, скорости и ускорения – остаются постоянными. В следующий момент времени при переходе от итерации к итерации эти параметры пересчитываются в программе и соответственно на этой базе определяются координаты центра тяжести (X и Y) для каждого элемента. Изменение этих координат и последующее изменение положения центра тяжести элемента происходит в дискретные периоды времени (циклы счета).

Изменение скорости в горизонтальном направлении вдоль оси X зависит от массы взаимодействующих элементов и величины возникающей при этом силы. Изменение вертикальной составляющей скорости каждого элемента ΔV_Y на определенном цикле работы рассчитывается по известной зависимости:

$$\Delta V_Y = g \Delta t, \quad (3.1)$$

где Δt – приращение времени за один цикл расчета, с.

После вычисления изменения скоростей элементов в программе производится расчет новых координат центров тяжести

для каждого элемента и перемещение на новую позицию по соотношениям:

$$X_{i+1} = X_i + \Delta V_X \Delta t, \quad (3.2)$$

$$Y_{i+1} = Y_i + \Delta V_Y \Delta t, \quad (3.3)$$

где X_i, Y_i – координаты центра тяжести элемента на предыдущем цикле счета,

X_{i+1}, Y_{i+1} – координаты центра тяжести элемента на последующем цикле счета (новые)

ΔV_X – приращение скорости элемента в направлении оси X ,

ΔV_Y – приращение скорости элемента в направлении оси Y .

После этого программой выполняется проверка наличия взаимодействия элементов. Для этого производится определение расстояния D между их центрами тяжести и возможного перекрытия границ элементов при взаимодействии Δl . При наличии такого перекрытия границ элементов (нахлестки) рассчитываются значения действующих на элементы сил в вертикальном и горизонтальном направлениях по соотношению:

$$\Delta F = K \Delta l. \quad (3.4)$$

Здесь ΔF – приращение действующей на каждый элемент силы,

K – коэффициент жесткости элемента,

Δl – перекрытие поверхности элементов при взаимодействии.

После вычисления сил определяются их моменты, в результате действия которых возникает поворот элементов на определенный угол. Далее элементы перемещаются на новые позиции в соответствии с полученными действующими на них силами. Все операции расчета циклически повторяются.

Кроме того, выполняется проверка на адгезионное объединение соседних элементов в агрегат, состоящий из нескольких частиц. Для этого задается критическое расстояние между частицами. Если сближение расположенных близко друг от друга частиц превышает это расстояние, то имеет место

образование комплекса частиц. Алгоритм расчета предполагает такое объединение частиц, для чего вводится предел прочности такого комплекса на разрыв.

В исходных данных вводятся критические пределы прочности на сдвиг L_s , изгиб L_b и нормальное сжатие L_t . Рассчитанные величины сил сравниваются с этими пределами и в случае их превышения образовавшиеся комплексы из элементов разрушаются и рассматриваются далее как отдельные несвязанные элементы.

В реальных условиях взаимодействие элементов имеет инерционность, обусловленную сопротивлением среды, рассеянием (диссипацией) энергии при изменении позиции элемента. Эти сложные факторы взаимодействия учитываются в программе коэффициентами трения, жесткости, сопротивления среды и др. Коэффициент внутреннего сопротивления является коэффициентом необратимости процесса, зависит от потерь энергии и определяется взаимодействием элементов.

Для учета действия силы трения введены коэффициенты трения качения и трения скольжения и соотношения (3.1) и (3.4) приходят к виду:

$$\Delta V_Y = g \Delta t - K_V V_Y ; \quad (3.5)$$

$$\Delta F = K \Delta l - K_T F . \quad (3.6)$$

Здесь K_V – коэффициент демпфирования, учитывающий сопротивление сред

V_Y – вертикальная составляющая скорости элемента;

K_F – коэффициент внутреннего сопротивления, обусловленного взаимодействием элементов;

K_T – коэффициент трения;

F – равнодействующая сил, приложенных к элементу.

Результаты расчетов выводятся на экран монитора в виде анимаций, что соответствует положению и взаимодействию отдельных элементов в определенные моменты времени. Кроме этого дополнительная информация представляется в виде цифровых и текстовых файлов. В этих файлах для каждого элемента выводятся координаты центров тяжести, углы поворота радиусов и их приращения с течением времени (итераций).

Для успешной работы программы пользователь создает файл исходных данных по определенным правилам, после чего программа запускается на счет в соответствии с заданным количеством итераций. Файлы полученных результатов анализируются с помощью электронных таблиц. Длительность выполнения расчетов и получение итоговых файлов зависит от количества итераций и взаимодействующих элементов.

С помощью численных методов, использованных в данной модели, имеется возможность имитации и исследования поведения элементов в динамике на микроуровне и влияния различных технологических параметров на физические процессы, происходящие при обогащении и разделении взаимодействующих фаз.

Для исследования поведения многих сложных систем, к которым относятся и тонкодисперсные осадки, используют идеализированные среды в виде частиц правильной формы, обычно сферической. В этом случае упрощение и формализация позволяют получать обобщенные параметры, характерные для различных условий. В данной работе также использовались аналогичные подходы.

3.2. Исследование свойств осадков как идеализированной среды

Предыдущими исследованиями установлено, что свойства порового пространства осадков и их фильтрационные свойства зависят не только от гранулометрического состава твердой фазы, но и от расположения частиц друг относительно друга [27, 32, 57, 90, 95].

Для характеристики поровой среды осадков используют такие понятия как пористость и коэффициент пористости. Пористость определяется как отношение объема пор к объему зернистой среды по соотношению:

$$m = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad (3.7)$$

где V_1 и V_2 – объем, занимаемый зернистой средой, и объем твердых частиц, соответственно.

В механике зернистых сред для характеристики свободного объема пористой среды используют понятие коэффициента пористости ε . Этот параметр определяют как отношение объема пор к объему твердых частиц [129, 130]:

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_2}{V_2}. \quad (3.8)$$

Автор работы [99] приходит к выводу о том, что для угольных смесей максимальная пористость не зависит от крупности и имеет значение 0,46.

Смесью с минимальной пористостью будет смесь, состоящая из двух видов разноразмерных частиц, в которой будут самые крупные частицы одного размера и мелкие частицы другого размера. При этом суммарный объем мелких частиц должен быть равен объему пор в осадке, образованном одними крупными частицами. Считается, что для угольных сред минимальная пористость составляет 0,26, для песка – 0,12. Если смешивать частицы угля с речным песком, то в таком осадке пористость будет находиться в интервале между минимальными пористостями смешиваемых материалов и зависеть от их долевого участия в смеси [132].

Пористость зернистых сред зависит также от способа укладки частиц в такой среде. Крайними случаями укладки являются кубическая (ортогональная) и гексагональная.

В первом случае частицы располагаются строго по вертикальным и горизонтальным рядам. Линии, соединяющие центры тяжести элементов, расположены под прямым углом друг к другу. Такая укладка одноразмерных сферических частиц обеспечивает максимальную пористость и наибольший размер каналов между частицами.

При гексагональной укладке каждый ряд сферических элементов смещается относительно предыдущего так, что элементы занимают углубления между соседними элементами нижнего или верхнего ряда. В таком случае линии, соединяющие центры тяжести элементов, располагаются под углом 60° друг к другу. Пористость и размер каналов между частицами при таком расположении одноразмерных сферических элементов минимальны.

Соответственно, если между сферическими крупными элементами расположить более мелкие, пористость такой среды уменьшится.

Для исследования изменения свойств осадков при механическом воздействии на частицы были рассмотрены различные варианты их упаковки с помощью описанной в п. 3.1 имитационной компьютерной модели.

На рис. 3.2 представлено исходное состояние осадка, состоящего из одноразмерных частиц с кубической упаковкой с неполным верхним рядом частиц.

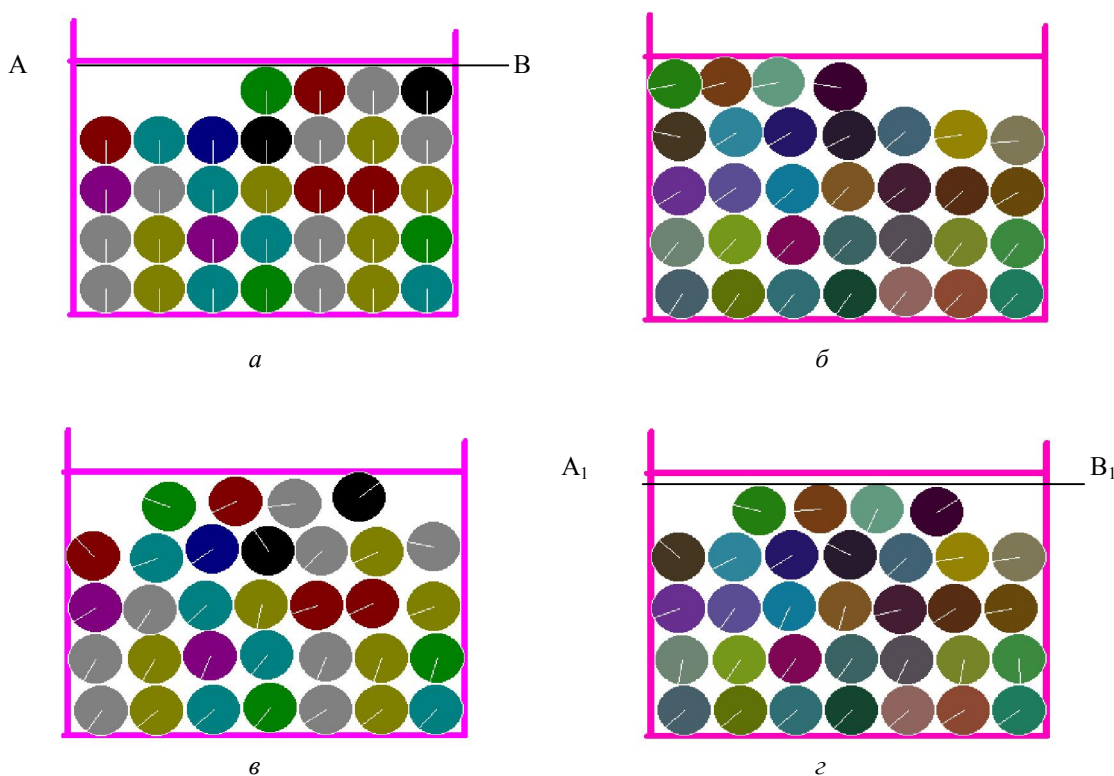


Рис. 3.2. Изменение состояния одноразмерного осадка при механическом воздействии с течением времени: *a* – исходное состояние, *б* – 2,4с, *в* – 7с, *г* – конечное состояние через 14с

Частицы находятся в замкнутом сосуде, при перемещении их верхнего ряда происходит изменение расположения всех частиц и порового пространства осадка с течением времени. Следует подчеркнуть, что во всех имитационных экспериментах сохраняются одни и те же исходные параметры элементов.

Механическое воздействие задается определенной скоростью в горизонтальном направлении для элементов верхнего ряда,

остальные элементы в начальных условиях неподвижны, их дальнейшее перемещение и вращение возникает только после механического взаимодействия с элементами верхнего ряда.

При обработке анимаций выдерживается один и тот же масштаб, анимации скопированы с экрана монитора с шагом через задаваемое количество итераций (циклов счета), которое соответствует натуральному времени.

Перемещение верхнего ряда вправо вызывает вращение и взаимодействие всех элементов, что видно по изменению угла поворота радиусов частиц. В момент времени t частицы верхнего ряда наталкиваются на левую стенку сосуда и в результате взаимодействия с ней начинают смещаться вправо (см. момент t на рис. 3.2).

Это движение тормозится средой и другими частицами, и в итоге конечное состояние осадка соответствует окончанию расчета в момент времени t_1 .

В механике горных пород такие осадки с кубическим (ортогональным) расположением частиц рассматриваются как недоконсолидированные, т.е. неуплотненные. На анимациях видно, что в результате перемещений происходит некоторое уплотнение осадка, т.к. между крышкой и осадком увеличивается зазор при сохранении в целом кубического расположения частиц (сравн. положение линий АВ и A_1B_1).

Анализ цифровых файлов позволил получить значение этого уплотнения.

При полном заполнении сосуда получен осадок, представленный на рис. 3.3.

Из полученных анимаций следует, что и при отсутствии возможности относительно свободного перемещения частиц осадка в сосуде происходит взаимодействие элементов, вызванное стремлением частиц верхнего ряда сместиться вправо. В результате этого возникает перестройка расположения частиц за счет их поворота и изменение порового пространства осадка с некоторым его уплотнением, о чем свидетельствует изменение положения линии АВ на A_1B_1 с образованием зазора между верхним рядом и крышкой сосуда. Анализ цифровых файлов позволил получить значение этого уплотнения, находящееся в пределах 1,99-3,7 относительных единиц.

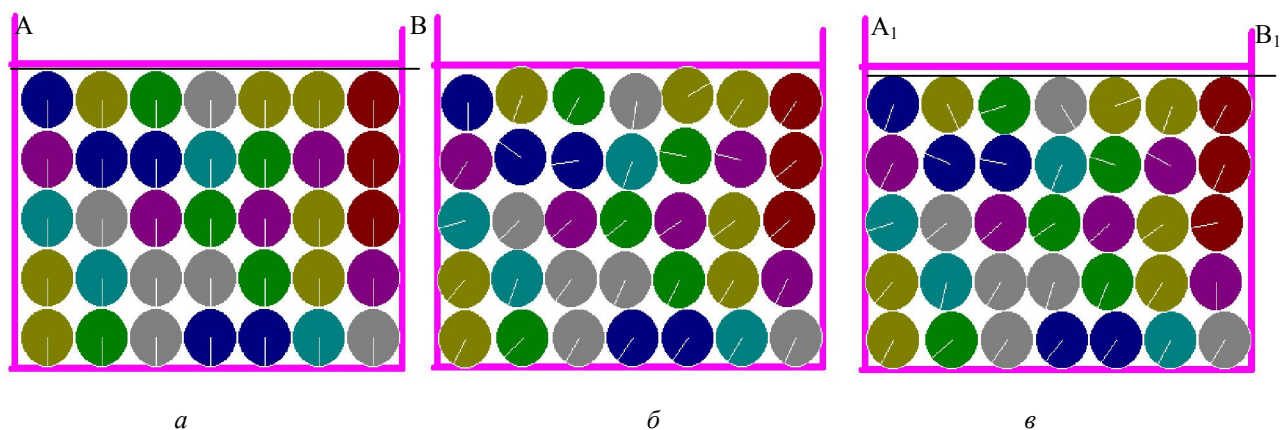


Рис. 3.3. Изменение состояния одноразмерного осадка, полностью заполняющего сосуд, при механическом воздействии: *a* – исходное состояние, *б* – 7с, *в* – конечное состояние через 14с

На рис. 3.4 представлен разноразмерный осадок с кубической упаковкой частиц, к которому так же было приложено механическое воздействие.

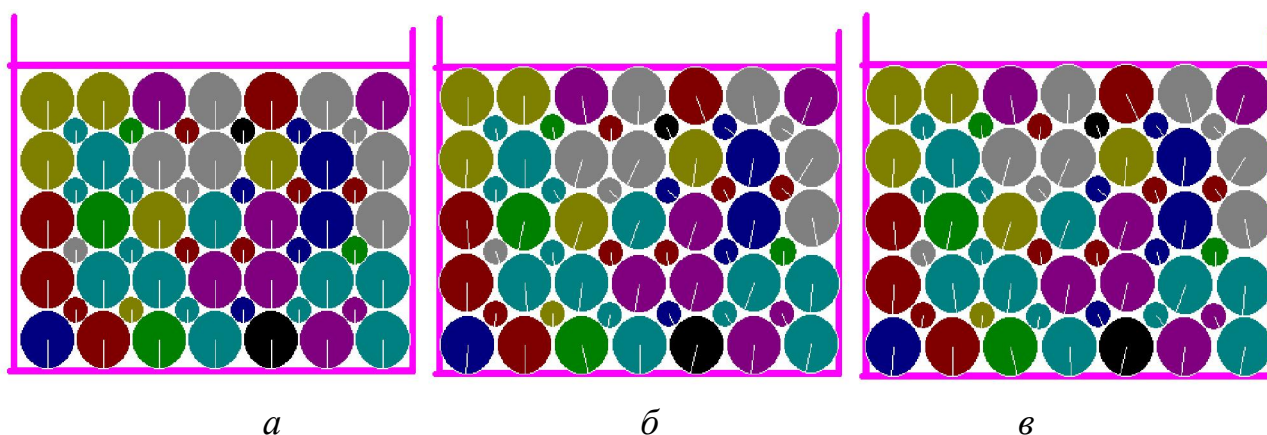


Рис. 3.4. Изменение состояния разноразмерного осадка при механическом воздействии с течением времени: *a* – исходное состояние, *б* – 7с, *в* – 14с

Такой осадок имеет низкую пористость из-за заполнения промежутков между крупными частицами более мелкими.

Каналы между частицами имеют меньший размер. Пористость такого осадка практически не увеличивается при механическом воздействии, хотя зрительно остается впечатление о некотором увеличении промежутков между частицами. Оценка изменения состояния осадков при различных способах упаковки в цифровом значении приведена ниже.

На рис. 3.5 показан осадок, состоящий из одноразмерных частиц, расположенных в соответствии с гексагональной упаковкой. Исходные условия имитационного исследования

оставлены теми же, как и в случае кубической упаковки частиц. За счет более плотного расположения элементов занимаемый ими объем уменьшился, и крышка сосуда была придвинута так, чтобы прижать осадок.

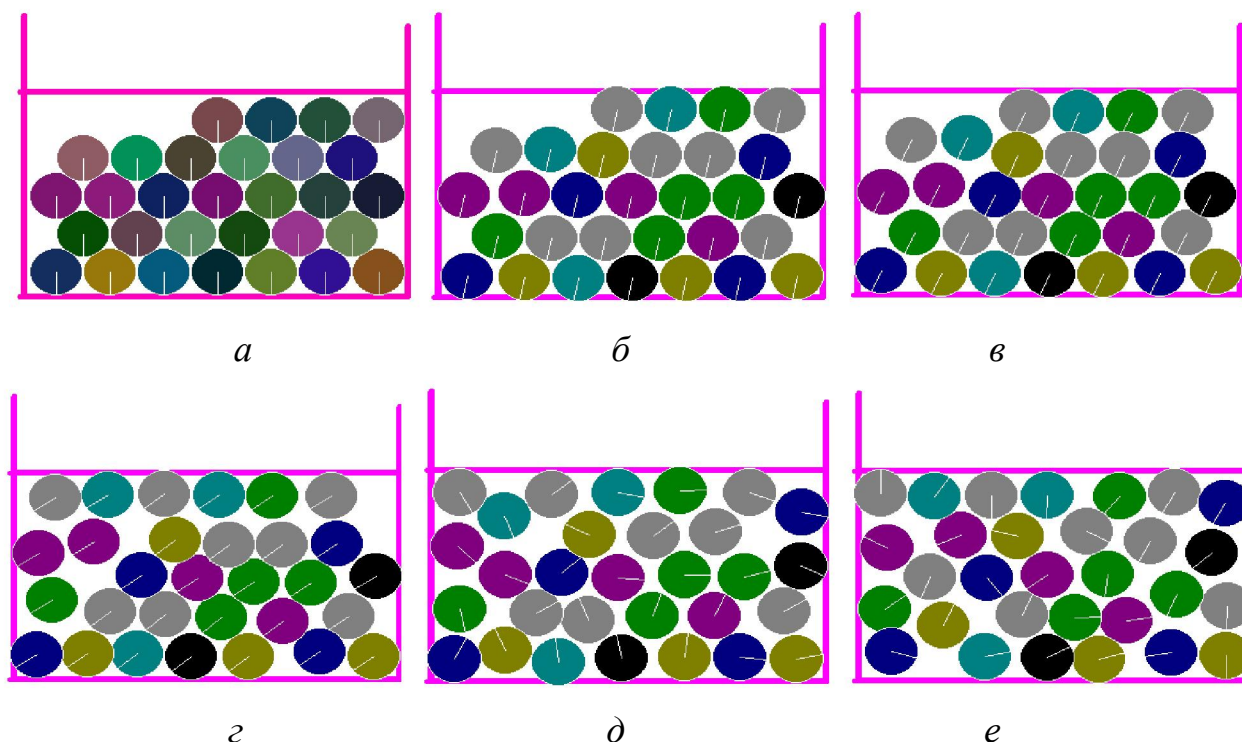


Рис. 3.5. Изменение состояния одномерного осадка с гексагональной упаковкой частиц при механическом воздействии с течением времени:

a – исходное состояние, *b* – $0,2c$, *в* – $0,6c$, *г* – $1c$,
д – $7c$, *e* – конечное состояние через $14c$

Из данных анимаций следует, что при перемещении верхнего ряда частиц в начальный момент времени ($0,2c$ на рис. 3.5) влево элементы переходят из гексагонального положения в положение, соответствующее кубическому расположению относительно частиц следующего нижнего ряда. И такое расположение сохраняется в течение длительного времени (см. рис. 3.5 *в, г*).

Когда количество итераций равняется половине заданного (момент времени *д* на рис. 3.5), частицы в осадке располагаются хаотически друг относительно друга в результате их взаимодействий. На последней итерации, которая соответствует $14c$ времени, осадок сохраняет хаотичное расположение частиц с образованием нескольких крупных каналов между частицами. Пористость осадка увеличивается по сравнению с его начальным состоянием.

На рис. 3.6 представлен осадок с гексагональной упаковкой, состоящий из одноразмерных частиц, полностью заполняющих сосуд.

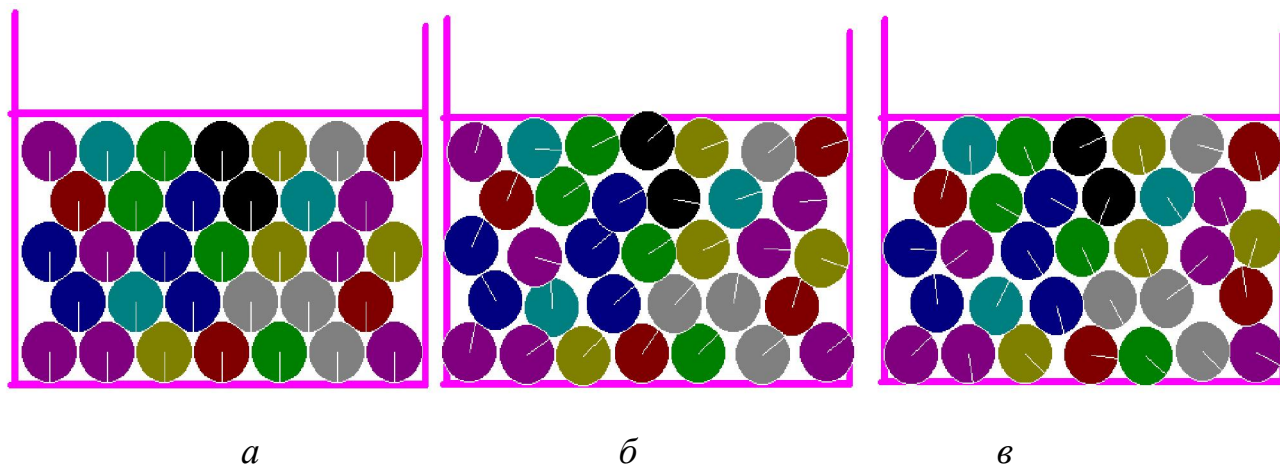


Рис. 3.6. Одноразмерный осадок гексагональной упаковки при механическом воздействии: *a* – исходное состояние, *б* – через 7с, *в* – конечное состояние через 14с

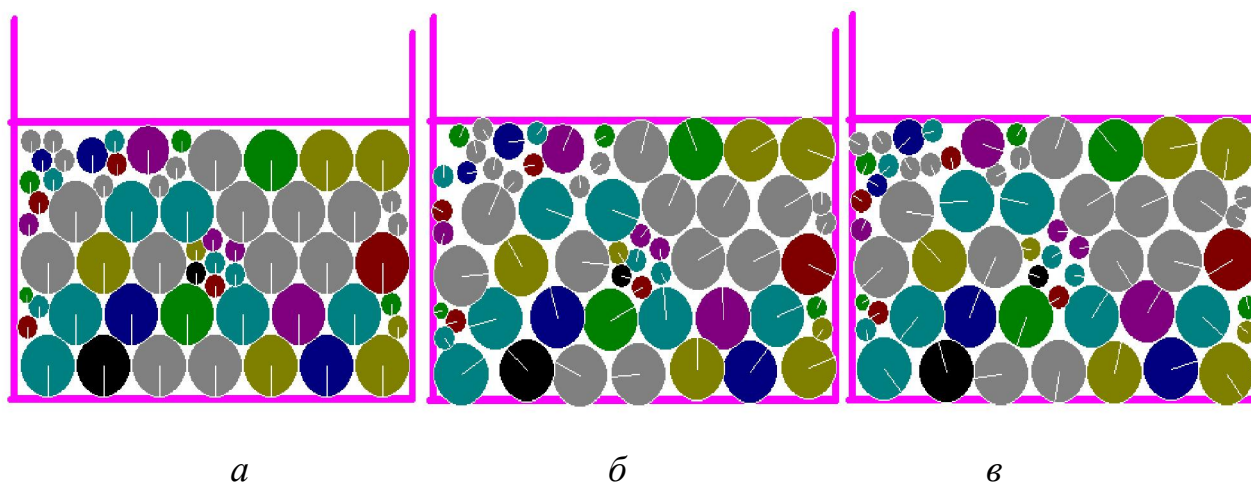


Рис. 3.7. Изменение состояния разноразмерного осадка при механическом воздействии с течением времени: *a* – исходное состояние, *б* – 7с, *в* – конечное состояние через 14с

Из анимаций можно сделать вывод о наличии некоторого разуплотнения осадка при механическом воздействии и образовании более крупных каналов в осадке по сравнению с исходным состоянием.

