

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



**А.А. Богданов**

## **ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ**

Монография

Днепропетровск  
НГУ  
2016

УДК 622.794.2

ББК 33.4

Б 73

Рекомендовано до друку вченою радою Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 3 від 11.03.2016).

Рецензенти:

А.О. Бондаренко – д-р техн. наук, доцент кафедри гірничих машин та інжинірингу (Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»);

Д.А. Федін – канд. техн. наук, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів (ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»).

**Богданов А.А.**

Б 73      Технологія механічного обезвоживання : монографія / А.А. Богданов ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск : НГУ, 2016. – 100 с.

ISBN 978-966-350-570-1

Работа посвящена интенсификации процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой установке. Рассмотрена модель процесса механического обезвоживания карбоната кальция на основе уравнения диффузии путем введения функции поглотителей и за счет постановки и комбинации разных граничных условий. Приведены теоретические и экспериментальные исследования закономерностей процесса удаления влаги из материала с анализом влияния на кинетику обезвоживания законов распределения функции поглотителя.

Для специалистов, работающих в сфере технологии обезвоживания материалов, сотрудников высших учебных заведений, научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов, а также для студентов машиностроительных и горных специальностей.

Ил. 51. Библиогр.: 110 назв.

УДК 622.794.2

ББК 33.4

© О.О. Богданов, 2016

© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2016

ISBN 978-966-350-570-1

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
РАЗДЕЛ 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	7
1.1. Классификация оборудования для механического обезвоживания материалов.....	7
1.2. Анализ и обобщение опыта создания и эксплуатации прессового оборудования для обезвоживания материалов.....	9
1.3. Теории механического обезвоживания материала и теории, близкие по физике процесса.....	18
1.3.1. Центрифугирование.....	18
1.3.2. Физические аналогии и уравнения математических моделей химических реакторов .....	19
1.3.3. Задачи нефтяного происхождения.....	22
1.3.4. Использование уравнения диффузии при изучении процессов фильтрования .....	23
Выводы .....	26
РАЗДЕЛ 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ.....	28
2.1. Методика проведения экспериментов.....	28
2.1.1. Конструкция лабораторной установки.....	28
2.1.2. Общие сведения о карбонате кальция, применение в промышленности .....	33
2.1.3. Подготовка проб карбоната кальция.....	36
2.2. Определение структурных характеристик карбоната кальция .....	37
2.2.1. Определение сил сопротивления движению и направляющих усилий шахтного шарнирно-сочлененного локомотива при торможении .....	37
2.2.2. Построение компрессионной кривой.....	39
2.2.3. Определение проницаемости .....	41
2.3. Анализ результатов экспериментов. Сравнение теоретических и экспериментальных данных .....	43
2.3.1. Механическое обезвоживание в перфорированной камере.....	44
2.3.2. Кинетика процесса механического обезвоживания .....	49
2.3.3. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.....	52
Выводы .....	55
РАЗДЕЛ 3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ.....	57
3.1. Уравнение диффузии и постановка краевых задач.....	57
3.1.1. Физическая модель процесса и обоснование принятых допущений .....	57
3.1.2. Начальное и граничные условия первой и второй краевой задачи.....	58
3.1.3. Третья краевая задача .....	60
3.2. Решение уравнения диффузии .....	61
3.2.1. Однородное уравнение диффузии .....	61
3.2.2. Частные случаи краевых задач .....	64

3.2.3. Неоднородное уравнение диффузии .....	64
3.3. Расчеты и анализ результатов .....	67
3.4. Зависимость коэффициента диффузии от времени .....	73
3.5. Расчеты и анализ результатов .....	75
Выводы .....	81
<b>РАЗДЕЛ 4 МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ .....</b>	<b>82</b>
4.1. Определение рационального времени процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке .....	82
4.2. Определение рационального давления процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке .....	84
4.3. Оценка геометрических параметров и расчет производительности прессовой установки для обезвоживания карбоната кальция.....	86
4.4. Технологическая линия по переработке карбоната кальция .....	88
Выводы .....	92
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>93</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>94</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие отраслей химической, строительной, лакокрасочной, резинотехнической, косметической промышленности требует увеличения выпуска качественных наполнителей, к которым в первую очередь относится карбонат кальция (мел). Ежегодное потребление мела в кусковом, дробленом и измельченном виде в развитых странах превышает 150 млн. т. При этом, по оценкам специалистов, около 30 % запасов этого качественного материала сосредоточено в Украине. Поэтому для промышленности нашей страны этот материал является важным стратегическим сырьем.

Существенным фактором, влияющим на выбор оборудования по переработке карбоната кальция, является его высокая природная влажность (30-35 %). С увеличением влажности мела более 20 % повышаются его пластические свойства, что приводит к налипанию его на рабочие поверхности перерабатывающего, транспортирующего и классифицирующего оборудования. Это снижает эффективность использования одних типов машин, а для других полностью исключает их работоспособность. На практике понижение влагосодержания карбоната кальция можно осуществить естественным путем (воздушная сушка) и искусственным. Естественная сушка имеет ряд крупных недостатков: сезонность, зависимость от климатических условий, неравномерная по влажности продукция, длительность процесса.

В настоящее время искусственное удаление влаги из мелового сырья осуществляется термическим методом. Но этот процесс, особенно в нынешних условиях, является экономически невыгодным. Сушильное оборудование занимает приблизительно до 30 % производственных площадей, потребляет до 40 % всего расходуемого тепла и до 30 % электроэнергии. Поэтому рассматриваются возможности использования на первом этапе переработки мела механического способа обезвоживания. Кроме того, этот процесс также считается экологически чистым.

Из существующего оборудования для механического обезвоживания применение вакуум-фильтров и центрифуг невозможно из-за их конструктивных особенностей и физико-механических свойств карбоната кальция.

Перспективным, когда влажность мела более 30 % и выше, является использование прессовых установок. Одним из вариантов машины для механического удаления влаги из карбоната кальция может стать установка типа пакетировочного пресса с камерой обезвоживания. Использование механического обезвоживания на первом этапе сушки обеспечит требуемую влажность материала для последующей его переработки, увеличит производительность оборудования и уменьшит себестоимость продукции. Но применение прессовых установок для обезвоживания мела требует в свою очередь обоснования и расчета их технологических параметров.

Целью данной работы являются теоретические и экспериментальные исследования процесса механического обезвоживания мелового сырья в

прессовой установке и разработка на этой основе методики расчета рациональных технологических параметров прессовых установок.

Задачи:

– провести экспериментальные исследования влияния физико-механических свойств карбоната кальция на кинетику механического обезвоживания в лабораторной прессовой установке;

– исследовать процесс механического обезвоживания карбоната кальция на основе уравнения диффузии с функцией поглотителей и различными граничными условиями;

– разработать методику определения рациональных технологических параметров процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой установке.

Теоретические положения данной работы базируются на основе теории фильтрации жидкости, теории обезвоживания и законов диффузии. Математическое моделирование процесса механического обезвоживания выполнено на основе уравнения диффузии с учетом физико-механических свойств карбоната кальция. Экспериментальные исследования проведены на лабораторной установке со специальными камерами обезвоживания. Обработка экспериментальных данных проведена с применением компьютерной техники и методов математической статистики. Исследования проводились путем определения условий эффективного удаления влаги из материала, анализа и обобщения результатов измерений, проведенных на лабораторной установке.

Научная новизна полученных результатов:

– обосновано, что при механическом обезвоживании карбоната кальция, когда давление возрастает по линейному закону во времени, снижение влажности материала происходит по экспоненциальному закону, конечное значение которой составляет  $\omega = 0,16-0,18$  при начальной влажности в диапазоне  $\omega = 0,25-0,35$ ;

– впервые на модели прессовой камеры экспериментально установлено кинетику отжима влаги из карбоната кальция в зависимости от начальной влажности материала и конструктивных особенностей прессовой камеры, влияющих на удаление влаги;

– применительно к описанию процесса механического обезвоживания карбоната кальция комплексно проанализировано неоднородное уравнение диффузии с функцией источников в правой части для различных сочетаний граничных условий, различных законов изменения функции источников и зависимостью коэффициента диффузии от времени.

Практическое значение полученных результатов заключается в разработке методик расчета рациональных технологических параметров процесса механического обезвоживания карбоната кальция. Разработанные методики позволяют определить влажность материала в любой момент времени с учетом коэффициента диффузии, изменяющегося во времени; рассчитать рациональное значение давления процесса механического обезвоживания для получения продукта заданной влажности; уменьшить время процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой камере на 28-30%.

## РАЗДЕЛ 1

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

#### 1.1. Классификация оборудования для механического обезвоживания материалов

Механическое обезвоживание находится многие годы под пристальным вниманием исследователей разных стран. Это связано, с тем, что данный процесс является наиболее дешевым при удалении влаги из материалов и доведении их до транспортабельного состояния. Ужесточение требований к энергосбережению и охране окружающей среды требует ограничение использования такого дорогостоящего процесса, как термическое обезвоживание, предполагающее применение сушильных агрегатов и значительные выбросы в атмосферу вредных газов и пыли.

Современное состояние исследований процессов обезвоживания характеризуется в основном интенсификацией и совершенствованием существующего оборудования, изысканием новых высокоэффективных методов удаления влаги и созданием на их основе высокопроизводительных машин и аппаратов.

Влага из материала может удаляться различными способами: механическим, физико-химическим, тепловым (сушка). При механическом удалении влага отжимается в прессах, под действием центробежных сил в центрифугах, под вакуумом или под давлением. Механическим способом (обезвоживанием) можно удалить только часть свободной влаги, находящейся в материале, дальше, обычно, используется сушка. Физико-химические способы на производстве применяются редко из-за своей дороговизны. На скорость обезвоживания, существенно влияет внутренне строение высушиваемых материалов, они условно разделяются на три типа: зернистые, пастообразные и волокнистые. Поэтому для правильной организации процесса обезвоживания следует учитывать форму связи влаги с материалом, которая делится на три основных типа:

– физико-механическая влага – эту влагу в значительном количестве можно удалить механическими способами;

– физико-химическая – в зависимости от природы волокна ее содержание может достигать до 40 %. Как правило, такую влагу удаляют сушкой.

– химическая – ее удаление возможно при сильном пересушивании материала, которое нежелательно, так как он становится жестким, хрупким частично утрачивает свойства смачивания.

Основываясь на вышесказанном можно сделать вывод, что организация процесса обезвоживания должна полагаться на индивидуальные данные, полученные экспериментально.

В настоящее время для обезвоживания материалов на предприятиях используется центрифугирование, вакуумное обезвоживание, тепловая сушка и прессование.

Метод обезвоживания в центрифугах применяется для сушки мелких мокрых продуктов. Принцип действия центрифуг заключается в том, что влажный материал попадает внутрь центрифуги и благодаря центробежной силе обезвоживается. Выгрузка обезвоженного осадка с роторов осуществляется под действием центробежной силы, вибрации или с помощью дифференциально вращающегося шнека.

Данный вид оборудования характеризуется высоким расходом металла и электроэнергии на 1 т обезвоживаемого материала: удельный расход на 1 т/ч – металла приблизительно 50 кг, электроэнергии – 0,3 кВт. Преимущество центрифуг заключается в эффективном удалении связанной влаги из материала. Конечная влажность материала составляет от 10 до 12 % при исходной влажности 25-28 %. Однако для достижения такой конечной влажности продукта необходима большая центробежная сила, которая может привести к разрушению ротора центрифуги. Это один из главных недостатков центрифуг. В качестве других недостатков данного вида оборудования следует отметить невысокую производительность и периодичность процесса (для центрифуг периодического действия), трудность регенерации фильтрующих сит и износ разгрузочных устройств [1-11].

Для получения осадков заданной влажности применяются вакуум-фильтры. Различают барабанные, тарельчатые, ленточные и дисковые вакуум-фильтры. В калийной промышленности нашли широкое применение барабанные фильтры для разделения труднофильтруемых грубозернистых суспензий с большим диапазоном крупности твердой фазы и максимальным содержанием класса –100 мкм до 30-50 %. На предприятиях цветной металлургии обезвоживаемые на барабанных фильтрах суспензии содержат до 90 % класса –74 мкм [5, 12-17].

Тарельчатые фильтры применяются в основном при обогащении фосфатных руд. Так же как и у других типов фильтров, цикл фильтрования предусматривает стадии загрузки материала и формирования осадка, просушки и промывки, выгрузки осадка и продувки фильтровального материала. Основным недостаток данных конструкций – большая установочная площадь.

Ленточные вакуум-фильтры конструктивно подобны конвейеру, несущая лента которого покрыта фильтровальным материалом и скользит по вакуум-камере, соединяя через отверстия обезвоживаемую суспензию с вакуумом.

По сравнению с другими вакуум-фильтрами ленточные наиболее просты в изготовлении и обслуживании, занимают относительно небольшую установочную площадь. Существенный недостаток этих фильтров – низкая степень регенерации фильтровальной перегородки. При этом резко снижается проницаемость перегородки, возрастает ее сопротивление оттоку фильтрата.

Для обезвоживания влажного мела на предприятиях по его переработке применяются следующие виды сушильного оборудования: барабанная, распылительная, конвейерная, аэрофонтанная, петлевая, вихревая сушилки и

сушка мела в кипящем слое. Принцип действия данного оборудования основан на распылении материала в виде суспензии либо его транспортировании в камере с горячими газами. В качестве сушильного агента используются дымовые газы, нагретый воздух или перегретый пар. Для переработки материал поступает в виде пасты или суспензии [18-21].

Центрифуги, вакуум-фильтры и тепловые сушилки непригодны для сушки меловой массы, поступающей непосредственно из карьера, потому как материал в них должен поступать в виде пасты или суспензии. Применение тепловых сушилок требует больших затрат на энергоносители, что влечет за собой повышение стоимости готового продукта.

## 1.2. Анализ и обобщение опыта создания и эксплуатации прессового оборудования для обезвоживания материалов

Прессование широко используется на предприятиях по переработке угля, торфа, сыпучих материалов. В качестве прессующего оборудования используются различные конструкции брикетных прессов: кольцевые, вальцовые и штемпельные.

Для уплотнения брикетной массы применяются вальцовые прессы с давлением 20-50 МПа [22-25]. В вальцовых прессах рыхлая пластичная смесь сжимается в плотные брикеты одинаковой формы и массы.

Вальцовые прессы получили наибольшее распространение при брикетировании руд. Эти прессы отличаются высокой производительностью (от 1 до 100 т/ч), большими усилиями прессования, экономичны, не требуют значительных эксплуатационных затрат, малогабаритны. Они пригодны для брикетирования абразивных материалов и высокотемпературного окускования.

Вальцовый пресс (рис. 1.1) представляет собой сварную станину 10, выполненную из толстолистовой стали. В ее боковых стенках расположены четыре корпуса подшипников 5, на которых покоятся валки 3. Валок состоит из вала 6, двух пустотелых валов-барабанов 7, посаженных на вал 6 и шестерни.

На пустотелые валы-барабаны 7 надеваются бандажные кольца с выфрезерованными в них ячейками. Форма ячейки соответствует форме полубрикета.

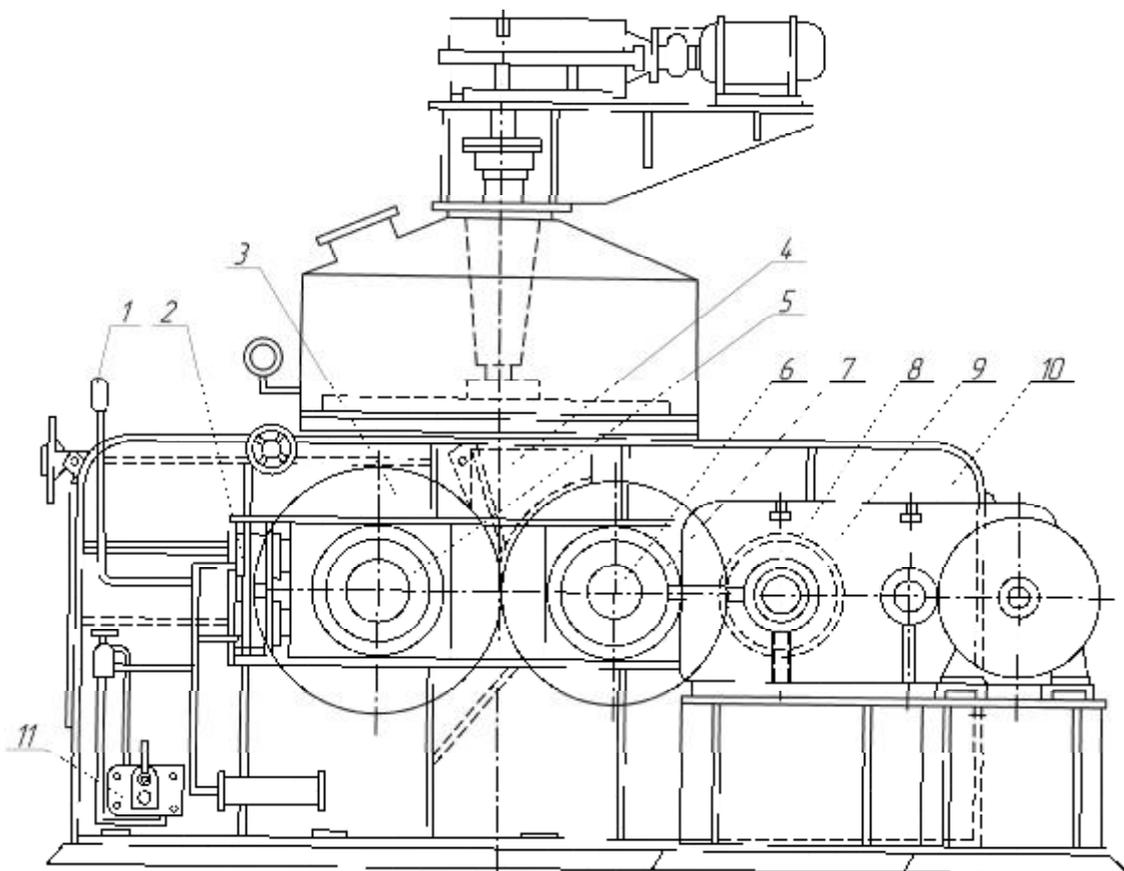


Рис. 1.1. Схема вальцового пресса

Бандажные кольца изготавливаются в виде цельного пакета или отдельных сегментов из высококачественных сталей с термической обработкой после фрезерования ячеек. Валки 3 получают вращение от привода 9. Вращаясь, они захватывают из загрузочной камеры 4 брикетную смесь. В пространстве между ячейками бандажных колес брикетная смесь спрессовывается. Когда ячейки расходятся, из них выпадает брикет. Для поддержания необходимого давления прессования валы 6 сжимаются с помощью отдельной гидравлической системы 2. Контроль давления прессования ведется по манометру 1. Для регулировки степени сжатия валков 3 используется насос повышения давления 11 гидравлической системы 2.

В случае попадания в межвалковое пространство посторонних предметов или поступления высоковязкого малопластичного материала на приводе установлена муфта отбора мощности 8. В зависимости от производительности пресса на валу 6 может закрепляться один или два пустотелых вала-барабана 7 с бандажными кольцами. Вальцовые прессы оборудованы автоматической смазкой всех трущихся поверхностей.

Продолжительность обжатия материала в вальцовом прессе не оказывает большого влияния на качество брикетов. Для полного и равномерного заполнения ячеек смесью, а также уменьшения влияния сил трения о боковые стенки, тормозящие ее движение на валки, смесь подается с подпором. Очень важное условие устойчивой работы вальцовых прессов – постоянная загрузка

материалом валков по всей ширине. В результате достигается получение одинаковых по размеру брикетов и равномерный износ поверхности бандажей.

Для получения прочной связи в брикетах необходимо равномерное уплотнение брикетной смеси по всему объему ячейки. Размеры и форма ячеек влияют на свободный выход брикета материала. Оптимальной для вальцового пресса считается форма ячейки, соответствующая параллелепипеду с полуцилиндрами. Передача давления в глубь зависит от пластичности смеси, объема ячейки и гранулометрического состава материала. Для обеспечения хорошего уплотнения внутренних слоев брикета применяются пресс-формы малых объемов (30-50 см<sup>3</sup>).

Прессование материала (преимущественно бурый уголь крупностью 0-1 мм и влажностью 7-8 %) может осуществляться в кольцевых прессах, где развиваются давления до 200-300 МПа [24].

Кольцевой пресс (рис. 1.2) представляет собой агрегат сложной и громоздкой конструкции. Основными деталями пресса являются кольцо 1, опирающееся на приводные ролики 7, и прессующий диск 6. На внутренней поверхности кольца сделан паз. Прессующий диск, имеющий на своей цилиндрической поверхности ребро, входит в паз. Ребро разделяет прессующий диск на два канала, в которых происходит обжатие материала. Требуемое давление прессования создается прижатием прессующего диска к материалу. Сила нажатия передается на кольцо и далее на приводные ролики. Возникающее трение оказывается достаточным для того, чтобы ролики и кольцо вращались в разных направлениях.

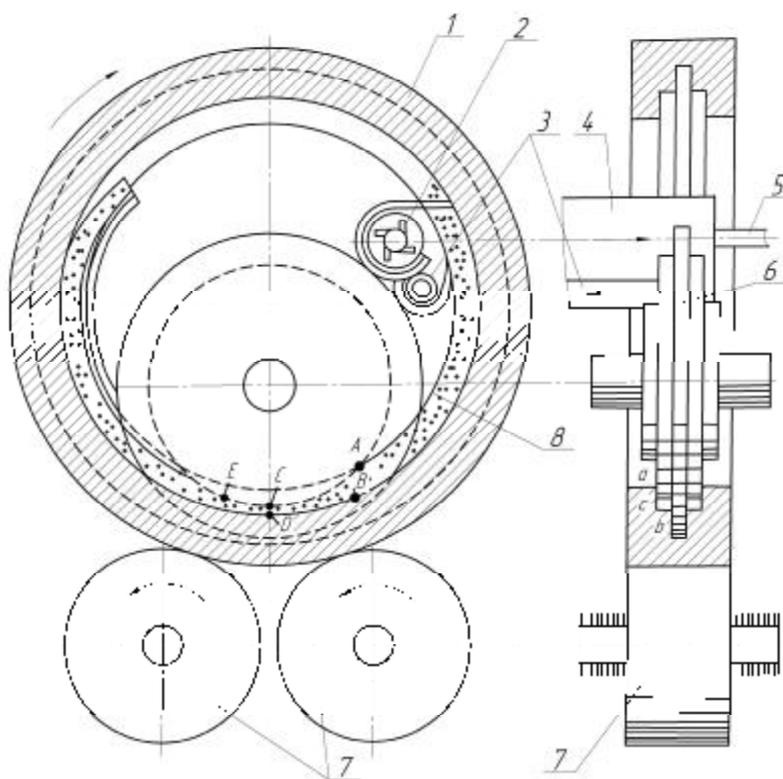


Рис. 1.2. Схема кольцевого пресса

Пресс загружается непрерывно винтовым конвейером 4, ось которого перпендикулярна торцевой поверхности кольца. Пройдя винтовой конвейер, материал центробежным питателем 2, установленным на валу 5, направляется в канал кольца. Из-за больших центробежных усилий, возникаемых в питателе, материал в нем предварительно уплотняется, частично освобождаясь от воздуха. После загрузки канала кольца материал попадает на винтовой конвейер 3. Загруженный в канал пресса материал увлекается вращающимся кольцом благодаря силам трения его о боковую стенку прессующего диска по периметру *а-б-в*. Одновременно материал тормозится неподвижными поверхностями стенки 8 и шины 9.

Прессование в кольцевом прессе имеет некоторое сходство с обжатием материала между двумя прессующими поверхностями. Одна поверхность выступает в качестве ведущей (прессовое кольцо), другая ведомой (прессующий диск). Обжатие материала в кольцевом прессе происходит в подвижном матричном канале. Высота канала в зоне обжатия уменьшается, а в зоне упругого расширения увеличивается. Аналогично изменяется удельное давление прессования. Максимального значения оно достигает на линии центров кольца и диска, где высота канала наименьшая (участок *СД*). Благодаря тому, что матричный канал – прессовое кольцо – находится в постоянном движении, брикет не проталкивается по каналу, а отделяется специальным устройством при подходе кольца к верхнему положению.

Обычно брикеты, получаемые на кольцевых прессах, используются для специальных технологически нужд. Кольцевые прессы не нашли широкого применения на брикетных фабриках в силу своей сложности, громоздкости, энергоемкости и сравнительно невысокой производительности.

Для брикетирования бурых углей и тонкозернистых руд, требующих очень высоких усилий, используют штемпельные прессы [26-35].

Материал, поступающий в пресс, сжимается между торцом штемпеля и группой брикетов в матричном канале. Давление прессования развивается за счет сил трения брикетов в канале и частично в лотке в течение определенного времени. За один оборот коленчатого вала штемпель пресса совершает полный цикл возвратно-поступательного движения. За этот период последовательно выполняются четыре операции: перемещение материала из загрузочной камеры в матричный канал, прессование, проталкивание брикетов по матричному каналу и заполнение материалом пространства перед штемпелем.

Штемпельный пресс (рис. 1.3) включает станину 1, прессовую головку 2, прессующий механизм 3 и привод 6.

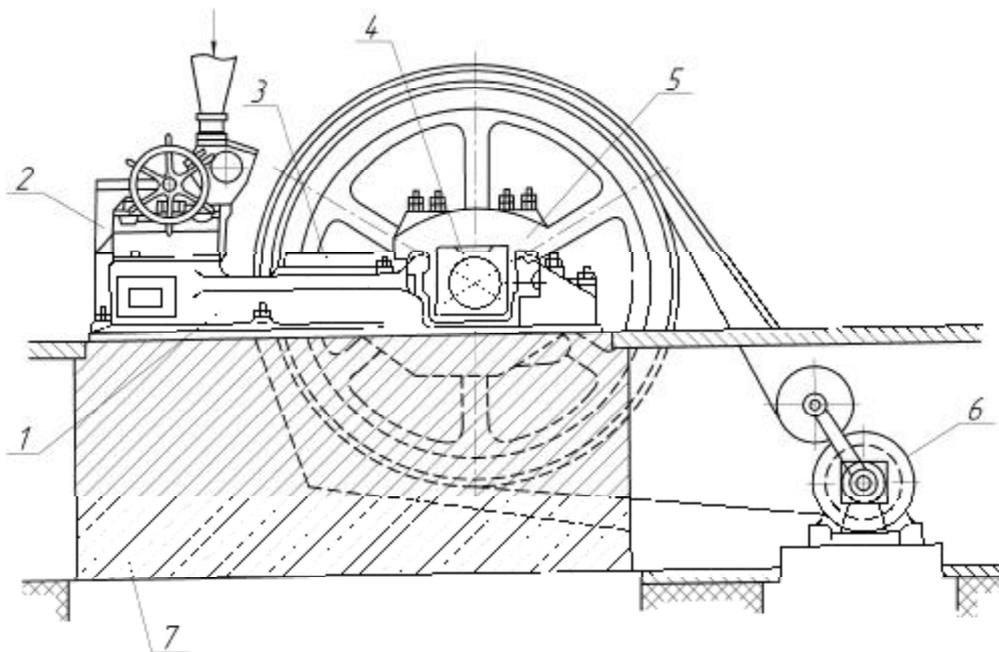


Рис. 1.3. Схема штемпельного пресса

Станина служит основанием для всех движущихся частей пресса. Она устанавливается на мощном железобетонном фундаменте 7. На станине покоятся коренные подшипники 5 коленчатого вала 4. Головка штемпельного пресса размещает в себе пресс-формы, в которых осуществляется собственно брикетирование. Она состоит из массивной литой станины 1 и крышки, соединенных между собой стяжными болтами 2. В головке проходят горизонтальные каналы, в которых располагаются пресс-формы. Число последних в зависимости от числа питателей может быть от одного до трех. Сверху горизонтальные каналы ограничены нажимной плитой 5, которая внутренним концом закреплена шарнирно на оси 6 с помощью выступов. Нижняя плоскость нажимной плиты опирается на пресс-формы. Это дает возможность изменять положение нажимной плиты в вертикальной плоскости, регулировать высоту формовочного канала и давление прессования.

Наиболее применимы в промышленности двухштемпельные прессы. Они хорошо уравновешены, обладают равномерностью вращения коленчатого вала, работают с легкими маховиками.

Отрицательная особенность прессования в штемпельных прессах – многократность воздействия давления на брикет. Влияние этого параметра возрастает с повышением “мягкости” материала. Штемпельный пресс работает эффективнее при удалении из материала воздуха.

Особое влияние на получение качественных брикетов оказывает букель – короткий суживающийся участок в матричном канале. Он служит для повышения сопротивления в матричном канале и деформации материала. Конфигурация букеля связана с такими свойствами прессуемого материала как сопротивление деформации, модуль упругости и пластичность. Форма букеля – один из решающих факторов, определяющих давление прессования и характер его колебаний. С увеличением высоты букеля возрастает сопротивление внутри

матричного канала. Длина букеля определяет температуру в матричном канале, давление прессования, интенсивность охлаждения пресса [26-27, 32].

Число ходов штемпеля определяет давление прессования: с увеличением оно падает и наоборот. Охлаждение матричного канала способствует росту давления прессования. На прессование в штемпельном прессе влияет также трение брикетов о стенки пресс-форм. Основные характеристики прессов для переработки материалов приведены в табл. 1.1.

Среди других известных типов прессов следует указать на шнековый, столовый, рычажный и ленточно-вакуумный. Последние три пресса применяются в основном для брикетирования руд [37-47].