На рис. 3.7 показаны результаты имитационного моделирования изменения состояния осадка с разноразмерными частицами, расположенными в виде гексагональной упаковки. В механике горных пород такие осадки относятся к переконсолидированным, т.е. уплотненным. Осадки в таком состоянии имеют самую низкую пористость и соответственно размер каналов в поровой среде осадка также минимальный.

Из анимаций следует вывод о том, что для переконсолидированных осадков приложение механического воздействия положительно сказывается на изменении поровой структуры осадка. При этом происходит переформирование каналов, по которым может удаляться жидкость, освобождаются тупиковые ловушки, увеличивается размер каналов и как следствие повышается эффективность обезвоживания.

Для всех исследованных разновидностей осадков рассчитаны пористость и коэффициент пористости, представленные в табл. 3.1.

Из данных табл. 3.1 видно, что наименьшей пористостью обладает разноразмерный осадок гексагональной упаковки с плотным заполнением сосуда. Пористость такого осадка составляет 0,124. В случае кубической упаковки разноразмерных частиц пористость осадка приближается к пористости осадка с гексагональной упаковкой и составляет 0,129. Коэффициенты пористости также имеют близкие значения для указанных осадков, т.к. эти величины взаимосвязаны.

Таблица 3.1

Характеристики исследованных типов осадков

№ №	Характеристика осадка			Пористость, <i>m</i>	Коэффициент пористости, <i>ε</i>
1	Кубическая упаковка частиц	Однораз- мерный	Неполный	0,313	0,455
2			Полный	0,248	0,331
3		Разнораз- мерный	Неполный	0,203	0,255
4			Полный	0,129	0,148
5	Гексагональная упаковка частиц	Однораз- мерный	Неполный	0,236	0,310
6			Полный	0,160	0,191
7		Разнораз- мерный	Неполный	0,178	0,217
8			Полный	0,124	0,142

Одноразмерный осадок с гексагональной упаковкой, заполняющий сосуд относительно свободно, без уплотнения, имеет

пористость, близкую по значению к одномерному осадку с кубической упаковкой, который полностью заполняет сосуд. В первом случае пористость имеет значение 0,236, во втором – 0,248.

С точки зрения процесса фильтрации и обеспечения минимальной конечной влажности осадка разномерные плотно упакованные в сосуде осадки представляют наибольшую трудность.

Анализ имитационных экспериментов позволил получить численные значения для изменения состояния поровой среды осадка в случае приложения к нему механического воздействия. Для анализа использованы данные цифровых файлов, получаемых в результате работы программы, в которых содержатся изменения координат центра тяжести элементов. В расчете сравнивались ординаты элементов, находящихся в верхнем ряду в сосуде. Результаты расчетов для различных типов осадков приведены в табл. 3.2.

При этом следует напомнить, что ось ординат в данной модели направлена сверху вниз. Следовательно, увеличение значения ординаты центра тяжести элемента Y свидетельствует о его перемещении вниз, что приводит к уплотнению осадка.

Соответственно, уменьшение значения Y показывает, что данный элемент смещается при взаимодействии с другими элементами вверх, что влечет за собой изменение поровой структуры осадка в сторону разуплотнения и повышение размера каналов между частицами. В конечном итоге увеличивается пористость осадка и облегчается удаление жидкости из него.

Данные табл. 3.2 позволяют установить, что при приложении механического воздействия неплотные и несколько уплотненные, но недоконсолидированные осадки, к которым относятся одномерные осадки с кубической упаковкой, уплотняются, т.к. приращение ординаты имеет положительное значение. Разномерные осадки, т.е. переконсолидированные, имеющие поровую структуру с более низкой пористостью по сравнению с одномерными, в целом разуплотняются, т.к. приращение ординаты имеет отрицательное значение.

Установлено положительное влияние механического воздействия в виде сдвига на переконсолидированные осадки, которое приводит к разуплотнению осадков и увеличению каналов между частицами. Это будет способствовать повышению

эффективности удаления влаги из осадка. Необходимо определить, как влияет скорость перемещения верхнего ряда частиц (скорость сдвига) на скорость фильтрации.

Таблица 3.2

Изменение состояния осадков и их поровой структуры при механическом воздействии

Характеристика осадка	№ цикла счета	Ордината центра тяжести элементов верхнего ряда, условных единиц									
		№5	№6	№7	№13	№17	№18	№23			
Одноразмерный, кубическая упаковка, полный	1	180	180	180	180	180	180	180			
	1400	182,93	181,99	182,46	183,73	182,69	183,16	182,64			
	разница	2,93	1,99	2,46	3,73	2,69	3,15	2,63			
Одноразмерный, кубическая упаковка, не полный	1	180	180	180	180						
	1400	187,943	185,088	184,942	186,977						
	разница	7,94	5,09	4,94	6,98						
Разноразмерный, гексагональная упаковка, Полный	1	220	220	220	220	205	212	216	205	205	205
	1400	213,148	212,661	214,086	211,211	208,488	208,866	203,926	198,696	201,968	208,616
	разница	-6,85	-7,34	-5,91	-8,79	3,49	-3,13	-12,07	-6,30	-3,03	3,62
Разноразмерный, Кубическая упаковка, полный	1	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	1400	174,717	174,31	174,426	174,386	174,767	174,418	174,618	174,717	174,31	174,426
	разница	-5,28	-5,69	-5,57	-5,61	-5,23	-5,58	-5,38	-5,28	-5,69	-5,57

3.3. Исследование влияния скорости прилагаемого к осадку сдвига на скорость фильтрации осадка методом имитационного моделирования

Для моделирования процесса истечения жидкости (фильтрата), содержащей наиболее тонкие частицы, была создана другая модель осадка, в которой в дополнение к элементам, имитирующим частицы осадка, введены специальные блоки очень мелких частиц. Последние создавались как группа элементов с определенными заданными одинаковыми свойствами. При этом использованы подходы, изложенные в публикациях [96, 104, 123, 132, 133], когда жидкость заменяется наиболее мелкими элементами и перемещается в пространстве между крупными, моделирующими частицы осадка.

Для имитационных экспериментов моделировались осадки

плотной и рыхлой структуры с гексагональной упаковкой одноразмерных частиц, зажатые стенками сосуда и расположенные в нем относительно свободно (не зажатые стенками).

Моделирование фильтрации через слой осадка выполнялось в течение 1600000 циклов, что соответствовало 8с времени эксперимента. Взаимодействие со стенками сосуда не задавалось.

На рис. 3.8 показаны отдельные фрагменты состояния осадков в различные моменты, которые изображаются программой в виде анимаций на мониторе на каждом цикле счета.

Графический материал рис. 3.8 показывает, что осадок, имеющий промежутки между элементами (рыхлый) даже при плотной гексагональной упаковке, значительно быстрее освобождается от мелких частиц, имитирующих воду. После 4с счета практически вся вода удалена, и дальнейшее увеличение количества итераций (времени обезвоживания) смысла не имеет.

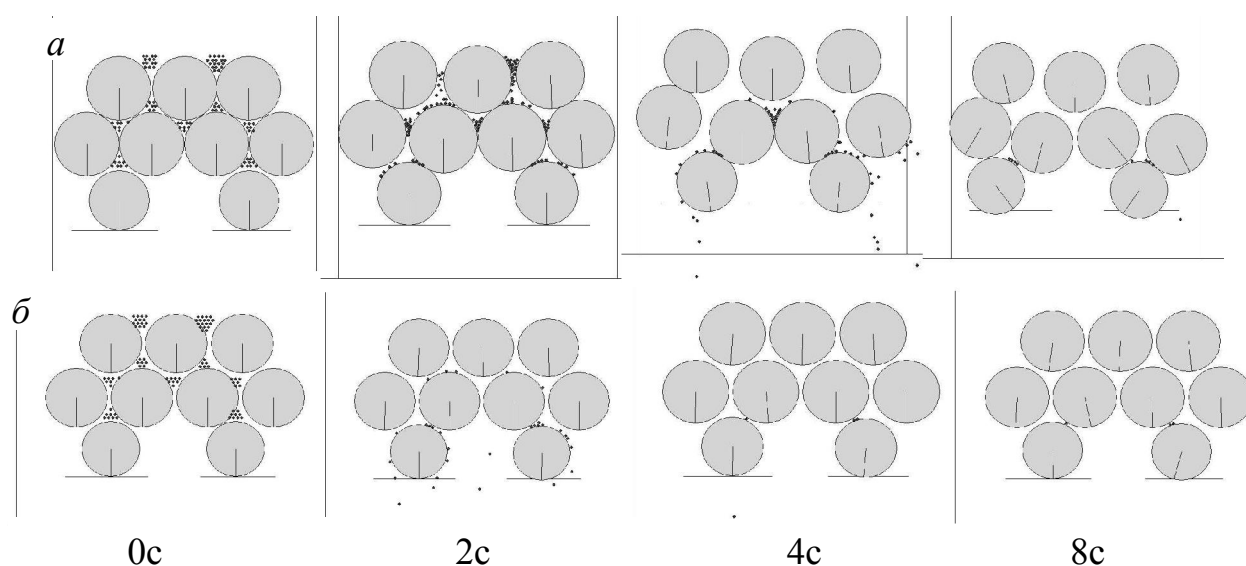


Рис. 3.8. Анимационные фрагменты состояния осадка без приложения сдвига:

Остаточная влага представлена тремя мелкими элементами, зажатыми между частицами осадка (рис. 3.8 б, 4 и 8с). Для плотного осадка собственно удаление влаги из поровой структуры начинается после 2с моделирования.

До момента времени 2с ни один из мелких элементов не выпал из слоя осадка (рис. 3.8 а, 2с). По окончании заданного времени счета количество условной остаточной влаги, заземленной в осадке, составило 8 элементов, т.е. вдвое больше,

чем для рыхлого осадка.

Из полученных результатов обработки данных имитационного эксперимента можно сделать вывод об адекватном отображении моделью процессов, происходящих при удалении влаги из осадков.

Далее были выполнены исследования с наложением и без наложения сдвига. Для этого была создана модель с бóльшим количеством частиц, имитирующих воду (около 2000), как и в работах [104, 123]. Кроме того, изменялась скорость сдвига. Сдвиг, который развивался с низким ускорением, равным 70 условных ед. обозначен как медленный (МС). Сдвиг с высокой скоростью – ускорение задано равным 7000 условных ед. (быстрый) обозначен далее как БС. Фрагменты анимаций поровой структуры осадков на определенных циклах счета представлены на рис. 3.9 и 3.10.

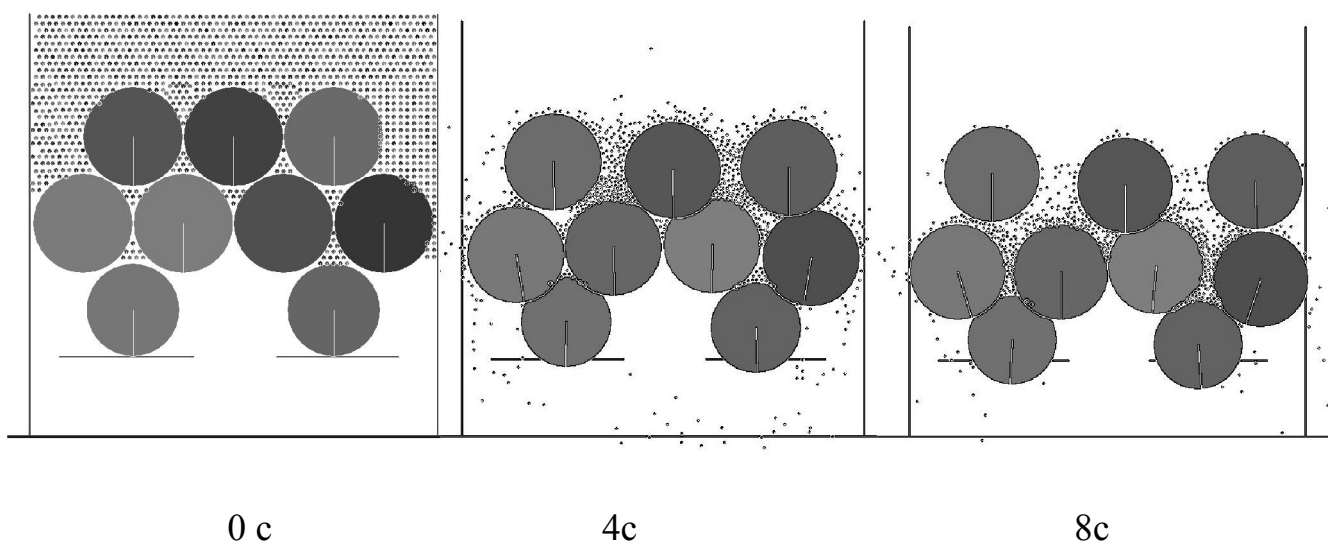


Рис. 3.9. Анимационные фрагменты состояния осадка с наложением сдвига с низкой скоростью (МС) в различные моменты времени

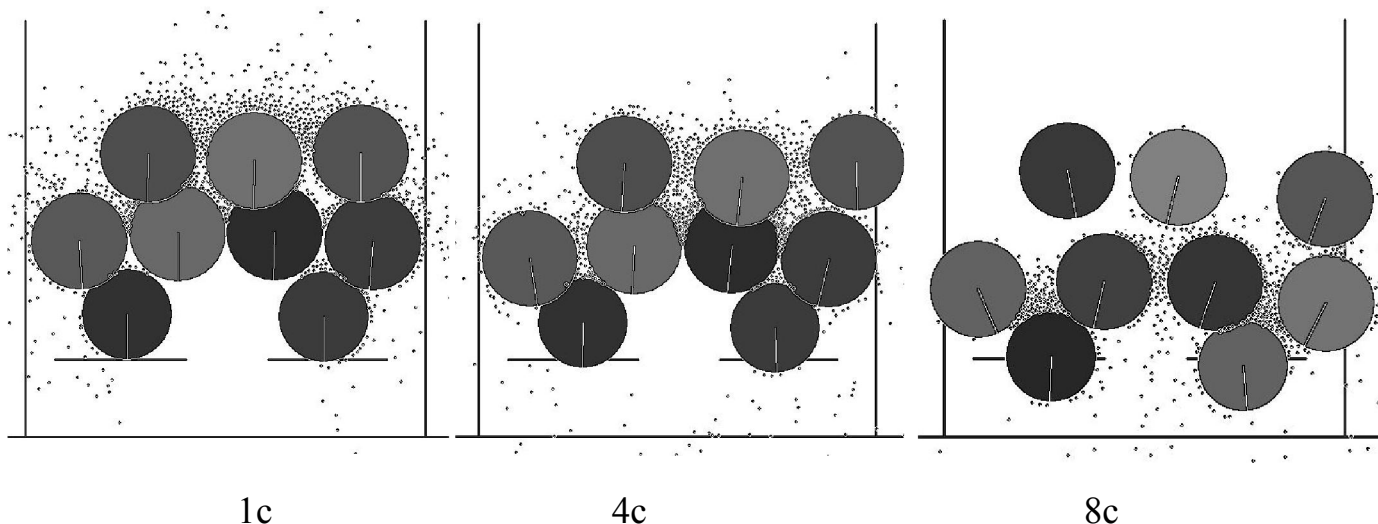


Рис. 3.10. Анимационные фрагменты состояния осадка с наложением сдвига с высокой скоростью (БС) в различные моменты времени

Механическое воздействие в виде сдвига прикладывалось к верхнему слою осадка. Исходное состояние поровой структуры осадка показано на рис. 3.9 в момент времени 0с. Из анимаций следует вывод о том, что при низкой скорости сдвига (МС) в плотном переконсолидированном осадке каналы между частицами увеличиваются, но при быстром сдвиге (БС) в одни и те же моменты времени каналы между частицами имеют большие размеры (рис. 3.9 и 3.10 в моменты времени 8с). Из анимаций следует, что в рыхлом осадке условное количество остаточной влаги выше, чем в плотном на 33%. Последнее объясняется уплотнением рыхлого осадка при медленном сдвиге. При сдвиге с высокой скоростью (БС) в рыхлом осадке не остается условной влаги (число частиц равно 0), а в плотном остается 225 единиц, что составляет 10% от исходного количества (рис. 3.10). И это значение остаточной влаги в 1,2 раза ниже, чем при медленном сдвиге.

На основе данных имитационного моделирования определено количество выделившегося фильтрата в условных единицах для всех типов осадков без механического воздействия, при медленном и быстром сдвиге на модели с малым количеством частиц, имитирующих воду (рис. 3.11). Эта модель выбрана в связи с большим удобством обработки данных. Изменение объема фильтрата определялось по количеству выделившихся из осадка мелких «частиц» жидкости.

Графики для осадков без приложения сдвига в качестве механического воздействия обозначены на рис. 3.11 без дополнительных комментариев (аббревиатуры МС и БС отсутствуют).

Из графиков, приведенных на рис. 3.11, следует, что для рыхлых осадков в начальной стадии фильтрования количество фильтрата не зависит от механического воздействия на осадок. До момента времени, равного 2с, графики совпадают. При наложении сдвига с низкой скоростью (МС) процесс замедляется из-за уплотнения поровой структуры рыхлого осадка. При сдвиге с высокой скоростью (БС) достигается максимальное удаление влаги в конечной стадии процесса – количество оставшихся в осадке мелких частиц равно нулю.

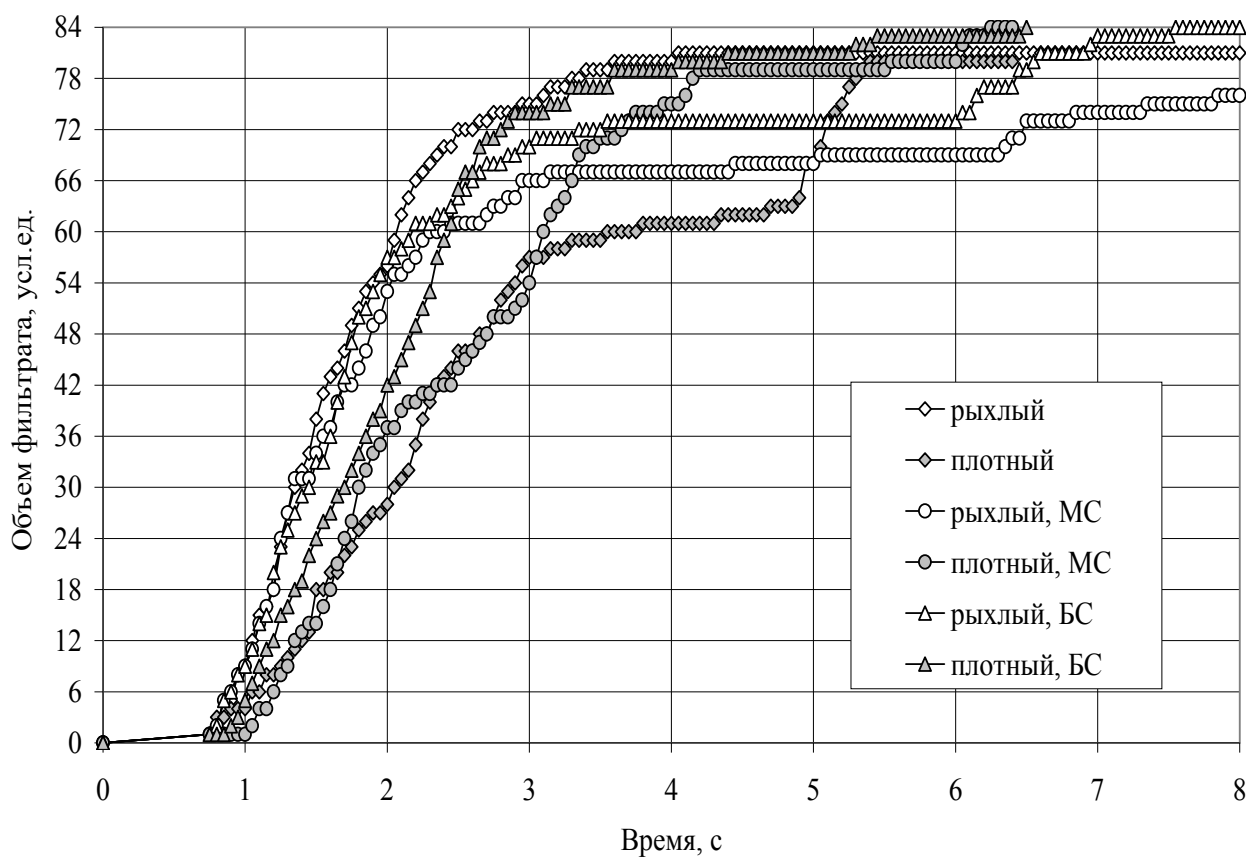


Рис. 3.11. Количество выделившегося фильтрата при разных состояниях поровой структуры осадка

Для плотных осадков медленный сдвиг начинает сказываться положительно после 3с от начала выделения фильтрата и обеспечивает остаточную влагу на 33% ниже, чем при отсутствии сдвига (8 единиц для зажатых плотных осадков). Наложение сдвига с высокой скоростью (БС) ускоряет процесс выделения фильтрата с самого начала и позволяет снизить количество остаточной влаги в 1,4 раза, чем без приложения сдвига.

Проведенные имитационные исследования на модели с использованием метода дискретных элементов позволили установить положительное влияние воздействия сдвига на осадки, особенно сдвига с высокой скоростью и в применении к плотным осадкам. Медленный сдвиг в приложении к рыхлым осадкам приводит к уплотнению их поровой структуры и замедлению выделения фильтрата из осадка. Полученные на модели выводы необходимо подтвердить в ходе физического эксперимента.

На рис. 3.12-3.14 представлены рассчитанные по данным имитационного моделирования значения скорости удаления влаги (фильтрации) для разных типов осадков и механического воздействия. Данные приведены для модели с большим количеством дискретных элементов, имитирующих воду и наиболее тонкие частицы, присутствующие в фильтрате. Модель дает возможность качественно сравнивать процессы, протекающие в порах осадка при разных условиях.

Без приложения механического воздействия скорость фильтрации для рыхлого осадка имеет максимальное значение на $0,75\text{с}$ счета и составляет 295 усл. ед. Для плотного осадка скорость фильтрации растет гораздо медленнее и достигает максимального значения в два раза позже по сравнению с рыхлым осадком (рис. 3.12). В плотном осадке процесс истечения влаги начинается позже – после $0,25\text{с}$. Само значение максимальной скорости фильтрации для плотного осадка в 2,5 раза ниже, чем для рыхлого. В конце процесса скорости фильтрации мало отличаются для любого типа осадка.

При приложении сдвига в случае рыхлых осадков не имеет значения, зажат осадок стенками сосуда или он расположен в нем относительно свободно.

Истечение жидкости начинается с небольшой задержкой после использования механического воздействия. Наличие медленного или быстрого сдвига мало изменяет значение скорости

удаления влаги в рыхлых осадках. Но при этом быстрый сдвиг способствует небольшому повышению скорости фильтрации – на 10 усл.ед. (рис. 3.13). Достижение максимума скорости фильтрации смещается вправо по оси времени на 0,5с, что связано с процессами развития сдвига в осадке.

Для переконсолидированных осадков характерно наличие определенного времени, необходимого для развития сдвига и начала истечения жидкости, которое составляет 0,5с (рис. 3.14). Момент достижения максимальной скорости фильтрации зависит от типа применяемого сдвига. При медленном сдвиге этот максимум достигается позже, на второй секунде счета и составляет 134 усл. ед. Быстрый сдвиг обеспечивает наибольшее значение скорости фильтрации в 156 усл. ед. в момент времени 1,75с.

Без механического воздействия максимум скорости фильтрации составляет 118 усл.ед., что в 1,3 раза ниже. Значение скорости удаления влаги не зависит от того, зажат осадок стенками сосуда или располагается в нем относительно свободно. В конце процесса скорость фильтрации мало отличается от типа прилагаемого к переконсолидированному осадку сдвига.

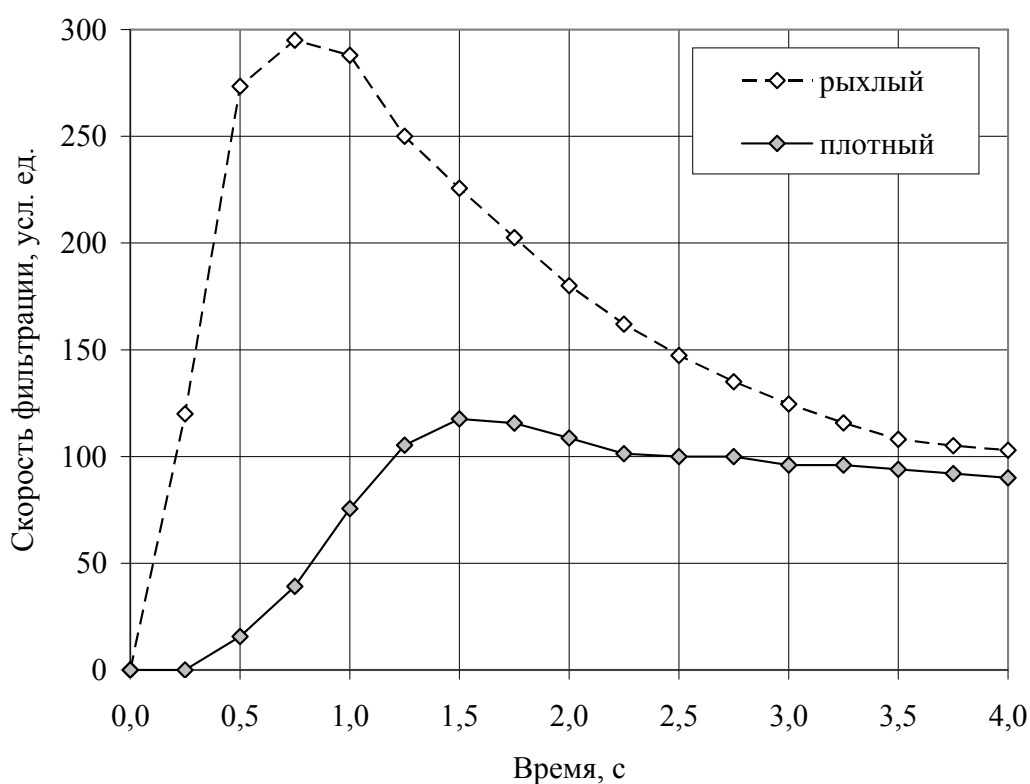


Рис. 3.12. Скорость фильтрации для рыхлых и плотных осадков с гексагональной упаковкой частиц без механического воздействия

В целом выполненное имитационное моделирование позволит прийти к выводу о том, что рыхлые осадки обеспечивают высокую скорость фильтрации и без приложения механических воздействий, максимальное значение достигается на второй секунде от начала процесса при всех состояниях осадка. При наложении сдвига с низкой скоростью (МС на рис. 3.13) скорость фильтрации снижается за счет возникновения уплотнения поровой структуры осадка под влиянием сдвига.