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики прессового оборудования

Параметры	Вальцовый пресс	Кольцевой пресс	Штемпельный пресс	
			Б-8232	БПД-2
Производительность, т/ч	50	10-15	4,2	2,4
Давление прессования, МПа	20-70	200-300	100	100
Мощность электродвигателя, кВт	200	170	160	125
Масса пресса, т	54	115	54	29,5

Шнековый пресс (рис. 1.4) используется в промышленности для отделения жидкости от влагосодержащих веществ. Существуют горизонтальные и вертикальные конструкции прессов.

Горизонтальный шнековый пресс состоит из корпуса 1 с загрузочными 2 и выгрузочными 3 устройствами, шнека 4 с полыми витками и осевой полостью и устройства 7 слива отжатой жидкости. Шнековый пресс работает следующим образом.

Отжимаемое вещество поступает через загрузочное устройство 2 и транспортируется шнеком к выгрузочному устройству 3. Создаваемое шнеком давление во влагосодержащем веществе приводит к отжатию жидкости которая через зазоры между планками 5 попадает в полость витков шнека 4 и из нее через радиальные отверстия в осевую полость шнека, а затем в устройство 6 слива отжатой жидкости.

Недостатки: возможность заклинивания шнека в камере, запрессовка материала перед выгрузкой, неравномерность удаления влаги по всей длине прессового канала.

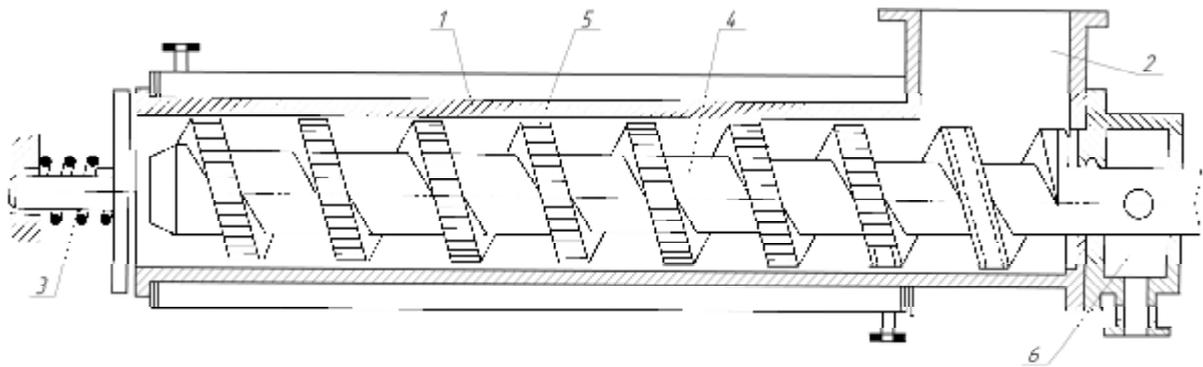


Рис. 1.4. Схема шнекового пресса

К столовым относятся прессы, имеющие различные прессующие механизмы, использующие принцип поворотного револьверного стола. Процесс прессования осуществляется путем периодического поворота стола с определенной частотой. Прессование одностороннее, одноступенчатое от трехпозиционного револьверного полуавтомата. Максимальное давление прессования 30 МПа. Производительность пресса 5-15 т/ч. Основным потребителем столовых прессов является кирпичная промышленность.

Револьверный пресс развивает двухстороннее и двухступенчатое давление прессования. Пресс состоит из верхней и нижней плит, находящихся друг над другом. Расстояние между ними ограничено вертикальным валом. На валу насажены корпуса нижних и верхних поршней. Поршни со стороны стола снабжены штемпелями, а с противоположной – роликами. При работе пресса вся система вращается вокруг вертикального вала, заставляя то подниматься, то опускаться нижние поршни со штемпелем. Такое же движение совершают верхние поршни и штемпеля. Максимальное обжатие материала достигается, когда верхние и нижние штемпели оказываются на минимальном расстоянии друг от друга. Производительность револьверного пресса около 20 т/ч.

Ротационный пресс является разновидностью столовых и револьверных прессов. Аппарат работает в режиме двухступенчатого прессования материала. На первой стадии материал медленно подпрессовывается, на второй – быстро формируется в брикеты при максимальных давлениях прессования, равных 30 МПа. Производительность по готовому брикету не превышает 10 т/ч.

Ленточный вакуумный пресс для брикетирования руд состоит из двух винтовых прессующих механизмов и вакуумной камеры, расположенной между ними. Первый винтовой прессующий механизм выполняет функции смесителя и подпрессовщика, второй – прессового органа. В торце пресса имеется выходная матрица с отверстиями. Сквозь них движется лента спрессованного материала. Для разрушения ленты на брикеты имеется ножевое устройство. Производительность пресса при потребляемой мощности электродвигателя 120 кВт равна 10 т/ч.

Прессовое оборудование используется также при переработке легковесного стального лома с получением брикетов для металлургических предприятий [48-50]. Брикетирование производится на механических и

гидравлических прессах. Сам процесс осуществляется на прессах горизонтального и вертикального типов. Применяется холодное и горячее брикетирование.

Для обеспечения высокой плотности готового продукта необходимо создать условия его предварительного уплотнения. Таким условием является многоступенчатость процесса. Движением пресс-штемпеля I-й ступени прессования стальной лом сталкивается из камеры загрузки в основную камеру. Штемпель II-й ступени формирует ширину пакета, а штемпель окончательной III-й ступени – длину (рис.1.5).

Наибольшее распространение получило брикетирование на гидравлических прессах. Это обусловлено их высокой производительностью, низкими энергозатратами, возможностью механизации и автоматизации процесса. По сравнению с электромеханическими прессами они более компактны, развивают большие давления на штемпелях и имеют более высокий к.п.д.

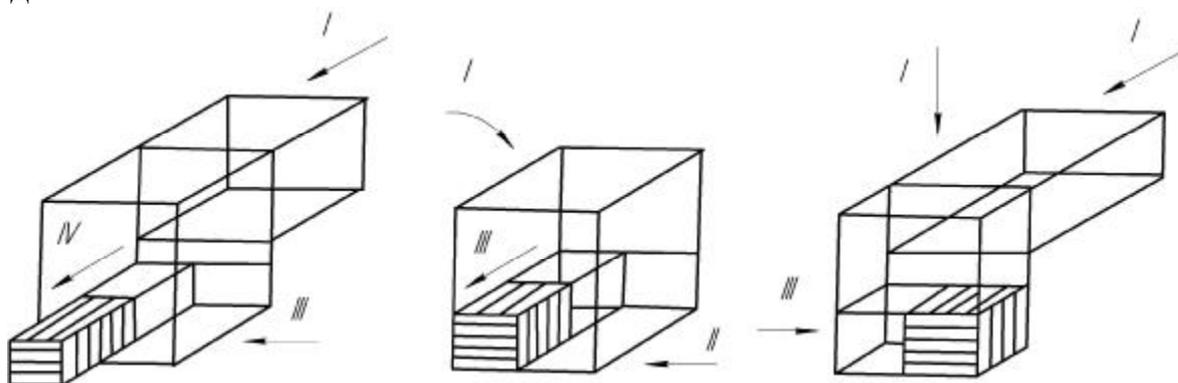


Рис. 1.5. Схемы уплотнения

Основные параметры данного оборудования приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнительные характеристики брикетировочных прессов

Параметры	Б-1642	ЧПА-1250	ПЛ-450
Плотность брикета, кг/м <sup>3</sup>	2000-2500	2500-3000	2000-2500
Масса брикета, кг	2500-3000	до 3000	600-1200
Давление прессования, МПа	16	19	12,9
Производительность, т/ч	12-20	12-18	15-20

Пакетировочный пресс (рис. 1.6) состоит из двух боковин 1, распорки 2, днища 3 и передней стенки 4. Загрузка пресс-камеры производится из

опрокидывающегося короба 5, установленного над механизмом 6 предварительной ступени прессования.

Это облегчает доступ для обслуживания механизма окончательной ступени прессования 7. Окно выдачи брикетов 10 закрывается вертикально перемещающимся затвором. Крышка 8 приводится в движение гидроцилиндрами 9.

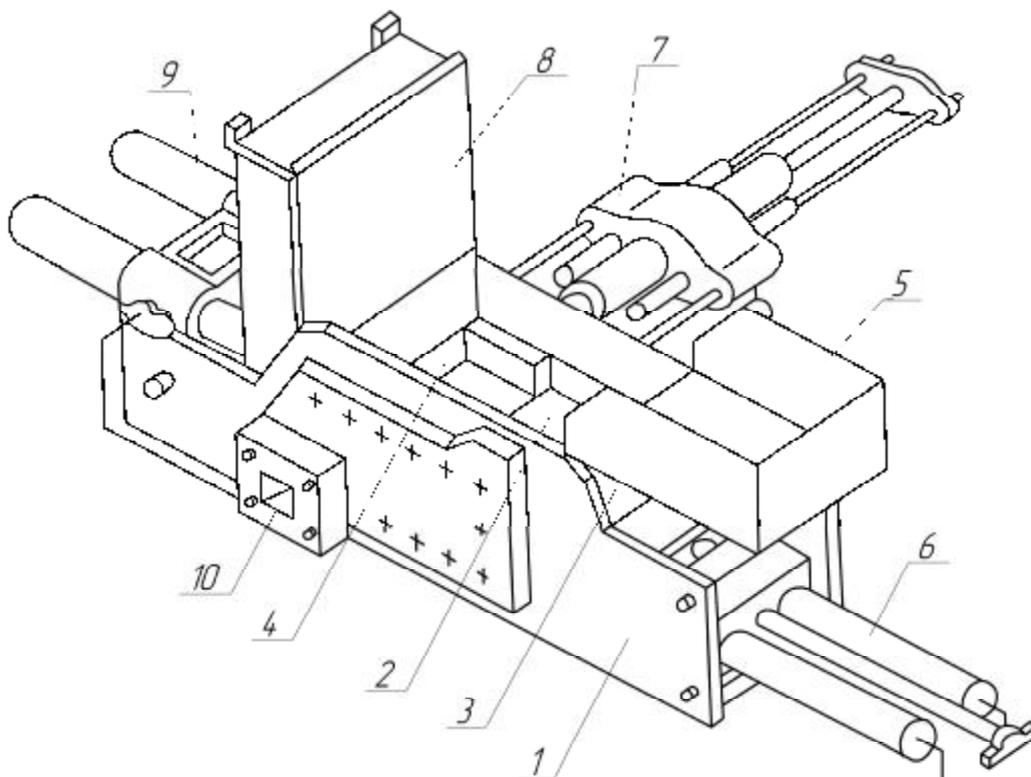


Рис. 1.6. Схема пакетировочного прессы

К недостаткам всех видов прессов можно отнести: отсутствие возможности отвода отжатой влаги; загрузка материала в виде смеси, а не куском разного размера (вальцовые и кольцевые прессы); высокая продолжительность цикла прессования, слабая герметичность соединений, многоступенчатость процесса прессования (штемпельные прессы). Главным фактором является то, что рассмотренные выше прессы используются только для получения брикетов. В качестве оборудования для обезвоживания материалов они не применялись. Поэтому на сегодняшний день актуальной является задача – создание прессовой установки со специальной камерой обезвоживания. Анализируя конструкции прессового оборудования можно сказать, что наиболее пригодными по своим характеристикам для переработки влажного мела являются штемпельные и пакетировочные прессы, снабженные камерой обезвоживания.

1.3. Теории механического обезвоживания материала и теории, близкие по физике процесса

### 1.3.1. Центрифугирование

Процессы разделения неоднородных веществ под действием центробежных сил наиболее близки по физической сущности к процессу механического обезвоживания. Промышленные способы центрифугирования материалов разделяют на [9, 11-13]:

- 1) центрифугальное осветление;
- 2) отстойное центрифугирование;
- 3) центробежную фильтрацию.

Центрифугальное осветление можно считать простейшим видом центрифугирования. С физической точки зрения его можно рассматривать как процесс свободного осаждения частиц твердой фазы под действием центробежного поля.

При отстойном центрифугировании происходит разделение суспензий со значительным содержанием твердой фазы. Данный процесс состоит из осаждения твердой фазы и непосредственно уплотнения осадка.

Наиболее эффективно обезвоживанию идет при центробежной фильтрации. Центробежной фильтрацией называется процесс разделения суспензий центрифугированием их в перфорированных роторах центрифуг.

С физической точки зрения этот процесс заключается в прохождении жидкости через дисперсный осадок и уплотнении этого осадка. При этом из осадка удаляется жидкость, удерживаемая в местах соприкосновения частиц на их поверхности. Процесс центробежной фильтрации состоит из трех периодов (рис. 1.7):

- 1) периода фильтрации с образованием осадка, когда происходит отделение частиц, взвешенных в жидкости, при прохождении последней через проницаемую стенку ротора центрифуги;
- 2) периода отжима жидкости из образовавшегося осадка, когда происходит уплотнение осадка, при практически неизменном объеме скелета осадка;
- 3) периода частичного удаления из осадка жидкости, удерживаемой молекулярными силами.

Второй и третий периоды центрифугирования сходны с процессом механического обезвоживания. Отличие состоит в том, что на жидкость и материал воздействует центробежная сила.

Процесс центробежного фильтрования, как и фильтрования под действием перепада давления, состоит из двух периодов: образование осадка – фильтрация жидкости и периода просушки осадка. Для обоих этих периодов применимы закономерности фильтрации жидкости и просушки осадка с заменой в них перепада давления центробежным давлением.

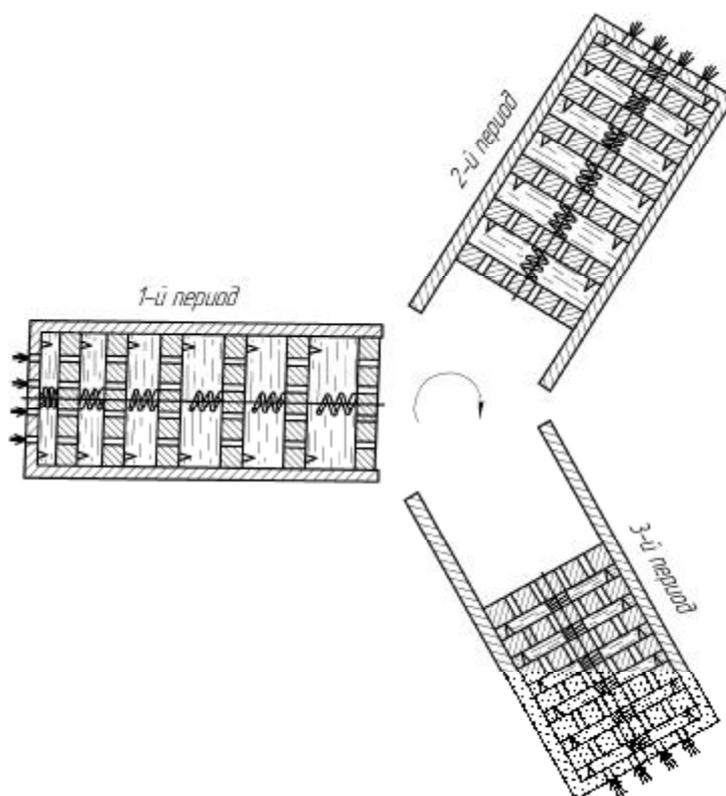


Рис. 1.7. Механическая модель процесса центробежной фильтрации

Критерием трудности обезвоживания осадков может служить значение проницаемости  $k = 12 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ . Осадки с проницаемостью ниже указанного значения относятся к труднофильтруемым. Проницаемость среды, находящаяся в интервале от 12 до  $33 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ , является средней. Осадки, которые имеют высокую проницаемость – от  $33 \times 10^{-13} \text{ м}^2$  и выше обеспечивают высокую скорость удаления влаги [51, 52].

### 1.3.2. Физические аналогии и уравнения математических моделей химических реакторов

Известно, что явления в различных областях физики содержат определенные общие черты. Это приводит к тому, что при математической формулировке задачи мы получаем одни и те же уравнения, описывающие различные физические явления. Для примера рассмотрим подход к математическому моделированию процессов, протекающих в химических реакторах [53-55].

Наиболее близко к процессу механического выдавливания воды из брикета влажного материала подходит модель реактора периодического действия полного смешения.

Математическая модель. Для случая периодической работы реактора полного перемешивания уравнение математической модели полностью определяется уравнением скорости реакции для  $i$ -го компонента

$$W_i = \frac{\partial C_i}{\partial t}, \quad (1.1)$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го компонента;

$\tau$  – расчетное время, которое при полном перемешивании можно считать фактическим временем пребывания компонентов в реакторе.

Изменение концентраций во времени и по длине для реактора этого типа показано на рис. 1.8.

Предлагается следующая схема решения задачи. Обозначим через  $f_i = C_i/C_{i0}$  долю непрореагировавшего вещества  $i$ -го компонента. Далее в уравнение (1.2) подставляем вместо скорости реакции ее конкретные выражения и интегрируя по всему объему, находим величину  $f_i$ .

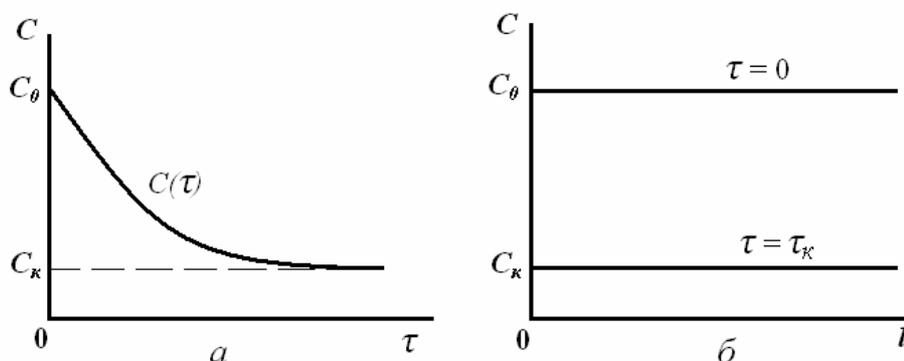


Рис. 1.8. Изменение концентрации в реакторе периодического действия полного смешивания:

$a$  – во времени;  $b$  – по длине.

Для реакции первого порядка при  $W_i = -kC_i$  изменение концентрации во времени и доля непрореагировавшего вещества

$$C_i = C_{i0}e^{-kt}$$

и

$$f_i = \frac{C_i}{C_{i0}} = e^{-kt}.$$

Для реакции второго порядка при  $W_i = -kC_i^2$

$$\frac{1}{C_{i0}} - \frac{1}{C_i} = -kt,$$

$$f_i = \frac{C_i}{C_{i0}} = \frac{1}{1 + kC_{i0}t}.$$

Надо отметить, что эта модель относится к классу идеальных. Простейшее дифференциальное уравнение (1.1) зависит от одной переменной  $\tau$ .

Граничные условия в начальный и конечный моменты времени задаются конкретными значениями.

Поэтому далее в [53] переходят к рассмотрению диффузионной модели.

Диффузионная модель является простой и широко распространенной формой представления химических процессов с конвективным продольным и радиальным переносом.

Физическая модель. В основе ее лежит допущение, заключающееся в том, что реакционный объем считается квазигомогенным, а вещество переносится за счет диффузии с некоторыми эффективными коэффициентом диффузии  $D_3$ .

Из-за неизотропности состояния массы реакционного объема в проточном реакторе, а также для простоты инженерных расчетов вместо коэффициента  $D_3$  обычно рассматривают их продольную и поперечную составляющие.

Математическая модель формально описывается уравнением диффузии в виде

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = D_{i3} \operatorname{div} \operatorname{grad} C_i - w \operatorname{grad} C_i - q \quad (1.2)$$

где  $\frac{\partial C_i}{\partial t}$  – изменение числа молей  $i$ -го компонента в единице объема за единицу времени;

$D_{i3} \operatorname{div} \operatorname{grad} C_i$  – изменение числа молей  $i$ -го компонента в единице объема за счет диффузионного переноса;

$w \operatorname{grad} C_i$  – изменение числа молей  $i$ -го компонента в единице объема при изменении концентрации за счет переноса вещества массовым потоком с линейной скоростью  $w$ ;

$q$  – количество вещества, образующегося (расходуемого) вследствие химической реакции в единице объема за единицу времени.

Решение уравнения (1.2) даже при использовании методов численного интегрирования представляет большие трудности. Поэтому целесообразно эти уравнения упростить так, чтобы получающаяся при этом ошибка не вносила заметных искажений в результаты решения. В первую очередь, это относится к упрощениям, связанным с раздельным исследованием продольного и поперечного переносов. Т.е. сначала решаются уравнения, отражающие только продольный перенос, а затем – поперечный перенос или наоборот. Проверка такого раздельного решения показала, что в результатах расчетов нет заметных расхождений. Но как будет показано ниже, во многих случаях возможен учет только продольного значения диффузионного коэффициента.

Для этого рассмотрим работы, использующие диффузионную модель для исследования течения жидкости через пористую среду. Здесь мы вплотную подходим к математической модели, принятой для решения нашей задачи.

### 1.3.3. Задачи нефтяного происхождения

В этих задачах авторы рассматривают фильтрацию жидкости в пористой среде при переменной величине пористости. Остановимся на трех работах, в которых приведена обширная библиография различных подходов к решению задач данного типа.

Классическая теория фильтрации построена на предположении, что пористая среда является абсолютно жесткой и не деформируется в процессе фильтрации. Для достаточно широкого круга задач такое предположение является вполне оправданным и приводит к результатам, удовлетворительно согласующимся с действительностью. В сравнительно недавнее время, однако, в нефтяной практике появился ряд фактов, которые нельзя объяснить с этих позиций. Но эти факты получали весьма естественное объяснение, если принималась во внимание деформируемость пористой среды.

В работе [56] рассматривается постановка задачи о неустановившейся фильтрации упругой жидкости в неупругой пористой среде, т.е. в пористой среде, характеризующейся неодинаковой зависимостью пористости от напряжений при нагружении и разгрузке, применительно к задачам снижения и последующего восстановления давления жидкости в пласте.

Пористая среда рассматривается авторами как зернистая. При возрастании сжимающих напряжений пористость среды уменьшается, главным образом вследствие более плотной упаковки зерен. Причем, с ростом сжимающих напряжений уменьшение пористости уменьшается, т. е. имеет место своеобразное упрочение.

Далее, взяв за основу уравнение неразрывности, авторы выводят основное уравнение для давления жидкости. Полученный результат приводит к следующему выводу. Задача нестационарной фильтрации жидкости в неупругой пористой среде при немонотонном изменении давления жидкости на границе приводит к некоторой нелинейной краевой задаче для уравнения в частных производных параболического типа, не сводящейся к какой-либо традиционной задаче математической физики. Для определения давления получается следующая задача

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a_1^2 \Delta p \quad \text{при} \quad \frac{\partial p}{\partial t} \leq 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a_2^2 \Delta p \quad \text{при} \quad \frac{\partial p}{\partial t} \geq 0 \quad (1.4)$$

Полученные уравнения относятся к уравнениям диффузии. Пример их использования дается в статье [57]. Начальное и граничные условия для уравнений (1.3) и (1.4) принимаются

$$p(x, 0) = p, \quad p(0, t) = p_0 \quad (0 \leq t \leq t_0)$$

$$\left( \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x \rightarrow 0} = 0 \quad (t \geq t_0) \quad (1.5)$$

В предлагаемой работе рассмотрены две простейшие задачи о снижении и последующем восстановлении давления при фильтрации жидкости в среде с неупругой зависимостью пористости от напряжений. Последующие исследователи еще более усложнили исходные уравнения [58], но в основе модели фильтрации жидкости в пласте осталась диффузионная модель.

Поэтому рассмотрим еще один цикл работ, использующих диффузионную модель для исследования течения жидкости через пористую среду. Здесь мы вплотную подходим к математической модели, принятой для решения нашей задачи.

#### 1.3.4. Использование уравнения диффузии при изучении процессов фильтрования

Закономерности процессов разделения неоднородных систем фильтрованием базируются на основных положениях гидродинамики течения жидкостей. При этом основной задачей расчета процессов является определение производительности фильтров по фильтрату, в основу решения которой положено основное уравнение фильтрования, связывающее между собой производительность фильтров, движущую силу процессов и гидравлическое сопротивление слоя осадка и фильтровальной перегородки. Следует представлять и понимать, что по существу закономерности процесса фильтрования представляют собой не что иное, как закономерности работы насосов на гидравлическую сеть: в данном случае под сетью подразумеваются фильтровальная перегородка и слой осадка, а под насосом – давление, под действием которого происходит течение фильтрата. Используемые в химической технологии и других смежных отраслях процессы фильтрования, а вместе с тем и фильтровальное оборудование, отличаются между собой главным образом способами создания движущей силы процесса (процессы фильтрования под вакуумом, под избыточным давлением, под действием давления столба жидкости, под действием избыточного давления вследствие развития центробежной силы в фильтрующих центрифугах).

Вопросами теории движения жидкости и газа в пористой среде занимаются ученые разных стран. Важную роль в становлении и развитии теории движения вод и подземной гидродинамики, выводе общих уравнений течения жидкости в пористой среде сыграли такие исследователи, как Н.Е. Жуковский, И.А. Чарный, В.И. Аравин, С.Н. Нумеров, Н.Н. Павловский, П.Я. Полубаринова-Кочина и др. [59-69]

Основы элементарного процесса фильтрования – прохождение жидкости (воды) через поровое пространство осадка. Работы таких известных исследователей, как Б.В. Дерягин и его сотрудники, М.И. Бейлина,

Ю.П. Бочкова, В.С. Бутовецкого, А.А. Клешнина, Г.Л. Майдукова, И.Д. Пейчева, П.И. Пилова, А.Д. Полуляха, А.П. Скрипова и многих других посвящены интенсификации и исследованию процессов механического обезвоживания [51, 70-75]. Эти работы послужили основой для определения круга параметров, влияющих на скорость перемещения и удаления влаги из осадков, развили современную теорию фильтрации и показали, в частности, влияние особенностей строения осадка и его пористости.

В данной области многое сделано также сотрудниками Донецкого национального технического университета Е.И. Назимко и Е.Е. Гарковенко. Основные результаты их исследований в этом направлении представлены в работах [52, 76-80].

Использование математической модели процесса механического обезвоживания на основе уравнения диффузии и обоснование принятых при этом допущений предлагается в [79]. Целью этой работы являлось исследование уравнения переноса вещества в пористых средах применительно к тонким труднофильтруемым осадкам.

Рассматривается дифференциальное уравнение вида

$$D \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1.6)$$

Коэффициент  $D$ , входящий в уравнение (1.6), является диффузионным фактором и определяется из соотношения

$$D = \frac{kP}{m n} \quad (1.7)$$

где  $k$  – проницаемость пористой среды,  $\text{м}^2$ ;

$P$  – давление, Па;

$m$  – вязкость воды, Па·с;

$n$  – пористость, отн. ед.

Для исследования процесса удаления влаги из осадка в неустановившемся режиме методом конечных разностей решено нестационарное дифференциальное уравнение (1.6) потока жидкости через пористый осадок, который имеет различные значения проницаемости по толщине. При этом в работе [77] приняты следующие начальные условия. При подаче суспензии в рабочую камеру обезвоживающего аппарата (фильтр-пресса) суспензия рассматривалась как жидкая среда, поэтому давление по всей толщине осадка принималось одинаковым и равнялось единице.

Граничные условия заданы из следующих соображений. В реальных аппаратах падение давления на выходе из осадка с учетом того факта, что жидкость имеет конечную вязкость, происходит не мгновенно, а по экспоненциальному закону в течение какого-то отрезка времени. На входе увеличение давления происходит аналогичным образом, но более медленными темпами из-за того, что скорость подачи суспензии, как правило, превышает скорость выведения жидкости. По мере фильтрования с течением времени  $\tau$  давление на выходе поры снижается до атмосферного, которое условно принято за ноль, по экспоненциальной зависимости

$$P(\tau) = \exp(-\tau/20) \quad (1.8)$$

На входе поры с нагнетательной стороны давление наоборот увеличивается от единицы по зависимости

$$P(\tau) = 0,5 + 1 / [1 + \exp(-\tau/30)] \quad (1.9)$$

При этих начальных и граничных условиях исследованы закономерности изменения давления по толщине осадка во времени (от начала момента фильтрования) при разном распределении проницаемости по толщине осадка.

Выполненный анализ уравнения переноса вещества в пористой среде тонкодисперсных осадков позволил авторам работы [77] сделать вывод о том, что, чем ниже проницаемость осадка и чем сильнее этот параметр уменьшается по длине поры, тем дольше длятся переходные процессы и тем медленнее стабилизируется градиент давления и в целом процесс фильтрования жидкости.

Далее подробный анализ результатов использования этого уравнения исследуется в [78]. В работах [79, 80] продолжается развитие этой темы.

В [80] авторы использовали свою математическую модель для исследования переходных процессов с учетом закона изменения проницаемости по толщине осадка. Исследовались линейная и линейная пикообразная зависимости.

Дифференциальное уравнение (1.9) решено численным методом Кранка-Николсона, который используется для решения уравнений параболического типа. Уравнение решалось на прямоугольной области для начальных условий

$$U(x, 0) = \text{inif}(x), \quad (1.10)$$

где  $x$  – координата по длине поры;

$\text{inif}(x)$  – начальная функция.

Параметр  $x$  изменяется в интервале

$$0 \leq x \leq a. \quad (1.11)$$

Проведенное моделирование позволяет заключить, что при более сложном законе изменения проницаемости по длине поры возникают переходные процессы и значительное (на порядок) замедление удаления влаги. Для сокращения времени протекания переходных процессов и ускорения истечения жидкости через поры в тонких осадках необходимо применять динамическое воздействие на осадок, которое будет способствовать изменению структуры пор в осадке, раскрытию тупиковых пор и ловушек, очищению пор от тонких частиц. Одним из таких способов может быть наложение сдвиговых деформаций на осадок в определенные моменты времени.

Интересным из этой работы представляется вывод о том, что дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение изменения структуры осадков при наложении динамических воздействий. Сложное статическое и динамическое нагружение может оказать существенное увеличение эффективности процесса обезвоживания.

Анализ математической постановки задач и способа решения в работах [77, 76-80] показывает следующее:

- 1) авторами используется однородное уравнение диффузии;

2) граничные условия выбираются соответственно первой краевой задаче;

3) решение задачи осуществляется методом численного интегрирования.

Отметим также тот факт, что в указанных работах не приводятся результаты экспериментов и нет ссылок на экспериментальные работы других авторов.

## Выводы

Основные выводы, которые можно сделать из анализа предыдущих разделов сводятся к следующему.

1. К машинам для механического обезвоживания мелкодисперсной массы относятся центрифуги и вакуум-фильтры. Но использование этого оборудования является проблематичным по двум причинам:

1) материал в него должен поступать в виде пасты или суспензии, что не соответствует физическому состоянию меловой массы из карьера;

2) эффективность процесса обезвоживания определяется коэффициентом проницаемости материала, который для мела на 2-3 порядка ниже традиционных, обезвоживание которых происходит на данном оборудовании.

2. Для уплотнения сыпучих материалов используются штемпельные, вальцовые и кольцевые прессы. Эти прессы используются только для получения брикетов в торфобрикетной или бурoughольной промышленности. Для обезвоживания материалов они не применяются.

3. Для уплотнения металлолома используются пакетировочные прессы. По конструкции и технологическим параметрам они могут рассматриваться как основа для создания прессовой установки для обезвоживания мела.

4. Среди технологических параметров процесса обезвоживания одно из важных мест занимает скорость прессования. Она определяет собой производительность прессы и качество готового продукта. Применение высоких скоростей недопустимо, потому как необходимо обеспечить возможность отвода воды из материала при уменьшении его пористости в процессе обжатия, что определяется диффузионным фактором среды.

Кроме экспериментальной отработки эти вопросы требуют теоретического исследования.

5. Предложена математическая модель процесса механического обезвоживания материала в центрифугах и фильтр-прессах на основе линейного уравнения диффузии. Решение уравнения проводилось численным методом Кранка-Николсона, но сравнение его эффективности с другими методами не проводилось. При этом для краев исследуемого порового пространства или единичной поры использовались граничные условия, соответствующие первой краевой задаче, т.е. задавались законы изменения влажности на границах участка. При этом не рассматривались более сложные граничные условия с учетом скорости изменения влажности на границе и с учетом влияния влажности окружающей среды (вторая и третья краевые задачи [81-85]).

6. Расчет технологических параметров процесса механического обезвоживания требует учета изменяемости проницаемости, пористости и диффузионной способности брикета. Неоднородная среда приводит к тому, что коэффициенты уравнения диффузии становятся разрывными функциями. В этом случае исследуемый участок разбивается на несколько частей, внутри которых коэффициенты уравнения считаются постоянными.

7. Технология вынужденного удаления влаги сжатием материала в прессовой камере кроме принятия переменными физических характеристик среды по п. 6 эквивалентна введению в правую часть уравнения диффузии функции источников. Данный подход можно использовать при исследовании процесса механического обезвоживания. При этом если физические характеристики могут быть определены экспериментальным путем, то функция источников требует своего обоснования, последующей теоретической проверки, сравнения с экспериментами и объяснения полученных результатов.

8. Уравнение диффузии относится к уравнениям параболического типа. Классическим способом их решения использование метода Фурье (метод разделения переменных), обладающий достаточной наглядностью и точностью. В общей постановке решение задачи позволит построить характеристики распределения влажности по длине брикета для принятого ряда значений времени и наоборот – определение изменения влажности в заданном сечении по времени.

Анализ вышесказанного позволяет сформулировать следующие задачи исследований:

1. Развитие математической модели процесса механического обезвоживания на основе уравнения диффузии путем введения функции поглотителей и за счет постановки и комбинации различных граничных задач.

2. Теоретическое исследование процесса удаления влаги из материала с анализом влияния на кинетику обезвоживания законов распределения функции поглотителей при различном сочетании краевых условий.

3. Экспериментальное определение физико-механических свойств карбоната кальция, влияющих на кинетику механического обезвоживания, исследование процесса удаления влаги из образцов в прессовой камере и сравнение результатов экспериментов с теорией.

4. Разработка методики определения технологических параметров процесса механического обезвоживания.

## РАЗДЕЛ 2

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

Целью экспериментальных исследований является определение структурных характеристик карбоната кальция, изучение поведения материала и процесса удаления влаги при его сжатии в прессовой камере, построение кинетических кривых механического обезвоживания, определение рациональных технологических параметров этого процесса.

#### 2.1. Методика проведения экспериментов

На первом этапе экспериментальных исследований определялись структурные характеристики карбоната кальция – пористость и проницаемость, а также влияние на них крупности, влажности и уплотняющего давления.

##### 2.1.1. Конструкция лабораторной установки

Экспериментальные исследования по механическому обезвоживанию карбоната кальция проводились на прессовых установках, конструктивная схема которых представлена на рис. 2.1.

Первая установка представляет универсальную испытательную машину с механическим и электрическим приводом с максимальным усилием  $F = 50$  кН. Вторая установка – гидравлический пресс колонного типа с максимальным усилием  $F = 100$  кН. Установки предназначены для прессования различных материалов и изделий, соответствующих по параметрам технологического процесса и удельным давлениям прессования. Пресс включает в себя основание 1 и верхнюю плиту 2, жестко соединенных между собой вертикальными круглыми колоннами 3. На верхней плите смонтирована рычажная система 4, которая системой рычагов выдает создаваемое прессом усилие на динамометр 5. Цена деления динамометра – 10 кг. Между основанием и верхней плитой пресса по направляющим колоннам перемещается подвижная траверса 6. Она выполнена в виде пустотелой литой коробки. Внутри смонтирован механизм перемещения траверсы. На крышке коробки крепится нижний захват. Конструкция захвата предусматривает возможность установки опорных плит и других приспособлений.

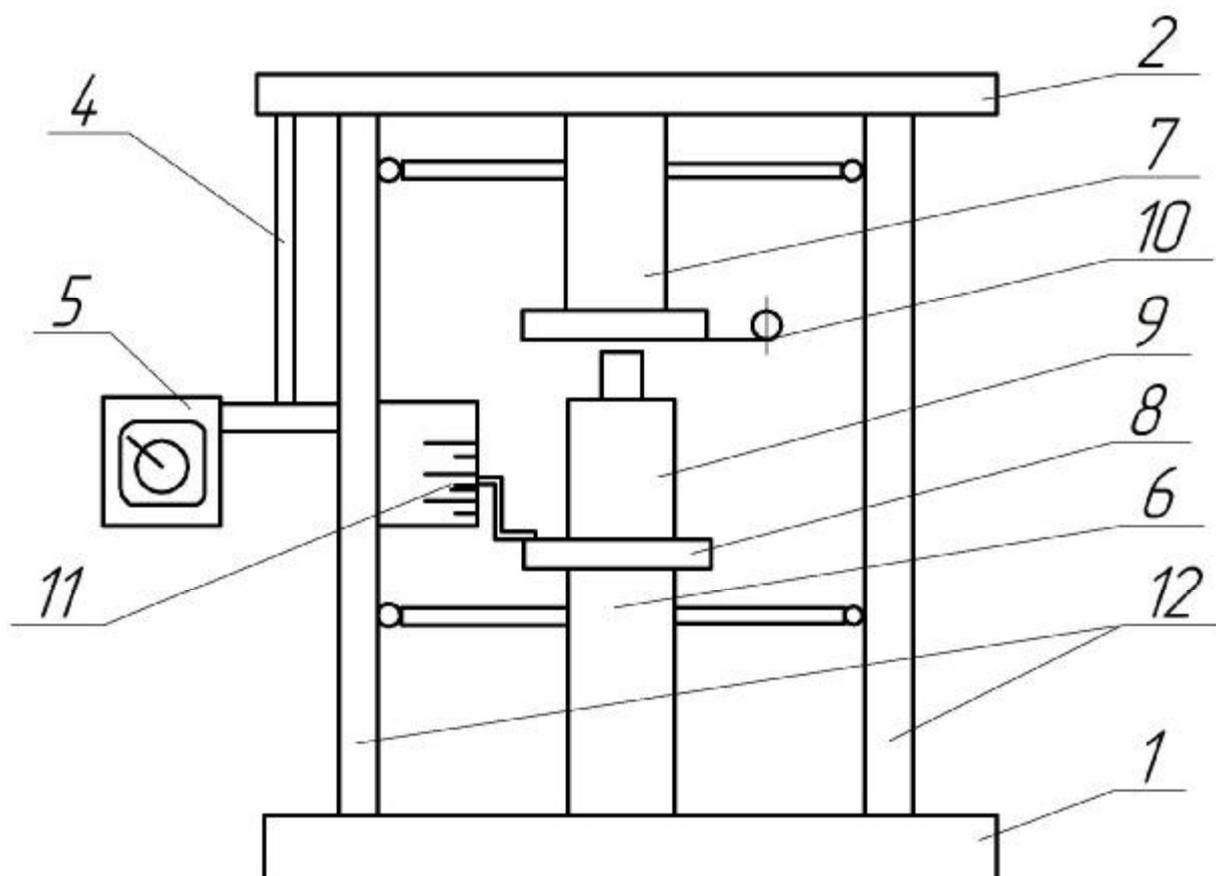


Рис. 2.1. Конструктивная схема прессовой установки:

1 – основание; 2 – верхняя плита; 3 – колонны; 4 – уравнивающий механизм; 5 – динамометр; 6 – подвижная траверса; 7 – неподвижная траверса; 8 – нижний стол; 9 – лабораторный образец прессовой камеры; 10 – индикатор часового типа; 11 – указатель перемещения.

Движение траверсы вверх-вниз с разной скоростью обеспечивается электродвигателем, соединенным с коробкой перемены передач. Изменение скоростей вращения электродвигателя производится с пульта управления. Вращательное движение от электродвигателя через коробку перемены передач передается на червячную пару и грузовую гайку. Грузовая гайка сообщает поступательное движение ходовому винту. Самотормозящая червячная пара, грузовая гайка с ходовым винтом дают возможность продолжительное время выдерживать заданную нагрузку без изменения. Передвижение подвижной траверсы возможно и в ручном режиме. Для этого предусмотрен механизм перемещения, состоящий из червячного колеса, закрепленного на ходовом винте, и червяка, на конце которого имеется квадрат под рукоятку. Вращением рукоятки можно перемещать подвижную траверсу вверх и вниз.

Траверса 7 является неподвижной. На подвижной траверсе 6 укреплен нижний стол 8, на котором располагается лабораторный образец прессовой камеры 9. Контроль перемещения поршня в камере осуществляется индикатором часового типа 10 и указателем 11. Указатель 11 связан с подвижной траверсой 6. При движении траверсы стрелка указателя фиксирует

величину перемещения поршня на закрепленной рядом мерной линейке. Цена деления линейки – 1 мм.

Фото прессов представлены на рис. 2.2-2.4.

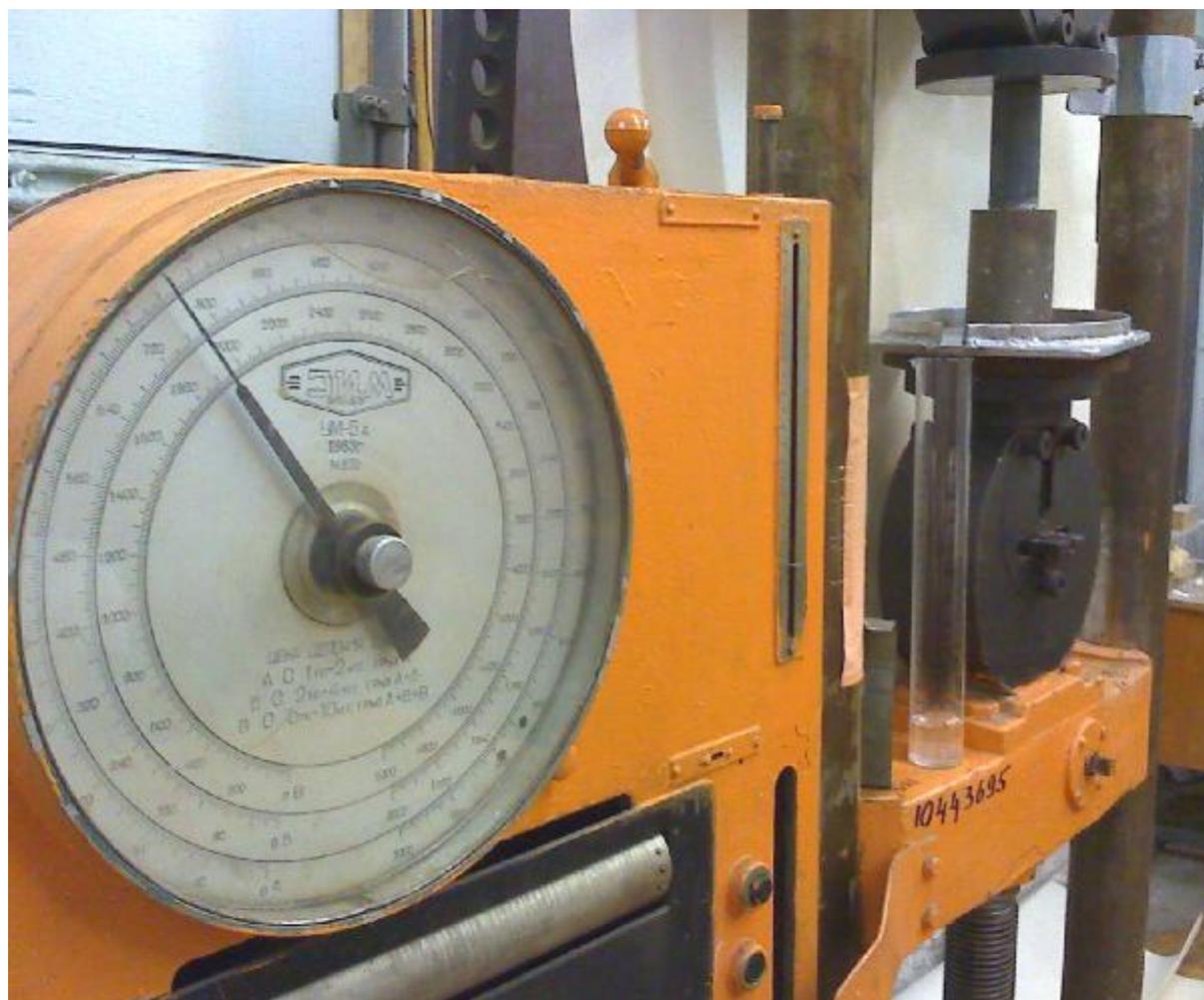


Рис. 2.2. Фото лабораторной установки (пресс 5 т)



Рис. 2.3. Фото лабораторной установки (пресс 5 т, пресс 10 т)



Рис. 2.4. Фото лабораторной установки (пресс 10 т)

Лабораторные прессовые камеры состоят из набора стальных цилиндров, пуансонов и сменных днищ (рис. 2.5). Схема лабораторного образца прессовой камеры 9 представлена на рис. 2.6.



Рис. 2.5. Фото прессовых камер

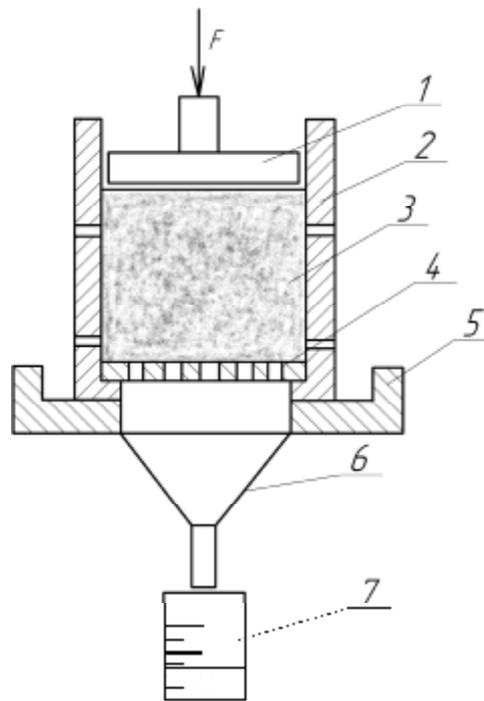


Рис. 2.6. Схема лабораторного образца прессовой камеры:

1 – пуансон; 2 – корпус камеры с отверстиями; 3 – исследуемый материал; 4 – днище с отверстиями; 5 – поддон; 6 – воронка; 7 – мерный сосуд.

Камера состоит из полого стального цилиндра 2. Диаметр применяемых цилиндров  $D = 0,03, 0,06$  и  $0,12$  м, высота  $L = 0,1-0,3$  м. Прессование мела осуществляется пуансоном 1. Днище 4 прессовой камеры выполнено съемным. Оно снабжено отверстиями для отвода отжатой воды.

Для проведения исследований использовались днища с разным количеством, диаметром и расположением отверстий (рис. 2.5). В опытах использовались также отверстия в корпусе камеры. Под камерой устанавливается поддон для сбора отжатой влаги 5 и последующему ее отводу в мерный сосуд 7 через воронку 6. Отжатый в ходе экспериментов карбонат кальция также собирался в поддон и удалялся по мере накопления. Отверстия внутри камеры и днище регулярно прочищались.

### 2.1.2. Общие сведения о карбонате кальция, применение в промышленности

Карбонат кальция – карбонатная порода (разновидность известняка), почти полностью сложенная кальцитом (91-98,5 %). Внешне это белая, слабоцементированная, тонкозернистая, пачкающаяся порода [86-87].

В своей основе карбонат кальция – мономинеральная порода оаохомогенного происхождения, сложенная кальцитом –  $\text{CaCO}_3$ . В составе этого минерала теоретически содержатся 56,03 %  $\text{CaO}$  и 43,97 %  $\text{CO}_2$ . Кальцит кристаллизуется в тригональной сингонии. Спайность совершенная по ромбоэдру. Твердость по шкале Мооса – 3, плотность –  $2700 \text{ кг/м}^3$ , пористость – 0,45-0,55. Содержание частиц меньше 0,01 мм обычно свыше 90 %. Основным диагностический признак – “вскипание” от капли соляной кислоты (5-10 %),

тем более бурная, чем меньше зерна кальцита. Цвет кристаллов бесцветный, белый. При нагревании на воздухе кальцит диссоциирует при температуре 800-900°C.

Карбонат кальция относится к жестким полускальным породам. Его прочность во многом зависит от влажности. Временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии изменяется от 1000 до 4500 кН/м<sup>2</sup>. Модуль упругости от 3000 МПа (для рыхлого карбоната кальция) до 10000 МПа, (для плотного) и ведет себя как упругое тело. Угол внутреннего трения равен 24-30°, сцепление в условиях всестороннего сжатия достигает 700-800 кН/м<sup>2</sup>. Естественная влажность карбоната кальция составляет 30-35 %.

Основываясь на данных, ранее разработанных классификациях воды в грунтах [88-93], воду, содержащуюся в карбонате кальция, можно разделить на следующие виды: свободную, капиллярную, осмотическую и адсорбционную.

Свободная вода представляет мало интереса, потому как не взаимодействует твердым веществом и удаляется из него свободной фильтрацией под действием силы тяжести.

Капиллярная вода заполняет собой поры капиллярных размеров. Эта вода удерживается физико-механической связью и может быть удалена механическим путем.

Осмотическая вода – это внутриклеточная вода заполняет клетки водорослей, а также осмотические ячейки. Осмотическая вода по своим свойствам не отличается от обычной воды и может быть удалена механически при давлениях до 100 кг/см<sup>2</sup>.

Адсорбционная вода по своим свойствам подобна упругому твердому телу. Она находится под большим давлением, обусловленным действием молекулярных сил притяжения. Поэтому ее следует рассматривать как составную часть твердых частиц, которая не может быть отделена от них механически.

Таким образом, механическим обезвоживанием из карбоната кальция можно убрать свободную, капиллярную и часть осмотической воды. При начальной влажности мела 35% механическим способом удаляется до 17-20 % влаги. Оставшуюся в карбонате кальция воду удаляют различными видами сушки.

Карбонат кальция является важным компонентом в различных отраслях промышленности, народного хозяйства и быта. Он достаточно дешевый природным материалом, поскольку на его добычу и последующую обработку не требуется больших капиталовложений, а его доступность и практически неограниченные запасы делают весьма привлекательным сырьем. Применение карбоната кальция в промышленности зависит от его степени чистоты, марки, состава и процентного содержания карбида и примесей, а также его крупности и тонины помола. Использование карбоната кальция в производстве в качестве наполнителя, позволяет существенно снизить себестоимость готовой продукции и улучшить ее качество. Потому что, несмотря на дешевизну, карбонат кальция является привлекательной комбинацией высокой белизны,

яркости, низкой твердости, цены и практически отсутствием реактивных примесей.

Карбонат кальция широко применяется в химической, бумажной, резинотехнической, стекольной, пищевой промышленности, при производстве пластмасс, лако-красочной продукции, в парфюмерии, медицине, строительстве, животноводстве и сельском хозяйстве.

Весьма интересен тот факт, что одной из основных промышленных сфер потребления карбоната кальция является производство пластмасс. В составе пластмасс он выполняет целый ряд функций. В частности, используется для коррекции белизны материала, снижения его себестоимости, а также некоторых других целей. Его используют при производстве кабельной продукции, полиуретанов, эпоксидных смол, полиэтилена, поливинилхлорида (пластиковые трубы, изделия из пластмасс, оконные профили, пластиковые панели). Без карбоната кальция не обходится производство поолефинов, полиэфирных волокон (лавсан, кримплен и пр.), поливинилхлорида. Изделия из этих видов пластмассы встречаются повсеместно – это кафельная плитка, трубы, линолеум, черепица и т.д. Краски на 20 % состоят из карбоната кальция, используемого тут в качестве красящего пигмента.

При производстве резины карбонат кальция способствует улучшению износостойкости изделий, а также экономии весьма дорогостоящего каучука и других компонентов. Достаточно широко применяется в композиционных материалах на основе ПВХ. В значительных концентрациях его используют в обувных и кабельных пластикатах. Причем для изготовления оболочек кабельной продукции его используют практически во всех случаях.

Карбонат кальция является одним из необходимых компонентов при производстве стекла, поэтому вторым потребителем по его объемам является стекольная промышленность. Также с помощью карбоната кальция осуществляется производство таких широко используемых в быту материалов, как сантехника, керамическая плитка, линолеум. В качестве наполнителя и красящего пигмента карбонат кальция используется в производстве лаков, красок, эмульсий.

Строительная отрасль также является активным потребителем карбоната кальция: герметики, шпаклевки, гипсокартон, цемент, известь. Кроме того, для мелования бумаги и картона он применяется в бумажной промышленности. При помощи мела, разведенного водой, может осуществляться примитивная побелка. Этот нехитрый состав и на сегодняшний день в некоторых случаях находит своё применение. Побелка при помощи мела представляет собой недорогой и достаточно простой способ, позволяющий получить ровное, матовое покрытие белоснежного цвета, скрывающее небольшие дефекты поверхности.

При производстве бытовой химии (чистящих средств, обувных кремов), в производстве удобрений для известкования почв, комбикормов для птиц и животных.

Продукт переработки карбоната кальция – тонкодисперсный осажденный мел, не содержащий примесей железа, которые извлекаются при помощи

магнита, применяется для изготовления микросхем в электронной промышленности, детских питательных смесей для повышения содержания кальция, лекарственных препаратов в фармацевтике, медицинских резиновых принадлежностей, изоляции токоведущих частей кабеля.

Кроме того, в качестве реагента он применяется для нейтрализации винной кислоты при производстве марочных вин, и для очистки свекловичного сока в сахарном производстве, а в фармацевтике – для выращивания пенициллина.

### 2.1.3. Подготовка проб карбоната кальция

При проведении исследований используются:

- 1) весы аналитические;
- 2) стаканчики для взвешивания;
- 3) шкаф сушильный, обеспечивающий стабильную температуру нагрева 105-110 °С;
- 4) измерительный инструмент: штангенциркуль (тип КЛ2, цена деления 0,1 мм), линейка (цена деления 1 мм), индикатор часового типа (ГОСТ 577-68, цена деления 0,01 мм);
- 5) мерные сосуды с делениями;
- 6) штатив;
- 7) кинокамера для съемки отдельных экспериментов (CANON-A630);
- 8) секундомер (СОС пр-2б-2-00, цена деления 0,2 с).

Методика определения содержания влаги основана на высушивании карбоната кальция до постоянной массы [94-96]. Навеску материала, отобранную от средней пробы, помещают в предварительно высушенный до постоянной массы стаканчик и сушат в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С в течение 2 часов при открытой крышке. Затем стаканчик с навеской вынимают, закрывают крышкой, охлаждают до комнатной температуры и взвешивают.

Согласно данной методики содержание влаги в пробе в относительных единицах вычисляют по формуле

$$w = \frac{m_k - m_0}{m_0}, \quad (2.1)$$

где  $w$  – влажность карбоната кальция;

$m_k$  – масса влажного карбоната кальция до высушивания;

$m_0$  – масса сухого карбоната кальция после высушивания.

За окончательный результат принимают среднее не менее чем из двух параллельных определений при условии, что расхождение между ними не превышает 0,001.

## 2.2. Определение структурных характеристик карбоната кальция

С физической точки зрения в основе процессов обезвоживания продуктов обогащения лежит фильтрация – течение жидкости (воды) через пористую среду. Значительное влияние на процесс и результаты обезвоживания оказывает структура пористой среды, которая зависит в основном от гранулометрического состава обезвоживаемого продукта и определяет проницаемость среды, т.е. способность пропускать жидкость [76, 97, 98].

### 2.2.1. Определение пористости

Важнейшей количественной характеристикой пористых тел является их пористость, определяемая как доля объема тела, приходящаяся на поры, или объем пор в единице объема материала. Обычно при этом игнорируются замкнутые изолированные поры и учитываются только соединенные между собой проточные поры. Они образуют поровое пространство – сложную разветвленную и нерегулярную сеть пор. Для большинства приложений важна пропускная способность пористой среды, то есть характеристика того, насколько легко может двигаться в ней жидкость. При одной и той же пористости пропускная способность различных сред может оказаться совершенно разной.

Под пористостью среды понимают ее свойство, обусловленное совокупностью пустот (пор), заключенных между отдельными зернами (частицами) среды или их агрегатами [99, 100]. Количественно пористость определяется объемом пор в единице объема среды

$$n = \frac{V_1 - V_2}{V_1}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – пористость;

$V_1$  – объем, занимаемый средой;

$V_2$  – объем твердых частиц.

Объем, занимаемый средой для цилиндрического сосуда равен

$$V_1 = \frac{\rho D^2}{4} H_0, \quad (2.3)$$

где  $D$  – диаметр сосуда;

$H$  – высота среды в сосуде.

Объем твердых частиц определяем по формуле

$$V_2 = V_1 - \frac{m_B}{\rho_B}, \quad (2.4)$$

где  $m_B$  – масса воды;

$\rho_B$  – плотность воды.

Порядок подготовки проб карбоната кальция:

1) на ситах рассеять сухой карбоната кальция по фракциям 0,5-1 мм, 1-2 мм, 3-5 мм;

- 2) засыпать равномерным его слоем 0,5-1 мм, 1-2 мм, 3-5 мм массой  $m_0 = 200$  г в три мерных стакана диаметром  $D = 0,048$  м;
- 3) залить в стаканы воду с избытком для полного водонасыщения;
- 4) выстоять пробы в течение суток;
- 5) слить остаток воды;
- 6) замерить высоту карбоната кальция  $H$  каждой фракции;
- 7) определить объем, занимаемый средой  $V_1$  по формуле (2.3)
- 8) определить объем твердых частиц  $V_2$  по формуле (2.4);
- 9) определить пористость каждой фракции по формуле (2.2);
- 10) данные измерений и вычислений занести в табл. 2.2.

Результаты статистической обработки данных по определению пористости мела приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Определение пористости мела и угля

фракция, мм	$H_0$ , м	$V_1$ , м <sup>3</sup>	$V_2$ , м <sup>3</sup>	пористость мела	пористость угля
0,5-1	0,056	$1,01 \times 10^{-4}$	$4,63 \times 10^{-5}$	0,543	0,51
1-2	0,063	$1,14 \times 10^{-4}$	$5,89 \times 10^{-5}$	0,482	0,51
3-5	0,071	$1,28 \times 10^{-4}$	$7,34 \times 10^{-5}$	0,428	0,49

На рис. 2.7 приведен график зависимости пористости мела и угля от гранулометрического состава.