При использовании сдвига с высокой скоростью (БС, см. рис. 3.13) максимальное значение скорости фильтрации выше, чем при медленном сдвиге, но меньше достигаемого в свободном состоянии осадка, равном 295 усл. ед. (см. рис. 3.12).

Для плотных осадков характерно наличие некоторого периода времени, необходимого жидкости для нахождения пути продвижения в каналах осадка. Осадок обладает определенной инерционностью из-за плотной упаковки частиц. При фильтровании без приложения сдвига скорость фильтрования гораздо ниже, чем у рыхлых осадков.

Ее максимальное значение составляет 118 усл. ед. в момент времени 1,5с (см. рис. 3.12). При медленном сдвиге (МС на рис. 3.14) максимальная скорость фильтрования имеет большее значение, достигается на 2с от начала моделирования и составляет 134 усл. ед. Начальное значение скорости фильтрации при этом ниже, чем в состоянии без приложения сдвига. Это позволяет заключить, что медленный сдвиг приводит к некоторому уплотнению осадка в начальный период, однако затем, при развитии сдвига способствует увеличению скорости удаления влаги.

Приложение к осадку с плотной поровой структурой сдвига с высокой скоростью (БС на рис. 3.14) обеспечивает рост скорости фильтрования сразу же после инерционного периода. При этом время достижения максимального значения скорости уменьшается до 1,5с. Максимальная скорость удаления влаги составляет 154-156 усл. ед. и удерживается в течение 0,25с. Таким образом, для плотных осадков создание сдвига с высокой скоростью позволяет повысить скорость удаления влаги из осадка.

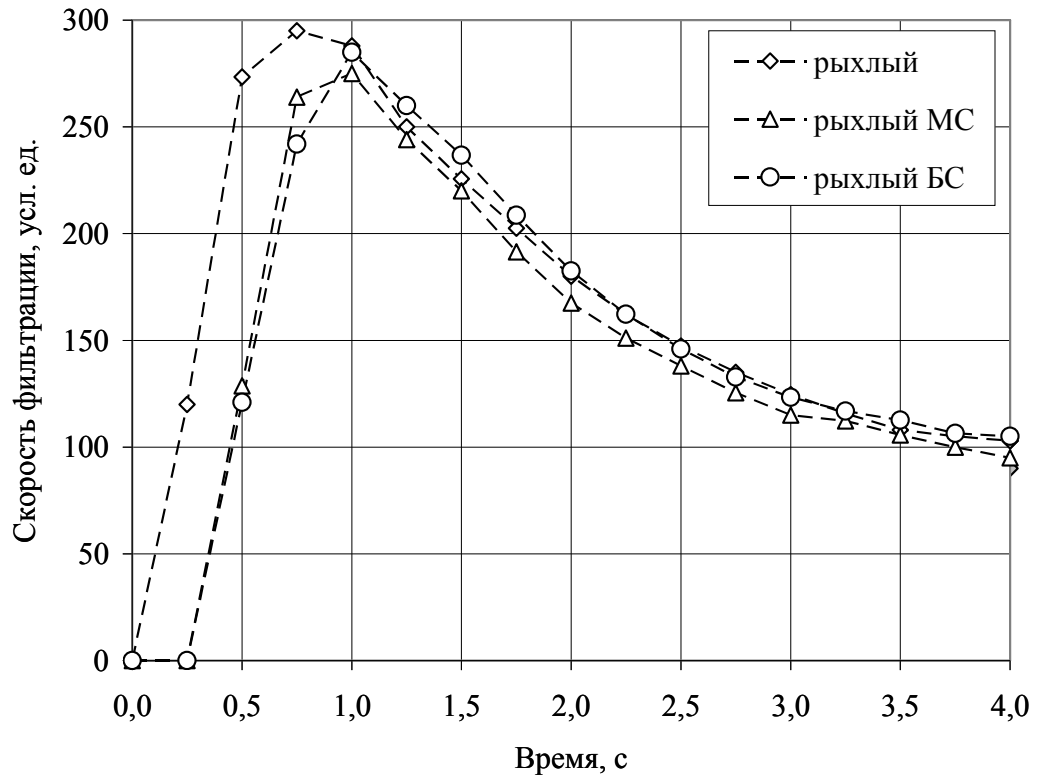


Рис. 3.13. Скорость фильтрации для рыхлых осадков с гексагональной упаковкой частиц при быстром и медленном сдвиге в сравнении с истечением без механического воздействия

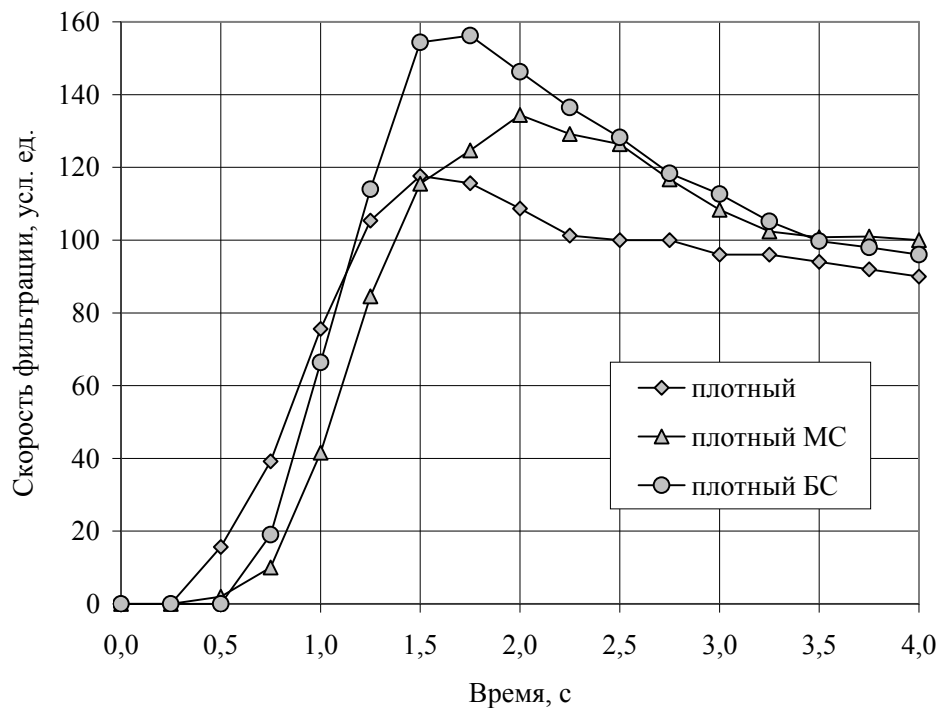


Рис. 3.14. Скорость фильтрации для переконсолидированных плотных осадков с гексагональной упаковкой частиц

Средняя скорость фильтрации за весь период обезвоживания представлена на рис. 3.15.

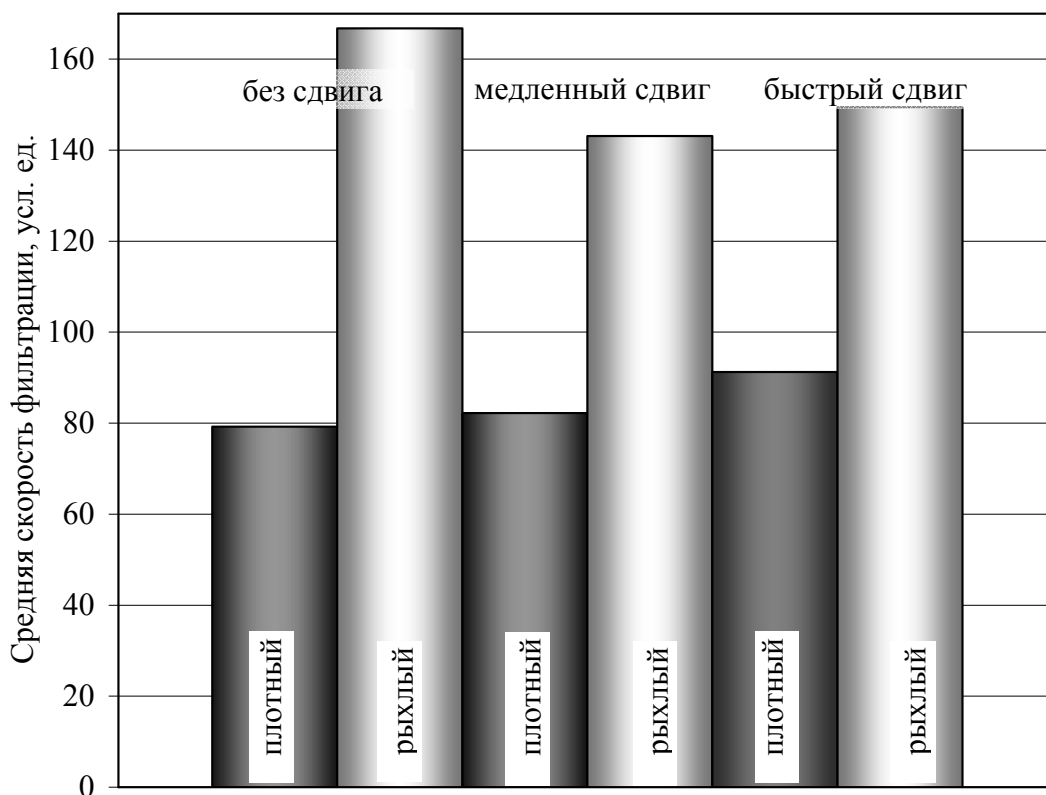


Рис. 3.15. Средняя скорость фильтрации для осадков разного типа за весь период имитационного фильтрования

Данные рис. 3.15 позволяют отметить, что максимальную среднюю скорость фильтрации закономерно имеет рыхлый свободный осадок без приложения сдвига – 167 усл. ед. Сдвиг с низкой скоростью снижает среднюю скорость фильтрации рыхлых осадков до 143 усл. ед., а сдвиг с высокой скоростью – до 149 усл. ед. Таким образом, применение к рыхлым осадкам быстрого сдвига меньше снижает среднюю скорость удаления влаги из них, чем медленный сдвиг.

Для переконсолидированных осадков картина прямо противоположная. Без механического воздействия плотные осадки имеют минимальную среднюю скорость фильтрации – 79 усл. ед. Приложение сдвига с низкой скоростью несколько повышает ее – до значений 82 усл. ед. Сдвиг с высокой скоростью повышает этот параметр на 11-15% до величины 91 усл. ед. Таким образом, сдвиг с

высокой скоростью повышает скорость фильтрации в плотных переконсолированных осадках.

Количество остаточной влаги в осадке оценивалось по числу защемленных или оставшихся в осадке мелких частиц, имитирующих жидкость (на основе модели с малым числом частиц). Результаты определений представлены на рис. 3.16.

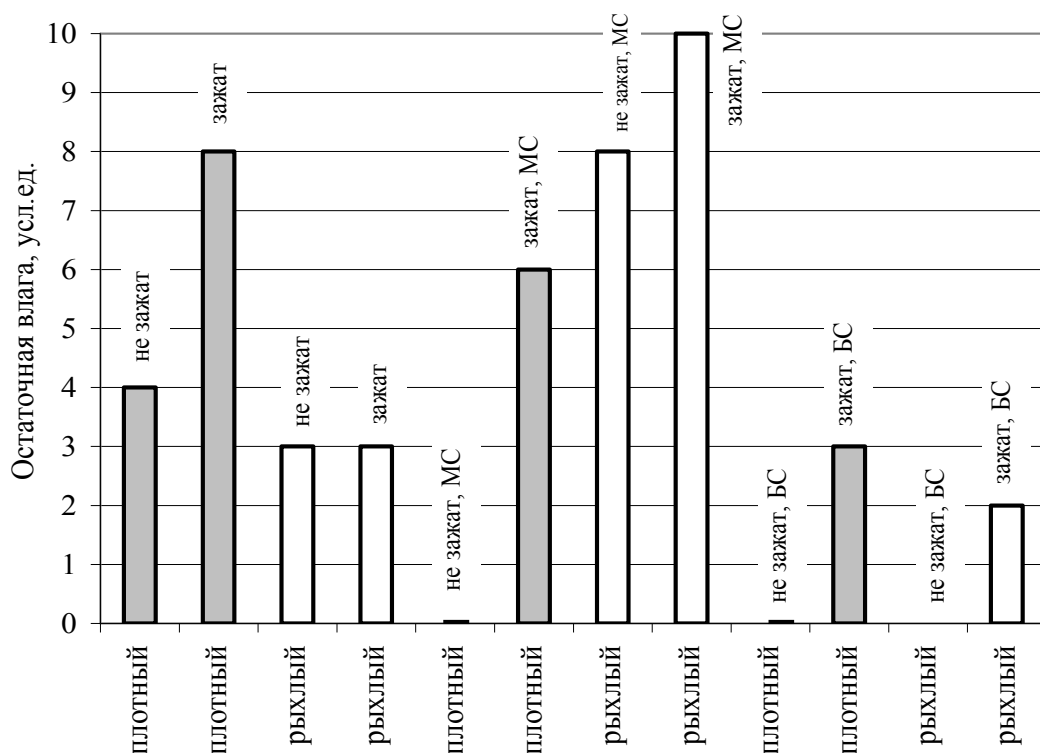


Рис. 3.16. Количество остаточной влаги в осадках разного типа в зависимости от механического воздействия на них

Из данных рис. 3.16 следует, что без приложения механического воздействия к рыхлому осадку в виде сдвига остаточная влага в 2 раза ниже по сравнению с плотным осадком. Медленный сдвиг в рыхлом осадке, зажатом стенками сосуда, увеличивает количество защемленной влаги почти в 3 раза.

В рыхлом свободно расположенном в сосуде осадке при сдвиге с низкой скоростью количество остаточной влаги меньше. При использовании быстрого сдвига для осадков с рыхлой поровой структурой количество остаточной влаги снижается до 0-2 усл. ед.

В плотных осадках без приложения сдвига количество остаточной влаги составляет 4-8 усл. ед. в зависимости от его уплотнения стенками сосуда. Скорость сдвига при его наложении к

плотному осадку, не зажтому стенками сосуда, не влияет на количество остаточной влаги – она отсутствует.

Для зажтого стенками плотного осадка характерно снижение количества остаточной влаги в 2 раза при быстром сдвиге по сравнению с медленным сдвигом. И это количество почти в 2,6 раза ниже, чем без приложения механического воздействия вообще, но превышает таковое для рыхлого осадка при быстром сдвиге. По сравнению с медленным сдвигом в рыхлом осадке приложение сдвига с высокой скоростью к зажтому плотному осадку позволяет снизить количество остаточной влаги с 10 до 3 усл. ед. Таким образом, быстрый сдвиг способствует снижению влажности осадков в любом первоначальном состоянии осадка.

На основании данных имитационного моделирования определен коэффициент снижения содержания влаги в осадках. Результаты определения представлены в графической форме на рис. 3.17.

Проведенное имитационное моделирование процесса истечения влаги из одноразмерных тонкодисперсных осадков при их гексагональной упаковке позволило обосновать следующие заключения.

Приложение сдвига с низкой скоростью способствует уплотнению рыхлого осадка, что приводит к снижению скорости фильтрации по сравнению со свободным состоянием осадка. Медленный сдвиг приводит к уплотнению рыхлой поровой структуры осадка. Использование быстрого сдвига для рыхлых недоконсолидированных осадков повышает скорость удаления влаги, но она остается более низкой, чем в случае отсутствия сдвига. При медленном сдвиге количество остаточной влаги в осадке выше, чем при его отсутствии. Быстрый сдвиг способствует ее значительному снижению.

Для плотных осадков характерен определенный инерционный период времени до начала удаления влаги из осадка. Этот период почти в 5 раз превышает аналогичный для рыхлых осадков и составляет 2,5с. При фильтровании без приложения сдвига скорость фильтрования гораздо ниже, чем у рыхлых осадков, ее максимальное значение составляет 12 усл. ед. (30 для рыхлых). При медленном сдвиге максимальная скорость фильтрования составляет 14 усл. ед.

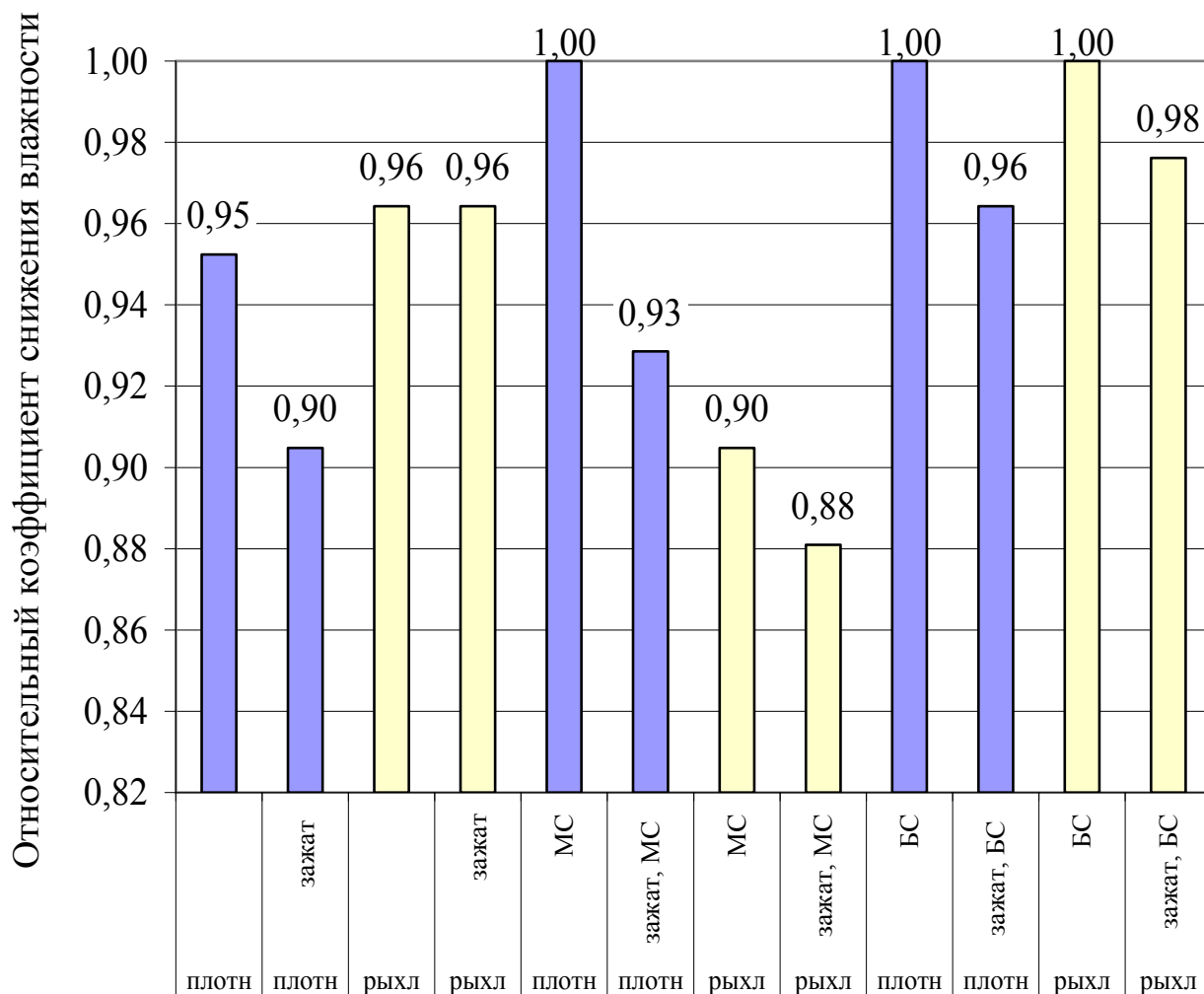


Рис. 3.17. Коэффициент снижения влажности в осадках при механическом воздействии и без него

Приложение к плотному переконсолидированному осадку сдвига с высокой скоростью обеспечивает рост скорости фильтрования сразу же после инерционного периода и снижение времени достижения ее максимального значения. Максимальная скорость удаления влаги составляет 16,25 усл. ед. и удерживается еще 0,5с. Для плотного осадка характерно снижение количества остаточной влаги в 2 раза при быстром сдвиге по сравнению с медленным. Это количество ниже, чем без приложения сдвига, следовательно, быстрый сдвиг способствует снижению влажности осадков в любом первоначальном состоянии поровой структуры осадка.

Таким образом, выполненное имитационное моделирование изменения состояния поровой структуры осадка при различных

типах механического воздействия и разном исходном виде осадков позволяет сделать следующие основные выводы:

- применение численных методов дает возможность исследовать поведение элементов в динамике на микроуровне и влияние различных технологических параметров на физические процессы, происходящие при разделении взаимодействующих фаз;

- использование идеализированных сред в виде частиц сферической формы позволяет получать обобщенные параметры, характерные для различных условий; из результатов обработки данных имитационного эксперимента следует, что модель адекватно отображает процессы, происходящие при удалении влаги из осадков;

- наименьшей пористостью, равной 0,124, обладает разноразмерный осадок гексагональной упаковки с плотным заполнением сосуда; при кубической упаковке разноразмерных частиц пористость осадка составляет 0,129 и приближается к пористости осадка с гексагональной упаковкой;

- с точки зрения процесса фильтрования и обеспечения минимальной конечной влажности осадка разноразмерные переконсолидированные осадки представляют наибольшую трудность;

- при приложении механического воздействия недоконсолидированные осадки, к которым относятся одноразмерные осадки с кубической упаковкой, уплотняются, т.к. приращение ординаты центра тяжести элементов верхнего ряда имеет положительное значение; разноразмерные переконсолидированные осадки, имеющие поровую структуру с более низкой пористостью, разуплотняются, т.к. приращение ординаты имеет отрицательное значение;

- установлено положительное влияние механического воздействия в виде сдвига на переконсолидированные осадки, которое приводит к разуплотнению осадков и увеличению каналов между частицами, что будет способствовать повышению эффективности удаления влаги из осадка;

- установлено, что для начала фильтрования переконсолидированных плотных осадков необходимо время для развития сдвига в осадке, составляющее 0,5с;

- для плотных осадков медленный сдвиг начинает сказываться положительно после 2с от начала выделения фильтрата и

обеспечивает достижение максимального значения скорости фильтрации в 134 усл. ед. в этот момент времени;

- приложение сдвига с высокой скоростью (БС) ускоряет процесс выделения фильтрата с самого начала и скорость фильтрации повышается на 16%;

- недоконсолидированные рыхлые осадки обеспечивают высокую скорость фильтрации и без приложения механических воздействий; при наложении сдвига с низкой скоростью (МС) процесс замедляется из-за уплотнения поровой структуры рыхлого осадка;

- при сдвиге с высокой скоростью (БС) достижение максимума скорости фильтрации смещается вправо по оси времени на 0,5с, что связано с процессами развития сдвига в осадке; максимальное значение скорости фильтрации на 10 усл. ед. выше, чем при медленном сдвиге, что составляет 3%, однако это значение меньше достигаемого без механического воздействия, равного 295 усл. ед;

- максимальная скорость фильтрации в недоконсолидированных осадках достигается на 0,75-1с от начала счета; наличие медленного или быстрого сдвига мало изменяет значение скорости удаления влаги, но при этом быстрый сдвиг способствует небольшому повышению скорости фильтрации; последнее связано с тем, что поровая среда осадка не успевает уплотниться до низкой пористости под действием быстро протекающего сдвига;

- для переконсолидированных осадков момент достижения максимальной скорости фильтрации зависит от типа применяемого сдвига – при медленном сдвиге этот максимум достигается позже, на второй секунде счета; в целом скорость фильтрации при медленном сдвиге ниже по сравнению со сдвигом с высокой скоростью, а в конце процесса скорость фильтрации мало отличается от типа прилагаемого к переконсолидированному осадку сдвига;

- приложение к переконсолидированному осадку с плотной поровой структурой сдвига с высокой скоростью обеспечивает рост скорости фильтрования сразу же после инерционного периода, при этом время достижения максимального значения скорости уменьшается до 1,75с; максимальная скорость удаления влаги составляет 156 усл. ед., так что для плотных осадков создание

сдвига с высокой скоростью позволяет повысить скорость удаления влаги из осадка на 16%;

- максимальную среднюю скорость фильтрации имеет рыхлый осадок без приложения сдвига – 167 усл. ед.; сдвиг с низкой скоростью снижает ее до 143 усл. ед., а сдвиг с высокой скоростью – до 149 усл. ед., т.е. на 12-16%, а применение к рыхлым осадкам быстрого сдвига меньше снижает среднюю скорость удаления влаги из них, чем медленный сдвиг;

- для переконсолидированных осадков без механического воздействия средняя скорость фильтрации ниже вдвое – 79 усл. ед.; приложение сдвига с низкой скоростью несколько повышает ее - до значений 82 усл. ед., а сдвиг с высокой скоростью повышает этот параметр на 11-15% до величины 91 усл. ед.; быстрый сдвиг способствует снижению влажности осадков в любом первоначальном состоянии поровой структуры осадка;

- проведенные имитационные исследования на модели с использованием метода дискретных элементов позволили установить положительное влияние воздействия сдвига на осадки, особенно сдвига с высокой скоростью и в применении к переконсолидированным плотным осадкам; медленный сдвиг в применении к недоконсолидированным рыхлым осадкам приводит к уплотнению их поровой структуры и замедлению выделения фильтрата из осадка.