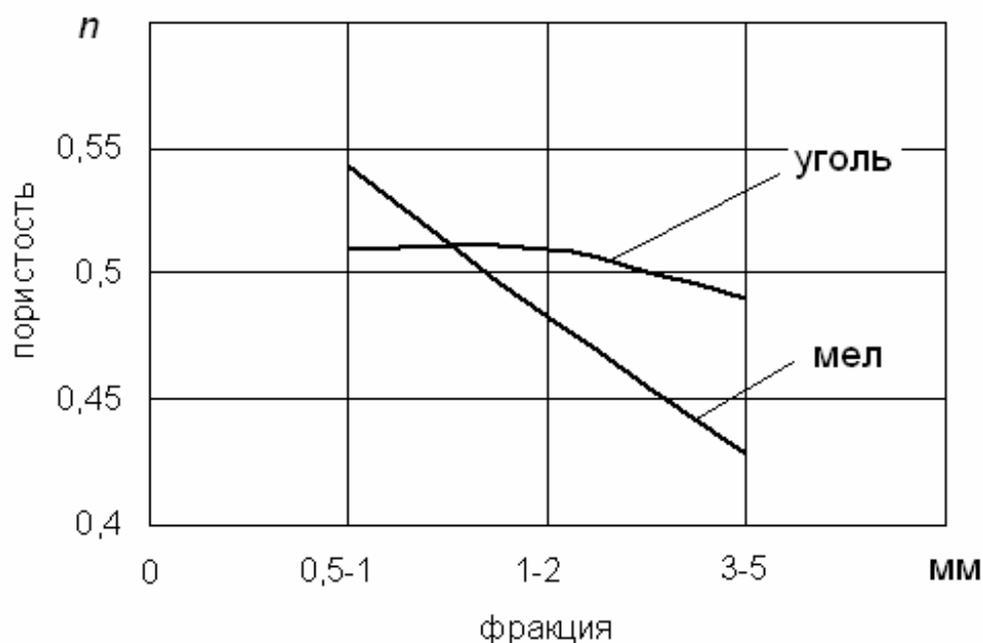


Рис. 2.7. Зависимость пористости материала от его гранулометрического состава

Из данных таблицы и графика видно, что увеличение пористости среды происходит с уменьшением частиц карбоната кальция и угля. Это объясняется увеличением количества зерен в единице объема среды, неплотно прилегающих друг к другу из-за неправильной их формы, и наличием адсорбированных воздушных слоев на поверхности частиц [22]. Кроме этого, существуют поры и в самом материале, куда активно впитывается вода. При этом увеличивается объем среды вследствие адсорбирования частицами воды и образования на их поверхности водяных пленок.

### 2.2.2. Построение компрессионной кривой

На втором этапе определения структурных характеристик карбоната кальция исследовалось влияние уплотняющего давления на пористость в состоянии его полного водонасыщения. Поскольку уплотнение и разуплотнение материала непосредственно связаны с изменением его пористости, в проектно-изыскательской практике результаты компрессионных испытаний традиционно представляют в виде компрессионной кривой – зависимости коэффициента пористости от сжимающего давления.

Зависимость в виде функции  $n = f(p)$  носит название компрессионной кривой [99, 101, 102]. Компрессионная кривая используется в механике грунтов для расчета осадки материала. По ней можно судить как будет себя вести образец при приложении внешнего давления. Опыты проводились в камере диаметром  $D = 0,06$  м с одним отверстием в днище для отвода отжимаемой воды. Сверху и снизу слоя карбоната кальция в камере были расположены фильтрующие перегородки, которые пропускали воду и задерживали выход меловой массы. Материал находился в состоянии полного водонасыщения ( $\omega = 0,37$ ). Давление прессования изменялось в интервале от 0 до 17 МПа.

При сжатии грунта без возможности его бокового расширения существуют следующие зависимости между относительной осадкой и коэффициентом пористости

$$d = \frac{L}{L_0} = \frac{E_0 - E}{1 + E_0}, \quad (2.5)$$

$$E = E_0 - d(1 + E_0), \quad (2.6)$$

$$E_0 = \frac{\omega_0 r_M}{r_B}, \quad (2.7)$$

где  $d$  – относительная усадка;

$L_0$  – начальная высота столба мела;

$L$  – текущее значение высоты столба мела (под нагрузкой);

$E_0$  – начальный коэффициент пористости;

$E$  – текущее значение коэффициента пористости;

$\omega_0$  – начальная влажность мела;

$r_M$  – плотность мела ( $2700 \text{ кг/м}^3$ );

$r_B$  – плотность воды ( $1000 \text{ кг/м}^3$ ).

Между коэффициентом пористости  $E$  и пористостью  $n$  существует зависимость [99]

$$n = \frac{E}{1 + E} \quad (2.8)$$

Определение коэффициента пористости  $E$  и пористости  $n$  карбоната кальция в состоянии полного водонасыщения осуществляем в следующей последовательности:

- 1) приготовить пробы карбоната кальция влажностью  $\omega = 0,37$  согласно п. 2.1.3;
- 2) загрузить пробу карбоната кальция в камеру диаметром  $D = 0,06$  м;
- 3) замерить высоту  $L_0$  столба карбоната кальция в камере;
- 4) установить камеру на пресс;
- 5) создать давление  $p$  на пробу карбоната кальция в камере;
- 6) фиксировать осадку карбоната кальция  $L$  по индикатору перемещения при разных величинах давления  $p$  (см. рис. 2.3);
- 7) результаты измерений  $L_0$ ,  $L$ ,  $p$  занести в таблицу;
- 8) определить относительную осадку образца под каждой ступенью нагрузки по формуле (2.5);
- 9) вычислить начальное значение коэффициента пористости по формуле (2.7);
- 10) определить коэффициент пористости карбоната кальция после уплотнения под каждой ступенью нагрузки по формуле (2.6);
- 11) определить пористость карбоната кальция по формуле (2.8);
- 12) результаты измерений занести в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты статистической обработки данных построения компрессионной кривой

$p$ , МПа	0	0,69	1,39	2,77	4,16	6,94	9,02	10,4	12,48	13,87	17,34
$n$	0,5	0,46	0,43	0,4	0,394	0,386	0,382	0,379	0,374	0,372	0,37

Компрессионная кривая для суглинка в состоянии его полного водонасыщения ( $\omega = 0,25$ ) взята для сравнения из [99].

Графически компрессионные кривые для карбоната кальция и суглинка показаны на рис. 2.8.

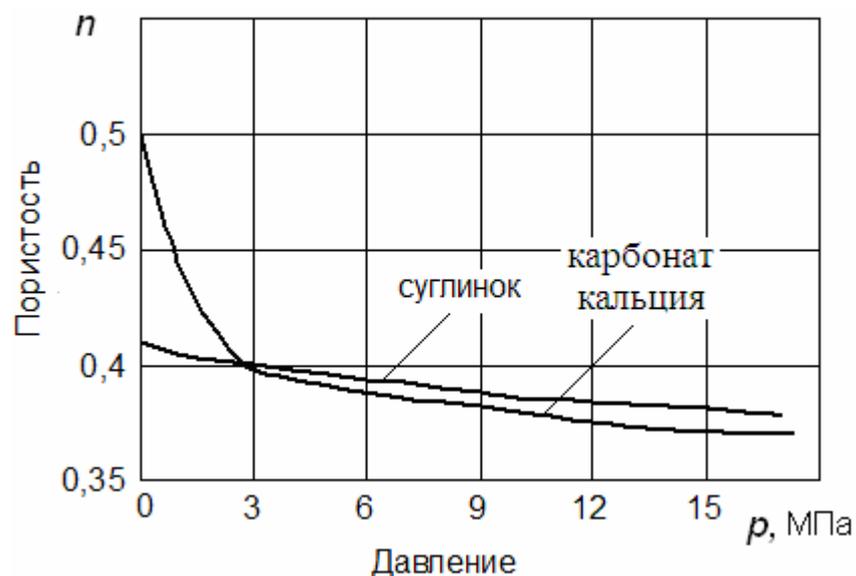


Рис. 2.8. Компрессионные кривые для карбоната кальция и суглинка

Из графика видно, что с увеличением уплотняющего давления пористость материалов уменьшается. Компрессионная кривая для суглинка в отличие от карбоната кальция имеет линейный характер.

Уплотнение суглинка происходит равномерно, пористость изменяется в пределах  $n = 0,41-0,37$ . Для карбоната кальция наиболее интенсивно этот процесс (изменение пористости от 0,5 до 0,4) происходит на начальном этапе приложения давления  $p = 0-2$  МПа. Здесь также наблюдается значительный выход влаги.

При дальнейшем увеличении давления  $p = 2-17$  МПа процесс замедляется и кривая  $n = f(p)$  имеет более пологий вид. Следовательно, для удаления воды из карбоната кальция нет необходимости доводить давление до 17 МПа, что подтвердили последующие эксперименты.

Рационально остановить этот процесс на величине давления  $p = 4-8$  МПа. Компрессионные кривые для материала влажностью менее  $\omega = 0,37$  будут иметь тот же характер и располагаться ниже приведенной зависимости  $n = f(p)$ .

### 2.2.3. Определение проницаемости

Способность пористой среды пропускать жидкость характеризуется проницаемостью. Ее определение тесно связано с основным законом движения жидкости в пористой среде, называемом законом Дарси, в честь французского инженера Анри Дарси, экспериментально установившего этот закон в 1856 году [76, 97, 98]. Закон Дарси является эмпирическим и адекватно описывает характер движения поровой жидкости при относительно малых градиентах давления, в том числе при фильтрации воды через грунт под плотинами и другими гидротехническими сооружениями, через стенки и дно каналов.

Схема опыта по определению проницаемости карбоната кальция приведена на рис. 2.9.

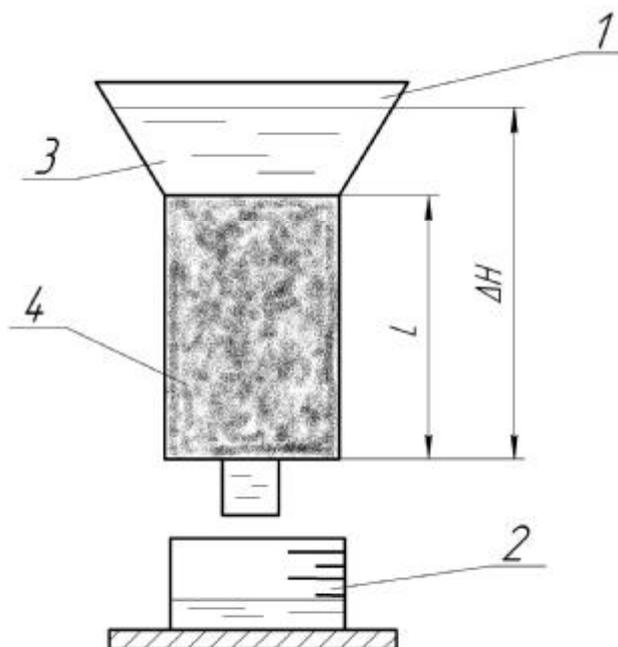


Рис. 2.9. Схема опыта по определению проницаемости карбоната кальция.

1 – стеклянный сосуд; 2 – мерный стакан; 3 – вода; 4 – карбонат кальция.

Дарси пропускал воду через набитые песком трубки под действием разности уровней и измерял расход жидкости, то есть ее количество, протекающее через трубку в единицу времени. Оказывается, что расход пропорционален разности уровней и площади сечения трубки и обратно пропорционален ее длине.

Размерность проницаемости ( $m^2$ ) показывает, что это чисто геометрическое свойство среды, косвенно определяющее размер ее структуры. Для сред геометрически подобной структуры проницаемость пропорциональна квадрату характерного размера структуры (например, размера зерна).

Суть эксперимента заключается в измерении расхода жидкости  $Q$ , то есть ее количества, протекающего через сосуд в единицу времени под действием разности уровней  $\Delta H$ . При этом исследуемый материал находится в состоянии полного водонасыщения. Расход  $Q$  пропорционален разности уровней  $\Delta H$  и площади поперечного сечения сосуда  $S$  и обратно пропорционален длине  $L$

$$Q \approx \frac{S \Delta H}{L}. \quad (2.9)$$

Для жидкости плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$ , формулу (2.9) можно переписать в виде

$$Q = \frac{krg\Delta HS}{L\mu}, \quad (2.10)$$

где  $Q$  – расход жидкости;

$k$  – проницаемость пористой среды;

$\rho$  – плотность жидкости ( $1000 \text{ кг/м}^3$ );

$g$  – ускорение силы тяжести ( $9,81 \text{ м/с}^2$ );

$\Delta H$  – разность уровней жидкости;  
 $S$  – площадь поперечного сечения сосуда;  
 $L$  – длина сосуда;  
 $\mu$  – вязкость воды (0,001 Па·с).

Зная площадь поперечного сечения сосуда, разность уровней жидкости, длину сосуда и измерив расход жидкости, определим проницаемость

$$k = \frac{QLm}{rg\Delta HS} \quad (2.11)$$

При проведении данного эксперимента ( $\Delta H = 0,135$  м,  $S = 3 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $L = 0,055$  м) был получен следующий диапазон проницаемости для карбоната кальция  $k = 6,8 \times 10^{-16} - 1,0 \times 10^{-15}$  м<sup>2</sup>.

В таблице 2.3 приведены характерные значения проницаемости для некоторых материалов и карбоната кальция.

Из данных эксперимента и таблицы 2.3 следует, что карбонат кальция является материалом с низкой проницаемостью. Движение воды сквозь него происходит с малой скоростью. Следовательно, для интенсивного удаления из мела влаги необходимо приложить достаточно высокое давление.

Таблица 2.3 – Характерные значения проницаемости для различных материалов

Материал	Диапазон проницаемости, м <sup>2</sup>
Уголь	$5,6 \times 10^{-11} - 2,4 \times 10^{-8}$
Песок	$2 \times 10^{-11} - 1,8 \times 10^{-10}$
Почва	$2,9 \times 10^{-13} - 1,4 \times 10^{-11}$
Песчаник (нефтесодержащий)	$5 \times 10^{-16} - 3 \times 10^{-12}$
Карбонат кальция	$6,8 \times 10^{-16} - 1,0 \times 10^{-15}$

### 2.3. Анализ результатов экспериментов. Сравнение теоретических и экспериментальных данных

На основании рассмотренных в разделе 1 конструкций прессового оборудования был сделан вывод, что для процесса механического обезвоживания наиболее подходят гидравлические пресса для переработки металлолома. В их конструкции необходимо предусмотреть прессовую камеру, снабженную отверстиями для отвода воды. Количество, форма и расположение отверстий должны определяться на основании экспериментальных данных с лабораторным образцом прессовой камеры.

В ходе проведения исследований по механическому обезвоживанию карбоната кальция в лабораторном образце прессовой камеры исследовалось влияние на конечную влажность карбоната кальция приложенного давления и продолжительности прессования. Определялись значения по выходу воды и

массы карбоната кальция через перфорированные днище и корпус лабораторного образца прессовой камеры.

### 2.3.1. Механическое обезвоживание в перфорированной камере

В ходе проведения экспериментальных исследований определялись значения относительной усадки карбоната кальция в камере под действием уплотняющего давления. Данные этих экспериментов использовались при определении высоты расположения отверстий в корпусе камеры.

Относительная усадка  $\delta$  определяется как отношение значения высоты слоя материала после приложения нагрузки  $h$  к значению высоты слоя материала перед уплотнением  $h_0$

$$d = \frac{h}{h_0}. \quad (2.12)$$

Опыты проводились в лабораторной прессовой камере диаметром  $D = 0,06$  м с перфорированным днищем. Влажность карбоната кальция изменялась в интервале  $\omega = 0,1-0,35$ , величина уплотняющего давления в интервале  $p = 0-20$  МПа.

Диаграмма зависимости усадки карбоната кальция от уплотняющего давления приведена на рис. 2.10. Точки на данном графике соответствуют началу выхода влаги из материала.

Результаты опытов показали следующее: для карбоната кальция влажностью  $\omega = 0,35$  при возрастании усилия прессования в интервале от 0 до 2 МПа (кривая 3) относительная усадка материала достигает 0,5-0,6 от максимальной. Количеством отжатой жидкой фазы можно пренебречь.

На втором этапе ( $p > 2$  МПа) происходит интенсивное увеличение выхода жидкой фазы и меловой массы. На этом участке обеспечивается максимальное уплотнение частиц твердой фазы. Происходит окончательное образование брикета карбоната кальция.

Аналогично процесс уплотнения происходит для материала влажностью  $\omega = 0,25$  и  $\omega = 0,30$  (кривые 1 и 2). Отличие состоит в интервале давлений на первом этапе прессования. Для карбоната кальция влажностью  $\omega = 0,25$  он составляет  $p = 0-2$  МПа, при влажности  $\omega = 0,3$  –  $p = 0-1,8$  МПа. Отличие в значениях относительной усадки для материала разной влажности объясняется суммарным выходом отжатой влаги и меловой массы.

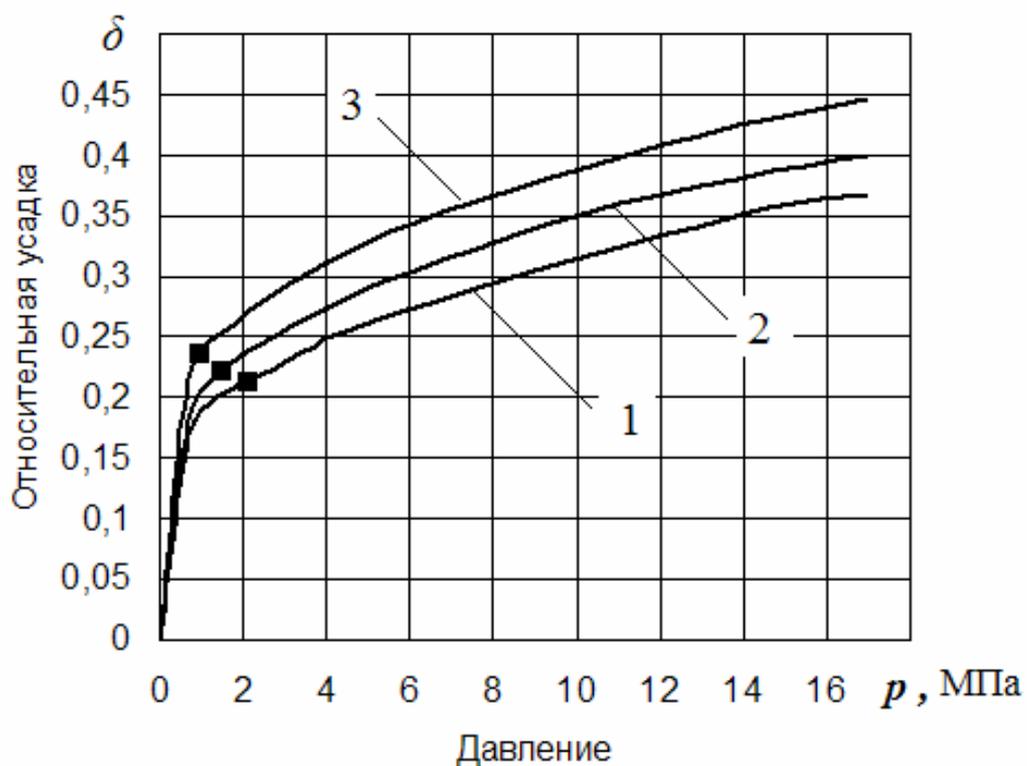


Рис. 2.10. Зависимость усадки карбоната кальция разной влажности от давления:

1 – влажность карбоната кальция  $\omega = 0,25$ ; 2 –  $\omega = 0,3$ ; 3 –  $\omega = 0,35$  (количество отверстий  $n = 1$ , диаметр  $d = 5$  мм)

На втором этапе экспериментальных исследований применялись камеры диаметром  $D = 0,03, 0,06, 0,12$  м с разным количеством отверстий  $n$  и их расположением в днище и корпусе прессовой камеры, с разной формой отверстий и толщиной днища прессовой камеры (рис. 2.11). Количество отверстий изменялось от 1 до 12, диаметр отверстий  $d = 2-5$  мм, влажность материала составляла  $\omega = 0,25-0,35$ . Целью данных экспериментов было установить влияние разной комбинации отверстий в камере на выход воды и массы карбоната кальция.

Эксперимент по механическому обезвоживанию влажного карбоната кальция проводим в следующем порядке:

- 1) приготовить пробы влажностью 0,25, 0,3, 0,35 согласно п. 2.1.3;
- 2) загрузить пробу влажностью  $\omega = 0,25$  в камеру диаметром  $D = 0,03$  м;
- 3) установить лабораторный образец прессовой камеры на нижний стол пресса (см. рис. 2.1 и 2.2);
- 4) определить начальное значение высоты слоя материала в камере  $h_0$ ;
- 5) приложить нагрузку  $F = 200$  кг (контроль по показаниям динамометра);
- 6) определить перемещение поршня в прессовой камере  $h_1$  по показаниям указателя перемещения и индикатора часового типа;
- 7) занести результаты измерений  $h_0$ ,  $h_1$  и  $F$  в таблицу;
- 8) снять нагрузку;

9) при появлении отжатой влаги ( $m_B$ ) и выдавленного карбоната кальция ( $m_{BM}$ ) собрать и определить их массу;

10) повторить пункты п. 5 – п. 9 для величин нагрузки  $F = 400, 800, 1200, 2200, 3200, 4200, 5000$  кг;

11) удалить из прессовой камеры брикет карбоната кальция, определить его массу  $m_{БР}$  и влажность  $\omega_k$ ;

12) занести результаты измерений  $m_B$ ,  $m_{BM}$ ,  $m_{БР}$  и  $\omega_k$  в таблицу;

13) повторить п. 2–12 для камеры диаметром  $D = 0,06$  м и  $0,12$  м.

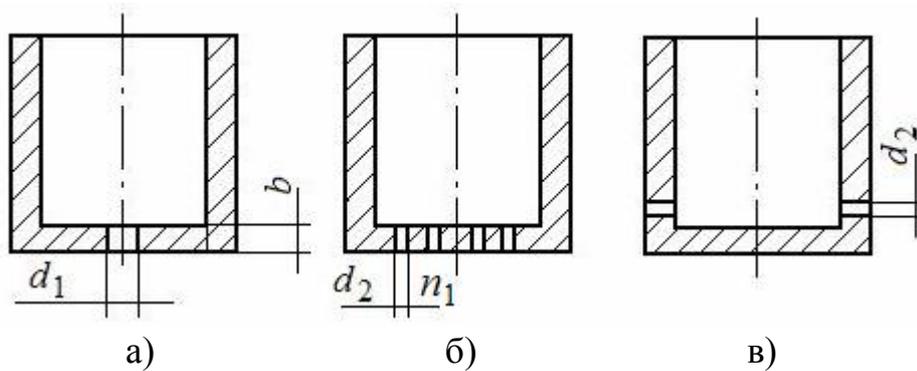
Эксперименты по механическому обезвоживанию карбоната кальция были сведены в таблицу 2.4 и схематично показаны на рис. 2.11.

В опытах № 1 и 2 (таблица 2.4) применялись днища толщиной  $b = 10$  мм с одним отверстием в центре диаметром  $d_1 = 5$  мм. В экспериментах № 3 и 4 (таблица 2.4) отверстия диаметром  $d_2 = 2$  мм и количеством  $n_1 = 6$  располагались на расстоянии 10 и 20 мм от центра днища, а в опыте № 5 – внизу в корпусе камеры.

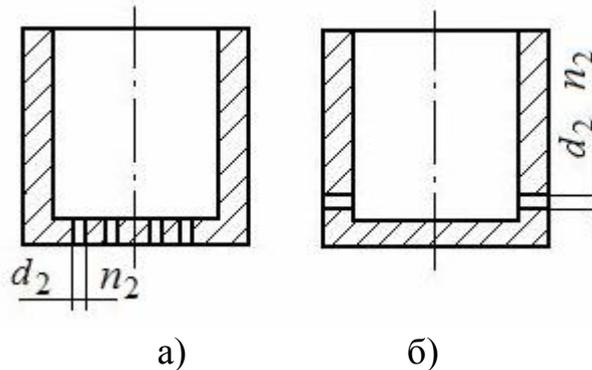
Суммарная площадь поперечного сечения отверстий в экспериментах № 3-5 соответствовала экспериментам № 1-2 (таблица 2.4) и составляла  $S_I = 20$  мм<sup>2</sup>.

Таблица 2.4 – Эксперименты по механическому обезвоживанию карбоната кальция в перфорированной прессовой камере

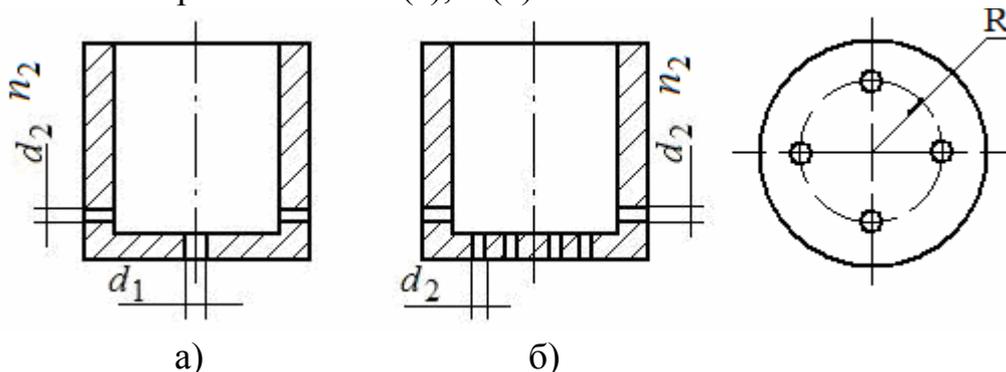
№	диаметр отверстий, $d$ , мм	количество отверстий, $n$ , шт.	расположение отверстий
1	5	1	центр днища
2	5	1	центр днища, конус
3	2	6	в днище на расстоянии 10 мм от центра
4	2	6	в днище на расстоянии 20 мм от центра
5	2	6	боковые стенки камеры, внизу
6	2	12	центр днища
7	2	12	боковые стенки камеры
8	5 + 2	1 + 6	центр днища + внизу боковых стенок камеры
9	2 + 2	6 + 6	в днище на расстоянии 10 мм от центра + внизу боковых стенок камеры
10	2 + 2	6 + 6	в днище на расстоянии 20 мм от центра + внизу боковых стенок



Эксперименты № 1, 2 (а), № 3, 4 (б), № 5 (в).



Эксперименты № 6 (а), 7 (б).



Эксперименты № 8 (а), № 9 и 10 (б).

Рис. 2.11. Схемы камер

В опытах № 6 и 7 (таблица 2.4) суммарная площадь поперечного сечения отверстий была увеличена в два раза ( $S_2 = 40 \text{ мм}^2$ ,  $d_2 = 6 \text{ мм}$ ,  $n_2 = 12$ ), а сами отверстия располагались в днище (опыт № 6) и в корпусе камеры внизу (опыт № 7).

В экспериментах (№ 8-10, таблица 2.4) комбинировалось расположение отверстий в днище и корпусе камеры.

В ходе проведения экспериментов с перфорированной прессовой камерой было установлено следующее: расположение отверстий либо в днище, либо внизу в корпусе камеры не повлияло на конечную влажность карбоната кальция; отверстия в стенках и днище камеры заполнены материалом, вместе с водой через отверстия удаляется некоторое количество карбоната кальция. Выдавленная масса представляет собой смесь воды и карбоната кальция.

Анализ отжатой массы на соотношение твердой и жидкой фазы показал, что 60 % в ней занимает вода и 40 % – карбонат кальция.

На рис. 2.12 представлен график зависимости выхода отжатой массы от давления для карбоната кальция разной влажности.

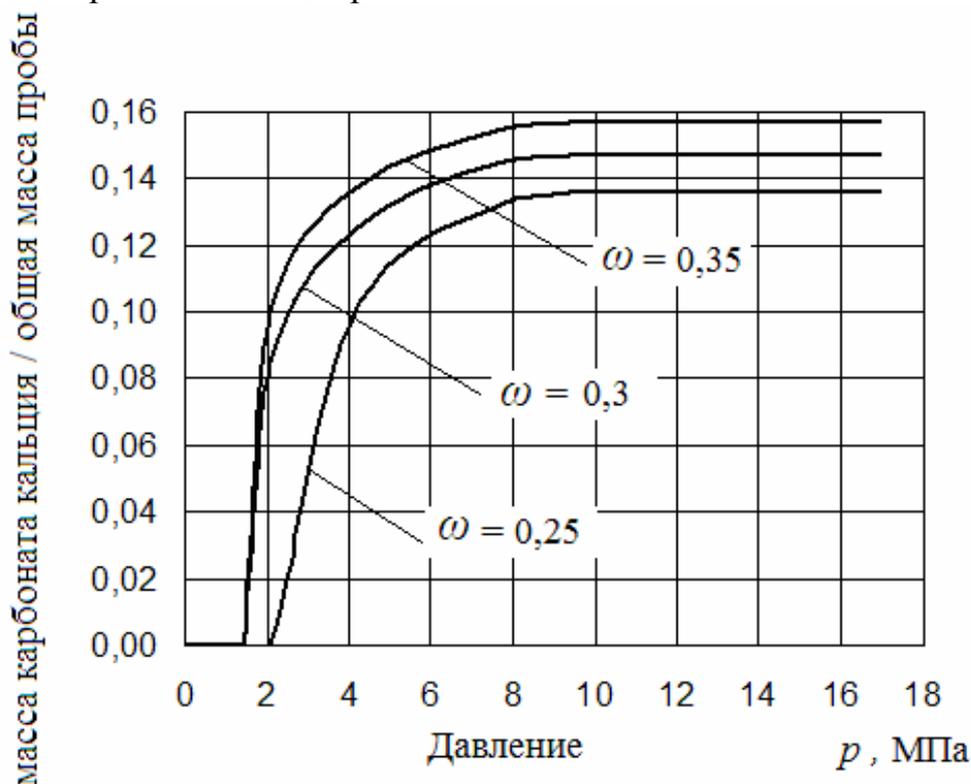


Рис. 2.12. Зависимость выхода массы карбоната кальция от давления для разной влажности

Выход отжатой массы карбоната кальция выражен в относительных единицах от общей массы пробы в камере. При работе прессовой установки на предприятии отжатая масса карбоната кальция будет идти снова на обезвоживание.