Раздел 4. Экспериментальные исследования процесса фильтрации осадков при механическом воздействии

В разделе 3 была установлена зависимость состояния поровой среды осадков и скорости удаления влаги от скорости прилагаемого к осадку сдвига и от того, является осадок переконсолидированным или нет. В связи с этим необходимо экспериментально определить основные закономерности фильтрации осадков в различном механически напряженном состоянии.

4.1. Исследование физико-механических свойств осадков, определяющих результаты механического обезвоживания

Процесс истечения влаги из поровой среды осадка можно условно разделить на несколько более простых подпроцессов, которые будут отличаться между собой по физическим принципам, лежащим в их основе [1, 32, 104]. Главными из этих подпроцессов являются механические, гидродинамические и фильтрационные. В фазе, в которой происходит формирование осадка и его поровой структуры, важную роль играют механические деформации твердой фазы на фоне прохождения жидкости через пористое пространство. Эти механические процессы включают сжатие осадка механическими усилиями, перпендикулярными к поверхности осадка (нормальными), называемое в механике грунтов компрессией. Следующей фазой является усадка твердого скелета осадка под действием постоянно приложенной к нему нагрузки – консолидация. После этого может происходить сдвиг скелета твердой фазы осадка под действием приложенных касательных напряжений. Результатом этих процессов является перестройка порового пространства осадка, что влечет за собой изменение скорости удаления влаги в сторону увеличения или снижения. Отсюда вытекает актуальность исследований, направленных на поиск эффективных и относительно недорогих методов воздействия на осадок для повышения скорости фильтрации влаги из него.

При формировании осадка и удаления влаги из него возможны несколько основных режимов его деформирования. Первым является режим компрессионного сжатия. При этом в осадке

обычно увеличиваются только нормальные деформации сжатия. В результате прохождения такого процесса жидкая фаза выдавливается из пор и замкнутых (тупиковых) ловушек в режиме фильтрации. Второй режим – режим чистого сдвига, при котором возможно несколько проявлений объемной деформации в осадке. При этом может происходить сжатие осадка, что имеет место при сдвиге в недоконсолидированном осадке. Другим возможным вариантом является разуплотнение, которое характерно для переконсолидированного осадка. В смешанном состоянии осадка сдвиг может происходить без изменения объема. Кроме перечисленных вариантов режимов возникают состояния осадка, при которых проявляется смешанный режим (третий), когда возможен сдвиг со сжатием. Все перечисленные выше режимы характерны для осадительных центрифуг, а также ленточных или камерных фильтр-прессов, вакуум-фильтров.

Рядом исследований было установлено, что любые подрежимы или режимы обезвоживания со сдвигом положительно влияют на процесс удаления влаги при фильтрации, т.к. при этом происходит переформирование поровой структуры осадка, разрушение тупиковых пор, что способствует повышению скорости удаления жидкой фазы. [47, 78, 91-94, 118].

В классических методах исследования, принятых в механике грунтов, испытания на сдвиг выполняются после предварительной консолидации (уплотнения) образца [130]. Режим консолидации осадка имеет значение в практике, т.к. такие режимы имеют место во многих аппаратах, применяемых не только в технологии обогащения, но и обезвоживания продуктов. Поэтому осадки, характерные для продуктов обогащения необходимо испытать в режиме консолидации.

Целью проведения такого эксперимента является определение колебаний скорости удаления влаги из осадка при разных режимах механического воздействия на него. Методики соответствующих испытаний осадков используются в механике грунтов [131]. Для определения сдвиговых характеристик осадков по стандартным методикам применяются различные по конструкции приборы. К основным методикам относятся простой (прямой) сдвиг, вращательный срез, трехосное сжатие, кручение, одноосное сжатие, вдавливание конусов и др.

Для получения достоверных результатов исследуемый осадок должен иметь цилиндрическую форму или форму параллелепипеда. Испытание осадков выполняется по открытой или закрытой системе. Открытая система носит название консолидировано-дренированной, результаты испытаний по этой системе зависят от прилагаемого давления. Поэтому готовят несколько образцов осадка и уплотняют их при небольшом одинаковом для всех давлении до полной стабилизации деформаций. Это значит, что осадок переходит в переконсолидированное состояние. Затем давление постепенно снижают до стабилизации деформаций разуплотнения. После этого осадок испытывают на сдвиг. При этом каждому давлению соответствует определенные характеристики осадка по влажности и пористости.

Сопrotивляемость осадков сдвигу зависит от их влажности. Однако, для зернистых осадков, представленных сгущенными продуктами гидроциклонов, угольными шламами, влажность практически не влияет на этот параметр. Для таких испытаний осадков определяющим параметром является их плотность, которая в механике грунтов выражается через пористость по соотношению [134]:

$$m = 1 - \delta_{ск}/\delta_m \quad (4.1)$$

где $\delta_{ск}$ и δ_m - плотность скелета осадка и плотность минеральной части, соответственно.

Плотность скелета осадка представляет собой плотность вещества осадка в данном объеме с учетом пор в сухом состоянии и определяется как отношение массы твердой части (скелета) к общему объему осадка (твердое вещество плюс поры между частицами), без заполнения пор водой.

Плотность минеральной части сухого осадка определялась как отношение массы скелета (твердой части) к объему осадка. Для определения использовался пикнометрический способ.

Исследование физико-механических свойств осадков углеобогащения выполнялось в лаборатории физического и компьютерного моделирования ДонНТУ, которых принимала участие и автор данной работы [82, 138-145].

На рис. 4.1 приведены результаты исследования плотности разных по вещественному составу и крупности осадков в зависимости от их влажности.

На рис. 4.1 видно, что кривые изменения плотности осадков имеют разный вид для осадков различного вещественного состава и гидрофобности. Данные позволяют заключить, что зернистый шлам – сгущенный продукт гидроциклонов – имеет максимальную плотность осадка при влажности 7-13%. В воздушно-сухом состоянии и при влажности более 15% плотность осадка после уплотнения снижается. В первом интервале влажности (до 7%) в порах осадка остается воздух, во втором – более 15% - при уплотнении из пор выдавливается влага и плотность снова снижается.

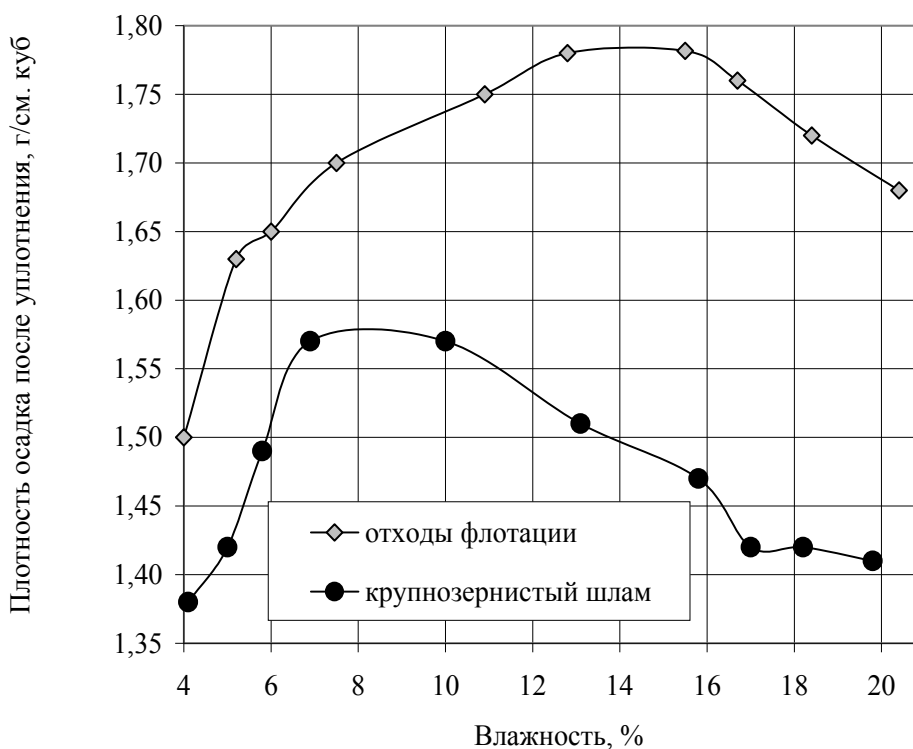


Рис. 4.1. Изменение плотности осадков углеобогащения после уплотнения в зависимости от содержания влаги в них

Для отходов флотации, являющихся гидрофильным продуктом и содержащих глинистые частицы в большом количестве, характерно повышение плотности до значения более $1,75 \text{ г/см}^3$ при влажности выше 11%. При увеличении влажности свыше 16% плотность этого материала начинает снижаться и при влажности 21% достигает величины $1,67 \text{ г/см}^3$.

Коэффициент пористости осадка ε может быть вычислен по этим параметрам из соотношения:

$$\varepsilon = (\delta_m - \delta_{ск}) / \delta_{ск}. \quad (4.2)$$

Результаты определения коэффициента пористости в зависимости от приложенного давления для отходов флотации ЦОФ Красноармейская показаны на рис. 4.2.

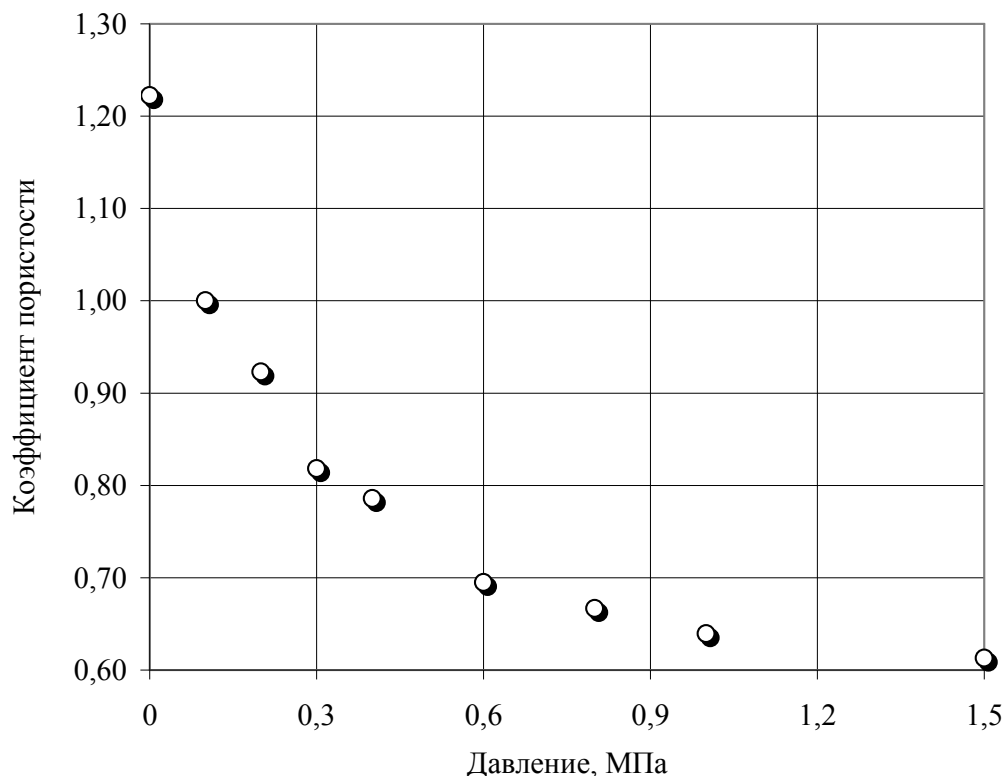


Рис. 4.2. Связь коэффициента пористости с прилагаемым к осадку давлением

Из приведенных данных следует, что коэффициент пористости глинистых осадков резко снижается при повышении давления. Обработка данных дала возможность получить аналитический вид такой зависимости в виде полинома третьей степени с высокой степенью аппроксимации:

$$\varepsilon = - 0,55P^3 + 1,66P^2 - 1,64P + 1,19; \quad R^2 = 0,987.$$

Для определения изменения пористости под действием приложенного давления проведены компрессионные испытания

осадков. При выполнении измерений нагрузка осадка производится не сразу, а ступенчато. В каждой ступени обеспечивается увеличение нагрузки примерно в два раза по сравнению с предыдущим нагружением. В каждой ступени осадок выдерживается под нагрузкой до момента стабилизации деформаций. После этого степень усадки осадка определялась как отношение усадки на данной ступени испытаний к конечной усадке [138]. В общем виде кривые компрессионных испытаний имеют вид, приведенный на рис. 4.3 [144, 137].

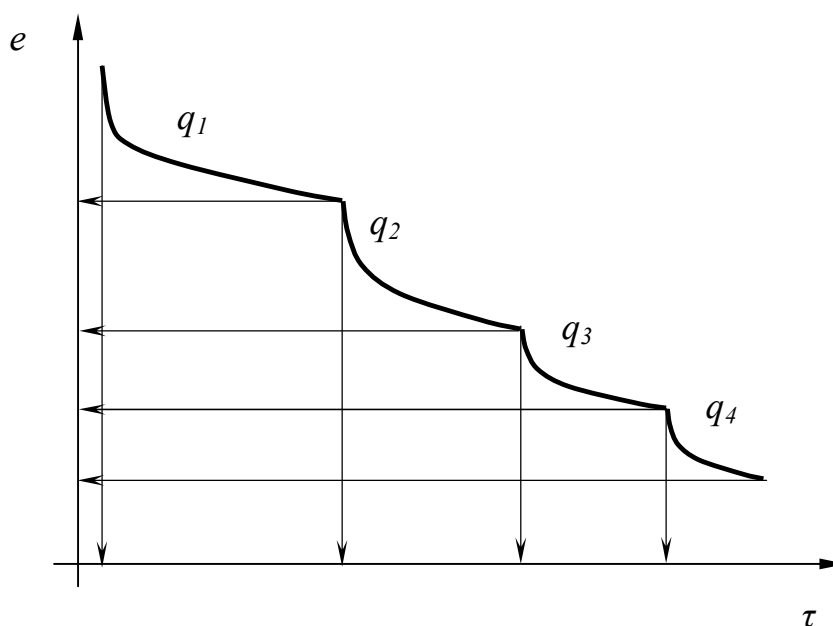


Рис. 4.3. Кривые компрессионных испытаний для осадков углеобогащения

Установлено, что для осадков углеобогащения (отходы флотации) имеется определенное значение нагрузки q , при котором деформация осадка имеет небольшое значение. В механике грунтов считается, что в таком случае деформации могут быть упруго-вязкими или упругими, т.е. исчезать при снятии нагружения. В случае, когда деформации относятся к упруго-вязким, скорость изменения относительной деформации незначительная и практически не зависит от высоты осадка и условий протекания жидкости. Аналогичные процессы происходят в осадках при обезвоживании на ленточных фильтрах, при формировании осадков в фильтр-прессах в начальной стадии

процесса и др. Указанная выше нагрузка q носит название структурной прочности осадка и обозначается как $q_{стр}$.

В случаях, когда приложенная к осадку нагрузка имеет значение, превосходящее величину $q_{стр}$, деформации в осадке происходят более интенсивно. Но, тем не менее, процесс переформирования осадка может быть длительным. Часто его завершение не удастся определить при выполнении одного эксперимента. На практике такие режимы имеют место в осадительных центрифугах и на конечной стадии обезвоживания в фильтр-прессах.

Время достижения осадком определенной заданной относительной деформации находят по известным из механики грунтов соотношениям [131].

На базе этих определений получают значение структурной прочности осадка, для чего используется стандартная компрессионная кривая. Эта кривая показывает зависимость относительной деформации образца (или его пористости) от прилагаемой нагрузки q (рис. 4.4).

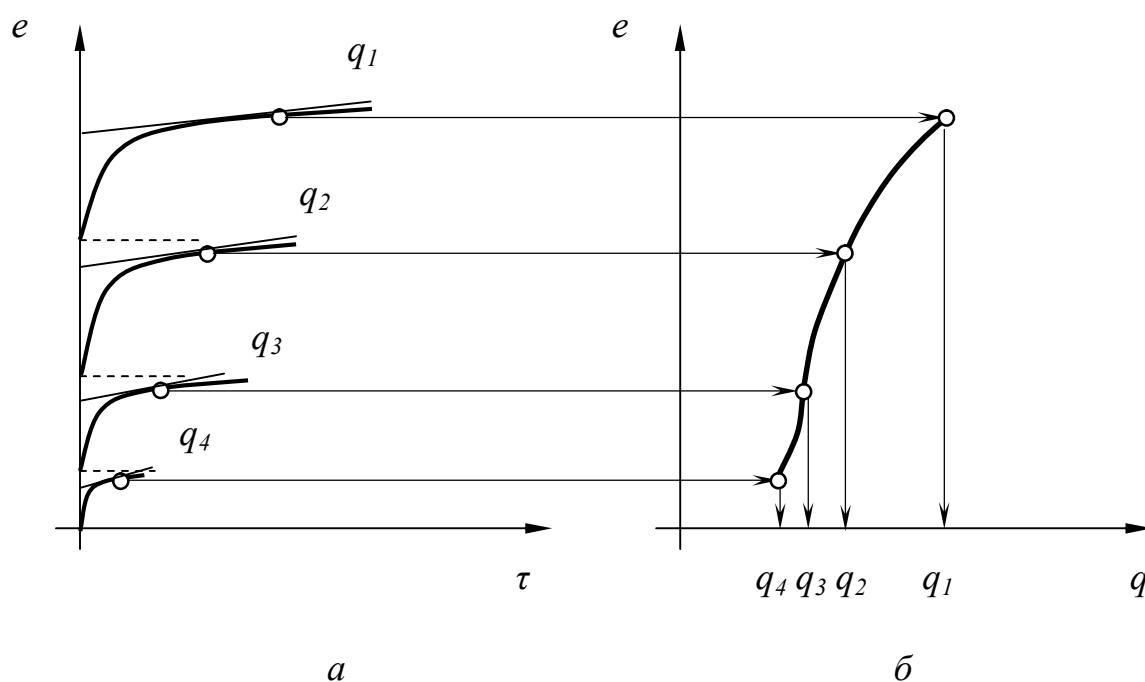


Рис. 4.4. Порядок построения консолидационной кривой:
 a – начальные данные, $б$ – консолидационная кривая

В каждой ступени нагружения определяется конечная деформация осадка. Конечной считается деформация, на превышающая 0,02мм/сут.

Обработка результатов компрессионных испытаний по стандарту выполняется в два этапа. На первом этапе снимают показания часовых индикаторов деформаций, определяют общую деформацию образца, затем относительную и строят кривые зависимости относительных деформаций на каждом этапе нагружения от времени опыта (рис. 4.4 б).

Относительные деформации e вычисляют по формуле:

$$e = \Delta h / h_0 . \quad (4.3)$$

Здесь Δh – изменение высоты осадка под действием пригружения;

h_0 – первоначальная высота осадка.

В связи с тем, что такие испытания требуют значительного времени, по оси абсцисс чаще используют логарифмическую шкалу и консолидационная кривая имеет вид, представленный на рис. 4.5.

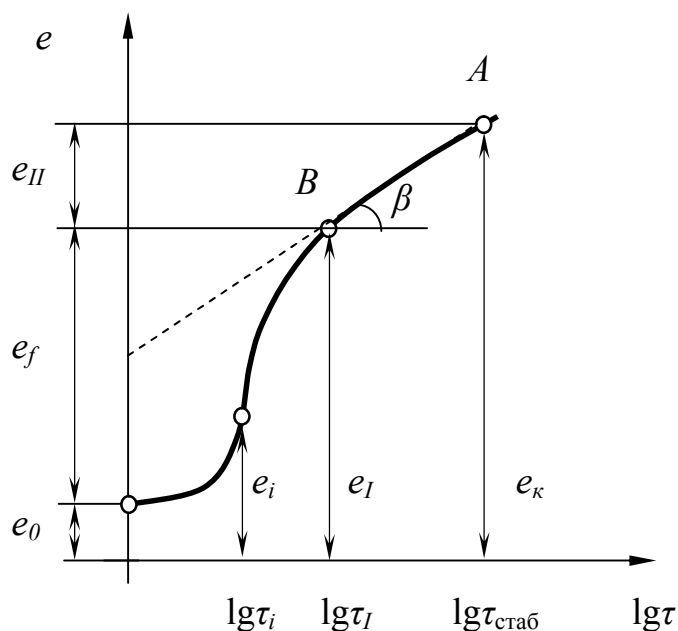


Рис. 4.5. Консолидационная кривая с логарифмической шкалой по оси абсцисс

На рис. 4.5 приняты следующие обозначения:

- τ_i – текущее значение времени, которому соответствует относительная деформация образца e_i ;
- τ_I – консолидационный параметр, соответствующий времени завершения первичной усадки образца и достижению первичной относительной усадка e_I ;
- e_{II} – вторичная относительная усадка образца;
- e_K – конечная относительная деформация образца, которой соответствует время стабилизации $\tau_{\text{стаб}}$;
- AB – участок кривой, близкий по форме к прямолинейному, соответствующий вторичной усадке образца;
- точка B – точка, соответствующая окончанию прямолинейного участка консолидационной кривой, в которой проводят касательную;
- β – угол наклона касательной в точке B , тангенс которого равен значению консолидационного параметра m_q , зависящего от величины прикладываемой к образцу нагрузки.

Значение времени τ_I зависит от вида осадка, его начального состояния, нагрузки на осадок, пути дренирования воды в порах осадка и др.

Кривая консолидации показывает, как происходят деформации e исследуемого образца при заданном пригрузении с течением времени. Консолидационные кривые дают информацию для определения физико-механических и гидравлических характеристик исследуемых образцов осадков. Из механики грунтов известно, что наибольшая усадка образцов происходит в начале эксперимента за относительно небольшое время. Затем процесс замедляется, о чем свидетельствуют и графики, показанные на рис. 4.3.

По данным консолидационных испытаний строят серию графиков в координатах « $e_I/e_K - q$ », « $\tau_I - q$ », « $e_I - q$ », « $m_q - q$ », « $e_i/e_I - (\lg \tau_i - \lg \tau_I)$ ». Из этих графиков определяют консолидационные параметры: относительную усадку образцов e_I и соответствующий ей момент времени τ_I , параметр m_q и соответствующие ему значения величин пригружения осадков.

Выполненные таким образом исследования физико-механических свойств осадков позволяют определить такие

параметры как структурная прочность осадка при компрессионном сжатии q_{cmp} , коэффициент уплотнения осадка a , стандартный модуль усадки e_q^c и модуль стандартной компрессии E_c , модуль усадки и другие параметры. Результаты определений, которые проводились совместно, подробно изложены в работах [138, 144, 145].

На рис 4.6 приведены в качестве примера консолидационные кривые для отходов флотации ЦОФ Красноармейская, полученные при разных значениях пригружения.

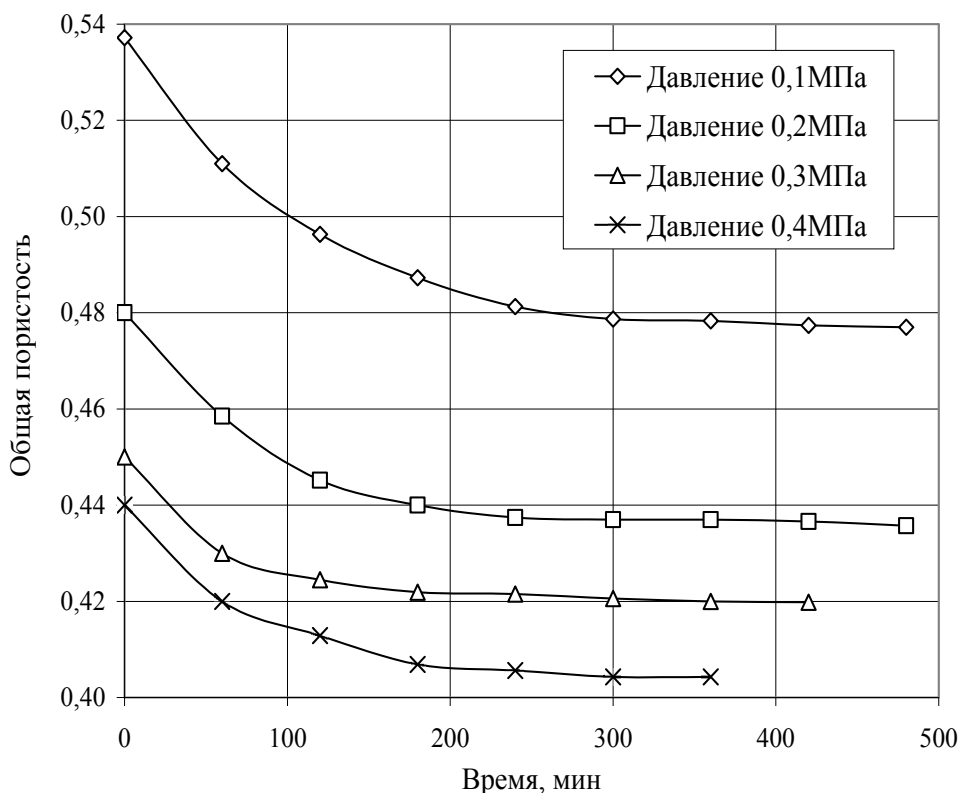


Рис. 4.6. Связь коэффициента пористости с прилагаемым к осадку давлением

Для отходов флотации ЦОФ Киевская и ЦОФ Калининская получены аналогичные зависимости. Такие испытания направлены на оценку сжимаемости осадков и изменение их водопроницаемости в зависимости от давления. Из кривых следует, что при увеличении пригружения осадка его пористость снижается с 54% до 40,5%.

Необходимо подчеркнуть, что пригружение образца в следующей ступени нагружения начинается с того

консолидированного состояния, которое уже было получено в предыдущей стадии.

В табл. 4.1 приведены результаты компрессионных испытаний некоторых продуктов углеобогащения.

Из данных, приведенных в табл. 4.1, следует, что коэффициент сжимаемости осадков сильно зависит от приложенного давления. При увеличении давления от 0,1 до 1,5 МПа снижает сжимаемость более, чем в 100 раз. В зависимости от вещественного состава и крупности продуктов этот параметр изменяется в несколько раз. Время консолидации так же значительно изменяется в зависимости от того, какая стадия нагружения выполняется. При этом период консолидации образцов разного вещественного состава существенно различается. Для глинистых осадков, представленных отходами флотации, время консолидации имеет максимальные значения. Зернистые осадки (сгущенные продукты гидроциклонов) консолидируются быстрее на порядок. Концентраты флотации, содержащие низкозольные угольные частицы с гидрофобной поверхностью, имеют минимальное время консолидации.

Таблица 4.1.

Параметры, полученные на основе компрессионных испытаний образцов

Продукт	Коэффициент компрессии, $\text{м}^2/\text{МН}$, при давлении		Модуль деформации, МПа, при давлении		Время консолидации, мин.
	0,1 МПа	1,5 МПа	0,1 МПа	1,5 МПа	
1	2	3	4	5	6
Отходы флотации ЦОФ Киевская	1,3	0,024	3,2	19,3	120-670
Сгущенный продукт гидроциклонов ГОФ Луганская	2,20	0,015	1,8	34	1-28
Шлам илонакопителя ВПП Моспинское	1,15	0,031	2,0	14,5	18-280
Концентрат флотации ЦОФ Комсомольская	3,6	0,035	1,3	25,1	2-15
Сгущенный продукт гидроциклонов ВПП Моспинское	2,35	0,026	2,6	32,3	4-40
Сгущенный продукт гидроциклонов ЦОФ Киевская	2,51	0,027	1,5	14,8	8-46
Отходы флотации ЦОФ Комсомольская	1,6	0,022	3,0	20,2	180-820
Концентрат флотации ЦОФ Киевская	3,1	0,034	1,3	22,5	10-52

Большая длительность консолидации глинистых осадков свидетельствует о том, что многие сгустители, применяемые для обработки этого продукта, работают в режиме неполной консолидации осадка. Указанное не относится к фильтр-прессам и илонакопителям. В первом случае высокое давление способствует ускорению процесса консолидации осадка, во втором – значительное время и высокая площадь отстойника.

Объем пор в единице объема осадка (в 1см^3) v вычислялся через коэффициент пористости:

$$v = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = 1 - m. \quad (4.3)$$

Осадки, состоящие в основном из угольных или песчаных частиц, относятся к зернистым несжимаемым. Во влажном состоянии зернистые осадки имеют определенное сцепление между частицами. Одной из причин сцепления является наличие капиллярных сил. При полном погружении осадков в воду это сцепление ослабевает или исчезает полностью вследствие обводненного состояния осадков. Второй причиной служит заклинивание зернистых частиц при их тесном контакте друг с другом, возникающее из-за неправильной формы частиц, наличия впадин и выступов на их поверхности. В механике грунтов этот тип сцепления рассматривается как разновидность жесткого сцепления. Для такого типа осадков, находящихся в переконсолидированном состоянии, усилие сдвига обычно имеет максимум, а затем установившееся практически постоянное значение [130].

Тонкие глинистые осадки, например отходы флотации, относятся к связанным осадкам. Отличительной особенностью таких осадков по сравнению с несвязанными (сыпучими) является то, что частицы в них и отдельные агрегаты, образованные из этих частиц, связаны между собой. Связи могут иметь разный характер – быть пластичными (водно-коллоидными) или частично жесткими (цементационно-кристаллизационными) [137]. При этом сопротивление сдвигу, определяемое силами сцепления между частицами, зависит от связанности частиц в осадке.

Для глинистых пород важным фактором является число пластичности, которое представляет собой разность предела текучести и предела пластичности:

$$I_n = W_m - W_p, \quad (4.4)$$

где I_n – число пластичности;

W_m и W_n – пределы текучести и пластичности, соответственно.

Предел текучести представляет собой влажность осадка, при которой стандартный балансирный конус с определенной массой погружается в глинистый осадок на глубину 10мм в течение 5с. Методика определения является стандартной и описана в специальной литературе [134, 136, 137].

Предел пластичности показывает границы раскатывания осадка, т.к. стандартным методом определения предела пластичности является метод раскатывания в шнур. Пробу осадка в пластичном состоянии раскатывают в шнур диаметром 3мм на стеклянной подложке. После этого шнур собирают в комок и снова раскатывают. Эти операции повторяют несколько раз до тех пор, пока при очередном раскатывании шнур не начинает крошиться на отрезки небольшой длины (от 3 до 10мм). В таком случае считают, что предел пластичности достигнут, и определяют влажность полученного после многократного раскатывания осадка, которая и соответствует пределу пластичности.

В качестве еще одного параметра, характеризующего механические свойства осадка, используется коэффициент уплотненности зернистых и глинистых осадков U , который определяется из соотношения:

$$U = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\min}}. \quad (4.5)$$

Здесь ε_{\max} и ε_{\min} – максимальный и минимальный коэффициенты пористости осадка в зависимости от способа его упаковки [32].

Результаты определения ряда физико-механических свойств осадков углеобогащения представлены в табл. 4.2.

Данные, приведенные в табл. 4.2, позволяют заключить, что для отходов флотации, являющихся глинистыми осадками, характерна низкая пористость в пределах 33-36%, нижний предел пластичности изменяется от 16 до 21%, а верхний – от 33 до 44%. Такие осадки будут снижать пористость при приложении давления [138-140].

Зернистые осадки с низким содержанием глины – концентраты флотации – имеют пористость в пределах 50%, не обладают пластичностью. Следует ожидать, что под действием давления в определенных пределах, их пористость значительно не снизится.

Таким образом, в ходе исследования физико-механических свойств осадков углеобогащения определен ряд параметров, которые имеют важное значение при механическом воздействии на осадок.

Таблица 4.2.

Физико-механические свойства продуктов углеобогащения

Продукт	Плотность, δ , кг/м ³	Общая пористость, m , %	Пределы пластичности, %		Число пластичности, %	Средний диаметр частиц, мм
			нижний	верхний		
Отходы флотации ЦОФ Киевская	1820	33	21	46	25	0,21
Сгущенный продукт гидроциклонов ГОФ Луганская	1640	44	-	-	-	0,8
Шлам илонакопителя ВПП Моспинское	1660	38	16	33	17	0,25
Концентрат флотации ЦОФ Комсомольская	1580	51	-	-	-	0,3
Сгущенный продукт гидроциклонов ВПП Моспинское	1670	41	-	-	-	0,65
Сгущенный продукт гидроциклонов ЦОФ Киевская	1650	45	-	-	-	0,7
Отходы флотации ЦОФ Комсомольская	1810	36	17	44	22	0,3
Концентрат флотации ЦОФ Киевская	1500	50	-	-	-	0,35

4.2. Исследование изменения параметров осадков при механическом воздействии

Как было установлено в п. 3.1, под действием внешнего давления водонасыщенные осадки, обладающие свойством связанности частиц, изменяют свою пористость, плотность и влажность. Изменение этих параметров осадков влияет на их сопротивление сдвигу, которое в свою очередь зависит от вида упаковки осадка, условий в точках контакта частиц неправильной формы друг с другом и от приложенного давления.

В механике грунтов известны стандартные методики определения поведения водонасыщенных осадков в различных состояниях [131]. Как отмечает ряд авторов, многие методики имеют существенные недостатки, но тем не менее их использование позволяет получить информацию о таких важных свойствах осадков, как водопроницаемость и сопротивление сдвигу. Для исследования водопроницаемости осадков чаще всего используют прибор Абелева-Озерецковскогго, схема которого показана на рис. 4.7.

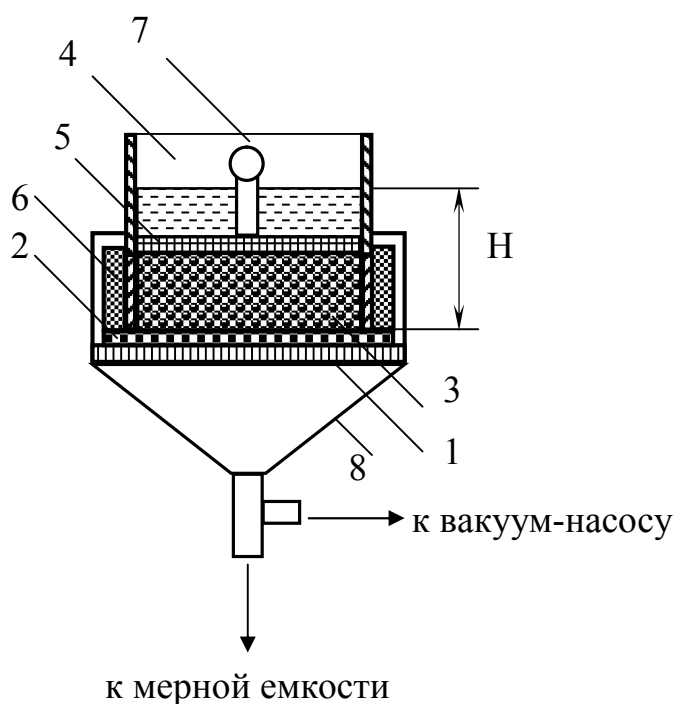


Рис. 4.7. Схема прибора Абелева-Озерецковскогго для определения водопроницаемости осадков: 1 – поддерживающая перегородка, 2 – фильтровальная сетка, 3 – осадок, 4 – цилиндр, 5 – перфорированный штамп, 6 – парафин, 7 – шарнир рычага, 8 – приемная воронка

Методика исследования является стандартной и подробно описана в работе [134]. В работе была использована эта методика и установка при проведении исследований осадков углеобогащения с помощью сотрудников лаборатории физического и компьютерного моделирования горного факультета ДонНТУ.

Измерительный сосуд представляет собой емкость, в котором располагается поддерживающая перегородка с уложенной на ней фильтровальной сеткой. На сетке устанавливается металлический цилиндр, сформированный из двух частей. Нижний цилиндр является режущим, имеет диаметр 70-80мм и высоту 20-30мм.

Верхний цилиндр обеспечивает направленное перемещение расположенного внутри него перфорированного штампа и поддержание постоянного уровня воды.

Исследуемый осадок помещают в нижний цилиндр и накрывают его смоченной фильтровальной бумагой. Во избежание протекания воды мимо осадка пространство между стенками цилиндра и измерительного сосуда заполняют парафином. Сверху осадок прижимают перфорированным штампом, над которым закреплен часовой индикатор, позволяющий регистрировать усадку осадка. Через шарнир рычага к осадку прикладывают некоторую первоначальную пригрузку и выдерживают осадок в таком состоянии до полного насыщения водой. После этого с помощью рычага (на рисунке не показан), связанного шарниром с перфорированным штампом прикладывают к осадку первую ступень нагрузки, обычно составляющую 0,05МПа.

Нижняя часть приемной воронки соединена с вакуум-насосом для создания разрежения и с мерной емкостью, с помощью которой определяют количество воды, профильтрованной через слой осадка. Уровень воды H в цилиндре поддерживается постоянным. Для этого можно использовать прозрачную емкость, заполненную водой, расположив ее вверх дном над цилиндром. Емкость закрыта крышкой с пропущенной через нее трубкой, второй конец которой заглублен в воду в измерительном цилиндре над перфорированным штампом. Если в цилиндре понижается уровень воды при протекании ее через слой осадка, то в емкость проскакивает пузырек воздуха и порция воды вытекает в цилиндр. Вспомогательная емкость на рис. 4.7. не показана.

По данным измерений определен коэффициент фильтрации по зависимости:

$$K_{\phi} = w_i / F H h t_i, \quad (4.6)$$

где w_i – количество воды, просочившейся через осадок за время t_i ;

F – площадь поперечного сечения осадка в кольце прибора;

H – средний напор за время t_i ;

h – толщина слоя осадка после усадки;

t_i - текущий момент времени.

Результаты позволяют сделать вывод о широком диапазоне изменения коэффициента фильтрации в зависимости от типа осадка и приложенного давления. В качестве примера в графической

форме показана зависимость коэффициента фильтрации для отходов флотации ЦОФ Комсомольская (рис. 4.8).

Из графика следует, что коэффициент фильтрации значительно уменьшается при увеличении давления.

Статистическая обработка данных позволила установить гиперболическую зависимость коэффициента фильтрации K_ϕ от приложенного давления P с высокой степенью приближения. Зависимость имеет вид:

$$K_\phi = 2,47 P^{-1,13} . \quad (4.7)$$

Полученные пределы изменения коэффициента фильтрации K_ϕ достигаются при полной консолидации осадка.

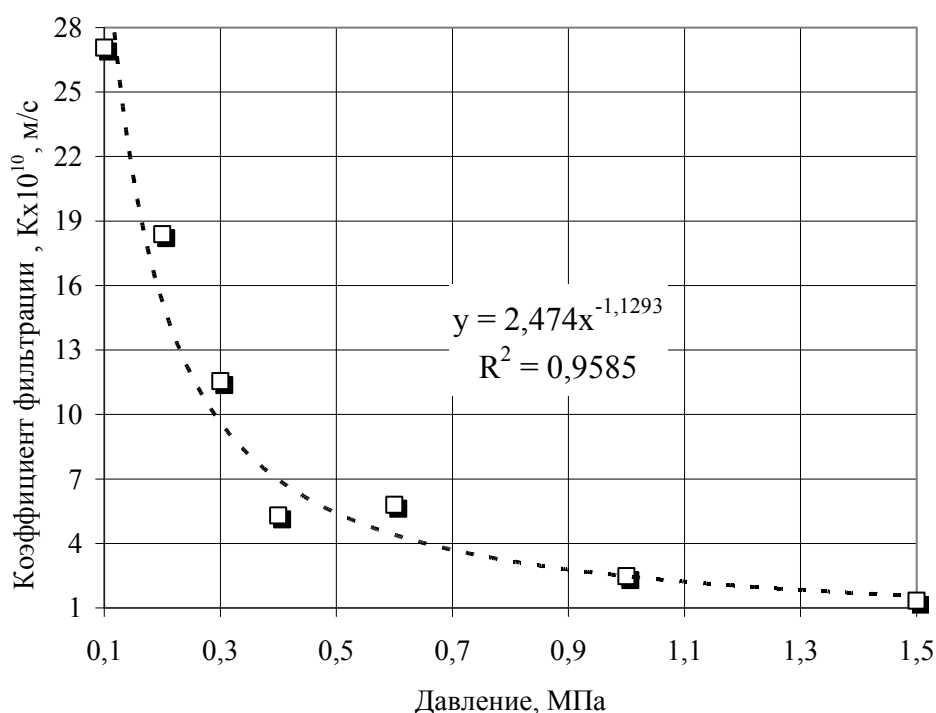


Рис. 4.8. Коэффициент фильтрации для отходов флотации ЦОФ Комсомольская

Следует подчеркнуть, что для большинства аппаратов, используемых для механического обезвоживания различных продуктов углеобогащения, характерна неполная консолидация осадков. Таким образом, удаление влаги из осадков происходит при незаконченном (неустановившемся) режиме консолидации. Для полной консолидации осадков необходимо или большее время процесса или приложение более высоких нормальных нагрузок, что в свою очередь приведет к значительному снижению пористости осадка (см. рис. 4.6).

4.3. Исследование изменения порового пространства осадков при приложении сдвиговых деформаций

Как указывает автор работы [104], сопротивление сдвигу характеризует прочность осадка и зависит от давления и условий контакта частиц между собой. Кроме того осадок должен находиться в переконсолидированном состоянии, при котором имеют место определенные соотношения между касательными и нормальными напряжениями, как это показано на рис. 4.9.

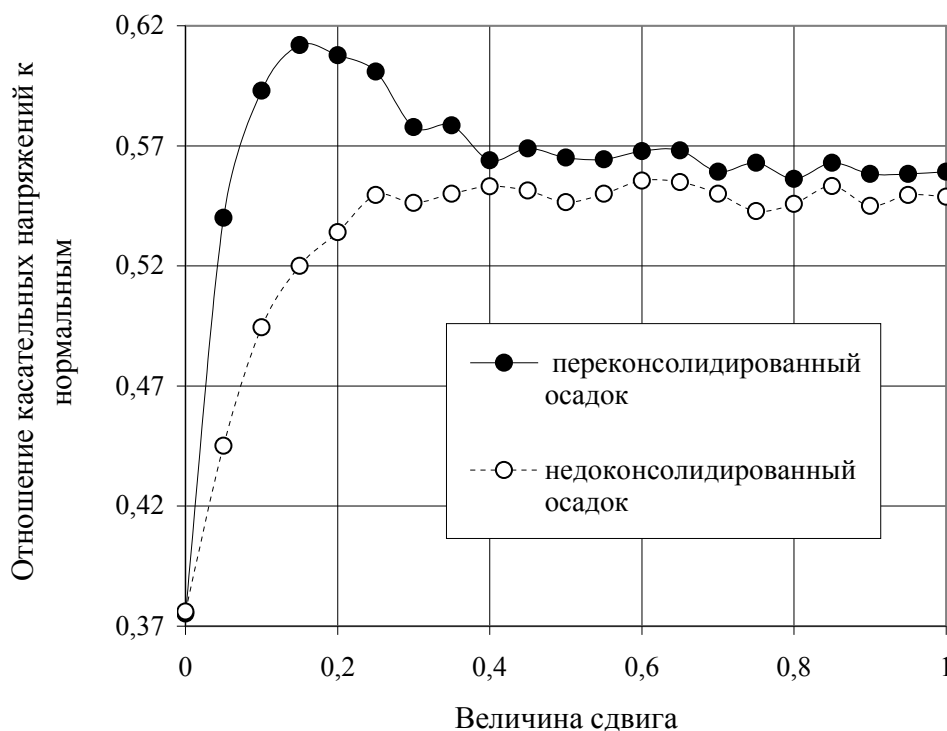


Рис. 4.9. Характерные графики для осадков в различном механическом напряженном состоянии [104]

В разделе 3 данной работы приведены результаты имитационного исследования на компьютерной модели влияния вида упаковки осадков, их гранулометрического состава и скорости приложения сдвига на параметры обезвоживания и количество остаточной влаги в осадке. Для подтверждения полученных результатов разработана лабораторная установка, позволяющая создавать нормальное пригружение осадка и сдвиг.

Известны устройства для испытания горных пород на срез и на трехосное сжатие [134, 147]. Эти устройства характеризуются высокой трудоемкостью в работе, отсутствием возможности

проведения испытаний образцов разных размеров и моделирования водонасыщения и фильтрационных свойств тонкодисперсных осадков.

Экспериментальная установка должна обеспечивать возможность уплотнения тонкодисперсного осадка, его деформирования в различных направлениях, создания равнокомпонентного или неравнокомпонентного объемного напряжения в осадке, а также создания потока жидкости через осадок. Для проведения исследований механических свойств образцов осадков и изменения их порового пространства на кафедре «Обогащение полезных ископаемых» ДонНТУ разработана экспериментальная установка, основу которой составляет испытательная ячейка. Принципиальное устройство измерительной ячейки для испытания образцов углеобогащения на трехосное сжатие показано на рис. 4.10, а общий вид установки – на рис. 4.11.

Установка представляет собой полностью металлическую конструкцию, состоящую из основания, рамы и крышки.

На верхней крышке расположен конусообразный подвод (воронка) для жидкости, на нижней закреплен отвод аналогичной формы. По торцам каждой из сторон вкручен болт [144-146]. Установка опирается на четыре ножки (рис. 4.11).

В ячейке расположены нагружающие устройства в виде поршней, имеющих возможность перемещения в горизонтальной плоскости. При испытании образец призматической формы устанавливается при поднятой крышке в пространстве, образованном подвижными поршнями и основанием установки. Нагружающие поршни имеют болты с известным шагом резьбы и головкой.

По количеству оборотов головки болта можно регулировать его подачу и определять пройденное расстояние. Для создания напряженного состояния осадка поршни должны перемещаться в определенной очередности.

Нагружение по каждой оси выполняется независимо. При этом болты поворачиваются на определенный фиксированный угол и обеспечивают постоянный контакт между поверхностью поршня и осадком. Создается давление на образец осадка по его торцевой поверхности. Для обеспечения возможности перемещения один из поршней выполнен составным и имеет фасонный вырез, так называемый ласточкин хвост.

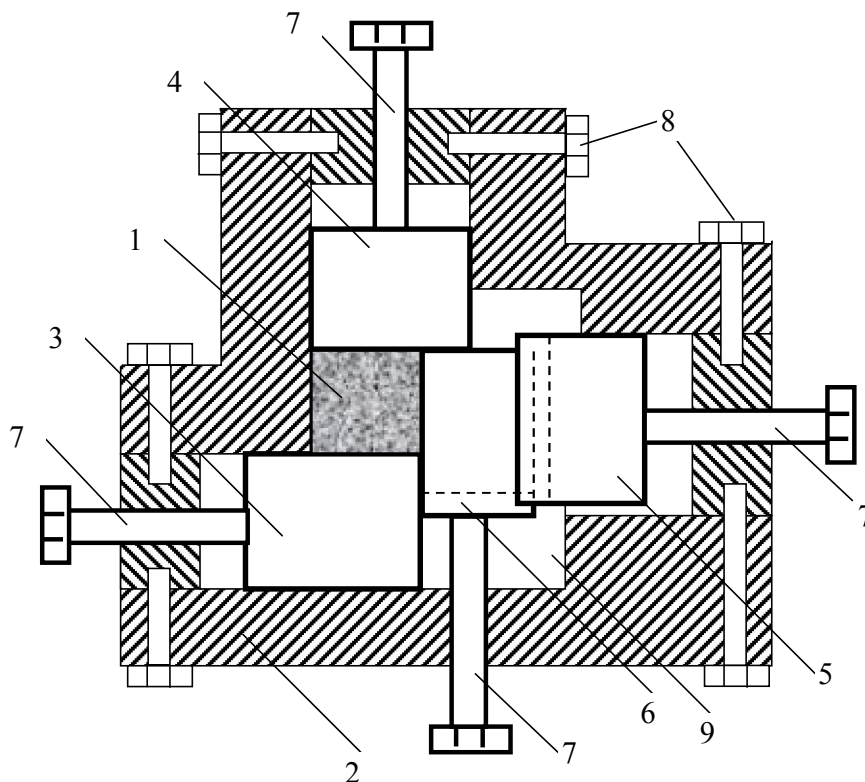


Рис. 4.10. Ячейка установки для испытания водопроницаемости образцов осадка в различных напряженных состояниях:

1 – испытуемый осадок; 2 – рама; 3 – поршень 1; 4 – поршень 2; 5 – поршень составной; 6 – вкладыш в составной поршень; 7 – болты для перемещения поршней; 8 – крепежные болты; 9 – опорный поддон

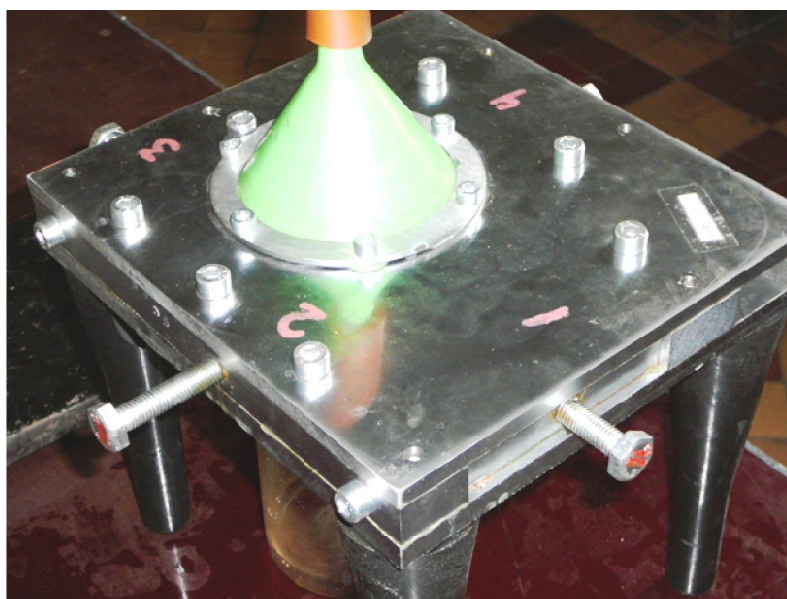


Рис. 4.11. Общий вид установки для исследования водопроницаемости образцов осадков в механически напряженном состоянии

4.3.1 Методика проведения испытаний

Методика проведения испытаний влагопроницаемости осадков и влияния скорости сдвига на скорость удаления влаги заключается в следующем. Перед началом испытаний поршни устанавливаются в исходное положение. Подготовленный осадок необходимой крупности помещается в форму, изготовленную из промышленной фильтровальной ткани для фильтр-прессов. Эта форма с осадком представляет собой параллелепипед. Перед проведением исследования форма с осадком насыщается водой и затем помещается в испытательную ячейку с раздвинутыми болтами и открытой крышкой. При этом форма с осадком не должна испытывать на своих гранях никакого нагружения, а только прилегать плотно к торцевым поверхностям поршней, без зазоров.

После установки образца осадка накрывается крышка, имеющая идентичные с основанием отверстия для подачи воды. Крышка плотно притягивается с помощью крепежных болтов. Вода подается сверху через закрепленную воронку с некоторой постоянной скоростью и принимается снизу через отверстия в основании в мерный приемный сосуд.

Затем измеряется расстояние от головки прижимных болтов до корпуса установки l_1 и l_4 , которые показаны для пояснения на рис. 4.12.

После этого откручиваются прижимные болты 2 и 3 на пол-оборота гаечного ключа и закручиваются болты 1 и 4 с помощью динамометрического ключа (рис. 4.12). Момент затяжки болта не должен превышать 1Нм. Затем до упора закручиваются болты 2 и 3. Далее действия повторяются, и момент затяжки прижимных болтов 1 и 4 увеличивается каждый раз на 0,5Нм.

В связи с тем, что заводской динамометрический ключ имел грубую градуировку шкалы момента затяжки с шагом делений 10Нм, для испытаний осадка на нормальное сжатие ключ был усовершенствован, и имелась возможность получать дискретный (фиксированный) момент затяжки. Схема усовершенствованного динамометрического ключа показана на рис. 4.13. Эта конструкция предоставляла возможность непрерывно снимать показания при закручивании прижимных болтов.