Из графика видно, что с увеличением влажности материала увеличивается и выход массы карбоната кальция. Максимальное ее значение составляет 0,16 от общей массы карбоната кальция в камере при начальной влажности материала 0,3-0,35.

С увеличением суммарной площади поперечного сечения отверстий с  $S_1 = 20 \text{ мм}^2$  до  $S_2 = 40 \text{ мм}^2$  выход массы карбоната кальция повысился на 5-6 %, а масса отжатой воды осталась неизменной. То есть изменение площади поперечного сечения не уменьшает конечную влажность материала, а только увеличивает потери карбоната кальция.

По результатам экспериментов были построены диаграммы влажность – давление (рис. 2.13, 2.14), меловая масса – давление для разной влажности карбоната кальция (рис. 2.12). Из диаграмм (рис. 2.13-2.14) видно, что конечная влажность карбоната кальция находится в интервале  $\omega = 0,16-0,18$ .

### 2.3.2. Кинетика процесса механического обезвоживания

На начальном этапе экспериментов по механическому обезвоживанию были проведены предварительные опыты с ударным нагружением. На слой карбоната кальция в камере диаметром  $D = 0,03, 0,06$  и  $0,12$  м с высоты 1 м по направляющему желобу сбрасывали груз массой 1, 5, 10 кг. В результате соударения груза и карбоната кальция количество удаленной влаги и меловой массы оказалось ничтожно малым, материал уплотнился незначительно. В связи с таким результатом ударного нагружения было решено проводить опыты по механическому обезвоживанию на прессовых установках.

Под кинетикой процесса механического обезвоживания понимается закон изменения количества влаги в материале в зависимости от приложенного давления, а также изменение количества влаги со временем. В ходе проведения экспериментов контролировался выход влаги при разных величинах давления и времени процесса обезвоживания.

Для экспериментов использовались камеры диаметром  $D = 0,03, 0,06$  и  $0,12$  м. Начальная влажность карбоната кальция составляла  $\omega = 0,25, 0,3$  и  $0,35$ . Давление прессования изменялось в пределах  $p = 0-45$  МПа.

Эксперимент проводился в следующем порядке:

- 1) приготовить пробы влажностью  $0,25, 0,3, 0,35$  согласно п. 3.1.3;
- 2) загрузить пробу влажностью  $\omega = 0,25$  в камеру диаметром  $D = 0,03$  м;
- 3) установить лабораторный образец прессовой камеры на нижний стол пресса (см. рис. 2.1 и 2.2);
- 4) установить секундомер и кинокамеру;
- 5) прикладывать нагрузку в течение времени  $\tau = 1200$  с;
- 6) снимать процесс обезвоживания на кинокамеру, контролируя величины нагрузки (по динамометру), времени (по секундомеру) и выхода влаги (по делениям мерного сосуда);
- 7) по окончании процесса удалить из прессовой камеры брикет карбоната кальция и определить его влажность  $\omega_k$ ;
- 8) повторить пункты п. 2 – п. 7 для времени процесса  $\tau = 150$  и  $300$  с и камер диаметром  $D = 0,06$  м и  $0,12$  м.

Представление полученных экспериментальных данных в виде графиков показывает кинетику изменения влажности карбоната кальция  $\omega$  от давления прессования  $p$  (рис. 2.13, 2.14). Начальная влажность пробы определяется при значении  $p = 0$ .

Из графиков видно, что при конечном давлении 10 МПа влажность карбоната кальция находится в пределах  $\omega = 0,16-0,18$ . Следует также отметить, что характер кривых  $\omega = f(p)$  при использовании камер разного диаметра неодинаков. При обезвоживании карбоната кальция в камере  $D = 0,03$  м кривая  $\omega = f(p)$  имеет более пологий вид, чем для камер  $D = 0,06$  и  $0,12$  м, кривые которых совпадают. Исходя из этого, можно предположить, что при дальнейшем увеличении диаметра камеры обезвоживания ( $D > 0,12$  м) график  $\omega = f(p)$  будет иметь вид, представленный на рис. 2.14.

На графиках показан интервал увеличения нагрузки от 0 до 12 МПа. При дальнейшем увеличении давления влажность карбоната кальция не изменилась.

Условно графики  $\omega = f(p)$  можно разделить на 2 участка: первый участок – увеличение давления от 0 до 6 МПа характеризуется интенсивным удалением влаги из карбоната кальция, что соответствует уменьшению влажности до  $\omega = 0,17-0,2$ ; второй участок – дальнейшее увеличение нагрузки от 6 до 10 МПа и снижение влажности материала на 2-3 %.

Анализируя результаты экспериментов по кинетике механического обезвоживания можно сделать вывод, что наиболее интенсивно процесс механического обезвоживания происходит при давлении  $p = 5-6$  МПа.

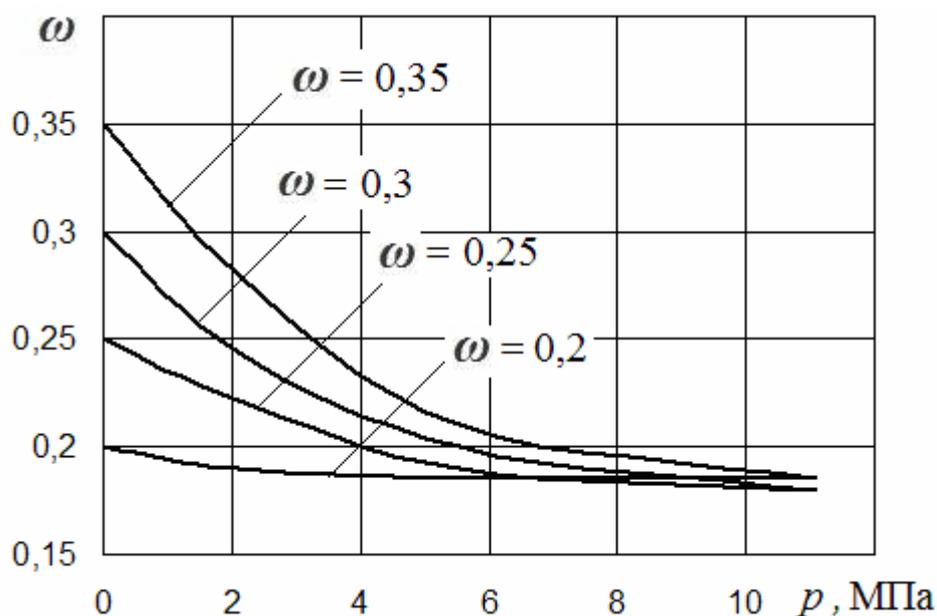


Рис. 2.13. Зависимость влажности карбоната кальция от давления прессования (камера  $D = 0,03$  м)

Отсюда следует, что для механического обезвоживания карбоната кальция рациональным является давление прессования в интервале  $p = 5-6$  МПа. Дальнейшее повышение его приведет к увеличению энергоёмкости и длительности процесса, уменьшая конечную влажность материала на 2-3%.

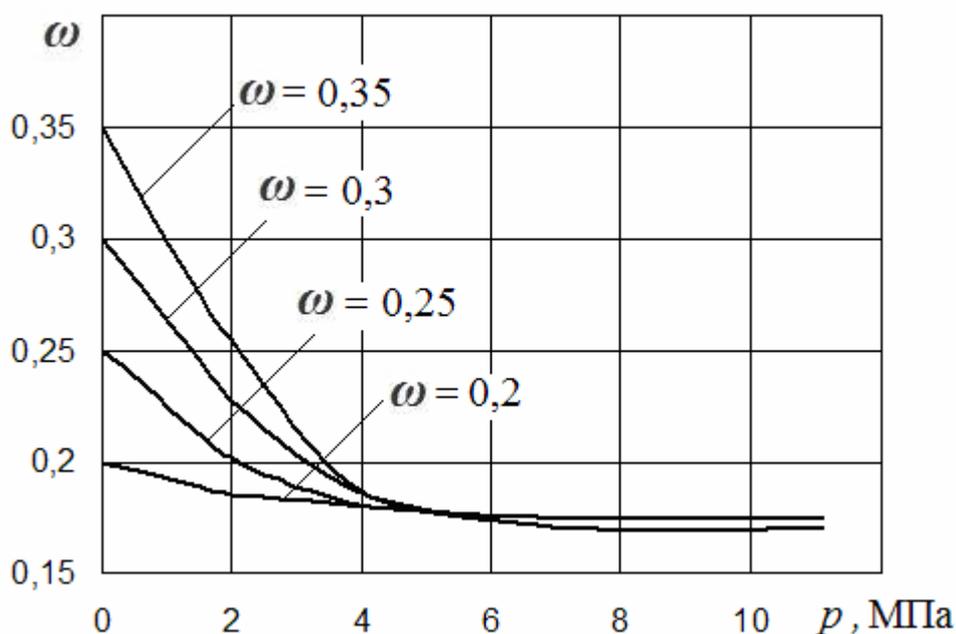


Рис. 2.14. Зависимость влажности карбоната кальция от давления прессования (камера  $D = 0,06$  и  $0,12$  м)

Ниже приведены результаты экспериментов с разной скоростью приложения нагрузки на материал. Скорость нагружения составляла  $\tau = 150$ ,  $300$  и  $1200$  секунд, начальная влажность карбоната кальция  $\omega = 0,3$  (рис. 2.15). Аналогичные кривые были получены для влажности  $\omega = 0,25$  и  $0,35$ .

Было установлено, что продолжительность механического обезвоживания существенно не влияет на конечную влажность материала. При продолжительности процесса от  $150$  до  $1200$  секунд конечная влажность составляет  $0,16-0,17$ .

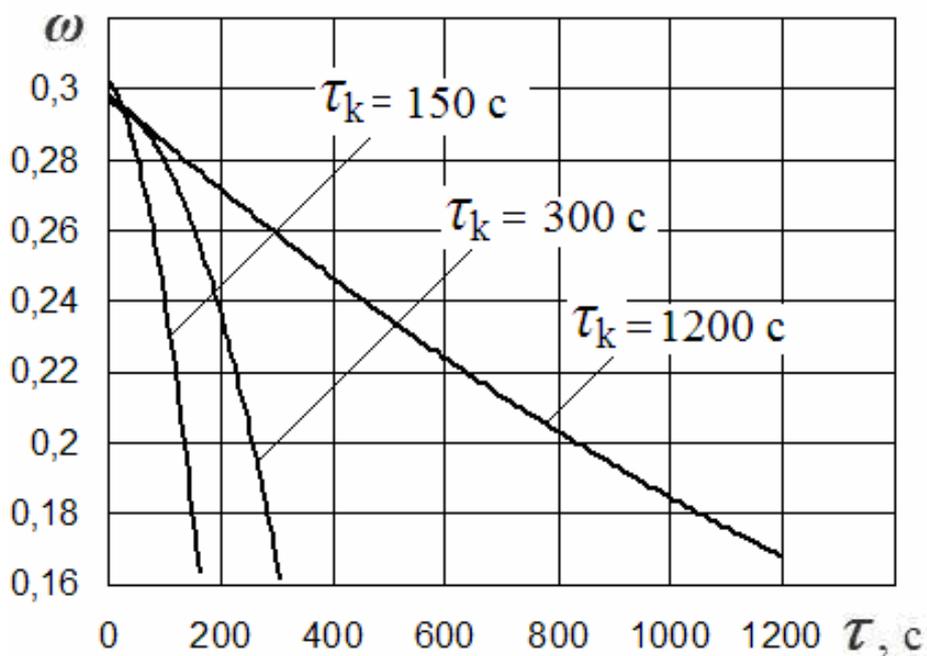


Рис. 2.15. Зависимость изменения влажности карбоната кальция при разной скорости нагружения

На основании данного результата можно сделать вывод, что характер кривых при обезвоживании карбоната кальция влажностью  $\omega = 0,2-0,35$  во временном интервале от 150 до 1200 секунд сохранится. Увеличение продолжительности обжарки до 1200 секунд и более существенно не изменит конечную влажность продукта, а приведет только к снижению производительности и увеличению энергозатрат.

Следовательно, для механического обезвоживания карбоната кальция рациональной является длительность процесса в интервале  $\tau = 150-300$  с.

В ходе экспериментов контролировалось послойное изменение влажности материала в разный момент времени. Оказалось, что влажность неодинаково распределена по длине образца. В верхней и нижней частях брикета конечная влажность изменялась в диапазоне  $\omega = 0,266-0,278$  для времени процесса  $\tau = 150$  с и  $\omega = 0,168-0,17$  для времени процесса  $\tau = 300$  с. В середине образца она была выше на 2-3 %.

Графики распределения влажности материала по длине для времени  $\tau = 150$  и 300 с приведены на рис. 2.16.

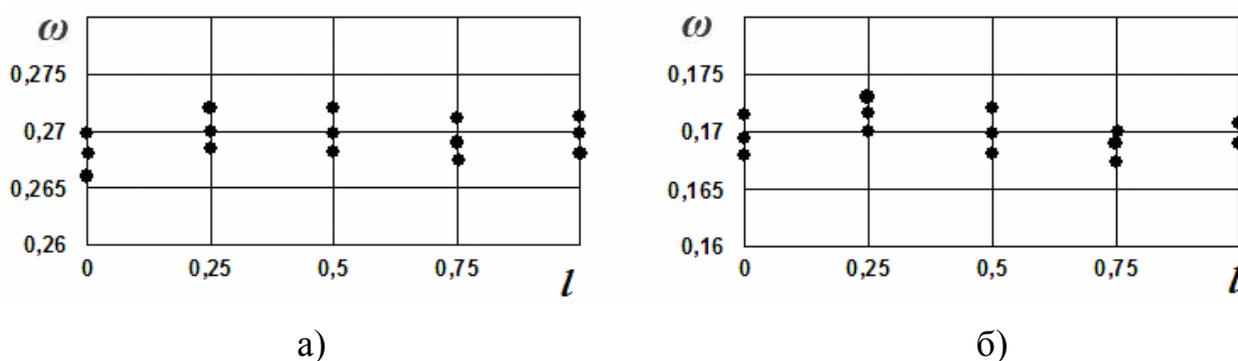


Рис. 2.16. Послойное изменение влажности материала в разный момент времени (а –  $\tau = 150$  с, б –  $\tau = 300$  с)

### 2.3.3. Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Сравнение теоретически полученных данных с результатами экспериментальных исследований показали достаточно хорошую качественную и количественную сходимость.

Так на рис. 2.17-2.21 приведены сравнительные данные по кинетике механического обезвоживания для карбоната кальция разной влажности. При этом были заданы исходные величины:

- 1) начальная влажность  $\omega_0 = 0,25, 0,3$  и  $0,35$ ;
- 2) конечная влажность  $\omega_k = 0,17$ ;
- 3) время процесса обезвоживания  $\tau = 150, 300$  и  $1200$  с;
- 4) диаметр камеры  $d = 0,06$  м;
- 5) высота слоя мела в камере  $l = 0,1$  м;
- 6) интенсивность функции поглотителей  $I_0 = 0$  (-10);
- 7) величина степени при коэффициенте диффузии  $n = 2$ ;
- 8) кинетика изменения коэффициента диффузии  $q = 0,0001, 0,00002$ ;

9) функция поглотителей влаги  $I(x, \tau) - (3.39)$ .

Точки на графиках соответствуют экспериментальным данным, кривая 1 – теоретический расчет при  $I_0 = 0$  (однородное уравнение диффузии), кривая 2 – теоретический расчет при  $I_0 = -10$  (неоднородное уравнение диффузии).

Как следует из данных графиков, расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 10-15% при доверительной вероятности 0,95.

На рис. 2.17-2.18 приведены графики зависимостей изменения влажности карбоната кальция ( $\omega = 0,25$ ) от времени процесса механического обезвоживания ( $\tau = 150, 300$  с).

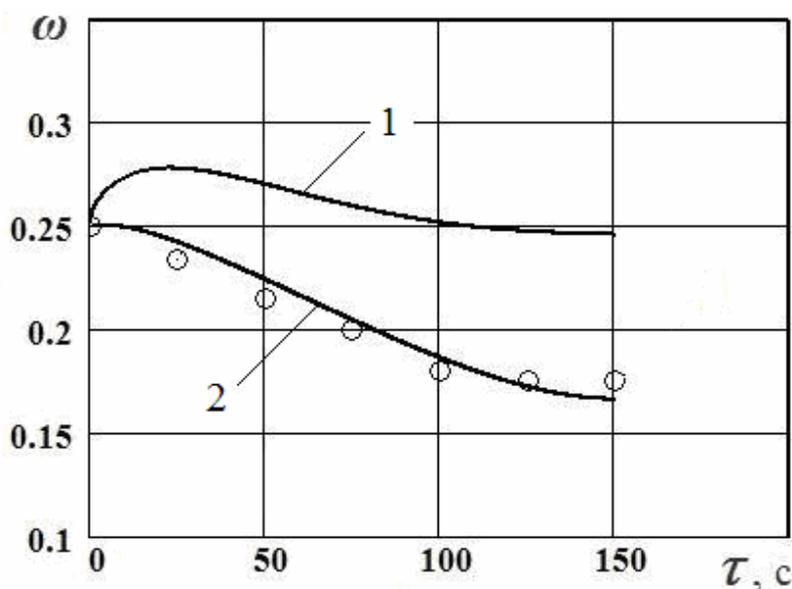


Рис. 2.17. Сравнение теоретических и экспериментальных данных при начальной влажности  $\omega = 0,25$ ,  $\tau = 150$  с,  $q = 0,0001$ :

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение

Из данных графиков хорошо видно влияние функции поглотителей влаги  $I(x, \tau)$  на поведение кривых 1 и 2. В первом случае, когда  $I(x, \tau) = 0$ , наблюдается резкий скачок, превышение влажности материала по отношению к начальной на 2-3 %. Что противоречит как физике протекания процесса, так и экспериментальным данным и наблюдениям.

На рис. 2.18 приведен график зависимости изменения влажности карбоната кальция ( $\omega = 0,25$ ) от времени процесса механического обезвоживания ( $\tau = 300$  с).

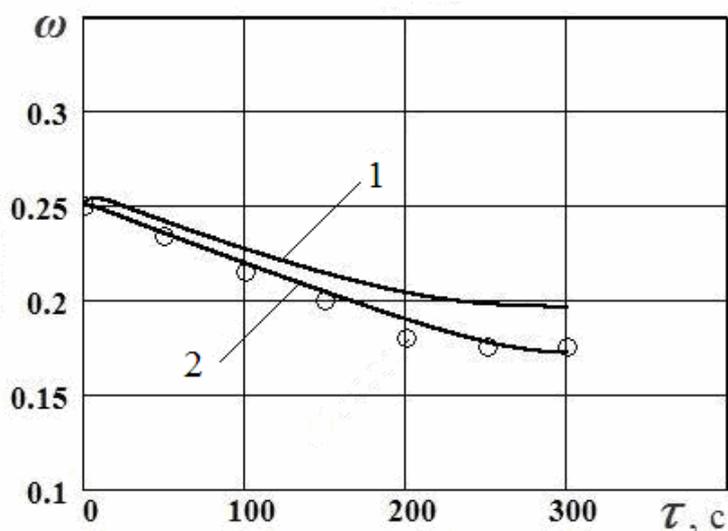


Рис. 2.18. Сравнение теоретических и экспериментальных данных при начальной влажности  $\omega = 0,25$ ,  $\tau = 300$  с,  $q = 0,0001$ :

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение

На рис. 2.19 приведен график зависимости изменения влажности карбоната кальция ( $\omega = 0,3$ ) от времени процесса механического обезвоживания ( $\tau = 150, 300$  с).

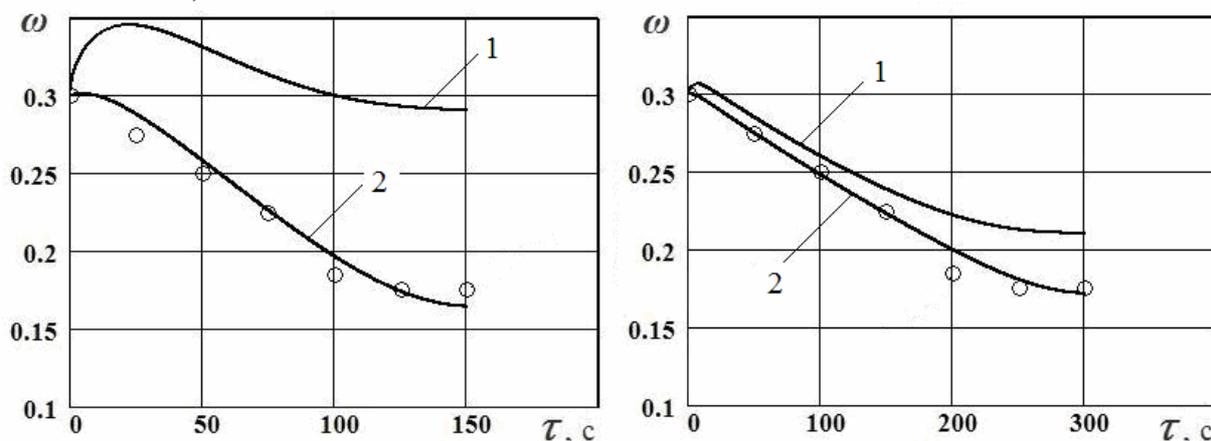


Рис. 2.19. Сравнение теоретических и экспериментальных данных при начальной влажности  $\omega = 0,3$ ,  $\tau = 150, 300$  с,  $q = 0,0001$ :

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение

На рис. 2.20 приведен график зависимости изменения влажности карбоната кальция ( $\omega = 0,35$ ) от времени процесса механического обезвоживания ( $\tau = 150, 300$  с).

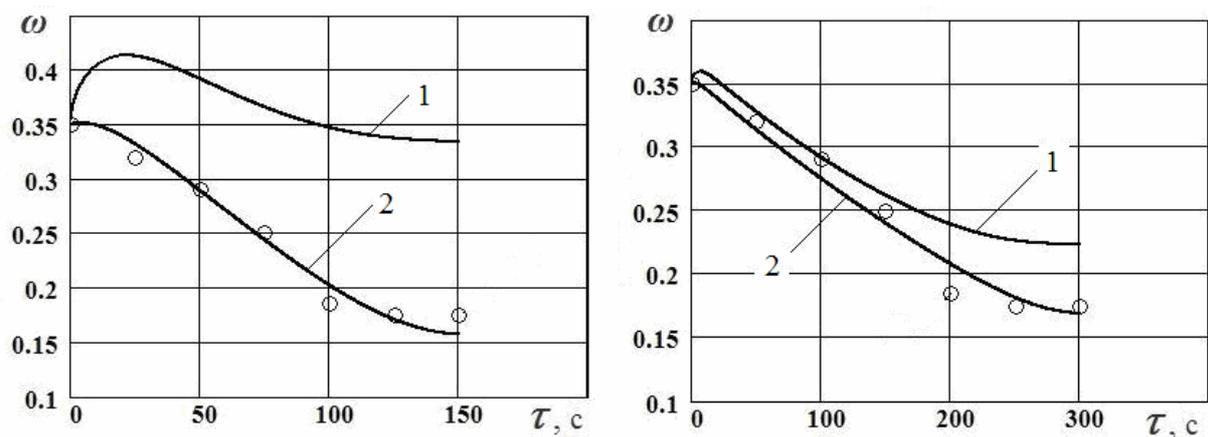


Рис. 2.20. Сравнение теоретических и экспериментальных данных при начальной влажности  $\omega = 0,35$ ,  $\tau = 150, 300$  с,  $q = 0,0001$ :  
 1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение

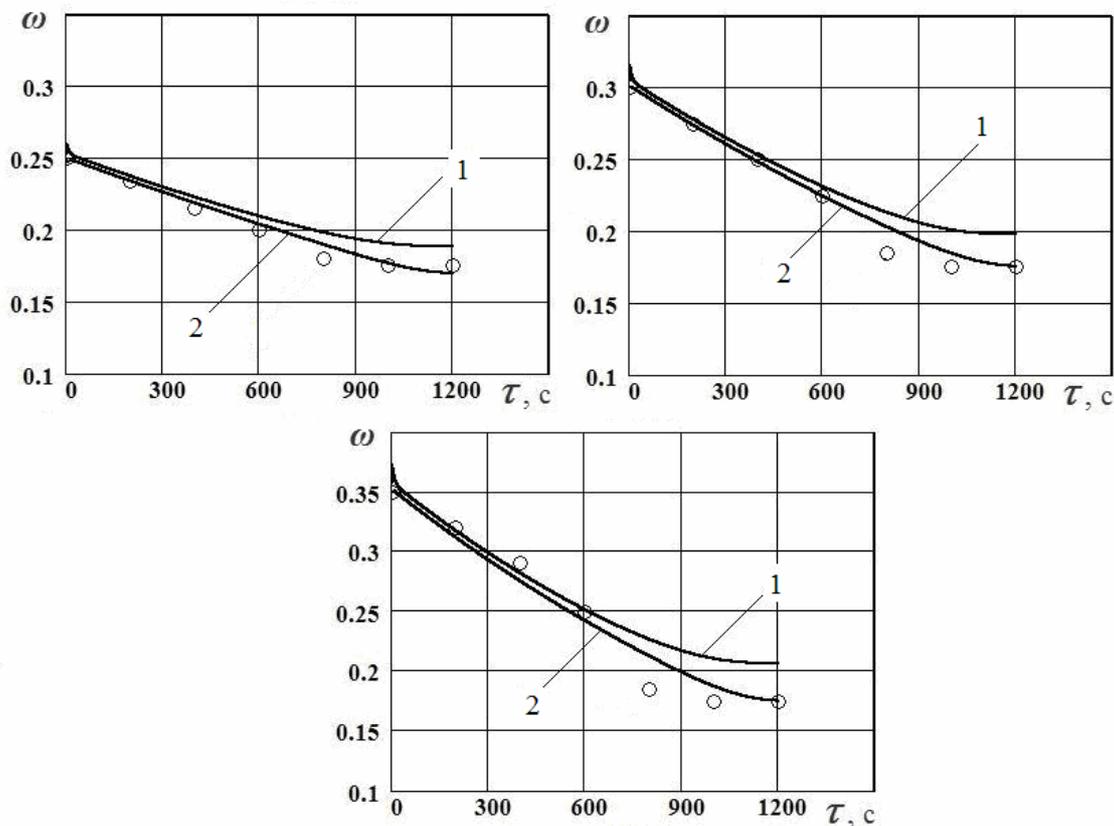


Рис. 2.21. Сравнение теоретических и экспериментальных данных при начальной влажности  $\omega = 0,25, 0,3, 0,35$ ,  $\tau = 1200$  с,  $q = 0,00002$

### Выводы

По результатам определения структурных характеристик карбоната кальция сделаны следующие выводы:

1. Пористость карбоната кальция в зависимости от гранулометрического состава (от 0,5-1 до 3-5 мм) находится в интервале  $n = 0,428-0,543$  (рис. 2.7).

2. Карбонат кальция является материалом с низкой проницаемостью  $k = 6,8 \times 10^{-16} - 1,0 \times 10^{-15} \text{ м}^2$  (таблица 2.3). Для успешного удаления из него влаги необходимо приложить достаточно высокое давление.

По результатам экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы:

1. При механическом обезвоживании карбоната кальция в лабораторных прессовых камерах разного диаметра была установлена зависимость влажности от давления прессования (рис. 2.13-2.14). Кинетика механического обезвоживания существенно изменяется. На участке от 0 до 4 МПа она выше, чем при дальнейшем увеличении давления от 4 до 18 МПа.

Диаграммы обезвоживания в камерах разного диаметра для карбоната кальция влажностью  $\omega = 0,25-0,35$  качественно одинаковы. Значение конечной влажности материала находится в пределах  $\omega = 0,16-0,18$ .

2. Для механического обезвоживания карбоната кальция рациональным является конечное давление прессования в интервале  $p = 5-6$  МПа, соответствующее конечной влажности материала  $\omega = 0,16-0,18$ .

3. Продолжительность механического обезвоживания существенно не влияет на конечную влажность материала. При длительности процесса от 150 до 1200 с конечная влажность составляет  $\omega = 0,16-0,18$  (рис. 2.15).

Увеличение продолжительности обжарки до 1200 с и более существенно не изменит конечную влажность продукта, а приведет только к снижению производительности и увеличению энергозатрат. Следовательно, для механического обезвоживания карбоната кальция рациональной является длительность процесса в интервале  $\tau = 150-300$  с.

4. Процесс обезвоживания карбоната кальция можно разбить на следующие этапы: первый – уплотнение материала и удаление газовой фазы –  $p = 0-2$  МПа, второй – окончательное формирование брикета и удаление жидкой фазы –  $p = 2-18$  МПа (рис. 2.10).

5. По результатам наблюдений и экспериментов с увеличением влажности материала увеличивается выход массы карбоната кальция. Максимальное значение его составляет 16 % от общей массы пробы карбоната кальция в камере при начальной влажности материала 30-35 % (рис. 2.12). Содержание влаги в отжатой массе карбоната кальция составляет до 50-60 %.

6. При исследованиях с применением перфорированной камеры с разным диаметром, количеством и расположением отверстий конечная влажность карбоната кальция составила  $\omega = 0,16-0,18$  при начальной влажности  $\omega = 0,25-0,35$ .

7. Комбинация расположения отверстий либо в днище, либо внизу корпуса камеры не влияет на конечную влажность карбоната кальция. Выход отжатой массы карбоната кальция и влаги одинаков для всех экспериментов.

8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных при механическом обезвоживании карбоната кальция показывает расхождение 10-15 % при доверительной вероятности 0,95 (рис. 2.17-2.21).

## РАЗДЕЛ 3

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

#### 3.1. Уравнение диффузии и постановка краевых задач

##### 3.1.1. Физическая модель процесса и обоснование принятых допущений

Согласно исследованиям [103, 104], карбонат кальция и другие материалы, по физическим свойствам близкие к нему, проходят два этапа в процессе нагружения в прессовой камере. Первый этап опрессовки, когда самотеком удаляется свободная влага, а сам материал принимает форму камеры и представляет уже сплошную среду. Основное изменение объема за счет сжатия поршня происходит на этом этапе. Когда брикет сформирован и продолжается движение поршня, начинается второй этап. В это время изменение объема незначительно, а процесс движения влаги по брикету можно считать диффузионным, но с учетом приложенного давления. Этот вывод следует из анализа результатов опытов, представленных в главе 2. При составлении математической модели второго этапа его особенности можно учесть переменным коэффициентом диффузии и составляющими, учитывающими наличие внешнего возмущения.

Физическая модель процесса механического обезвоживания. Представим полый цилиндр длиной  $l$ , заполненный пористой средой и во всякий момент времени влажность материала по его сечению одинаковая. Принимаем ось  $x$ , направленной слева направо, с началом координат на левом конце  $x = 0$ . Диффузия через стенки цилиндра отсутствует, уход влаги возможен через торцевое сечение  $x = l$  (рис. 3.1).

Для упрощения расчетов принимаем следующие допущения. Рассмотрим конечный промежуток времени, но достаточно малый по сравнению с длительностью всего процесса прессования. Тогда можно положить коэффициент  $D$  постоянным. Длину образца и его пористость также считаем неизменными.

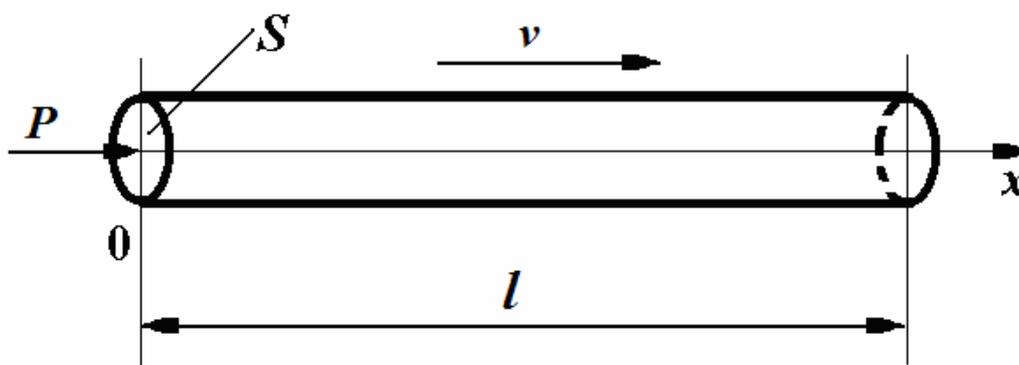


Рис. 3.1. Физическая модель

Процесс движения влаги описывается функцией  $\omega(x, \tau)$ , представляющей влажность материала в сечении  $x$  в момент времени  $\tau$ . Уравнение диффузии имеет вид [81-82]

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{D}{n} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad (3.1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии;  
 $n$  – коэффициент пористости.

Процесс вытеснения влаги из брикета под давлением мы рассматриваем как диффузионное движение жидкости в поровом пространстве. Но для большей близости к физике данного процесса введем в уравнение (3.1) функцию поглотителей влаги внутри трубки  $I(x, \tau)$ . Тогда уравнение (3.1) примет вид

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + I(x, t), \quad (3.2)$$

где  $a^2 = D / n$ .

Таким образом, имеем неоднородное уравнение с частными производными второго порядка параболического типа.

Отметим, что уравнение (3.1) в математическом смысле отличается от (1.6) наличием функции поглотителей  $I(x, \tau)$ , что делает его неоднородным. Величина  $a^2$  отвечает диффузионному фактору и может быть определена из (1.7).

### 3.1.2. Начальное и граничные условия первой и второй краевой задачи

Для выделения единственного решения уравнения (3.2) необходимо к нему присоединить начальное и граничные условия. Здесь за основу можно принять рассмотренные в главе 1 законы изменение концентраций во времени и по длине для реактора периодического действия полного смешивания (рис. 1.8).

Принимаем, что в начальный момент времени концентрация влаги в цилиндре длиной  $l$  одинаковая в любом сечении, т.е. начальное условие имеет вид

$$w(x, 0) = w_0. \quad (3.3)$$

В качестве первого граничного условия принимаем, что на левом крае в сечении  $x = 0$  концентрация влаги изменяется по закону

$$w(0, t) = w_0 \exp(-\mu t). \quad (3.4)$$

Граничное условие (3.4) для левого края характеризуется по [77] как первая краевая задача. Это уравнение соответствует началу и концу рассматриваемого нами процесса обезвоживания. При  $\tau = 0$  имеем начальную влажность  $w_0$ , что отвечает (3.3). Если процесс обезвоживания идет время  $\tau_k$ , то конечная влажность в сечении  $x = 0$  определится из соотношения

$$w_{k0} = w_0 \exp(-\mu t), \quad (3.5)$$

где  $\mu$  – коэффициент, характеризующий скорость процесса обезвоживания.

На практике время  $\tau_k$  определяется параметрами прессовой установки: ее мощностью, скоростью, величиной перемещения поршня, а также размерами прессовой камеры.

Коэффициент  $\mu$  определяется из (3.5) по известным значениям величин  $\omega_0$ , и  $\tau_k$ . Величиной  $\omega_{k0}$  задаемся. Для разного времени длительности процесса  $\tau_{ki}$  можно определить соответствующие значения  $\mu_i$ .

Граничное условие для правого края выбираем соответствующим по классификации [77, 105-107] второй краевой задаче. В правом сечении  $x = l$  задаем значение производной

$$\frac{\partial w}{\partial x}(l, t) = -K w_0 \{1 - \exp[-m(t_k - t)]\}. \quad (3.6)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности.

Это выражение характеризует изменение влажности в сечении  $l$  в момент времени  $\tau$ . В конце изучаемого процесса в момент времени  $\tau = \tau_k$ , когда прекращается движение жидкости  $\frac{\partial w}{\partial x}(l, t) \equiv 0$ .

Правая часть (3.6) может быть записана иначе. Например, в предложенной форме записи производной для момента времени  $\tau = 0$  мы получаем конкретное значение расхода жидкости, что не соответствует физике процесса – ведь значение усилия прессования в это время равно нулю. Чтобы учесть этот момент рассмотрим граничное условие для правого края в виде

$$\frac{\partial w}{\partial x}(l, t) = -K_2 w_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -m(t_k - t) \frac{t}{t_k} \right] \right\}. \quad (3.7)$$

Определим следующее допущение: в (3.4), (3.6) и (3.7) мы используем одно значение коэффициента  $\mu$ , определяемое из (3.5).

Найдем значение коэффициента  $K$  в (3.6). При выводе уравнения диффузии из [81, 82] полагалось, что масса воды, протекающая через сечение  $l$  за промежуток времени  $(\tau, \tau + \Delta \tau)$ , равна

$$dQ(l, t) = DS \frac{dw}{dx}(l, t) dt. \quad (3.8)$$

Подставим сюда значение производной из (3.6) и проинтегрируем по времени

$$Q(l, t) = -DSK w_0 \int_0^{t_k} \{1 - \exp[-m(t_k - t)]\} dt.$$

Получим, что за время  $\tau_k$  через сечение  $l$  пройдет количество жидкости

$$Q(l, t) = DS \frac{K w_0}{m} [1 - m t_k - \exp(-m t_k)]. \quad (3.9)$$

Введем еще одно допущение: конечная влажность одинакова по всей длине образца и равна ее значению на левом крае  $\omega_{k0}$ . Тогда, количество ушедшей жидкости из образца объемом  $V$

$$Q(l, t) = w_0 V - w_{k0} V = w_0 V [1 - \exp(-m t_k)]. \quad (3.10)$$

Выражение для определения  $K$  получим, приравняв (3.9) и (3.10)

$$K = \frac{ml}{D} \left( \frac{1 - \exp(-mt_k)}{1 - mt_k - \exp(-mt_k)} \right). \quad (3.11)$$

Аналогично определяется коэффициент  $K_2$  для граничного условия (3.7)

$$K_2 = -\frac{l}{D} \left( \frac{1 - \exp(-mt_k)}{\int_0^{t_k} \left\{ 1 - \exp \left[ -m(t_k - t) \frac{t}{t_k} \right] \right\} dt} \right). \quad (3.12)$$

Отметим, что в этом случае аналитическое выражение для интеграла, как в (3.9), получить нельзя, но он легко берется численно.

### 3.1.3. Третья краевая задача

Граничные условия (3.6) и (3.7), отвечающие второй краевой задаче, не являются единственными. Рассмотрим третью краевую задачу, соответственно которой по [81, 82] для граничного условия в сечении  $x = l$  задано линейное соотношение между производной и функцией

$$\frac{\partial w}{\partial x}(l, t) = -K^* [w(l, t) - w_{\text{нар}}(t)], \quad (3.13)$$

где  $K^*$  – коэффициент пропорциональности;

$w_{\text{нар}}(t)$  – влажность окружающей среды.

Эта краевая задача соответствует процессу обезвоживания, когда на правом крае происходит движение влаги в окружающую среду, влажность которой в свою очередь зависит от времени.

Из (3.13) также следует, что должен быть задан закон изменения влажности на правом крае. Принимаем его в виде (3.4), как и для левого края. Начальное условие оставляем в виде (3.3).

Для рассматриваемого нами процесса механического обезвоживания будем считать величину  $w_{\text{нар}}(t)$  постоянной и заданной конечному значению влажности. Тогда с учетом (3.5) граничное условий (3.13) запишется в виде

$$\frac{\partial w}{\partial x}(l, t) = -K^* w_0 [\exp(-mt) - \exp(-mt_k)]. \quad (3.14)$$

Из (3.14) следует физическое соответствие данного граничного условия изучаемому процессу, в конце которого в момент времени  $t = t_k$ , когда прекращается диффузия жидкости в окружающую среду  $\frac{\partial w}{\partial x}(l, t_k) \equiv 0$ .

Коэффициент  $K^*$  определяется аналогично изложенному в подразделе 3.1.2. После подстановки (3.14) в (3.8) и интегрирования получим, что за время  $t_k$  через сечение  $l$  пройдет количество жидкости

$$Q(l, t) = DS \frac{K^* w_0}{m} [\exp(-mt_k)(1 + mt_k) - 1]. \quad (3.15)$$

Далее приравнивая (2.15) выражению (2.10) имеем

$$K^* = \frac{ml}{D} \left( \frac{1 - \exp(-mt_k)}{\exp(-mt_k)(1 + mt_k) - 1} \right). \quad (3.16)$$

Как и в подразделе 3.1.2 условие (3.14) можно уточнить для момента времени  $\tau = 0$ . Чтобы на правом крае в начале процесса отсутствовал расход жидкости, запишем граничное условие в виде

$$\frac{\partial w}{\partial x}(l, t) = -K_2^* w_0 \frac{t}{t_k} [\exp(-mt) - \exp(-mt_k)]. \quad (3.17)$$

Теперь после подстановки его в (3.8) и интегрирования имеем

$$K_2^* = \frac{2m^2 t_k l}{D} \left( \frac{1 - \exp(-mt_k)}{\exp(-mt_k)(2 + 2mt_k + m^2 t_k^2) - 2} \right). \quad (3.18)$$

## 3.2. Решение уравнения диффузии

### 3.2.1. Однородное уравнение диффузии

В настоящее время во многих случаях при решении дифференциальных уравнений используют численные методы, хорошо реализуемые на компьютерах. Уравнение параболического типа (3.2) не является исключением. Например, в [79] излагается построение алгоритма решения уравнений этого типа на основе метода сеток и даются примеры его реализации.

В [81, 107] предлагается для численного решения уравнений теплопроводности, которые также относятся к уравнениям параболического типа, использовать метод конечных разностей.

В нашей постановке задачи исходным является одно уравнение, а не система. Также мы имеем относительно простые выражения для начального и краевых условий. Поэтому воспользуемся классическим и более наглядным способом. Решаем уравнение (3.2) с использованием метода Фурье.

Метод Фурье – один из распространенных и эффективных методов решения уравнений с частными производными. Этот метод часто встречается и под другими названиями: метод разделения переменных или метод собственных функций. Основная идея этого метода состоит в том, что решение задачи для уравнения с частными производными сводится к решению вспомогательных задач для уравнений с меньшим числом независимых переменных. В частности, если заданное уравнение содержит две независимые переменные, то вспомогательные задачи будут уже зависеть только от одной переменной. Таким образом, решение уравнения с частными производными сводится к решению обыкновенных дифференциальных уравнений.

Алгоритм его решения изложен в [81], а некоторые примеры его реализации в [107].

Рассмотрим случай, когда  $I(x, \tau) = 0$ , а граничные условия соответствуют первой и второй краевым задачам.

Граничные условия (3.4) и (3.6) для функции  $\omega(x, \tau)$  неоднородные. Вводим новую функцию

$$F(x, \tau) = \omega(x, \tau) - U(x, \tau). \quad (3.19)$$

Здесь  $U(x, \tau)$  известная функция, которую принимаем в виде

$$U(x, t) = -Kw_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -m(t_k - t) \frac{x}{l} \right] \right\} \frac{l^2 - x^2}{2 \cdot l} + w_0 \exp(-mt). \quad (3.20)$$

Выражение (3.20) подобрано с тем условием, чтобы новая функция  $F(x, \tau)$  в (3.19) с учетом неоднородных граничных условий (3.4) и (3.6) для функции  $\omega(x, \tau)$  удовлетворяла однородным граничным условиям для функции  $F(x, \tau)$

$$F(0, t) = 0, \quad \frac{\partial F(l, t)}{\partial x} = 0. \quad (3.21)$$

Далее для  $F(x, \tau)$  из (3.19) с учетом начального условия (3.3) и выражения (3.20) при  $\tau = 0$  имеем начальное условие

$$F(x, 0) = Kw_0 \left[ 1 - \exp \left( -mt_k \frac{x}{l} \right) \right] \frac{l^2 - x^2}{2l}. \quad (3.22)$$

После подстановки (3.19) в (3.2) и последующих преобразований имеем

$$\frac{\partial F}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (3.23)$$

Получили неоднородное уравнение, но с однородными граничными условиями (3.21) и начальным условием (3.22).

Найдем систему собственных функций соответствующего уравнению (3.23) однородного уравнения, удовлетворяющих однородным граничным условиям (3.21). Полагаем

$$F(x, \tau) = X(x) \tau_k(\tau)$$

и разделяя переменные в однородном уравнении

$$\frac{\partial F}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}$$

получим уравнение для определения  $X(x)$

$$X''(x) + I^2 X(x) = 0.$$

Решением этого уравнения является функция

$$X(x) = C_1 \cos(\lambda x) + C_2 \sin(\lambda x).$$

Для нахождения  $C_1, C_2, \lambda$  учтем граничные условия (3.21) для функции  $F(x, \tau)$ . Из них следует, что

$$X(0) = 0, \quad X'(l) = 0.$$

Нетривиальные решения для  $X(x)$ , удовлетворяющие этим условиям, получаются при

$$C_1 = 0, C_2 \neq 0, I = \frac{(2k-1)p}{2l}.$$

Таким образом приходим к следующей системе собственных функций

$$X_k(x) = \sin \frac{(2k-1)p}{2l} x \quad (k=1, 2, 3, \dots).$$

Функцию  $F(x, \tau)$ , удовлетворяющую уравнению (3.23), граничным условиям (3.21) и начальному (3.22) будем искать в виде суммы ряда по этой системе собственных функций

$$F(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) \sin \frac{(2k-1)p}{2l} x. \quad (3.24)$$

Разложим неоднородный член в уравнении (3.23)

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{\partial U}{\partial t}$$

в ряд Фурье на интервале  $0-l$  по системе собственных функций аналогично (3.24), обозначив его для определенности

$$\sum_{k=1}^{\infty} s_k(t) \sin \frac{(2k-1)p}{2l} x. \quad (3.25)$$

Подставим (3.24) и (3.25) в (3.23) и после преобразований приходим к системе дифференциальных уравнений для определения  $f_k(\tau)$

$$\frac{\partial f_k(t)}{\partial t} = -\frac{(2k-1)^2 p^2 a^2}{4l^2} f_k(t) + s_k(t). \quad (3.26)$$

Выражения, определяющие начальные условия для функций  $f_k(\tau)$  получим из (3.22) с учетом (3.24) по формулам для коэффициентов ряда Фурье

$$f_k(0) = \frac{2}{l} \int_0^l K w_0 \left[ 1 - \exp\left(-m t_k \frac{x}{l}\right) \right] \frac{l^2 - x^2}{2l} \sin \frac{(2k-1)p}{2l} x \, dx. \quad (3.27)$$

Решаем уравнения (3.26) при начальных условиях (3.27) и находим коэффициенты  $f_k(\tau)$ . На этом этапе решение дифференциального уравнения (3.26) осуществляется численным методом с использованием специальных встроенных функций, имеющихся в любом математическом пакете.

Количество уравнений в системе (3.26) зависит от принятого нами максимального значения  $k$  и будет обосновано по результатам сравнения решений.

Полученные значения  $f_k(\tau)$  подставляем в (3.24). Теперь, приняв во внимание связь между  $F(x, \tau)$  и  $\omega(x, \tau)$  из (3.19) получим

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} [f_k(t) + s_k(t)] \sin \frac{(2k-1)p}{2l} x. \quad (3.28)$$

### 3.2.2. Частные случаи краевых задач

Рассмотрим граничное условие (3.7). В этом случае дополнительная функция (3.20) должна быть записана в виде

$$U(x, t) = -K_2 w_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -m(t_k - t) \frac{x}{l} \frac{t}{t_k} \right] \right\} \frac{l^2 - x^2}{2 \cdot l} + w_0 \exp(-m \cdot t). \quad (3.29)$$

Далее с учетом (3.29) получаем начальное условие, аналогичное (3.22), но которое становится тождественно равным нулю. Соответственно, начальные условия для функций  $f_k(\tau)$  из (3.27) также принимают нулевые значения  $f_k(0) \equiv 0$ .

Теперь рассмотрим случай, когда для правого края заданы граничные условия по третьей краевой задаче. Начальное условие и граничное условие для левого края не меняются.

Как и в первом случае, граничные условия (3.4) и (3.14) являются неоднородными. Поэтому вводим новую функцию (3.19), а вспомогательную функцию  $U(x, \tau)$  задаем в виде

$$U(x, t) = -K^* w_0 [\exp(-m t) - \exp(-m t_k)] \frac{l^2 - x^2}{2 l} + w_0 \exp(-m t). \quad (3.30)$$

Функция  $F(x, \tau)$  в (3.19) с учетом неоднородных граничных условий для функции  $\omega(x, \tau)$  удовлетворяет однородным граничным условиям (3.21).

Теперь определим начальное условие для функции  $F(x, \tau)$ . Подставляем (3.3) и (3.30) в (3.19) и приняв  $\tau = 0$ , имеем

$$F(x, 0) = -K^* w_0 [1 - \exp(-m t_k)] \frac{l^2 - x^2}{2 l}. \quad (3.31)$$

Далее метод решения не отличается от изложенного выше. Отметим только, что выражения для вспомогательной функции (3.30) имеет более простой вид, чем аналогичное (3.19) для второй краевой задачи.

Условие (3.17) для третьей краевой задачи приводит к тому, что вспомогательную функцию  $U(x, \tau)$  в (3.19) надо задать в виде

$$U(x, t) = -K^* w_0 [\exp(-m t) - \exp(-m t_k)] \frac{(l-x)x}{2 l} \frac{t}{t_k} + w_0 \exp(-m t). \quad (3.32)$$

Но, как и выше, получив с учетом (3.32) начальное условие, аналогичное (3.22), также приходим к нулевым значениям коэффициентов  $f_k(0) \equiv 0$  функций  $f_k(\tau)$  из (3.27).

### 3.2.3. Неоднородное уравнение диффузии

Рассмотрим задачу с начальным условием (3.3) и граничными условиями на разных краях (3.4) и (3.6). Как и в предыдущем случае, вводим новую неизвестную функцию  $F(x, \tau)$  в виде (3.19), представляющую отклонение от

некоторой известной функции  $U(x, \tau)$  в виде (3.20). После подстановки их в (3.2) функция  $F(x, \tau)$  определяется как решение уравнения

$$\frac{\partial F}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \bar{I}(x, t), \quad (3.33)$$

где 
$$\bar{I}(x, t) = I(x, t) - \left[ \frac{\partial U}{\partial t} - a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right].$$

В уравнении (3.33) функция  $I(x, \tau)$  берется со знаком плюс для источников влаги и минус – для поглотителей.

Для уравнения (3.33) мы опять получили однородные граничные условия в виде (3.20) и начальное условие в виде (3.21). Для нахождения искомой функции  $F(x, \tau)$  на первом этапе рассмотрим уравнение (3.33) без правой части (однородное уравнение) при полученных для него однородных граничных условиях (3.21) и начальном (3.22). Как и выше находим семейство собственных функций для представления  $F(x, \tau)$  в виде (3.24).

На втором этапе возвращаемся к неоднородному уравнению (3.33) и ищем его решение в виде суммы ряда по собственным функциям (3.23). Здесь коэффициенты  $f_k(\tau)$  надо подобрать с таким расчетом, чтобы функция, определяемая рядом (3.24), удовлетворяла неоднородному уравнению (3.33) и начальному условию (3.22).

Представим функцию  $\bar{I}(x, t)$  в виде ряда

$$\bar{I}(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{p}_k(t) \sin \frac{(2k-1)p x}{2l}, \quad (3.34)$$

где 
$$\bar{p}_k(t) = \frac{2l}{l} \int_0^l \bar{I}(x, t) \sin \frac{(2k-1)p x}{2l} dx.$$

Подставляем предполагаемую форму решения (3.24) с учетом (3.34) в уравнение (3.33) и будем иметь

$$\sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{(2k-1)p x}{2l} \left\{ \frac{d f_k(t)}{d t} + \frac{(2k-1)^2 p^2}{4l^2} a^2 f_k(t) - \bar{p}_k(t) \right\} = 0.$$

Это уравнение будет удовлетворено, если все коэффициенты разложения равны нулю, т.е.

$$\frac{d f_k(t)}{d t} = - \frac{(2k-1)^2 p^2}{4l^2} a^2 f_k(t) + \bar{p}_k(t). \quad (3.35)$$

Решаем обыкновенные дифференциальные уравнения (3.35) с нулевыми начальными условиями (3.27) и находим  $f_k(\tau)$ . Окончательно получаем решение исходной задачи в виде

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} [f_k(t) + p_k(t)] \sin \frac{(2k-1)p x}{2l}, \quad (3.36)$$

где  $p_k(\tau)$  – коэффициенты ряда Фурье выражения  $p_k(t) = \bar{p}_k(t) + \left[ U_t' - a^2 U_{xx}'' \right].$

В выражении (3.33) требуется задаться видом функции  $I(x, \tau)$ . В нашем случае она играет роль поглотителя влаги, но не должна нарушать заданные начальное и граничные условия. С учетом размерности, начального условия (3.3) и граничного на левом конце трубки (3.4) выбираем функцию  $I(x, \tau)$  в виде

$$I(x, t) = I_0 \frac{W_0}{t_k} \frac{x}{l} [1 - \exp(-m t)], \quad (3.37)$$

где  $I_0$  – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, из (3.33) при  $x = 0$  и  $\tau = 0$  уравнение (3.2) превращается в однородное при соответствующих граничных условиях.

Выражение (3.37) не единственно возможный вид функции поглотителя. Можно предложить и другие зависимости, например

$$I(x, t) = I_0 \frac{W_0}{t_k} \frac{x}{l} [1 - \exp[-m(t_k - t)]], \quad (3.38)$$

$$I(x, t) = I_0 \frac{W_0}{t_k} \frac{x}{l} [1 - \exp(-m t)] [1 - \exp[-m(t_k - t)]], \quad (3.39)$$

Графики зависимости функции  $I(x, t) = I_0 \frac{W_0}{t_k} \frac{x}{l} [1 - \exp(-m t)]$  по

длине и от времени приведены на рис. 3.2.

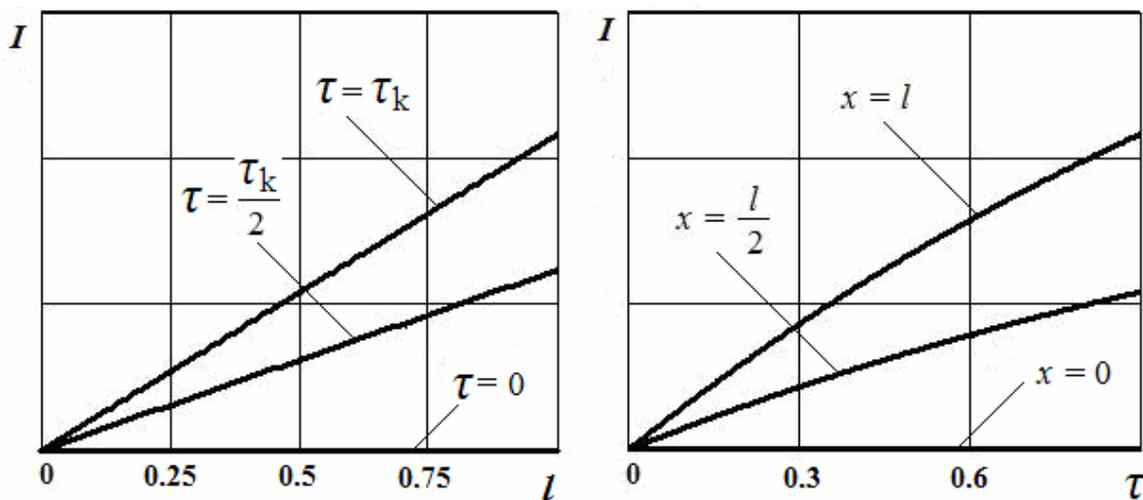


Рис. 3.2. Изменение функции  $I(x, \tau)$  уравнение (3.37)

Из графиков видно, что функция  $I(x, \tau)$ , изменяющаяся по закону (3.37) в начальный момент времени равна нулю и возрастает с течением времени. В конечный момент времени процесса обезвоживания ее значение будет максимально.

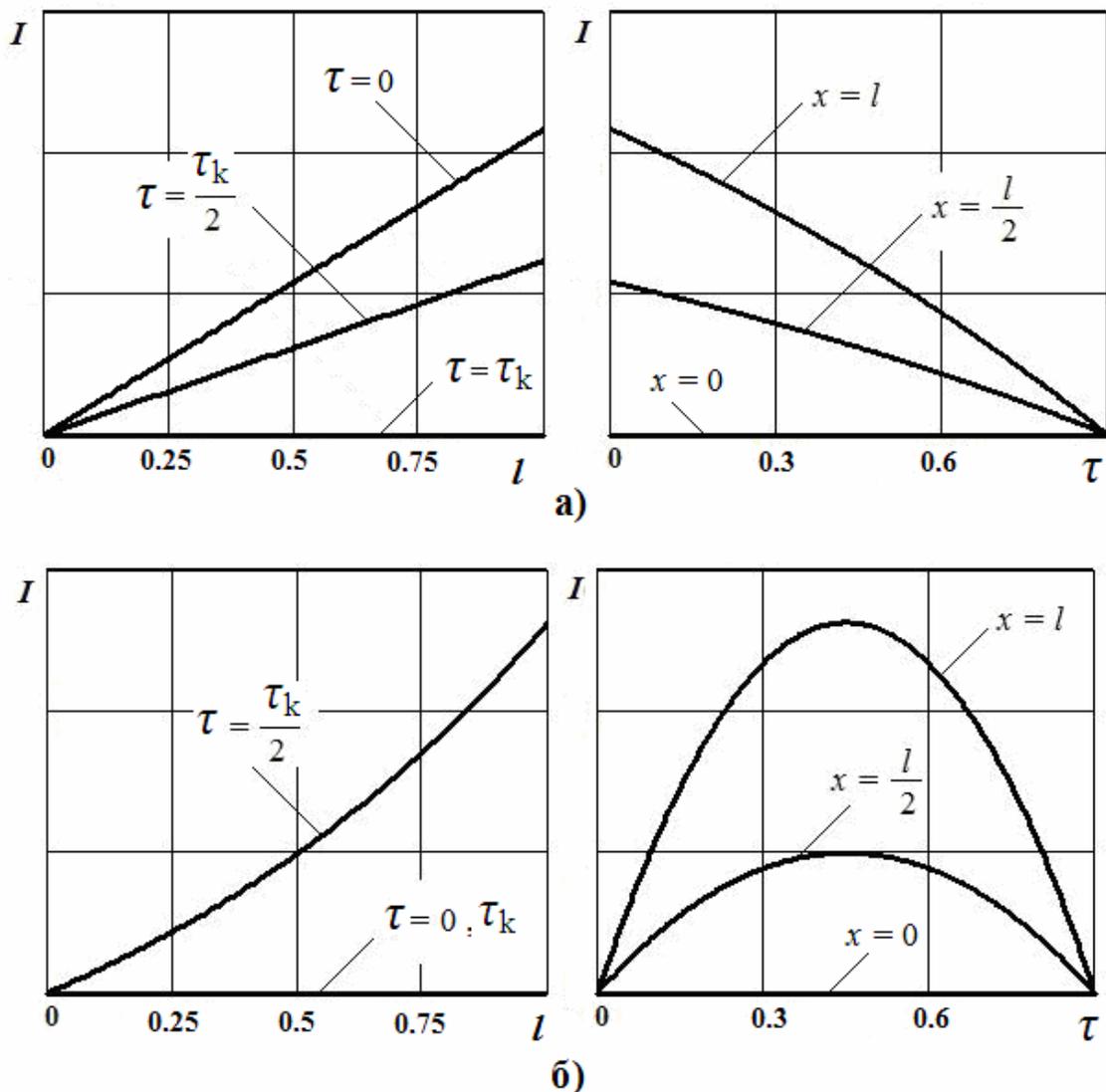


Рис. 3.3. Изменение функции  $I(x, \tau)$  по длине и по времени а) уравнение (3.38), б) уравнение (3.39)

Функция  $I(x, \tau)$ , изменяющаяся по закону (3.38) в начальный момент времени имеет некоторое значение и убывает с течением времени. Третья функция  $I(x, \tau)$  – формула (3.39) – в начальный и конечный момент времени равна нулю, возрастает до момента  $\tau = \tau_k/2$  и затем постепенно убывает.