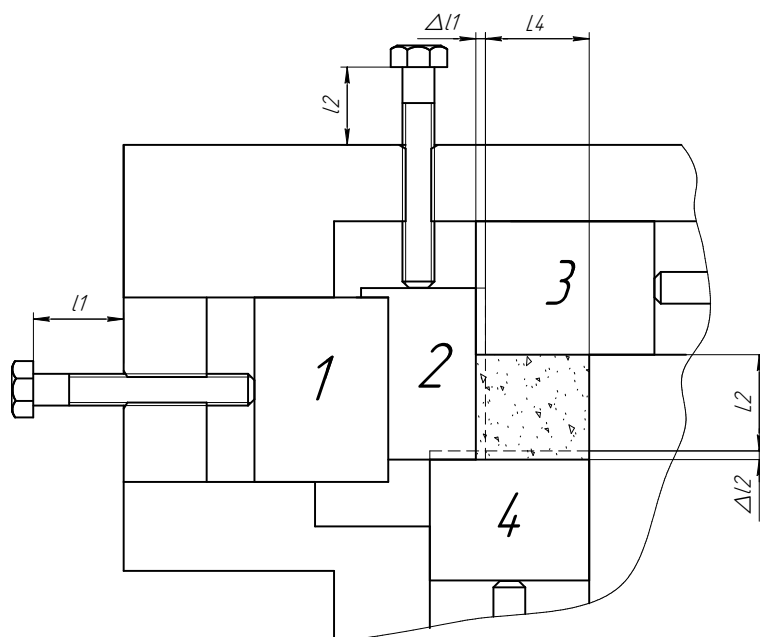


Рис. 4.12. Схема для пояснения измерений положения болтов

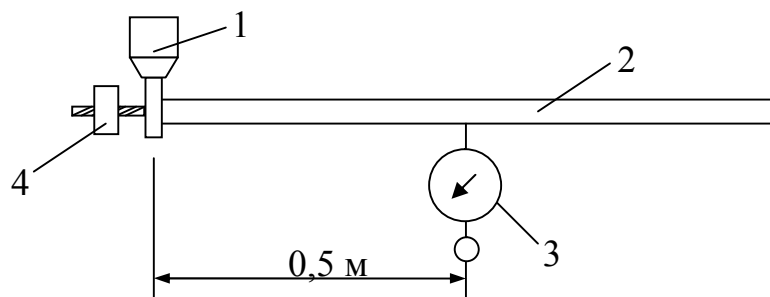


Рис. 4.13. Схема динамометрического ключа после усовершенствования:

1 – накидная головка под гаечный ключ; 2 – плечо-рычаг (алюминиевая трубка); 3 – динамометр; 4 – гайка-груз

Давление на образец осуществляется нажимными поршнями, а также крышкой и основанием по всем граням образца. Образец нагружается до определенной величины и после этого нагружающие поршни останавливаются. Между поршнями, крышкой и основанием образуется объем, в котором находится сжатый с определенным усилием водонасыщенный осадок. Вода

протекает через отверстия в крышке, через фильтровальную ткань, осадок и отверстия в опорной плите. Таким образом, передача нагружения на образец выполняется ступенчато и на каждой ступени измеряется время прохождения определенного объема жидкости через осадок.

Деформирование осадка вызывает изменение его фильтрационных свойств. При этом происходит трансформирование пористого пространства осадка. Перед выполнением эксперимента осадок должен быть полностью насыщен водой, для чего ячейку с осадком оставляют под постоянным небольшим потоком воды длительное время (сутки) [146].

При выполнении исследований осадков углеобогащения на сдвиг необходимо учитывать, что их сопротивляемость сдвигу зависит от длительности и характера действия прилагаемой нагрузки, т.е. имеет выраженный реологический характер. При этом методика испытания должна учитывать влияние изменения структуры осадка в ходе эксперимента. Сопротивляемость осадка сдвигу определяется не только нормальными напряжениями на поверхности сдвига, но и содержит ряд параметров, которые зависят от влажности и пористости осадка.

Для водонасыщенных осадков, какими и являются материалы, подвергаемые механическому обезвоживанию, уплотнение структуры происходит только за счет выделения воды из пор. Поэтому влажность осадка становится параметром, который может характеризовать и пористость осадка.

Параллельно с процессом сдвига в осадке происходит изменение его структуры, которое может быть учтено использованием теории порового давления. В соответствии с этой теорией сопротивляемость осадка сдвигу характеризуется некоторыми условными (относительными) параметрами ϕ' и C' , которые определяются при заданных условиях. Основным условием является завершение процесса консолидации исследуемого осадка [135].

В ходе исследования осадков на сдвиг необходимо выбрать величину нормальной нагрузки, под которой будет производиться сдвиг. При этом минимальная нагрузка должна быть такой, чтобы сопротивляемость осадка сдвигу не оказалась больше этой нагрузки, иначе будет происходить не сдвиг, а отрыв.

Интенсивность сдвигающей нагрузки должна быть такой, чтобы сдвиг произошел в течение 0,5 мин., тогда он может квалифицироваться как быстрый сдвиг. Скорость приложения быстрого сдвига составляет 5-6мм/мин. Для реализации медленного сдвига необходимо время, равное 10 мин. и выше.

При исследовании влияния сдвига на фильтрационные свойства осадка прижимной болт откручивается на пол-оборота, что составляет перемещение равное 0,75мм при шаге резьбы 1,5мм. Одновременно закручивается прижимной болт поршня 4 на четверть оборота, что составляет 0,375мм. Таким образом сохраняется первоначальная площадь основания осадка.

В ячейке использован принцип испытания прочности материала на двухосное сжатие - образец подвергается воздействию нормальных деформаций в двух плоскостях, перпендикулярно направленных друг к другу. За величину нормальной нагрузки по оси абсцисс отвечает прижимной болт поршня 1, по оси ординат - прижимной болт поршня 4. Величина давления, оказываемого поршнями на грани образца, рассчитывается через момент затяжки соответствующего прижимного болта.

Полный момент затяжки $M_{зам}$ равен сумме момента, затрачиваемого на создание силы сжимающей (растягивающей) болт M , момента на преодоление трения между поршнем и торцом болта M_1 , момента на преодоление трения в резьбе M_2 [149] и может быть определен как:

$$M_{зам} = M + M_1 + M_2, \text{ Нм.} \quad (4.8)$$

Момент M , затрачиваемый на создание силы, сжимающей болт, равен:

$$M = 0,5 F s / \pi, \quad (4.9)$$

где F – сила, направленная на сжатие болта, Н;

s – шаг резьбы болта, мм.

Поскольку динамометрический ключ не фиксирует усилия при свободном раскручивании и закручивании болта и в какой-то степени компенсирует все моменты на преодоление сил трения, то можно считать, что:

$$M_{зам} = M = 0,5 F s / \pi. \quad (4.10)$$

Откуда

$$F = 2 M_{зам} \pi / s, \text{ Н}. \quad (4.11)$$

Давление стенки поршня площадью S на осадок, будет равно:

$$P = F / S, \text{ Н/м}^2, \quad (4.12)$$

где S – площадь торца поршня, м^2 .

При расчете площади необходимо учесть, что по мере закручивания прижимных болтов соседние поршни перемещаются, и площадь их контакта с образцом материала уменьшается примерно от 803 до 750 мм^2 . Таким образом, по результатам полученных давлений можно оценивать величину максимальных или критических деформаций, определять степень консолидированности или переконсолидированности осадка.

Тарирование установки выполнено с помощью динамометрического ключа, которым закручивались прижимные болты 1 и 4. По результатам измерения изменения длин болтов поршней 1 и 4, выступающих за пределы корпуса, определено давление на образец. После подстановки выражения (4.11) в соотношение (4.12) получено:

$$P = 2 M_{зам} \pi / s S, \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}. \quad (4.13)$$

Таким образом, разработанная методика и установка удовлетворяют требованиям трехосного воздействия на тонкодисперсные осадки и могут быть использованы для определения параметров механического воздействия на осадок в целях интенсификации процесса удаления влаги из него при фильтровании.

Для определения расхода фильтрата через осадок кроме мерной емкости использовался специально созданный расходомер с использованием подходов, описанных в работе [15]. Первоначально выполнялась грубая настройка расхода воды с помощью мерного сосуда. Когда расход воды через измерительную ячейку был отрегулирован, то мерный сосуд заменялся капельным расходомером. Для регистрации прохождения капель использован

чувствительный элемент в виде пары "инфракрасный светодиод - фотоприёмник". Светодиод (тип BL-L5131RAC с длиной волны 940нм) при проведении эксперимента постоянно светит и освещает фотоприёмник (инфракрасный фотодиод, тип BL-L512PD, длина волны 940нм). При этом на выходе фотоприёмника формируется потенциал, который далее поступает на усилитель (тип AD706 JNZ с напряжением питания 15v) и усиливается до 5v. Когда между светодиодом и фотоприёмником пролетает капля, она перекрывает инфракрасный луч и напряжение на выходе фотоприёмника пропадает. Таким образом, имеем два состояния: 5/0 вольт, нет капли/есть капля. Это напряжение поступает на микроконтроллер (тип Atmel AVR8). С помощью интегральной схемы MAX 232 информация поступает на компьютер для последующей обработки. Посылка производится по интерфейсу RS-232 (EIA-232).

Скорость фильтрации определялась по известному количеству капель, объёму одной капли и зафиксированному времени фильтрации.

4.3.2. Анализ результатов исследования

На основе проведенных исследований с помощью ячейки для испытаний свойств водонасыщенных осадков и их статистической обработки, получены зависимости изменения скорости фильтрации от приложенного давления для недоконсолидированного и переконсолидированного состояния осадков.

В графической форме они представлены на рис. 4.14 и 4.15.

Приведенные данные позволяют заключить, что для недоконсолидированного осадка скорость фильтрации в целом выше, чем для переконсолидированного.

Однако, при увеличении давления она резко снижается и в том и в другом случае практически до близких величин.

При этом установлены экспоненциальные зависимости скорости фильтрации от давления с высокой степенью аппроксимации. Для недоконсолидированного осадка:

$$v = 1,901 e^{-0.101P}, R^2 = 0,91. \quad (4.14)$$

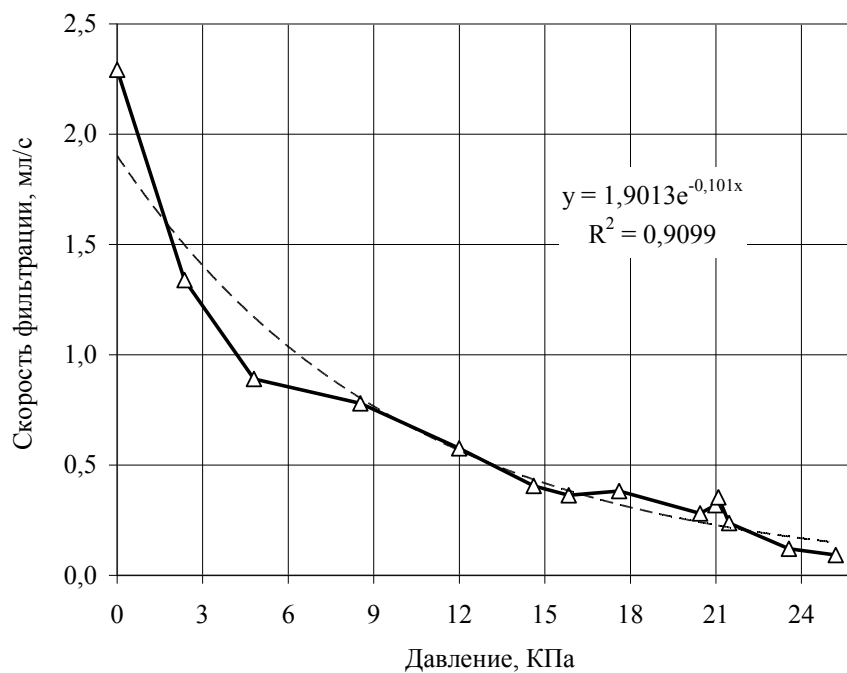


Рис. 4.14. Скорость фильтрации для недоконсолированного осадка

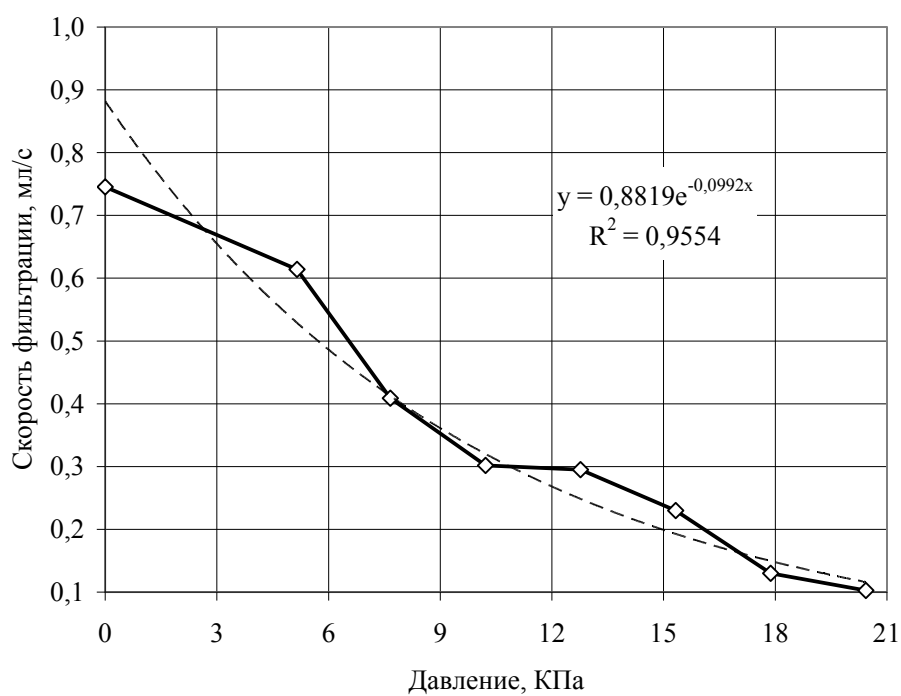


Рис. 4.15. Изменение скорости фильтрации для переконсолированного осадка

Для переконсолидированного осадка:

$$v = 0,882 e^{-0.099P}, \quad R^2 = 0,96. \quad (4.15)$$

При этом для переконсолидированного осадка может быть установлена и линейная зависимость, но в этом случае параметр аппроксимации имеет несколько меньшее значение ($R^2 = 0,9496$), поэтому окончательно принята экспоненциальная. Зависимость скорости фильтрации от величины сдвига, приложенного к недоконсолидированному осадку показана на рис. 4.16.

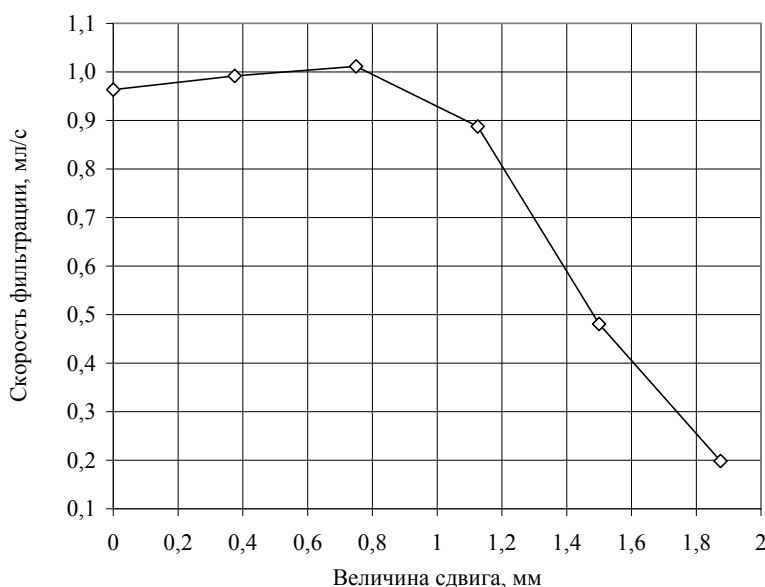


Рис. 4.16. Влияние медленного сдвига на скорость фильтрации недоконсолидированного осадка

Сдвиг прилагался с низкой скоростью (0,2мм/мин.) при небольшом давлении $P = 5,15\text{КПа}$.

Для переконсолидированных осадков получены зависимости скорости фильтрации при быстром и медленном сдвиге для давлений $P = 10,2\text{КПа}$ (рис. 4.17) и $P = 17,88\text{КПа}$ (рис. 4.18).

Анализ графиков рис. 4.16-4.18 позволяет заключить, что недоконсолидированные осадки уплотняются при наложении сдвиговых деформаций с низкой скоростью, что приводит к значительному снижению скорости фильтрации.

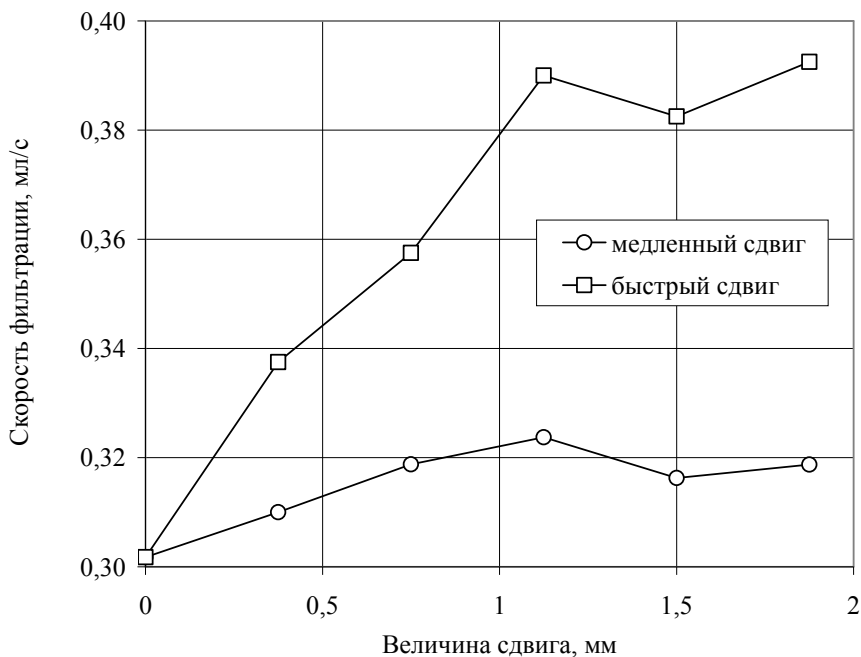


Рис. 4.17. Скорость фильтрации для переконсолидированного осадка ($P = 10,2\text{КПа}$)

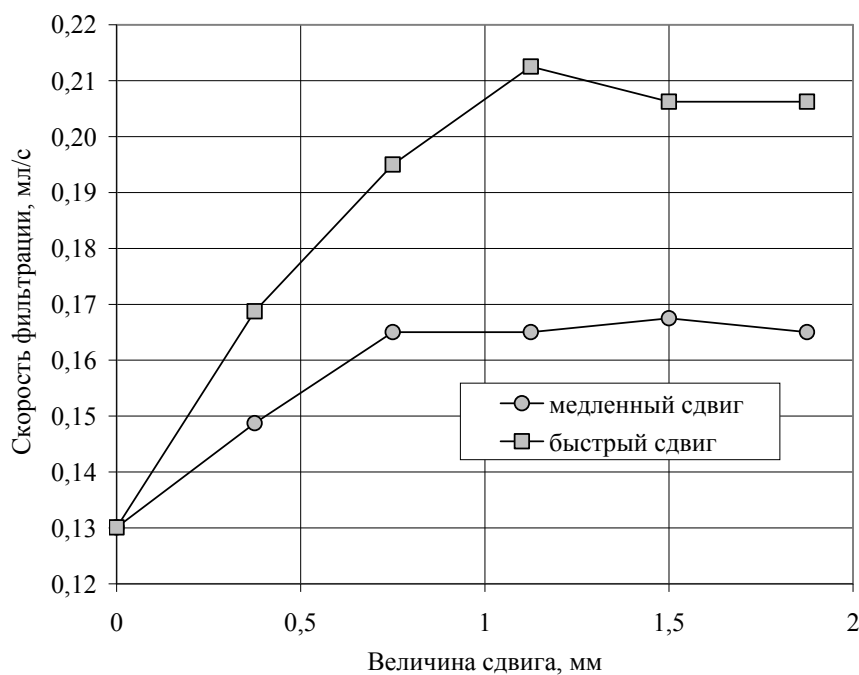


Рис. 4.18. Изменение скорости фильтрации для переконсолидированного осадка при высоком давлении ($P = 17,88\text{КПа}$)

Аналогичные выводы были получены и при использовании метода дискретных элементов для исследования поведения осадков [150-153]. Для переконсолидированного состояния осадка характерно уменьшение скорости фильтрации в 1,3-1,4 раза при использовании медленного сдвига по сравнению с приложением

быстрого сдвига к осадку при различных давлениях. Аналогичные результаты были получены и с помощью численного имитационного моделирования [150-153].

4.4. Аprobация влияния механического воздействия на осадок на параметры его обезвоживания в промышленных условиях

Многие исследователи и работники углеобогатительной отрасли промышленности отмечают увеличение долевого участия шламовых продуктов в рядовых углях, поступающих на предприятия [154-156]. В связи с этим повышается удельный вес затрат на обработку и обогащение частиц именно шламовой крупности. Известно, что этот материал хуже отдает воду, которую необходимо отделить, чтобы довести продукты до потребительских стандартов и требований. Для этих целей используются различные оборудование, но наибольшее применение нашли различные фильтровальные установки [118, 157-161].

Приложение сдвига к осадку, подвергающемуся фильтрованию, проще всего осуществить в промышленных условиях на фильтровальной ткани ленточного вакуум-филтра. В этом аппарате используется верхний подвод исходной суспензии и горизонтальное расположение фильтровальной ткани. Поэтому направление основных сил процесса удаления влаги совпадает – гравитационная сила и фильтрующая, возникающая от перепада давлений по обе стороны от фильтрующей поверхности, имеют одно и то же направление. Это способствует наиболее благоприятному распределению твердой фазы по крупности в среде суспензии и осадка, что дает рациональную структуру осадка и более высокую скорость фильтрования, а также удельную производительность ленточных вакуум-филтров по сравнению с другими конструкциями. Кроме того, ленточные филтры имеют ряд технологических преимуществ: отсутствие перелива и преждевременного осаднения суспензии, достижение влажности в пределах 20% при содержании в питании филтра частиц с размером менее 40мкм до 40%.

По сравнению с филтрами, где фильтровальное полотно закреплено жестко, ленточные филтры со сходящим фильтровальным полотном имеют ряд преимуществ. В последних конструкциях траектория движения полотна и дренажной ленты

совпадают только на участке собственно фильтрования. Принципиальная схема такого фильтра показана на рис. 4.19.

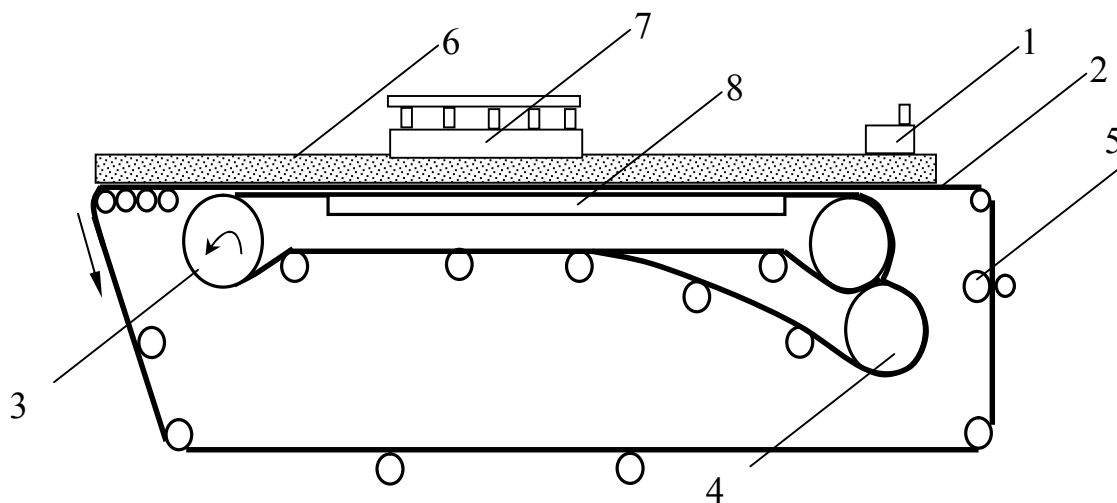


Рис. 4.19. Схема устройства ленточного вакуум-фильтра:

1 – подача питания; 2 – дренажная лента; 3 – приводной барабан; 4 – натяжные барабаны; 5 – натяжные ролики; 6 – осадок; 7 – подача промывной воды; 8 – вакуумные камеры

На предприятиях на фильтрование обычно направляется шламовая суспензии, содержащая частицы различной крупности. Проницаемость формирующегося осадка является величиной переменной, соответственно и пористость его также будет различной в зависимости от гранулометрического параметра, по которому предложено определять свойства осадка в работе [162]. При этом гранулометрический параметр как показатель однородности твердой фазы может быть определен по упрощенной зависимости:

$$P_o = d_{60} / d_{10}, \quad (4.16)$$

где P_o показатель однородности (гранулометрический параметр);
 d_{60} и d_{10} - средневзвешенные диаметры соответственно крупных и мелких частиц твердой фазы суспензии.

В зависимости от значения параметра P_o выбирается тип фильтра и можно получить различные показатели обезвоживания. Проницаемость осадка тесно связана с параметрами поровой среды осадка, от которой зависит сопротивление осадка переносу фаз в каналах. Установлена эмпирическая зависимость между

показателем однородности и сопротивление осадка, которая имеет вид [162]:

$$r_{oc} = 0,25 * 10^4 P_o^{1,2} / d_{cpe}^2. \quad (4.17)$$

Здесь r_{oc} – удельное сопротивление осадка;

P_o – показатель однородности;

d_{cpe} – средневзвешенный размер частиц осадка.

Из зависимости (4.17) можно сделать вывод о том, что при росте показателя однородности при значительном отличии в размерах частиц осадка увеличивается удельное сопротивление осадка. Это связано с более плотной упаковкой частиц. Такой пример разноразмерного осадка исследовался при имитационном моделировании и получена минимальная пористость в этом случае (см. табл. 3.1). Низкая проницаемость осадка отрицательно сказывается на производительности фильтровальной установки, о чем свидетельствуют данные рис. 4.20 [163].