В уравнениях (3.37–3.39) присутствует коэффициент  $I_0$ , порядок которого можно оценить после проведения расчетов и сравнения результатов с экспериментами.

### 3.3. Расчеты и анализ результатов

Использование метода Фурье предполагает в первую очередь решить два вопроса:

1) определить достаточное число членов ряда Фурье, дающих удовлетворительную точность решения задачи внутри интервала разложения;

2) оценить расхождение полученного решения на границах интервала от действительного значения.

Вычисления проводились по следующей схеме.

1. По методу Фурье, изложенному в разделах 3.2 и 3.3, составлены программы в MathCAD (приведены в приложении) с графическим отображением результатов.

2. Начальное и конечное значения влажности вводились в относительных единицах. Остальные параметры задавались в абсолютных.

3. Расчеты проводились для 4-х и 12-ти членов ряда Фурье.

4. Исследовалось влияние диапазона изменения отдельных параметров, входящих в уравнение, на форму полученного решения.

5. Рассматривались функции источника различных видов и проводилась оценка коэффициентов, характеризующих их мощность.

Задаем исходные данные, соответствующие полученным при лабораторных исследованиях и используемых в экспериментах:  $\omega_0 = 0,3$ ;  $\omega_k = 0,17$  (начальная и конечная влажность материала);  $\tau_k = 150, 300, 1200$  с (продолжительность процесса обезвоживания);  $n = 0,4$  (пористость материала);  $l = 0,1$  м;  $d_{\text{кам}} = 0,06$  м (длина и диаметр прессовой камеры в лабораторных исследованиях).

Особо оговорим значение параметра  $a$  в уравнении (3.2), характеризующего коэффициент диффузии. На его значение влияет скорость нарастания нагрузки и соответственно определенный участок, выделенный в интервале общего времени нагружения. Как мы приняли в подразделе 3.1.1, считаем параметр  $a$  постоянным, а его значение и диапазон возможного изменения определим по результатам расчетов.

На графики выводим значения влажности образца  $\omega(x, \tau)$  по длине  $x$  в момент времени  $\tau = 0$  и в зависимости от времени  $\tau$  при  $x = 0$ . Эти графики должны соответствовать начальному условию и граничному для левого края.

Строим также аналогичные графики для времени  $\tau = \tau_k$  и для  $x = l$ . На графиках длина образца представлена в относительных единицах  $\bar{l}$ , перевод в абсолютные осуществляется по формуле  $l = 0,1 \cdot \bar{l}$ . Результаты расчета представлены на рис. 3.4 – 3.11.

На начальном этапе проводились расчеты с целью определить достаточное число членов ряда Фурье, дающих удовлетворительную точность решения задачи внутри интервала разложения. Построены графики зависимостей изменения влажности по длине образца для 4-х и 12-ти членов ряда (рис. 3.4). На приведенных ниже графиках кривая 1 – 4 члена ряда, кривая 2 – 12 членов ряда.

Для определения достаточного числа членов ряда Фурье в расчетах была посчитана средняя влажность образца при 4-х и 12-ти членах. Оказалось, что величина средней влажности в данных расчетах одинакова.

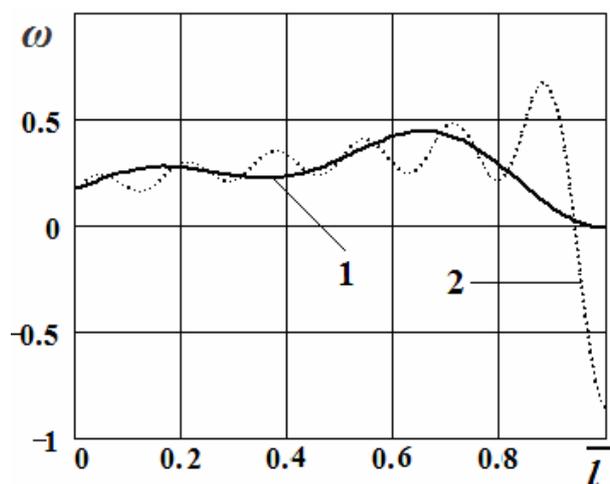


Рис. 3.4. Зависимость изменения влажности по длине образца для 4-х и 12-ти членов ряда Фурье: 1 – четыре члена ряда, 2 – двенадцать членов ряда

Таким образом, при решении уравнения диффузии возможно использование метода Фурье с достаточным числом членов ряда  $k = 4$ .

Графики зависимости изменения влажности образца от длительности процесса обезвоживания для  $\tau_k = 150, 300$  и  $1200$  с приведены на рис. 3.5. Они соответствуют граничному условию (3.4) для левого края (первая краевая задача). График изменения влажности по длине образца, соответствующий начальному условию (3.3) представляет собой линию, параллельную оси абсцисс, со значением равным начальной влажности образца.

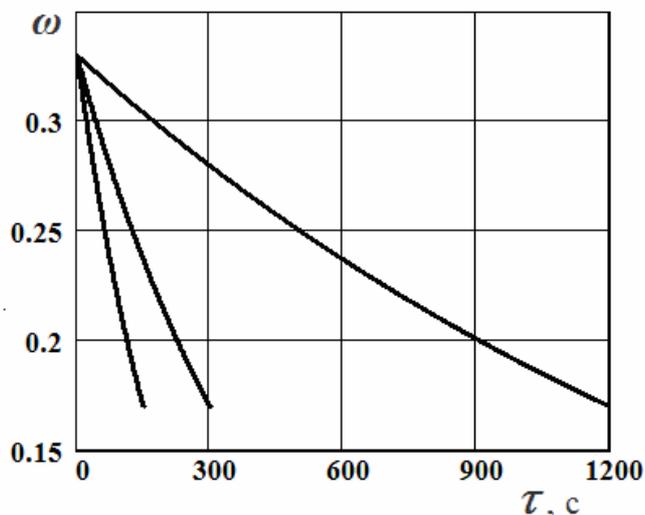


Рис. 3.5. Зависимость изменения влажности образца от времени для граничного условия (3.4)

На рис. 3.6 – 3.7 представлены графики зависимости изменения влажности образца для момента времени  $\tau = \tau_k$  и сечения  $x = l$ . Граничное условие на правом крае – (3.6), функция источников имеет вид (3.37). Продолжительность процесса обезвоживания  $\tau_k = 150, 300$  и  $1200$  с. На приведенных графиках кривая 1 – однородное уравнение ( $I_0 = 0$ ), 2 – неоднородное уравнение ( $I_0 = 20$ ).

Из графиков видно, что с увеличением времени кривая 2 неоднородного уравнения расположена выше кривой 1. Это объясняется действием функции поглотителей, которая добавляет в образец влагу. С увеличением времени процесс отличия в кривых для однородного и неоднородного уравнений в распределении влажности по длине образца уменьшается – кривые сливаются в одну (рис. 3.6).

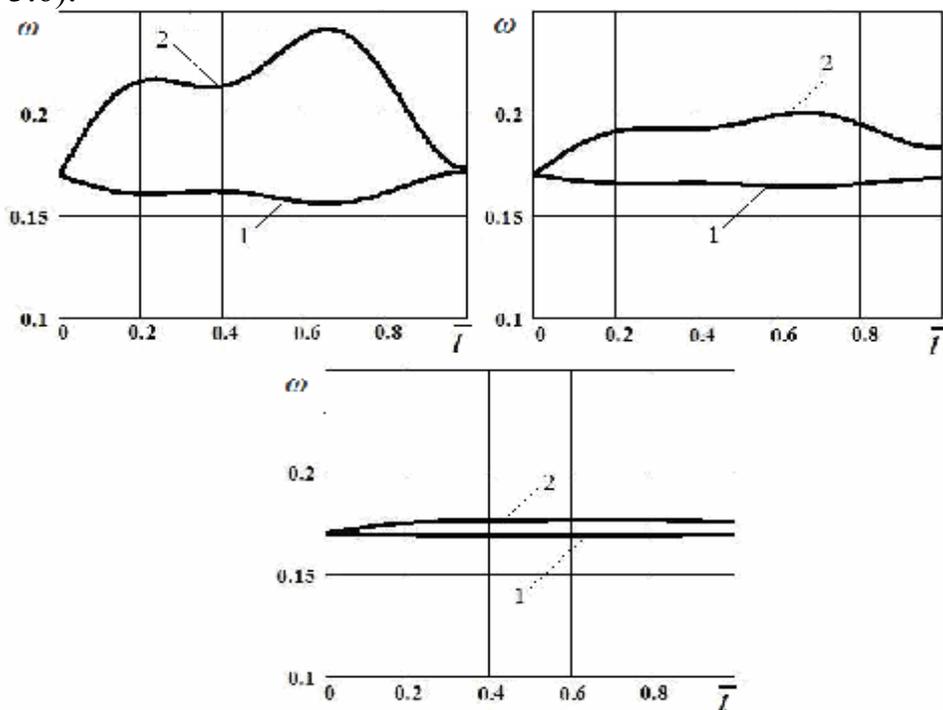


Рис. 3.6. Зависимость изменения влажности по длине образца для граничного условия (3.6),  $I(x, \tau)$  – условие (3.37)

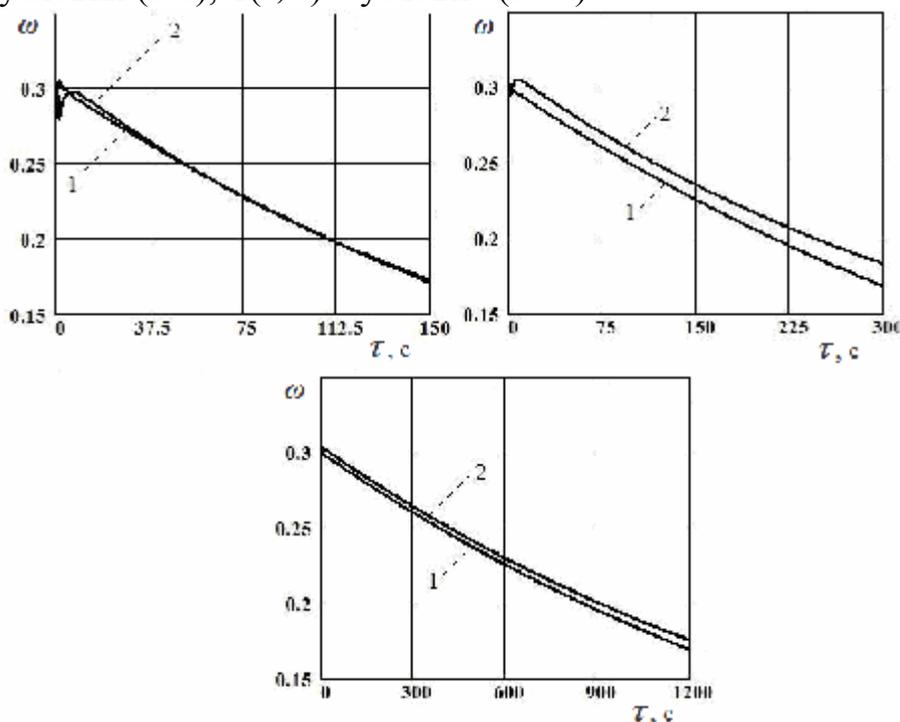


Рис. 3.7. Зависимость изменения влажности от времени для граничного условия (3.6),  $I(x, \tau)$  – условие (3.37)

Графики изменения влажности образца по времени практически совпадают (рис. 3.7).

На рис. 3.8 – 3.9 представлены графики зависимости изменения влажности образца для момента времени  $\tau = \tau_k$  и сечения  $x = l$ .

Граничное условие на правом крае – (3.14), функция поглотителей имеет вид (3.37). Кривая 1 – однородное уравнение ( $I_0 = 0$ ), 2 – неоднородное уравнение ( $I_0 = -20$ ).

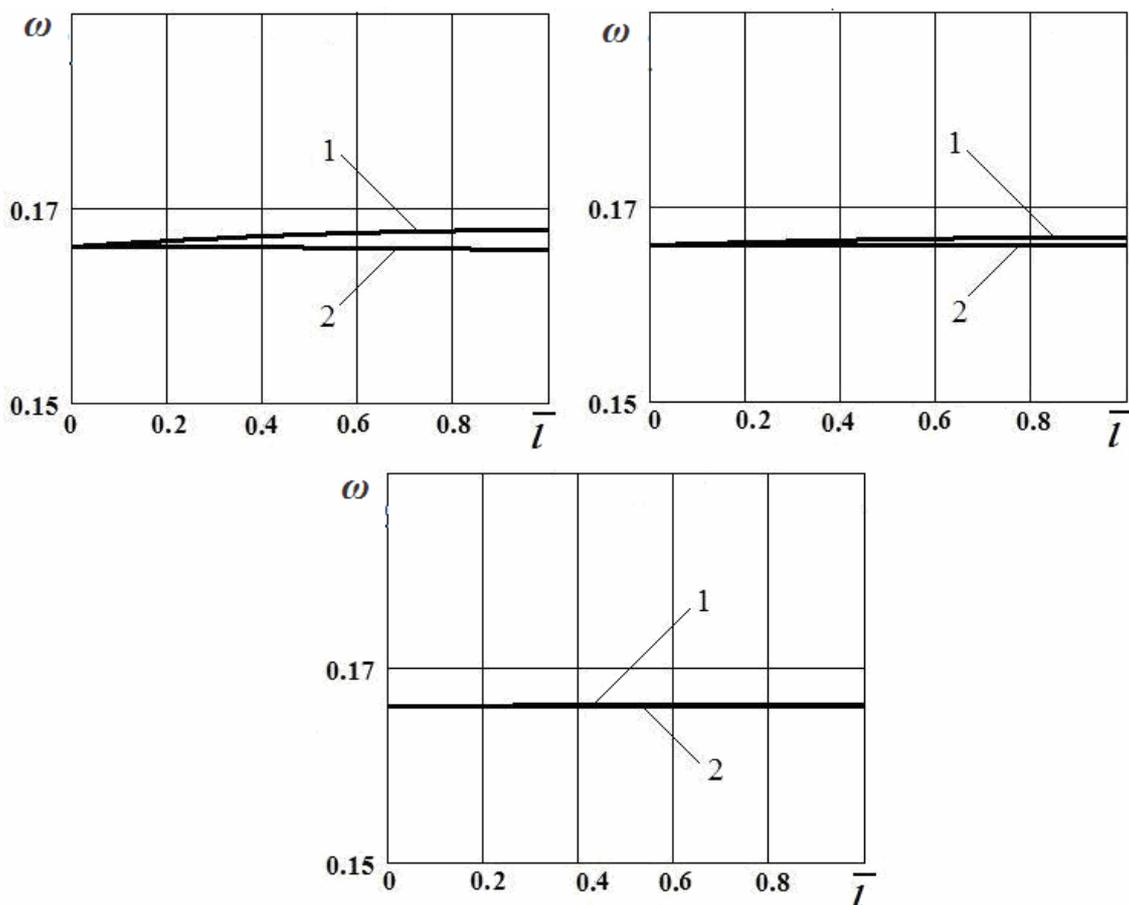


Рис. 3.8. Зависимость изменения влажности по длине образца для граничного условия (3.14),  $I(x, \tau)$  – условие (3.37):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

Из графиков видно, что кривые однородного и неоднородного уравнений для распределения влажности по длине образца совпадают (рис. 3.8). Для графиков изменения влажности образца по времени кривая 2 резко уходит вниз, т.е. процесс удаления влаги идет быстрее. С увеличением времени процесса кривые изменения влажности по времени сливаются в одну (рис. 3.9).

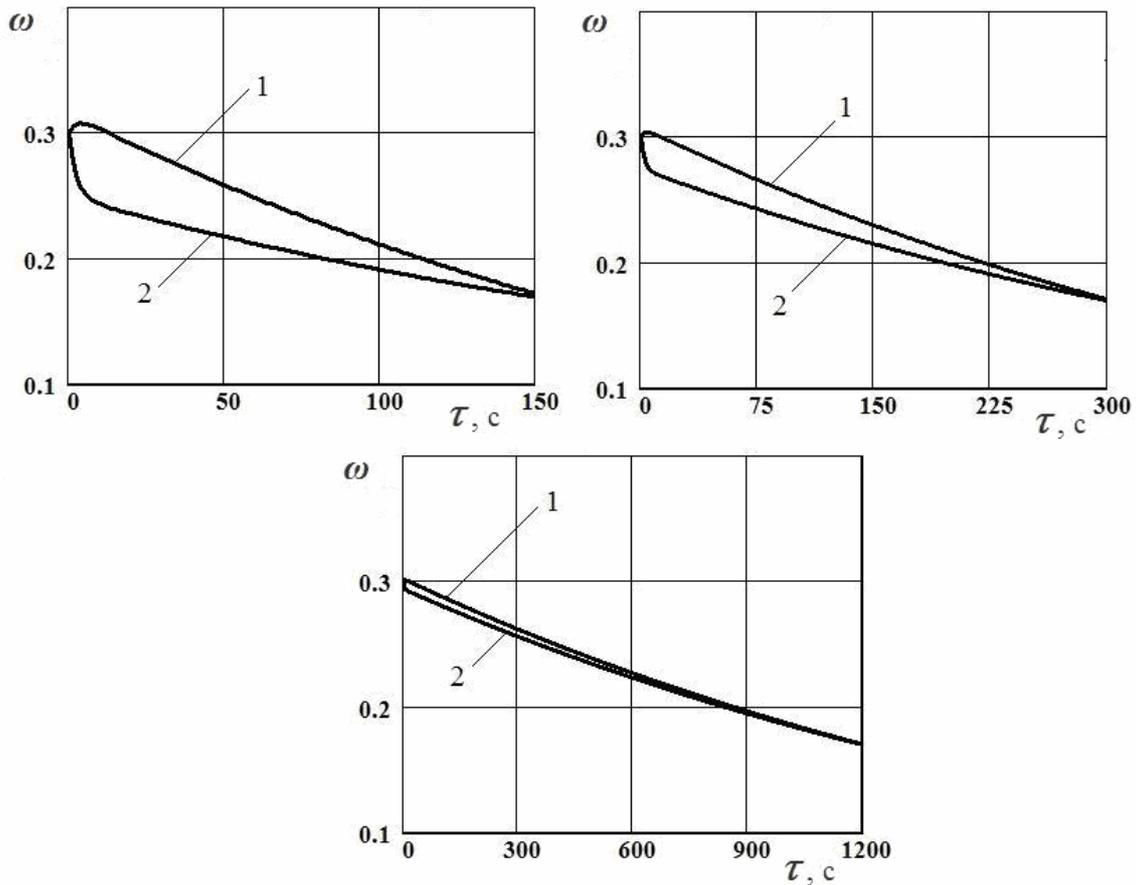


Рис. 3.9. Зависимость изменения влажности от времени для граничного условия (3.14),  $I(x, \tau)$  – условие (3.37):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

Аналогичный вывод для условий (3.6) и (3.14) можно сделать и когда функция поглотителей изменяется по закону (3.39). На рис. 3.10 и рис. 3.11 приведены графики зависимостей  $\omega = f(x)$  и  $\omega = f(\tau)$  для условий (3.6) и (3.14) соответственно. С увеличением продолжительности процесса  $\tau_k = 300$  и  $1200$  с качественно вид данных зависимостей сохраняется.

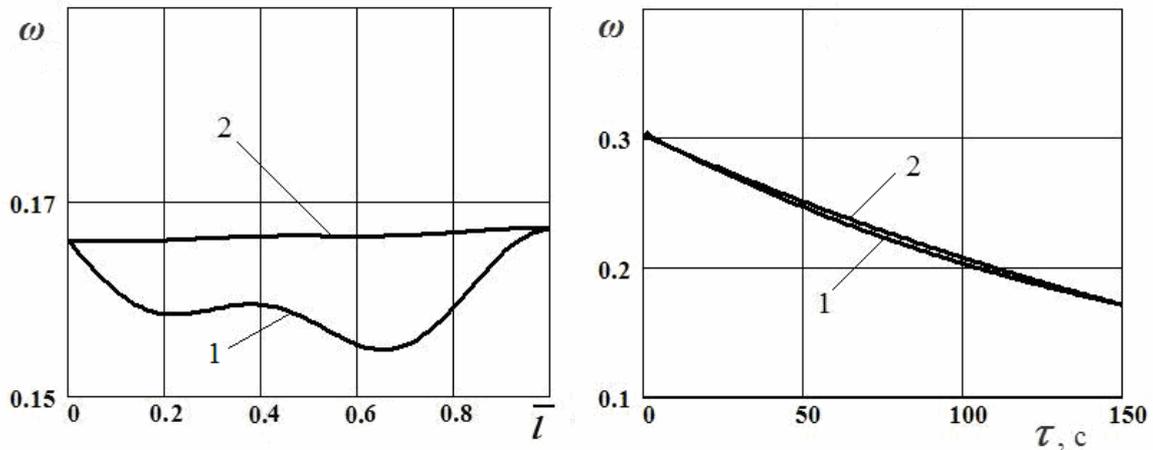


Рис. 3.10. Зависимости изменения влажности по длине образца (а) и от времени (б) для граничного условия (3.6),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

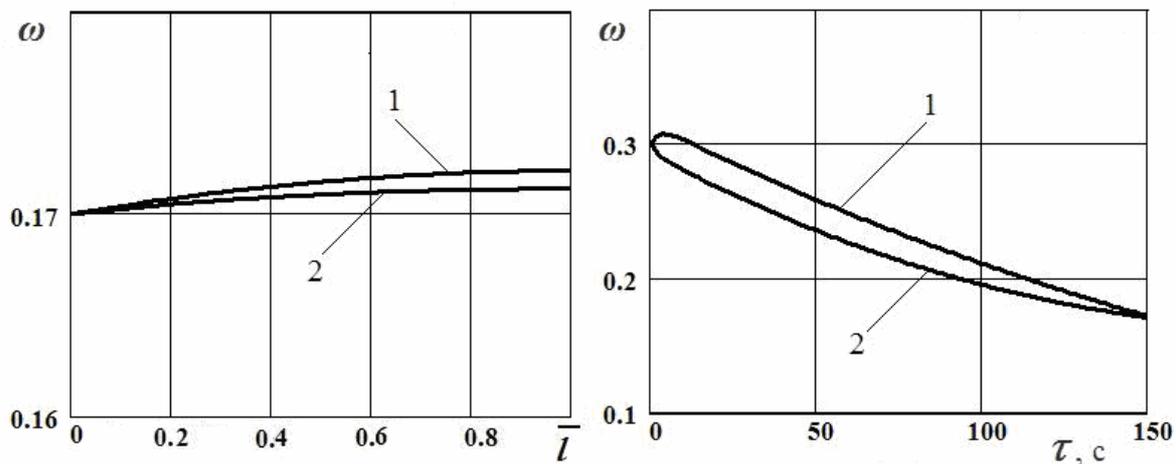


Рис. 3.11. Зависимость изменения влажности по длине образца (а) и от времени (б) для граничного условия (3.14),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l$ ,  $\tau = \tau_k$

### 3.4 Зависимость коэффициента диффузии от времени

До сих пор мы считали коэффициент диффузии постоянным и который определял часть влаги, удаляемую из образца диффузионным процессом. Остальную часть влаги и неравномерность ее удаления во времени относили на счет функции источника. Но процесс механического обезвоживания связан с изменением структуры брикета за счет уменьшения порового пространства и возможности фильтрации через него воды. Значит, в процессе сжатия брикета коэффициент диффузии будет уменьшаться, что в математической постановке задачи можно задать соответствующей функцией, минимум или нулевое значение которой наступит в конце изучаемого процесса при  $\tau = \tau_k$ .

В общем случае можно положить  $a = f(\omega)$  или, что тоже самое,  $a = f(x, \tau)$  и решать уравнение (3.2) численным методом, как это предлагается в [77]. Но стандартной программы для решения дифференциальных уравнений в частных производных не существует. Каждый исследователь выбирает один из предлагаемых алгоритмов решения уравнения и далее разрабатывает метод решения уравнения или системы уравнений применительно к своей физической модели. Эта задача является сложной в математическом плане. Но она еще требует большой работы в части проверки соответствия результата физической сущности исследуемого процесса. Поэтому в нашей постановке мы ограничимся только временем, считая  $a = f(\tau)$ . Тогда уравнение (3.2) примет вид

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a(t)^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + I(x, t). \quad (3.40)$$

Начальное и граничные условия оставим в том же виде (3.3), (3.4), (3.6).

Из сравнения (3.40) и (3.2) получаем, что функциями времени должны быть коэффициенты диффузии  $D$  и пористости  $n$ . Опыты с измерением пористости брикета в процессе отжатия влаги показали диапазон ее изменения

0,5-0,37. Предыдущие расчеты показали, что ее изменение в данном диапазоне оказывает малое влияние на поведение исследуемых зависимостей. Влияние же коэффициента диффузии наоборот, велико. Поэтому принимаем  $n = \text{const}$ ,  $D = D(\tau)$ . Задаемся законом изменения коэффициента диффузии в виде

$$D = D(t) = q^2 n (t_k - t)^b, \quad (3.41)$$

где  $q$  – коэффициент пропорциональности, аналогичный коэффициенту  $a$  в уравнении (3.2).

Зависимость (3.41) предполагает, что в конце процесса обезвоживания коэффициент диффузии стремится к нулю и движение жидкости прекращается. Степень  $\beta$  может принимать различные значения. Примем  $\beta = 2$ .

Для отличия предыдущей задачи с этой введем индекс  $\tau$  в коэффициент  $K_\tau$  и найдем его новое значение по сравнению с (3.6). С учетом (3.41) интеграл от выражения (3.8) запишется в виде

$$Q(l, t) = -q^2 S K_t w_0 \int_0^{t_k} (t_k - t)^2 \{1 - \exp[-m(t_k - t)]\} dt.$$

После интегрирования получаем

$$Q(l, t) = \frac{q^2 S K_t w_0}{3m^3 t_k^2 \exp(mt_k)} \left( \begin{array}{l} 6 \exp(mt_k) - m^3 t_k^3 \exp(mt_k) - \\ - 3m^2 t_k^2 - 6mt_k - 6 \end{array} \right) \quad (3.42)$$

С другой стороны количество ушедшей жидкости из образца объемом  $V$  определяется по той же формуле (3.10).

Выражение для определения  $K_t$  получим, приравняв (3.42) и (3.10)

$$K_t = \frac{3m^4 l t_k^2 [1 - \exp(mt_k)]}{q^2 (6 \exp(mt_k) - m^3 t_k^3 \exp(mt_k) - 3m^2 t_k^2 - 6mt_k - 6)}. \quad (3.43)$$

Аналогично коэффициент  $K_{t2}$  для граничного условия (3.7)

$$K_{t2} = -\frac{l}{q^2} \left( \frac{1 - \exp(-mt_k)}{\int_0^{t_k} (t_k - t)^2 \left\{ 1 - \exp \left[ -m(t_k - t) \frac{t}{t_k} \right] \right\} dt} \right). \quad (3.44)$$

В этом случае аналитическое выражение для интеграла, так же как в (3.12), получить нельзя и поэтому будем определять его численно. Также определим значения  $K^*_t$  и  $K^*_{t2}$  для третьей краевой задачи.

Выражение для  $K^*_t$  и  $K^*_{t2}$  соответственно равны

$$K^*_t = \frac{3q^{-2} m^4 l [\exp(mt_k) - 1]}{A1}, \quad (3.45)$$

где  $A1 = -3 \exp(mt_k) m^2 t_k^2 - 6 \exp(mt_k) + 6 \exp(mt_k) m t_k + m^3 t_k^3 + 6$ .

$$K_{t_2}^* = \frac{12q^{-2} m^4 t_k l [\exp(mt_k) - 1]}{A2}, \quad (3.46)$$

где  $A2 = -72 \exp(mt_k) - 12 \exp(mt_k) m^2 t_k^2 + 48 \exp(mt_k) m t_k + m^4 t_k^4 + 24 m t_k + 72$ .

С учетом (3.41) уравнение (3.40) запишется в виде

$$\frac{\partial w}{\partial t} = a_t^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + I(x, t), \quad (3.47)$$

где  $a_t^2 = q^2 (t_k - t)^2$ .