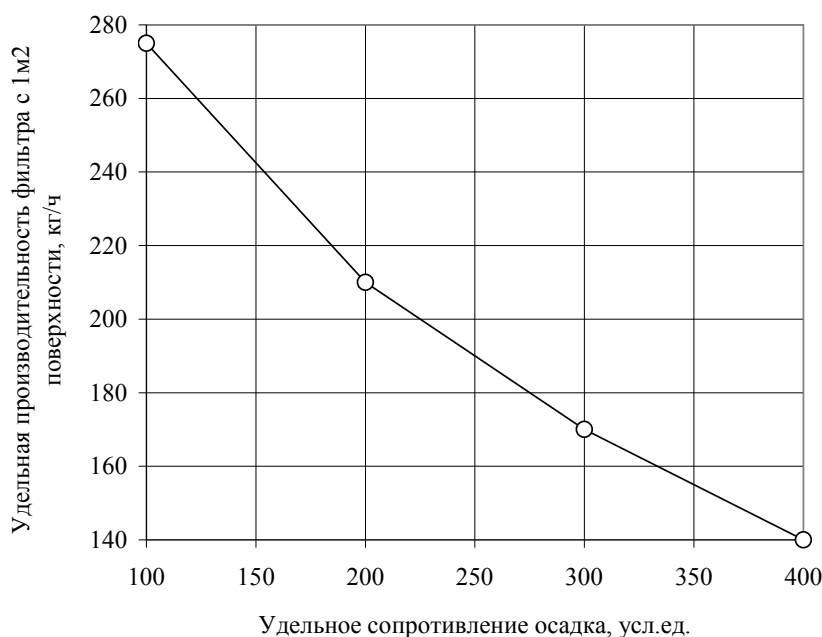


Рис. 4.20. Связь производительности фильтра с удельным сопротивлением осадка

Производительность ленточного фильтра находится в прямой зависимости от содержания твердого в питании и скорости перемещения дренажной ленты. На практике установлено, что параметры фильтрования более зернистых осадков сильнее зависят от приложенного перепада давлений. Как считают авторы работы

[164], зависимость содержания остаточной влаги в осадке и перепада давлений от времени имеет вид:

$$h(t) / h_0 = [1 - (k_1 m^3 P_o^{1.2} \Delta p t) / (1 - \varphi - \psi (1 - m)^2 r_0 h_0^2)]^{0.5}, \quad (4.18)$$

где $h(t)$ и h_0 – текущее и начальное значение высоты свободной поверхности раздела фаз над уровнем ленты фильтра;

k_1 – коэффициент, учитывающий температуру и пористость слоя;

m – пористость осадка;

P_o – показатель однородности осадка

Δp – разрежение;

t – время;

φ – предельное значение доли твердых частиц в уплотненном слое;

ψ – остаточное влагосодержание осадка;

r_0 – удельное сопротивление осадка;

Приведенная зависимость позволяет определить рациональный момент приложения сдвиговых деформаций, т.к. осадок должен находиться в переконсолидированном состоянии. Только в этот момент можно достичь некоторого разуплотнения осадка и повышения его пористости и проницаемости, что будет способствовать увеличению скорости удаления влаги.

Промышленные испытания метода повышения эффективности механического обезвоживания, разработанного на основе имитационного моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, проведены на обогатительной установке шахты «Глубокая». Технологическая схема установки включает предварительную классификацию угля по машинным классам, обогащение отсадкой угля крупностью 6(10)-50мм, обезвоживание продуктов отсадочной машины. Шламы улавливаются в гидроциклонах ГЦМ-360, часть слива гидроциклонов сгущается в сгустителе СВ-4,5, а сгущенные продукты направляются на обезвоживание на ленточном фильтре ЛОП-10.

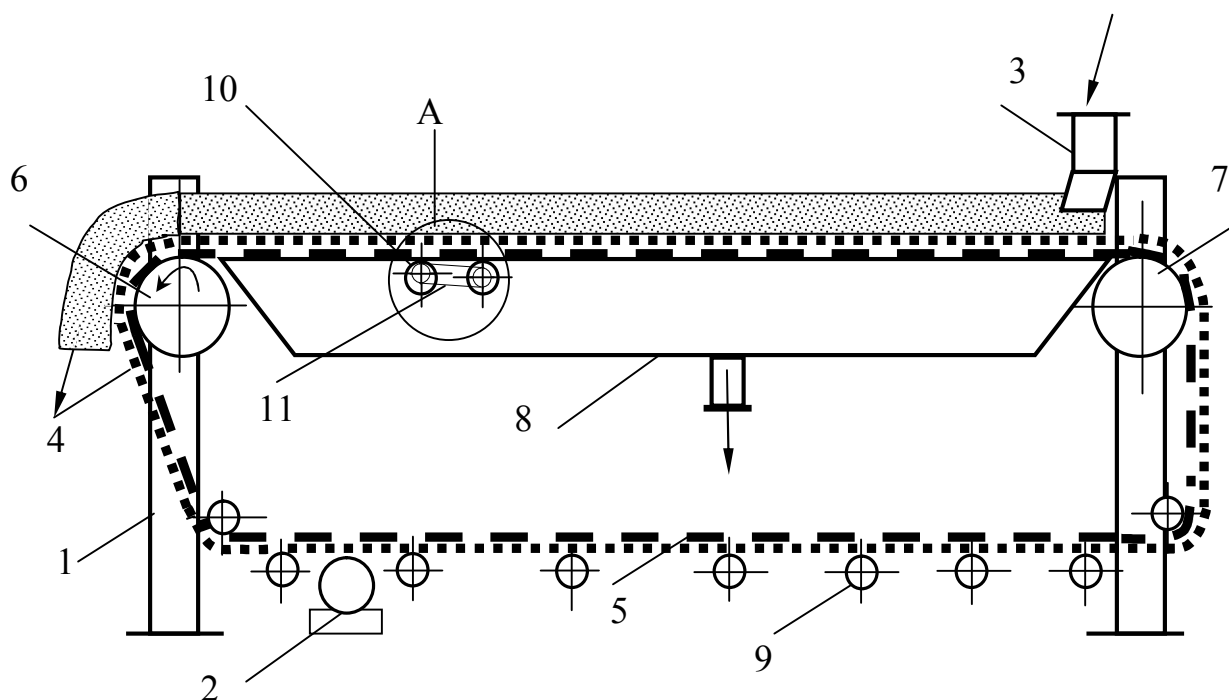


Рис. 4.21. Схема ленточного вакуум-фильтра с приложением сдвигающих усилий к осадку:

1 – рама, 2 – привод, 3 – питание, 4 – фильтровальное полотно, 5 – перфорированная лента, 6 – приводной барабан, 7 – натяжной барабан, 8 – вакуумная камера, 9 – поддерживающие ролики, 10 – ролик с эксцентрично расположенной осью, 11 – клиноременная передача

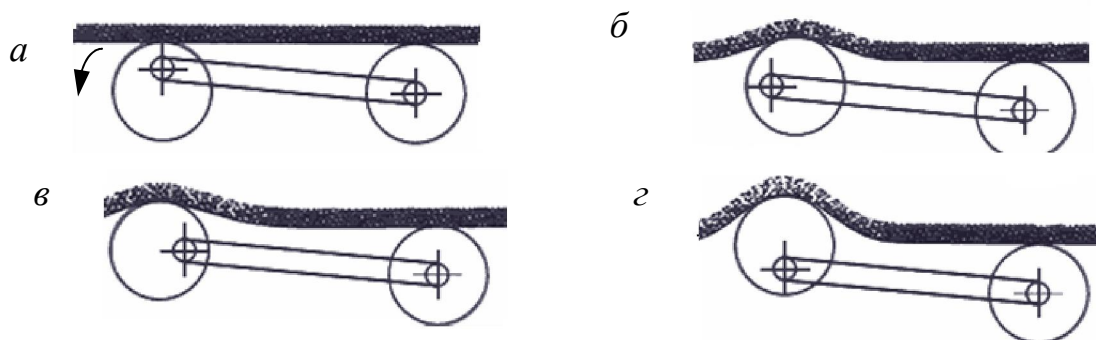


Рис. 4.22. Схема установки ролика с эксцентричной осью и последовательные фазы объемного сдвига и разуплотнения осадка при повороте ролика: а – 0° , б – 90° , в – 180° , г – 270°

Для реализации теоретических разработок работы фильтр ЛОП-10 был усовершенствован – обеспечение приложения сдвиговых деформаций к осадку в переконсолидированном состоянии достигается установкой последнего ролика фильтра с эксцентриситетом. Данное техническое решение запатентовано [166]. Принципиальная схема ленточного фильтра усовершенствованной конструкции показана на рис. 4.21, ролика с эксцентриситетом (позиция А на рис. 4.21) – на рис. 4.22.

Результаты проведенных промышленных испытаний по апробации метода приложения к осадку сдвиговых деформаций на ленточном вакуум-фильтре приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3.

Результаты промышленных испытаний

№№	Дата	Зольность питания, %	Влажность осадка, %		Снижение влажности осадка, %
			без рыхлителя	с рыхлителем	
1	6.10	28,2	26,3	25,5	0,8
	17.10	28,9	27,5	26,8	0,7
2	3.11	26,5	26,2	25,4	0,8
	25.11	25,5	25,8	25,2	0,6
3	10.12	29,8	29,1	28,7	0,4
	23.12	29,1	28,5	28,0	0,5
4	9.01	25,2	25,3	24,5	0,8
	28.01	24,6	24,6	23,6	1,0
5	5.02	26,4	29,2	28,8	0,4
	20.02	28,2	31,2	29,8	0,4
6	2.03	24,4	28,8	28,2	0,6
	18.03	27,5	29,6	29,0	0,6
7	7.04	24,8	26,1	25,4	0,7
	20.04	26,2	28,2	27,6	0,6
8	4.05	27,1	29,0	28,2	0,8
	25.05	24,3	25,6	24,6	1,0
Средние		26,7	27,6	26,8	0,8

Приведенные данные позволяют заключить, что усовершенствованная конструкция, позволяющая прикладывать сдвиг к осадку в переконсолидированном состоянии, обеспечивает снижение влажности шламового осадка на величину от 0,4 до 1% (среднее значение 0,8%). Это позволяет рекомендовать применение

сдвига к осадку на ленточном вакуум-филт্রে на последнем участке обезвоживания.

На основе полученных результатов и акта промышленных испытаний выполнен расчет ожидаемого экономического эффекта на основе стандартной методики для внедряемой техники и технологии на предприятиях угольной промышленности. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет около 160 тыс. грн.

Таким образом, на основании результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- в ходе исследования физико-механических свойств осадков углеобогащения определен ряд параметров, которые имеют важное значение при механическом воздействии на осадок: зависимость пористости от давления, число пластичности, средний диаметр частиц, время консолидации, модуль общей деформации, коэффициент компрессии;

- исследование изменения параметров осадков при механическом воздействии показало, что коэффициент фильтрации значительно уменьшается при увеличении давления; статистическая обработка данных позволила установить гиперболическую зависимость коэффициента фильтрации K_f от приложенного давления P с высокой степенью приближения, которая имеет вид: $K_f = 2,47 P^{-1,13}$; уточнены коэффициенты в зависимости коэффициента фильтрации K_f от прилагаемого давления P для осадков углеобогащения;

- для проведения исследований изменения порового пространства осадков при приложении сдвиговых деформаций разработана экспериментальная установка и методика проведения испытаний; данные испытаний позволяют заключить, что для недоконсолидированного осадка скорость фильтрации выше, чем для переконсолидированного; при увеличении давления она резко снижается и в том и в другом случае практически до близких величин:

- установлены экспоненциальные зависимости скорости фильтрации от давления; для недоконсолидированного осадка: $v = 1,901e^{-0.101P}$, ($R^2 = 0,91$); для переконсолидированного осадка: $v = 0,882e^{-0.099P}$, ($R^2 = 0,96$);

- недоконсолидированные осадки уплотняются при наложении сдвиговых деформаций с низкой скоростью (0,2мм/мин.), что

приводит к значительному снижению скорости фильтрации; для переконсолидированного состояния осадка характерно уменьшение скорости фильтрации на 15-20% при использовании медленного сдвига по сравнению с приложением быстрого сдвига, имеющего скорость 5-6мм/мин., к осадку при различных давлениях; аналогичные результаты были получены и с помощью численного имитационного моделирования;

- промышленные испытания метода повышения эффективности механического обезвоживания, разработанного на основе имитационного моделирования, теоретических и экспериментальных исследований проведены на обогатительной установке шахты «Глубокая»; для реализации теоретических разработок работы фильтр ЛОП-10 был усовершенствован – обеспечение приложения сдвиговых деформаций к осадку в переконсолидированном состоянии достигается установкой последнего ролика фильтра с эксцентриситетом;

- усовершенствованная конструкция, позволяющая прикладывать сдвиг к осадку в переконсолидированном состоянии, обеспечивает снижение влажности шламового осадка на величину от 0,4 до 1% (среднее значение 0,8%), что позволяет рекомендовать применение сдвига к осадку на ленточном вакуум-фильтре на последнем участке обезвоживания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследований, результаты которых изложены в части II, можно подвести следующим образом.

В результате выполненных исследований получено решение актуальной научно-практической задачи обоснования параметров, обеспечивающих интенсификацию процесса обезвоживания угольных шламов, путем установления зависимости скорости фильтрации жидкости от скорости приложения сдвигающих усилий и от механического состояния осадка, что позволило определить рациональный момент механического воздействия на осадок в зависимости от состояния осадка и его типа, что имеет важное значение для повышения эффективности процессов углеобогащения.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Анализ уравнения переноса вещества в пористой среде для случая тонкодисперсных осадков позволил получить зависимость для определения положения границы раздела фаз в поре осадка, которая имеет вид:

$$h_B = \frac{-6 K_2 K_3 h}{\Delta P + 6K_2(K - K_3)} + \sqrt{\left[\frac{6K_2 K_3 h}{\Delta P + 6K_2(K - K_3)} \right]^2 + \frac{12K_2 \Delta P \tau}{\Delta P + 6K_2(K - K_3)}}.$$

В ходе анализа данного уравнения определено максимальное время, необходимое для обезвоживания тонкодисперсных осадков с различной проницаемостью, которое изменяется в пределах от 50 до 2000с в зависимости от толщины и проницаемости осадков. Получены зависимости необходимого времени обезвоживания от проницаемости осадков, перепада давлений и толщины осадков, имеющие вид гиперболы.

2. На базе экспериментальных исследований получены такие основные гидродинамические характеристики различных осадков как проницаемость и коэффициент фильтрации, которые были использованы при анализе уравнения, определяющего положение границы раздела фаз в порах осадка.

3. Для осадков с высокой проницаемостью характерно наличие колебаний избыточного давления по длине поры, которые развиваются постепенно с течением времени. Максимальная амплитуда колебаний давления характерна для участков, расположенных близко ко входу в пору. Колебания давления на различных участках поры стремятся к затуханию с течением времени.

4. При имитационном исследовании поведения осадков установлено, что при приложении механического воздействия недоконсолидированные осадки уплотняются, т.к. приращение ординаты центра тяжести элементов верхнего ряда имеет положительное значение на 1,99-3,7 отн. ед. Переконсолидированные осадки с более низкой пористостью разуплотняются, т.к. приращение ординаты имеет отрицательное значение от -3 до -12 отн. ед. Установлено положительное влияние механического воздействия в виде сдвига на переконсолидированные осадки, которое приводит к разуплотнению осадков и увеличению каналов между частицами.

5. В ходе моделирования установлено, что для переконсолидированных осадков скорость фильтрации при медленном сдвиге ниже по сравнению со сдвигом с высокой скоростью на 12-15%. При этом время достижения максимального значения скорости уменьшается на 20%. Таким образом, для уплотненных осадков приложение сдвига с высокой скоростью повышает скорость удаления влаги по сравнению с медленным сдвигом.

Быстрый сдвиг со скоростью, отличающейся от скорости приложения медленного сдвига в 30 раз и более, способствует снижению влажности осадка в любом первоначальном состоянии его поровой структуры.

6. При исследовании изменения физико-механических свойств осадков углеобогащения при механическом воздействии уточнены коэффициенты в зависимости коэффициента фильтрации K_f от

прилагаемого давления P , которая имеет вид гиперболы: $K_{\phi} = 2,47 P^{-1,13}$.

7. Для исследования изменения порового пространства осадков при приложении сдвиговых деформаций создана экспериментальная установка и разработана методика проведения испытаний. Определены экспоненциальные зависимости скорости фильтрации от давления. Для недоконсолидированного осадка: $v = 1,901 e^{-0.101P}$, ($R^2 = 0,91$); для переконсолидированного осадка: $v = 0,882 e^{-0.099P}$, ($R^2 = 0,96$).

Приложение быстрого сдвига со скоростью 5-6мм/мин. к переконсолидированному осадку при различных давлениях повышает скорость фильтрации в 1,2-1,3 раза по сравнению с медленным сдвигом, скорость которого составляет 0,2мм/мин.

8. Промышленные испытания метода повышения эффективности механического обезвоживания, разработанного на основе имитационного моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, проведены на обогатительной установке шахты «Глубокая». Усовершенствована конструкция фильтра ЛОП-10, позволяющая прикладывать сдвиг к осадку в переконсолидированном состоянии с помощью установки последнего ролика фильтра с эксцентриситетом, что обеспечивает снижение влажности осадка на 0,4-1% (среднее значение 0,8%). Ожидаемый годовой экономический эффект составляет около 160 тыс. грн.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ЧАСТИ II

1. Полулях А.Д. Особенности современных технологий углеобогащения / А.Д. Полулях // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ. – 2003. – вип. 17(58). - С. 3-6.
2. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. / В.А. Жужиков. М.: Химия. – 1980. – 398с.
3. Фридман С.Э. Обезвоживание продуктов обогащения. / С.Э. Фридман, О.К. Щербаков, А.М. Комлев. М.: Недра. – 1988. – 240 с.
4. Гарковенко Е.Е. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов и др. Донецк: Норд-Пресс. – 2002. – 266 с.
5. Пилов П.И. Распределение частиц твердой фазы в турбулентном потоке жидкости при выделении осадка / П.И. Пилов // Науковий вісник НГА України. - 1998. - №1. - С. 74-77.
6. Полулях А.Д. Состояние подготовки и обогащение машинных классов рядового угля в Украине / А.Д. Полулях, О.В. Ищенко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 23 (64). - С. 21-26.
7. Кофанов А.С. Пути снижения влажности флотоконцентрата и тонкого шлама / А.С. Кофанов, Л.Т. Вертола, С.Ф. Абрамюк и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 23(64). - С. 142-146.
8. Пейчев И.Д. Исследование теоретических закономерностей течения жидкости через пористую среду / И.Д. Пейчев // Обогащение полезных ископаемых: Наук.-техн. зб. - Днепрпетровск. – 2004. – Вып. 20 (61). – С. 99-104.
9. Пейчев И.Д. Техника и технология фильтрования угольных суспензий / И.Д. Пейчев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 22(63). - С. 121-128.
10. Пейчев И.Д. Теоретические основы фильтрования угольных суспензий / И.Д. Пейчев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ – 2006. - вип. 25(66)-26(67). - С. 144-148.

11. Пейчев И.Д. Расчет оптимального давления фильтрования и некоторых конструктивных параметров фильтр-прессов / И.Д. Пейчев, Ю.М. Гарин, А.В. Пархоменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 43(84) – С. 112-117.

12. Пейчев И.Д. Анализ существующих методов улавливания и обработки тонкодисперсных отходов углеобогащения / И.Д. Пейчев, Ю.М. Гарин, А.В. Пархоменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 43(84) – С. 143-147.

13. Березняк А.А. Исследование влияния растворенных газов на фильтрование тонкодисперсных суспензий / А.А. Березняк // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ – 2006. - вип. 25(66)-26(67). - С. 148-151.

14. Абрамюк С.Ф. Исследования результатов работы шнеко-толкающей центрифуги и пути ее усовершенствования в углеперерабатывающей промышленности / С.Ф. Абрамюк // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 27(68)-28(69). – С. 98-110.

15. Березняк А.А. Исследование кинетики фильтрования через слой дистена крупностью 40-50 мкм / А.А. Березняк, Е.О. Козырь, Е.А. Нестеренко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 27(68)-28(69). – С. 126-132.

16. Березняк А.А. Исследование кинетики фильтрования через антрацит крупностью 40-50 мкм / А.А. Березняк // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – вип. 31(72). – С. 86-88.

17. Анциферов А.В. Результаты экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию мела / А.В. Анциферов, А.А. Богданов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – вип. 29(70)-30(71). – С. 190-194.

18. Анциферов О.В. Рівняння дифузії та аналіз різних граничних умов на опис процесу зневоднення / О.В. Анциферов, О.О. Богданов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2008. – вип. 34(75). – С. 148-153.

19. Богданов А.А. Динамика механического обезвоживания // А.А. Богданов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2008. – вип. 34(75). – С. 154-160.

20. Анциферов О.В. Методика оцінки технологічних параметрів процесу механічного зневоднення шламів / О.В. Анциферов, О.О. Богданов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2009. – вип. 36(77)-37(78). – С. 150-154.

21. Мацак А.Ф. Опыт применения центрифуг разработки ООО «НТЦ «ЭУОМАН» при обезвоживании продуктов обогащения / А.Ф. Мацак, А.Г. Трошин // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2008. – вип. 33(74). – С. 124-128.

22. Мацак А.Ф. Влияние режимных и конструктивных параметров осадительных центрифуг на влажность флотоконцентратов углей / А.Ф. Мацак, А.Г. Трошин, Н.Г. Пономарева // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2006. – вип. 27(68)-28(69). – С. 110-114.

23. Трошин А.Г. К обоснованию технологии обезвоживания мелкодисперсного угля / А.Г. Трошин, А.Ф. Мацак, А.А. Шкоп // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2009. – вип. 36(77)-37(78). – С. 177-187.

24. Вертола Л.Т. Расчетный метод определения скорости и толщины слоя осадка в роторах центрифуг со шнековой выгрузкой осадка. / Л.Т. Вертола М. Наука. – 1969. – 128с.

25. Сансиев В.Г. Анализ уравнений гидродинамики нестационарного течения жидкости в диффузорной щели шпальтового сита / В.Г. Сансиев // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2007. – вип. 29(70)-30(71). – С. 173-177.

26. Бевзенко Б.Ф. О необходимости ситовой классификации питания флотации на углеобогатительных фабриках / Б.Ф. Бевзенко // Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. – 2005. - вип. 23 (64). - С. 69-73.

27. Полулях А.Д. Энергетическая модель осаждения суспензий / А.Д. Полулях, О.В. Ищенко // Уголь Украины. – 2006. - № 2. - С. 42-44.

28. Полулях А.Д. Энергетическая интерпретация гравитационных разделительных процессов зернистых сред при

обогащении полезных ископаемых. / А.Д. Полулях, и др . Луганск. – 2006. - 144 с.

29. Подопригора А.И. Энергетическое состояние зернистых смесей как характеристика их гранулометрического состава и разделительной способности / А.И. Подопригора, А.А. Клешнин, А.Д. Полулях // Сб. научн. Трудов НГАУ – 1998 - №3, Т4. - С. 108-113.

30. Полулях А.Д. Метод расчета регулирования производительности вакуум-фильтров изменением гранулометрического состава фильтруемого продукта / А.Д. Полулях, Е.А. Гончаренко // Геотехническая механика. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск. - 2000. - Вып. 22. - С. 58-63.

31. Клешнин А.А. Исследование проницаемости фильтровальных осадков / А.А. Клешнин, Е.А. Гончаренко // Збагачення корисних копалин. Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2000. – Вип. 9(50). – С. 68-73.

32. Бейлин М.И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей. / М.И. Бейлин - М.: Недра, 1969. – 240 с.

33. Гончаренко Е.А. Метод идентификации параметров обобщенного уравнения фильтрования / Е.А. Гончаренко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. НГАУ. - 2003. - №17 (58). С. 103-110.

34. Полулях А.Д. Определение границ применимости закона Дарси для зернистых сред / А.Д. Полулях, Е.А. Гончаренко, Ю.В. Кочетов // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ. – 2000. – Вип. 10 (51). – С. 81-87.

35. Гончаренко Е.А. Обобщенная модель процесса фильтрования тонкодисперсных шламов / Е.А. Гончаренко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. - Дніпропетровськ. – 2001. – Вип. 13 (54). – С. 125-130.

36. Lin C.L. Fine Coal filtration as Revealed by 3D Lattice-Boltzmann Simulations / C.L. Lin, J.D. Miller, J.A. Mejia & al // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 504-515.

37. Videla A.R. Simulation of Saturated Fluid Flow in Packed Particle Beds / A.R. Videla, C.L. Lin, J.D. Miller // *J. Chin.Inst. Chem. Engrs.* – 2007. – 39:117.

38. Verma S. Evaluation of a Pilot-Scale Plate-and-Frame Filter Press for Dewatering Fine Anthracite Refuse / S. Verma, M.S. Klima // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 516-524.
39. Maher T. P. *A Review of Literature on Water in Coal* / T. P. Maher, W. A. Barton. // Investigation Report CET/1R456, CSIRO Division of Coal and Energy Technology, North Ryde, 1996.
40. H. Anlauf. Effect of the Weave Structure and Pore Size of Monofil Filter Cloths on the Process Result of Continuous Liquid Filtration with Cake Formation / H. Anlauf, H. R. Muller // *Aufbereitungs Technik* 31(6), 293-303 (1990).
41. Verma S. An Evaluation of a Pilot-Scale Plate-and-Frame Filter Press for Dewatering Fine Coal Refuse and Silica Sand / S. Verma // M.S. Thesis, The Pennsylvania State University, University Park. – 2009.
42. Patwardhan A. Dewatering Ultrafine Clean Coal in T.H. Filter Press / A. Patwardhan, Y.P. Chung, B.J. Arnold & al // *Coal Preparation* – Balkema ed. – 2006. – 26. – 33-54.
43. Dachang M. The Pressure Filtration Technology and Application of Equipment / M. Dachang, L. Chunfeng, S. Xiauhui // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 525-535.
44. Stanmore B. R. Porosity and Water Retention in Coarse Coking Coal / B.R. Stanmore , G. O'Brien, Y. He & al. // *Fuel* 34, 1996, pp. 321-334.
45. Lin C.L. Pore Structure Analysis of Particle Beds for Fluid Transport Simulation During Filtration / C.L. Lin, J.D. Miller // *Int. J. Miner. Process.* – 2004. - 73:281.
46. Dong X. Effects of Electro-chemistry Pretreatment on Dewatering Characteristics of Fine Coal over Cu Electrode / X. Dong, S. Yao, W. Ren & al // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 536-540.
47. Neesse Th. Model Calculations for Porosity, Pore Size Distribution and Flow Resistance in Filter Cakes / Th. Neesse, M. Fahland // *Aufbereitungs Technik*, Vol. 35, No. 3, pp. 117-124 (1994).
48. Larue O. Filtration, cake washing and pressurized electro-osmotic dewatering of a highly conductive silica suspension / O. Larue, T. Mouroko-Mitoulou, E. Vorobiev // *Transactions of the Filtration Society* – 2001. – 1(2): 31-37.

49. Yoon R.-H. Dewatering of Fine Coal Using Hyperbaric Centrifugation / R.-H. Yoon, Asmatulu R. // *Coal Preparation* – Balkema ed. – 2005. – 25(3): – 117-121.

50. Yoon R.-H. Development of Advanced Fine Coal Dewatering Technologies / R.-H. Yoon, M.K. Eryadin, J. Zhang & al // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 575-583.

51. Keles S. Development of the Centribaric™ Dewatering Technology / S. Keles, G. Littrell, R.-H. Yoon & al // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 488-495.

52. Ofori P.K. Moisture Reduction in Coal with Reference to Surface Chemical Phenomena / P K Ofori // *Australian Coal Association Report ERG953*, pp. 145 (1990).

53. Peterson J.B. Low Cost Dewatering of Mineral By-product Slurries/ J.B. Peterson, S.K. Shanna, R.H. Church & al // *Proceedings of Conference on the Recovery and Effective Reuse of Discarded Materials and By-Product for Construction of Highway Facilities*, EPA, pp. 35-40 (1993).

54. Laskowski J.S. Coal Surface Chemistry and its Role in Fine Coal Beneficiation and Utilization / J.S. Laskowski // *Coal Preparation*, 14, 115-131 (1994).

55. Kuchma Yu. Combination of Centrifuges for Dewatering the Finely Dispersed Slurry and the Flotation Concentrate / Yu Kuchma, L. Vertola, S. Abramuk // *Proceedings of XVI ICPC*. – USA - SME. – 2010. – p. 496-503.

56. Полулях А.Д. Обезвоживание угольного шлама на сите вибрационного грохота /А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, С.Н. Ходос и др.// *Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ*. – 2004. – Вип. 20 (61). – С. 110-117.

57. Надутый В.П. Модельное исследование истечения жидкости в слое горной массы через дренажные каналы с сеточными выходными отверстиями /В.П. Надутый, Л.Н. Прокопишин, И.П. Хмеленко// *Сб. научных трудов НГУ*. – 2008. – Вып. 31. – С. 191-196.

58. Надутый В.П. Определение равновесного состояния тонкого слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита грохота /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др. // *Науковий вісник НГУ*. – 2008. – Вип. 9. – С. 81-85.

59. Надутый В.П. Определение условия равновесия слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита /В.П. Надутый,

В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.// Вісник НТУ "ХПІ". – Харків. – 2008. – Вип. 38. – С. 22-28.

60. Елисеев В.И. Равновесные слои жидкости в капиллярной ситовой ячейке /В.И. Елисеев, В.И. Луценко, В.П. Надутый и др.// Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2008. – Вып. 74. – С. 44-54.

61. Назимко Е.И. Микроструктура кека флотоконцентрата и ее роль в процессах обезвоживания / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2000. – вип. 9(50). -С. 93-99.

62. Надутый В.П. Результаты исследований процесса опускания жидкости в поровых каналах при обезвоживании горной массы / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 40(81). – С. 139-147.

63. Надутый В.П. Результаты исследований равновесного состояния жидкости в ячейке сита обезвоживающего грохота /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.// Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця. – 2009. – Вип. 3(55). – С. 77-80.

64. Надутый В.П. Определение закономерностей опускания жидкости в поровых каналах влажной горной массы, лежащей на сетке /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.// Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2009. – Вип. 22. – С. 71-74.

65. Елисеев В.И. Статические гистерезисные явления в капиллярах /В.И. Елисеев, В.И. Луценко// Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2006. – Вип. 66. – С. 157-163.

66. Huang P. Simulation of capillary pressure hysteresis in drainage and imbibition process / P. Huang, G. Yang, L. Myer & al // ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium June 29 – July 2, 1997. New York.

67. Jerauld G.R. The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore level modeling. / G. R. Jerauld, S.J. Salter // Transport in Porous Media, 5, 1990. – p. 103–151.

68. Надутый В.П. Разработка модели опускания жидкости в поровом канале переменного сечения при обезвоживании слоя горной массы /В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.//

Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 85. – С. 64-69.

69. Сергеев П.В. Развитие научных основ селективной флокуляции угля гидрофобными органическими реагентами. / П.В. Сергеев / Дисс. ... д-ра техн. наук. / НГУ. – Д. – 2008. – 348с.

70. Лейчикс И.М. Фильтрование с применением вспомогательных веществ. / И.М. Лейчикс - К.: Техника, 1975. – 192 с.

71. Wen W.W. The Use of Asphalt as a Dewatering Aid for Ultrafine Coal. / W.W. Wen // *Proceedings of the Advances in Filtration and Separation Technology*, the American Filtration Society Annual Meeting, Vol. 2, Arlington, Virginia, 1990, pp. 512-515.

72. Latsch H. Enhancement of the Efficiency of Polymeric Flocculants in Dewatering and Clarification / H. Latsch, M. Kaiser // 12th International Coal Preparation Congress, Kraków, 1994, pp. 493-501.

73. G.P.T. Dzinomwa G.P.T. Superabsorbent Polymers for the Dewatering of Fine Coal / G.P.T. Dzinomwa, C.J. Wood // *Proc 7th Australian Coal Preparation Conference* (J Smitham, ed.), ACPS, Mudgee 1995, pp. 200-218.

74. Allen B.L. Effect of Asphalt Emulsion in Vacuum Filtration Dewatering of Fine Coal / B.L. Allen, R. Honaker, D. Tao // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 562-567.

75. Gerl S. New Experimental and Theoretical Results regarding Steam Pressure Filtration, / S. Gerl, W. Stahl // *Proc., 7th World Filtration Congress*, 20-23 May 1996, S. 258-262, Budapest.

76. Gerl S. Steam Pressure Filtration - A Process for Combined Mechanical/Thermal Dewatering of Filter Cake / S. Gerl, W. Stahl, T. Krumrey // *Aufbereitungs Technik* 35, 563-572 (1994).

77. Buckley A.N. The Moisture Retention Characteristics of Coal with Particular Reference to Surface Effects / A.N. Buckley, S.K. Nicol // *CSIRO Division of Coal and Energy Technology Investigation Report IR273*, pp. 66 (1994).

78. Шпильовий Л.В. Моделювання процесів консолідації дисперсної фази суспензії хвостів збагачення рідкіснометалевих руд /Л.В. Шпильовий// Збагачення корисних копалин Наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ. – 2005. – Вип. 21 (62). – С. 92-100.

79. Zasyadko A.V. Dewatering of Flotation Concentrates and Middlings on Belt Press Filters /A.V. Zasyadko, A.V. Kostromitin, S.A.

Osadchiy & al// *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 545-548.

80. Bickert G. Coal Filtration with ANDRITZ Hyperbaric Filters – Operating Experience in Europe and Asia / G. Bickert, E. Frohnwieser, F. Denking // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 584-590.

81. Полулях А.Д. Метод расчета регулирования производительности вакуум-фильтров изменением гранулометрического состава фильтруемого продукта / А.Д. Полулях, Е.А. Гончаренко // *Геотехническая механика*. Сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. - Днепропетровск. - 2000. - Вып. 22. - С. 58-63.

82. Parekh B.K. Improving Densification of Fine Coal Refuse Slurries to Eliminate Slurry Ponds / B.K. Parekh, D.P. Patil, Rick Honaker & al// *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 549-554.

83. Bickert G. Coal Tailings Dewatering Using Modern Membrane Filter Press – First Experience in Australia / G. Bickert, K. Barber, P. Poh // *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 568-574.

84. Antipenko L. Dewatering of Coal Suspensions during Filtration with Compressed Air / L. Antipenko, A. Kirichenko// *Proceedings of XV ICPC*. – China - CNCA. – 2006. – p. 555-561.

85. Полулях А.Д. Экспериментальные исследования деформационных свойств павлоградских концентрированных угольных шламов / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // *Обогащение полезных ископаемых*. Днепропетровск. – 2004. – вып. 19 (60). – С. 97-107.

86. Полулях А.Д. Реологическая модель высококонцентрированного илосодержащего угольного шлама / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // *Геотехническая механика*. Сб научн. Тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2003. – вып. 41. – С. 184-188.

87. Полулях А.Д. Исследование реологической модели высококонцентрированного илосодержащего угольного шлама / А.Д. Полулях, В.Г. Сансиев, В.К. Гарус // *Вибрации в технике и технологиях*. 2004. - №1 (33), С. 55-58.

88. Гарковенко Е.Е. Математическая модель процесса изменения концентрации фаз при движении многофазной среды /

Е.Е. Гарковенко // Материалы III Научной школы “Импульсные процессы в механике сплошных сред“. - Николаев, сентябрь 1999. - С. 18-21.

89. Гарковенко Е.Е. Приемы моделирования пористой среды осадков при их фильтровании / Е.Е. Гарковенко // Труды международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», посвященной 100-летию В.Г. Гейера. Донецк. – 2003. - Т.1. – С. 62-68.

90. Гарковенко Е.Е. Методы моделирования процесса фильтрования жидкости через пористую среду осадка / Е.Е. Гарковенко / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2005 - №56 - С. 27-34.

91. Гарковенко Є.Є. Інтенсифікація процесу фільтрування в полі деформацій зсуву / Є.Є. Гарковенко, О.І. Назимко // Труды Міжнар. конф. «Міжнародний та вітчизняний досвід переробки відходів». 2002. – С. 17-19.

92. Гарковенко Е.Е. Анализ уравнения переноса вещества в пористой среде тонкодисперсных осадков / Е.Е. Гарковенко // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Дніпропетровськ. - 2003. – Вип.7. – С 49-55.

93. Гарковенко Е.Е. Особенности обезвоживания тонких труднофильтруемых осадков / Е.Е. Гарковенко // Сб. Трудов НГУ. – 2003. - № 17. – т.1. – С. 88-93.

94. Гарковенко Є.Є. Особливості нормальних деформацій ущільнених осадів при активізації об'ємного зсуву / Є.Є. Гарковенко // Вісник Криворізького технічного університету. – 2005. - вип.7. - С. 89-93.

95. Назимко Е.И. Интенсификация процессов фильтрации тонкодисперсных угольных шламов импульсными полями / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. – 2004. - №1. – С. 317-319.

96. Nazimko L.I. Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation / L.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky & al // *Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. - China. - 2006.- p. 785-798.*

97. Майдуков Г.Л. Фильтрационные свойства продуктов флотации донецких углей / Г.Л. Майдуков, Н.В. Карягина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. Новосибирск. – 1974. - №3, С. 125-126.

98. Благоев И.С. Обратное водоснабжение углеобогащительных фабрик / И.С. Благоев и др. – М.: Недра, 1980. – 216 с.
99. Подопрігора А.І. Максимальная и минимальная порозность зернистых смесей / А.І. Подопрігора // Збагачення корисних копалин: наук.- Техн.- зб. – Дніпропетровськ. – 1999. - №3 (44). С. 42-44.
100. Святець І.Е. Определение пористости угля / И.Е. Святець// Обогащение и брикетирование угля. – 1972. - №11, С. 14-20.
101. Абрамов Н.П. Исследование состояния воды в некоторых дисперсных системах методом ЯМР /Н.П. Абрамов, Л.А. Байдаков, Л.П. Страхов // Коллоидный журнал. – 1974. - №1, С. 22-26.
102. Дерягин Б.В. Вода в дисперсных системах. / Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев, Ф.Д. Овчаренко – М.: Химия. – 1989. – 288 с.
103. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. / Л.С. Лейбензон - Гостехиздат. - 1947. – 210 с.
104. Гарковенко Е.Е. Развитие физико-технических основ технологий обезвоживания деформируемых дисперсных сред / Е.Е. Гарковенко / Дисс. Д.т.н. Днепропетровск – 2006. - 324с.
105. Назимко О.І., Гарковенко Є.Є., Морозова В.Г. Аналітичне дослідження впливу проникності осадів на переміщення речовини в порах / О.І. Назимко, Є.Є. Гарковенко, В.Г. Морозова// Обогащение полезных ископаемых. Днепропетровск. – 2004. – Вып. 20(61). – С. 83-88.
106. Брук О.Л. Фильтрация угольных суспензий. / О.Л. Брук - М.: Недра, 1978. – 271с.
107. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа./ Л.Г. Лойцянский – М.: Наука, 1987. – 840 с.
108. Надутый В.П. Определение условий равновесного состояния частицы, висящей на перетяжке жидкости / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др. // Науковий вісник НГУ: Наук.-техн. журнал. – Дніпропетровськ. – 2008. – Вип. 10. – С. 46-49.
109. Надутый В.П. Экспериментальные исследования и моделирование процесса обезвоживания горной массы на грохоте с подстилающей сеткой / В.П. Надутый, В.И. Луценко, В.И. Елисеев и др.// Вісник НТУ “ХПІ”. – Харків. 2009. – Вип. 25. – С.151-156.

110. Bourgeois F. Morphological Analysis and Modelling of Fine Coal Filter Cake Microstructure / F. Bourgeois, G. Lyman // *Chemical Engineering Science*, 52/7, 1151-1162 (1997).

111. Bendit E.G. Improving the Dewatering of Fine Coal and Tailings / E.G. Bendit, N.C. Lockhart // 12th International Coal Preparation Congress, Kraków, 1994, pp. 95-102.

112. Майдуков Г.Л. Технология фильтрования продуктов обогащения углей. / Г.Л. Майдуков - М.: Недра. – 1975. – 142с.

113. Gerl S. New Experimental and Theoretical Results regarding Steam Pressure Filtration / S. Gerl, W. Stahl // *Proc., 7th World Filtration Congress*, 20-23 May 1996, S. 258-262, Budapest.

114. Bourgeois F.S. Advances in the fundamentals of fine coal filtration. / F.S. Bourgeois, W.A. Barton // *Coal preparation*, 19, 1998. Pp. 9-31.

115. Blunt J. M. Pore-level modeling of wetting. / J. M. Blunt, H. Scher // *Physical Review E* 52:6-B, 1995. – p. 6387–6403.

116. Lowry M.I. Pore scale modeling of nonwetting phase residual in porous media. / M.I. Lowry, C.T. Miller // *Water Resources Research*, 31:3, 1995. – p. 455–473.

117. Yang G. Object-Oriented Analysis of Network Flows at Por and Reservoir Scales. / G. Yang, L.R. Myer // *ISRM International Symposium 36th U.S. Rock Mechanics Symposium June 29 – July 2, 1997. New York.*

118. Уваров И.И. Анализ техники и технологии обезвоживания тонкодисперсных угольных шламов / И.И. Уваров // *Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. – 2003. – Вип. 17 (58). – С. 101-103.*

119. Гаркушин Ю.К. Дериватографічні дослідження процесу зневоднення вугілля з використанням поверхнево-активних речовин-інтенсифікаторів / Ю.К. Гаркушин, В.С. Білецький, П.В. Сергеев та ін. // *Обогащение полезных ископаемых. - Днепропетровск. – 2004. – вып. 19(60), С. 72-77.*

120. Гаркушин Ю.К. Применение композиционных реагентов-нефтепродуктов для интенсификации обезвоживания угля фильтрованием / Ю.К. Гаркушин, П.В. Сергеев // *Збагачення корисних копалин. - Дніпропетровськ. – 2004. – вип.. 20(61), С. 104-110.*

121. Гаркушин Ю.К. Дослідження фізико-хімічної інтенсифікації зневоднення вугільних флотоконцентратів / Ю.К.

Гаркушин, П.В. Сергеев, В.С. Білецький // Збагачення корисних копалин. - Дніпропетровськ. – 2005. – вип. 21(62), С. 80-86.

122. Назимко Е.И. Повышение экологической безопасности за счет складирования тонких отходов обогащения в виде твердых отвалов / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.В. Назимко // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг. - 2006. - вип. 15. - С. 148-152.

123. Гарковенко Е.Е. Моделирование процесса вакуумного фильтрования угольных шламов / Е.Е. Гарковенко// Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва. – 2004. - №1. – С. 317-319.

124. Cundall P.A. A discrete numerical Model for granular assemblies / P.A. Cundall, O.D.L. Strack // *Geotechnique*, 29, # 1, pp. 47-65 (1974).

125. Nazimko O.I. Simulation of the Coal and Rock Particle Interaction Kinetics During the Dry Separation / O.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky & al // *Proceedings of XVI International Congress of Coal Preparation. USA. 2010. p. 581-586.*

126. Корчевский А.Н. Моделирование процесса пневматического разделения лома цветных металлов / А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко // Вісник КТУ вип 21 2008 С. 62-66.

127. Назимко Е.И. Исследование процесса флотации угольных частиц на микроуровне / Е.И. Назимко, И.Н. Друц, Л.И. Серафимова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 15(131), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. С. 115-121

128. Серафимова Л.І. Моделювання утворення флотаційного комплексу / Л.І. Серафимова// Вісник Криворізького технічного університету. Кривий Ріг. 2009. - вип. 24. – С. 57-60.

129. Куприн А.М. Закономерности изменения порозности зернистых материалов и ее определение / А.М. Куприн, А.А. Клешнин, Г.В. Клешнина // Изв. Вузов: Строительство и архитектура. – 1967. - №6. – С. 53-56.

130. Цытович Н.А. Механика грунтов. / Н.А. Цытович - М.: Выща школа. – 1979. – 272 с.

131. Петраков А.А. Учебное пособие по курсу "Механика грунтов". / А.А. Петраков, В.В. Яркин, Р.А. Таран и др. – Макеевка: ДонНАСА. – 2004. – 164 с.

132. Bruno M.S. Some influences of saturation and fluid flow on sand production: Laboratory and Discrete Element Model Investigations. / M.S. Bruno & al // SPE 36534, *Proc. 1996 SPE Ann. Tech. Conf., Denver, Colorado, 6–9 October, 1996. p. 447–461.*

133. O'Connor P.M. et al. Discrete Element Modeling of Sand Production / P.M. O'Connor & al // *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 1998. 34:3–4, Paper No. 231.

134. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. / В.Д. Ломтадзе - М.: Недра. – 1990. – 328 с.

135. Бирюков Н.С. Методическое пособие по определению физико-механических свойств грунтов. / Н.С. Бирюков, В.Д. Казарновский, Ю.Л. Мотылев - М.: Недра. – 1975. – 178 с.

136. Безрук В.М. Геология и грунтоведение. / В.М. Безрук, М.Т. Кострико. - М.: Недра. – 1969. – 264 с.

137. Денисов Н.Я. Инженерная геология. / Н.Я. Денисов - М.: Госстройиздат, 1990. – 404 с.

138. Гарковенко Е.Е. Исследование поведения осадков при наложении сдвиговых полей* / Е.Е. Гарковенко // *Збагачення корисних копалин.* - 2006. - вип. 25(66)-26(67) с. 160-166. * В проведении экспериментов принимала участие инж. Науменко В.Г.

139. Назимко Е.И. К вопросу об исследовании перемещения влаги в порах осадков при их переменной проницаемости / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко // *Збагачення корисних копалин.* Вип. 21 (62). Дніпропетровськ 2005. - с. 86-92

140. Гарковенко Є.Є. Особливості переміщення вологи в пористому середовищі осадів при фільтруванні / Є.Є. Гарковенко // *Збагачення корисних копалин.* – 2003. - № 18 (59). – с. 165-171.

141. Гарковенко Е.Е. Интенсификация обезвоживания тонких труднофильтруемых осадков / Е.Е. Гарковенко // *Матеріали міжнародної конференції “Форум гірників - 2005”.* – 2005. – т. 1 (А-Г), с. 185-191.

142. Гарковенко Е.Е. Интенсификация механического обезвоживания осадков тонкодисперсных углесодержащих материалов / Е.Е. Гарковенко // *Вісник КТУ* вип. 13 2006 с. 90-94

143. Гарковенко Е.Е. Повышение эффективности обезвоживания концентратов на ленточных вакуум-фильтрах / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, Б.А. Блюсс и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2006.- №1. – с. 92-95

144. Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г. Исследование свойств тонкодисперсных осадков продуктов обогащения, имеющих значение при обезвоживании / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Разработка рудных месторождений - КТУ №91 2007 с. 117-121.

145. Науменко В.Г. Методика исследования свойств тонокодисперсных осадков углеобогащения при их механическом обезвоживании / В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 29-30 – С. 178-184

146. Науменко В.Г. Методика исследования и экспериментальная установка для определения параметров тонкодисперсных осадков /В.Г. Науменко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 15(131), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – С. 127-133.

147. А.с. СССР М. кл. G 01 N 3/10 № 989370. Установка для испытания образцов при объемном нагружении. Опубл. 15.01.83. Бюл. №2.

148. Назимко Е.И., Науменко В.Г. и др. Испытания и тарирование установки для исследования обезвоживания шламов / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко, Н.А. Куриленко // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ. – 2010. – вип. 41(82)-42(83). – С. 237-243

149. Орлов П.И. Основы конструирования. Спр-метод. пособие в 2-х кн. Кн. 2. Под ред.П.Н. Учаева. / П.И. Орлов - М: Машиностроение. – 1988. – 544 с.

150. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Моделирование процесса удаления влаги из углесодержащих осадков. / Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ. – 2011. – вип. 45(86) – С. 153-158.

151. Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г. Моделирование процесса фильтрования при механическом воздействии на осадок. / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Висник КТУ Зб.наук. праць - Кривий Ріг, - 2011. - вип. 27 - С.191-195.

152. Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г. Аналитическое моделирование процесса удаления влаги из осадков / Е.И. Назимко, Е.Е. Гарковенко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин (Доклады междунар. науч.-техн. конф.

«Перспективные технологии обогащения полезных ископаемых», посвященной 100-летию со Дня рождения проф. В.И. Кармазина (21-24 марта 2012г.) – Дніпропетровськ. – 2012. – вип. 49(90) – С. 120-125.

153. Назимко Е.И., Науменко В.Г. Имитационное моделирование изменения поровой структуры осадков при механическом воздействии. /Е.И. Назимко, В.Г. Науменко // Збагачення корисних копалин. (Доклады XV междунар. науч.-практ. конф. «Обогащение полезных ископаемых» г. Бердянск, 24-26 мая 2012г) – Дніпропетровськ. – 2012. – вип. 50(91) – С. 158-163.

154. Полулях А.Д. Технологические регламенты углеобогащительных фабрик Справ.-информ. Пособие. / А.Д. Полулях - Днепрпетровск – НГУ. 2002 – 855 с.

155. Курченко И.П. Проблемы и резервы обогащения углей Украины / И.П. Курченко, А.А. Золотко // Уголь Украины. – 1994. - №11. – С. 2-8.

156. Техничко-економический анализ работы углеобогащительных фабрик Украины за 2008 год. – Луганск: УкрНИИУглеобогащение, 2009. – 104 с.

157. Оборудование для обогащения угля / Под. Ред Братченко Б.Ф. М.: Недра. – 1979. – 336с.

158. Справочник по обогащению углей / Под ред Благова И.С., Коткина А.М., Зарубина Л.С. М.: Недра. - 1984 - 614 с.

159. Полулях А.Д. Практикум по расчетам качественно-количественных и водно-шламовых схем углеобогащительных фабрик. – Уч. пособие/ А.Д. Полулях, П.И. Пилов, А.И. Егурнов. Днепрпетровск. НГУ – 2007. – 504 с.

160. Полулях А.Д. Практикум по технолого-экологическому инжинирингу при обогащении полезных ископаемых. - Уч. пособие/ А.Д. Полулях, П.И. Пилов, А.И. Егурнов и др. Днепрпетровск. НГУ – 2011. – 90 с.

161. Нищеряков А.Д. Опыт применения на ЦОФ Павлоградская ленточного классификатора КЛ10 и его технологические перспективы/ А.Д. Нищеряков, А.А. Янишевский, О.И. Бойко // Збагачення корисних копалин. - Дніпропетровськ. – 2003. - № 17(58). – С. 157-161.

162. Клешнин А.А. Исследование процесса фильтрования угольных шламов различного гранулометрического состава.

Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.15.08. ДПИ. – Донецк, 1974. – 23 с.

163. Блюсс Б.А. Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд./ Б.А. Блюсс, Н.А. Головач – Днепропетровск. – Полиграфист. – 1999. – 126 с

164. Блюсс Б.А. Расчет областей миграции частиц полидисперсного разноплотностного материала по сечению трубопровода при напорном гидротранспорте / Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин// Збагачення корисних копалин. Дніпропетровськ. - 2005. – Вип. 22(63) – С. 115-121.

165. Патент на корисну модель №20852 Стрічковий вакуум-фільтр. Опубл. 15.02.2007, бюл. №2.

166. Обоганительное оборудование. Каталог-2006. Ин-т Гипромашуглеобогащение.

167. Оборудование для горнорудной, угольной и металлургической промышленности. Торговый дом Бердичевского машиностроительного завода «Прогресс». Каталог-проспект. – 2006г. - 42с.

168. Пять прогрессивных программ развития вашего бизнеса. Торговый дом Бердичевского машиностроительного завода «Прогресс». Каталог-проспект. – 2006г. – 8 с.