Рассмотрим однородное уравнение, когда  $I(x, \tau) = 0$ . Далее повторяем схему рассуждений, изложенных в разделе 3.2. Оставляем граничные условия в виде (3.4) и (3.6) и вводим новую функцию  $F(x, \tau)$  (3.19). Функция  $U(x, \tau)$  остается в виде (3.20) и мы имеем однородные граничные условия (3.21).

Принятое условие  $a = f(\tau)$  при разделении переменных по методу Фурье не отразится на виде системы собственных функций. Поэтому приходим к выражению (3.26), в котором вместо  $a$  подставим  $a_\tau$  и учтем соответствующие изменения в разложении  $s_k(\tau)$  в виде (2.25). Далее задача решения уравнения (3.47) решается численным методом.

### 3.5 Расчеты и анализ результатов

Вычисления проводились по следующей схеме.

1. По методу Фурье, изложенному в разделах 3.2 и 3.3, составлены программы в MathCAD (приведены в приложении) с графическим отображением результатов.

2. Начальное и конечное значения влажности вводились в относительных единицах. Остальные параметры задавались в абсолютных.

3. Расчеты проводились для 4-х членов ряда Фурье.

4. Исследовалось влияние диапазона изменения отдельных параметров, входящих в уравнение, на форму полученного решения.

5. Рассматривались функции источника различных видов и проводилась оценка коэффициентов, характеризующих их мощность.

Задаем исходные данные, соответствующие полученным при лабораторных исследованиях и используемых в экспериментах:

$\omega_0 = 0,3$ ;  $\omega_k = 0,17$  (начальная и конечная влажность материала);

$\tau_k = 150, 300, 1200$  с (продолжительность процесса обезвоживания);

$n = 0,4$  (пористость материала);

$l = 0,1$  м;  $d_{\text{кам}} = 0,06$  м (длина и диаметр прессовой камеры в лабораторных исследованиях).

На графики выводим значения влажности образца  $\omega(x, \tau)$  по длине  $x$  в момент времени  $\tau = 0$  и в зависимости от времени  $\tau$  при  $x = 0$ . Эти графики должны соответствовать начальному условию и граничному для левого края.

Строим также аналогичные графики для времени  $\tau = \tau_k$  и для  $x = l$ .

На рис. 3.12-3.13 представлены графики зависимости изменения влажности образца для момента времени  $\tau = \tau_k$  и сечения  $x = l$ . Граничное условие на правом крае – (3.6), функция поглотителей имеет вид (3.39).

На приведенных графиках кривая 1 – однородное уравнение ( $I_0 = 0$ ), 2 – неоднородное уравнение ( $I_0 = -10$ ).

Из графиков видно, что функция поглотителей выравнивает кривую распределения влажности по длине образца, приближая ее к заданной конечной влажности. С увеличением времени процесса отличие в кривых для однородного и неоднородного уравнений в распределении влажности по длине образца уменьшается – кривые приближаются друг к другу рис. 3.12.

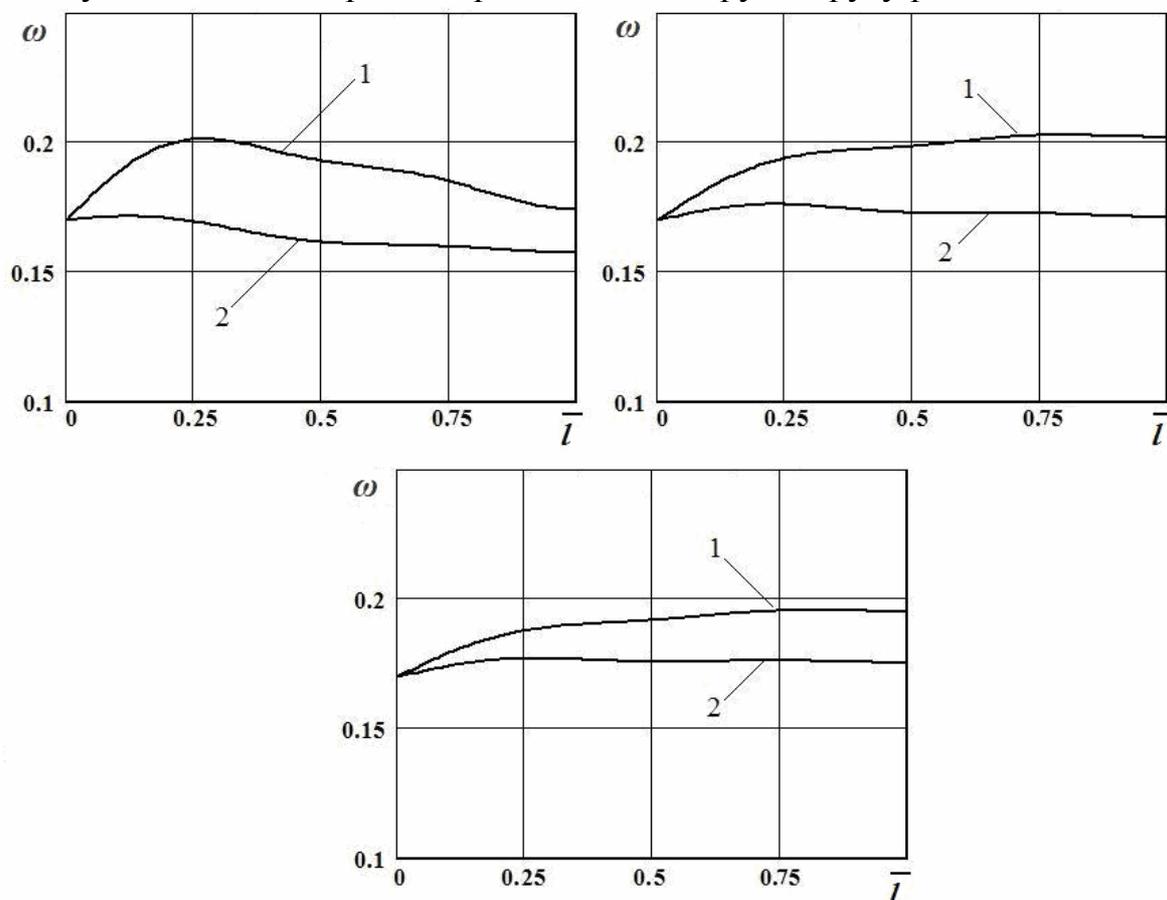


Рис. 3.12. Зависимость изменения влажности по длине образца для граничного условия (3.6),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

Для графиков изменения влажности образца по времени (рис. 3.13) наблюдается следующее: кривая 1 однородного уравнения резко падает вниз, а затем постепенно выравнивается. Т.е. влага в начале процесса быстро удаляется и достигает своего конечного значения, процесс останавливается. С введением функции поглотителей в процесс кривая 2 изменения влажности поднимается

вверх относительно кривой 1. Функция поглотителей добавляет влагу в образец, что противоречит физике процесса обезвоживания.

Аналогичный вывод можно сделать для граничного условия (3.7), функция поглотителей имеет вид (3.39). Графики зависимостей изменения влажности по длине образца и по времени подобны представленным на рис. 3.12-3.13.

Для всех зависимостей с увеличением времени процесса кривые однородного и неоднородного уравнений практически совпадают.

На рис. 3.14-3.15 представлены графики зависимости изменения влажности для времени  $\tau = \tau_k$  и сечения  $x = l$ . Граничное условие для правого края – (3.14), функция поглотителей имеет вид (3.39).

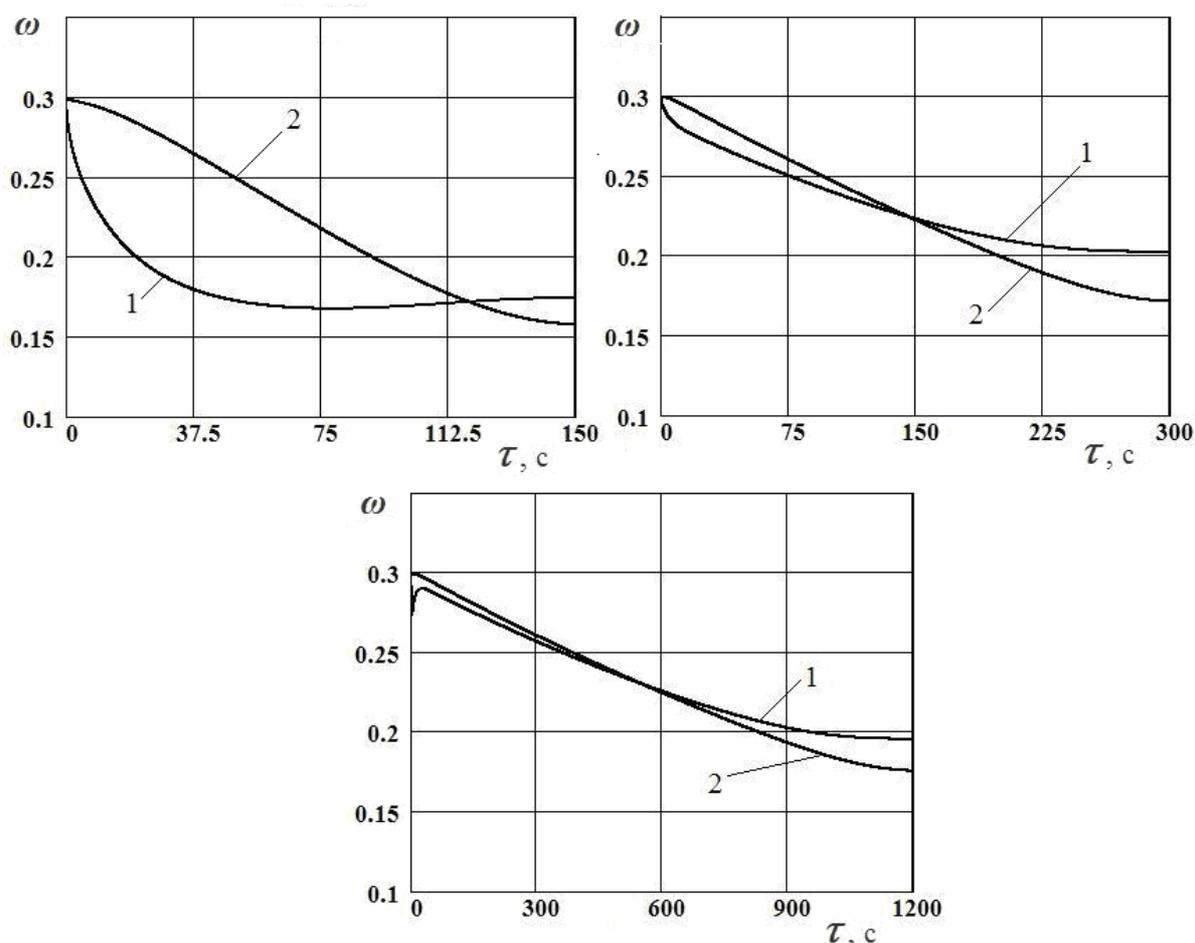


Рис. 3.13. Зависимость изменения влажности от времени для граничного условия (3.6),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

Из графиков изменения влажности по длине образца видно, что кривые для однородного уравнения (кривая 1) расположены выше, чем для неоднородного (кривая 2). Это указывает на превышение величины конечной влажности однородного уравнения над неоднородным (рис. 3.14). Такая же картина наблюдается для графиков изменения влажности по времени (рис. 3.15).

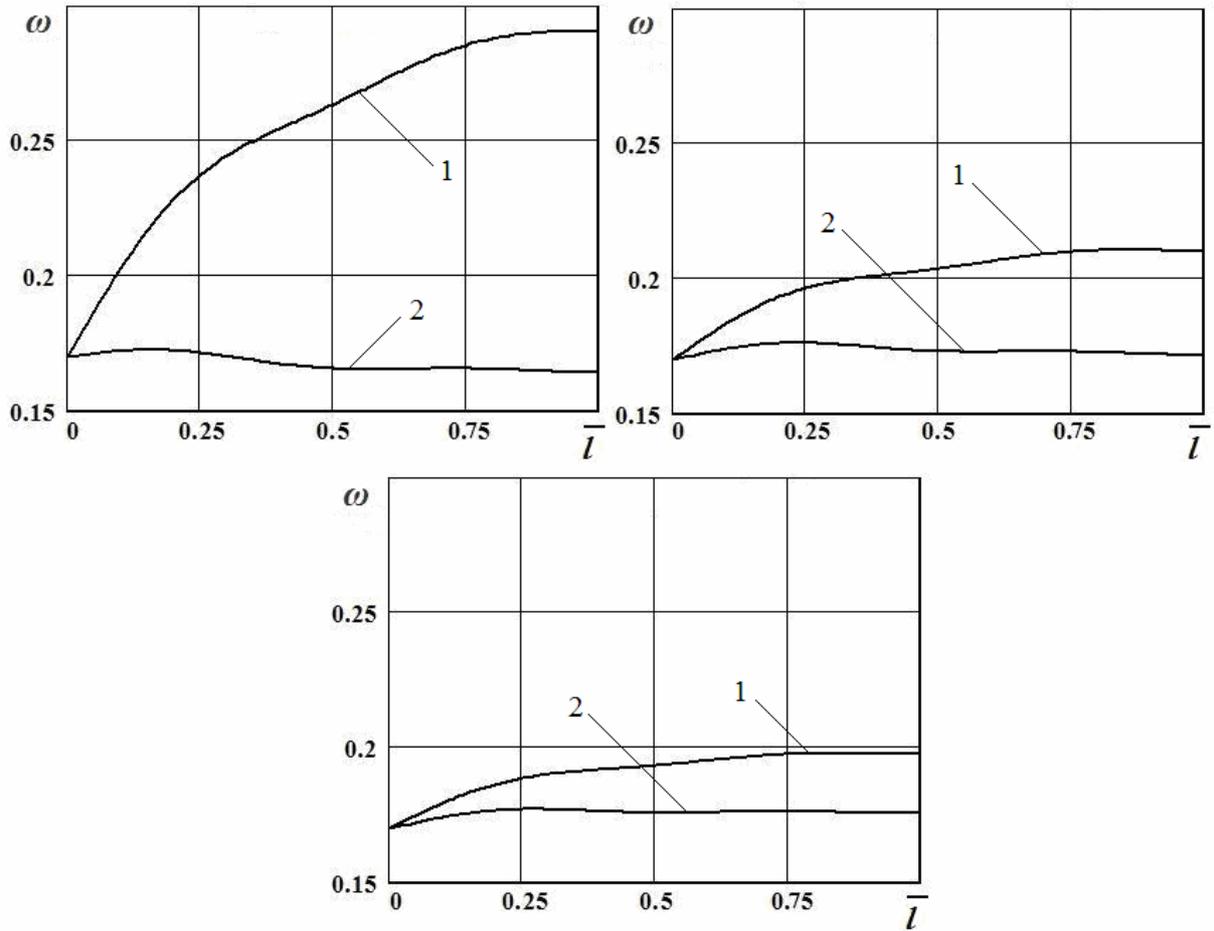


Рис. 3.14. Зависимость изменения влажности по длине образца для граничного условия (3.14),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):  
 1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

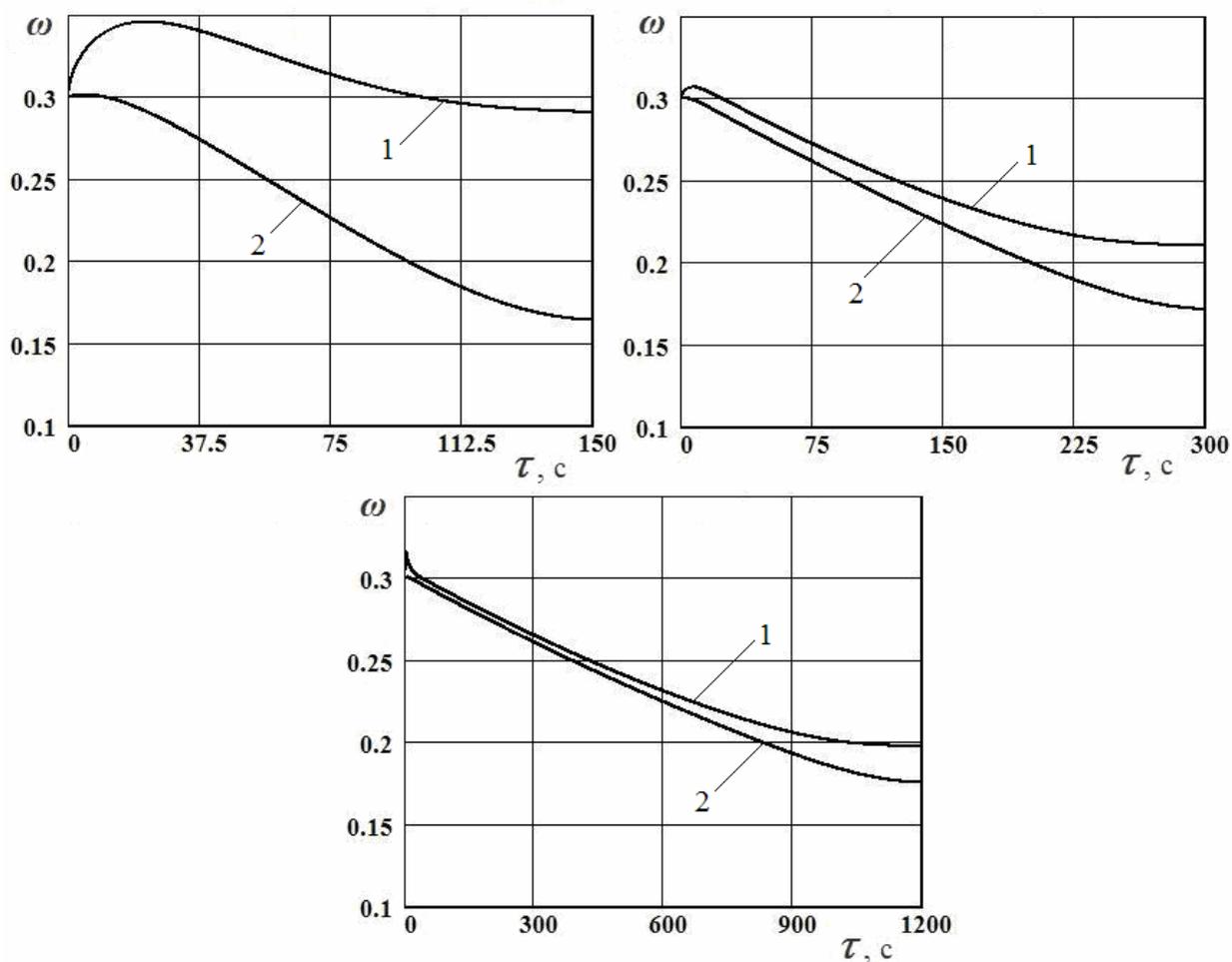


Рис. 3.15. Зависимость изменения влажности от времени для граничного условия (3.14),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

В данном случае функция  $I(x, \tau)$  играет роль поглотителей, забирая влагу из образца, что соответствует физике процесса обезвоживания.

На рис. 3.16-3.17 представлены графики зависимости изменения влажности для момента времени  $\tau = \tau_k$  и сечения  $x = l$ . Граничное условие на правом крае – (3.17), функция поглотителей имеет вид (3.39).

Для графиков зависимости изменения влажности по длине образца для однородного и неоднородного уравнений наблюдается та же закономерность, что и для условий (3.6, 3.7). Однако кривые 1 и 2 расположены ниже заданной конечной влажности (рис. 3.16). Кривые изменения влажности образца по времени резко уходят вниз (рис. 3.17).

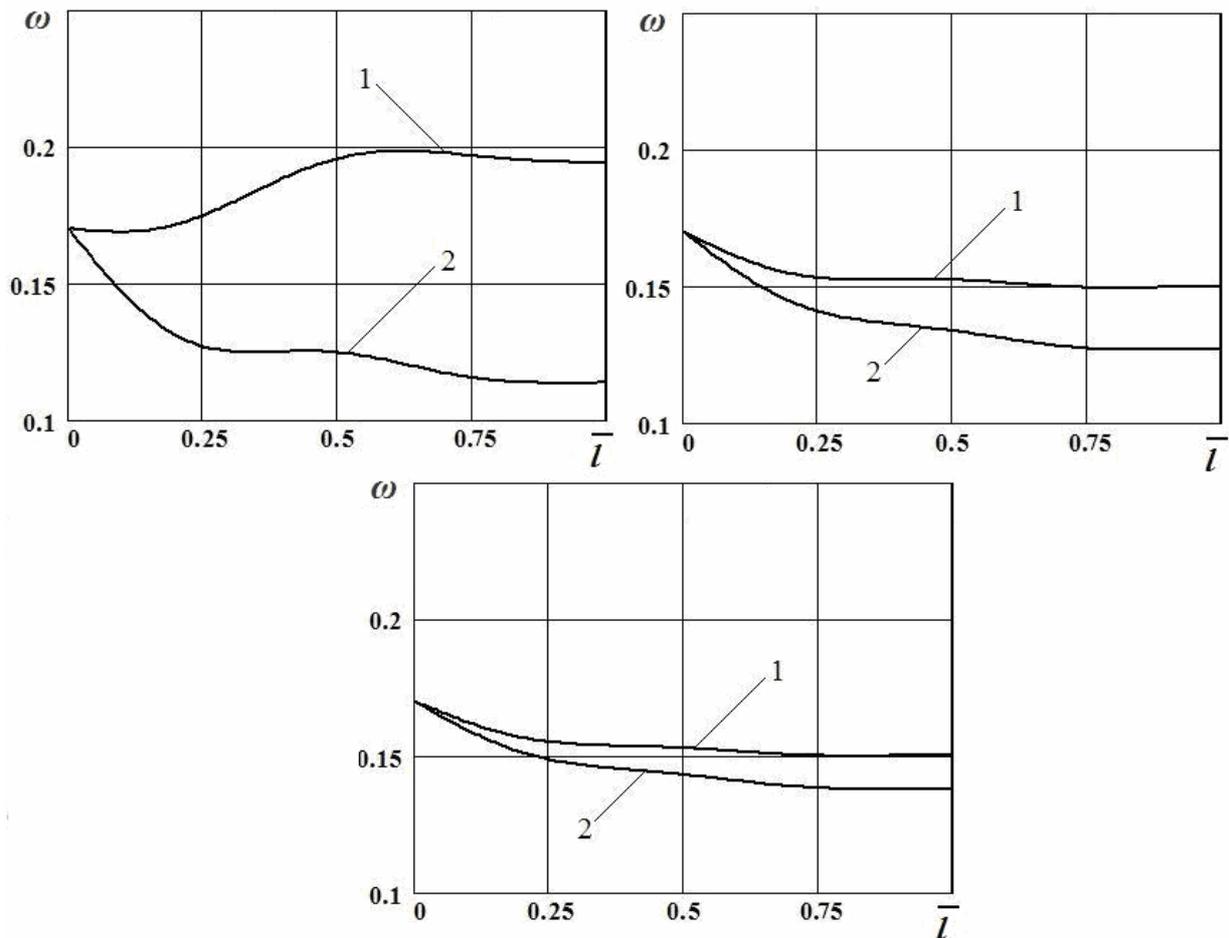


Рис. 3.16. Зависимость изменения влажности по длине образца для граничного условия (3.17),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

Следовательно, для данного условия (3.17) функция поглотителей  $I(x, \tau)$  играет роль поглотителя влаги. При этом процесс удаления влаги из образца идет намного быстрее, чем для краевой задачи (3.14).

Рассмотрев решение неоднородного уравнения диффузии с начальным условием (3.3), граничным условием для левого края (3.4) и комбинациями граничных условий для правого края (3.6, 3.7, 3.14 и 3.17) делаем вывод, что для описания процесса механического обезвоживания наиболее подходят следующие условия:

- начальное – (3.3);
- граничное для левого края – (3.4);
- граничное для правого края – (3.14);
- вид функции поглотителей  $I(x, \tau)$  – (3.39).

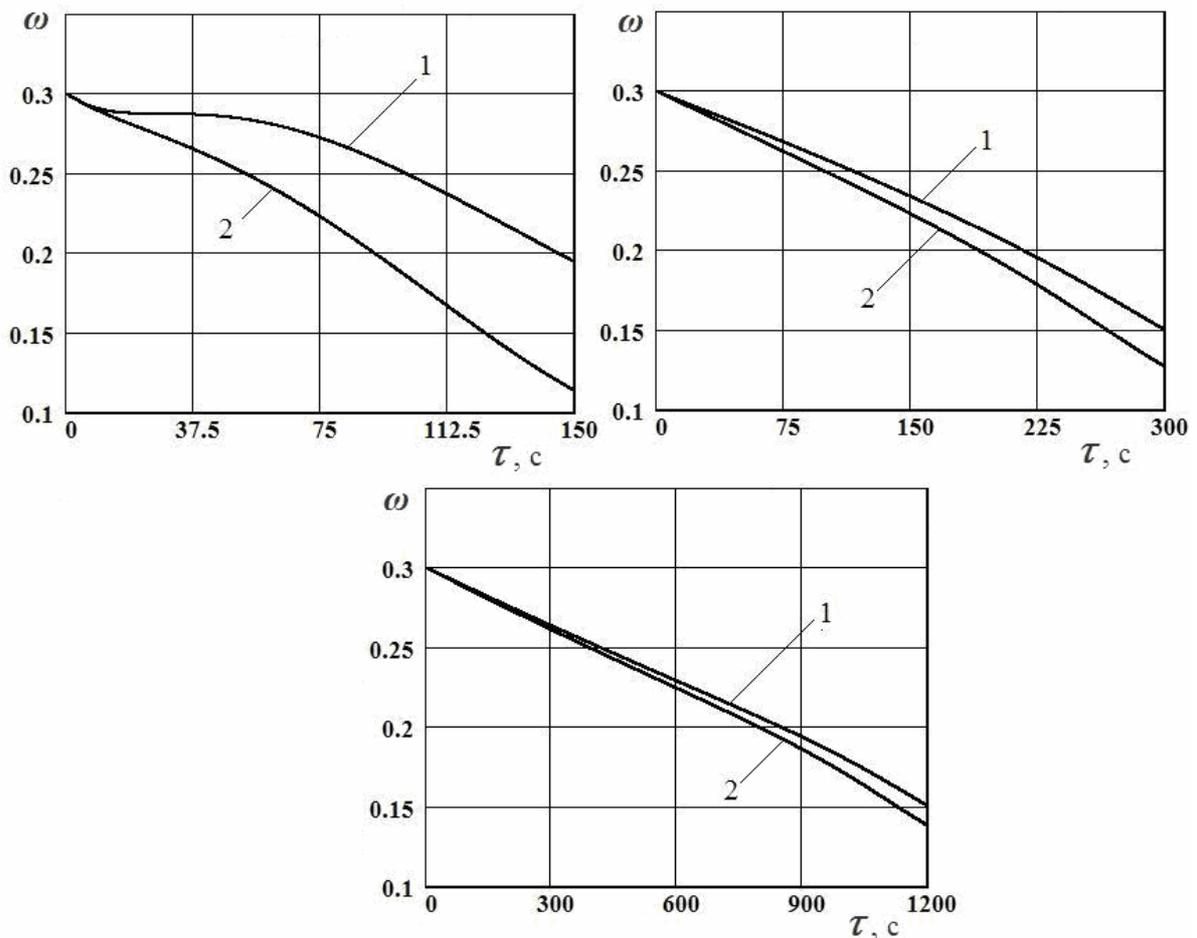


Рис. 3.17. Зависимость изменения влажности от времени для граничного условия (3.17),  $I(x, \tau)$  – условие (3.39):

1 – однородное уравнение, 2 – неоднородное уравнение,  $x = l, \tau = \tau_k$

### Выводы

1. Обосновано применение уравнения диффузии и составление на его основе математической модели процесса механического обезвоживания в прессовой камере.
2. Рассмотрено решение однородного и неоднородного уравнения диффузии методом Фурье при различных граничных условиях: первая, вторая и третья краевая задачи. Начальное условие во всех случаях одинаковое.
3. Приведено решение неоднородного уравнения диффузии при постоянном коэффициенте диффузии и зависящем от времени процесса, что так же позволяет использовать метод Фурье.
4. Рассмотрены различные комбинации граничных условий для правого края и их влияние на полученное решение.
5. Получены аналитические зависимости для определения изменения влажности по длине образца и в любой момент времени с учетом коэффициента диффузии, изменяющегося во времени.
6. Для описания процесса механического обезвоживания наиболее подходят следующие условия:

## РАЗДЕЛ 4

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ

Исходные данные для расчета:

1. Начальная влажность материала,  $\omega_0$ , %.
2. Конечная влажность материала,  $\omega_k$ , %.
3. Толщина слоя карбоната кальция,  $l$ , м.
4. Продолжительность процесса обезвоживания,  $\tau$ , с.

4.1. Определение рационального времени процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке

Схема алгоритма приведена на рис. 4.1. Рациональное время процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке определяем в следующем порядке.

1) Расчет процесса обезвоживания в соответствии с исходными данными (программа приведена в приложении).

Коэффициенты  $q$  и  $I_0$  используются для конкретной конструкции установки с учетом ее технических характеристик и результатов экспериментальных исследований.

2) Получение экспериментальной зависимости влажности материала от продолжительности процесса  $\omega = f(\tau)$  и по длине образца  $\omega = f(x)$ .

3) Перевод полученных величин влажности и времени в относительные единицы по формулам:

$$w_{\text{отн}} = \frac{w_i}{w_0}, \quad t_{\text{отн}} = \frac{t_i}{t}.$$

4) Построение зависимости влажности от времени  $\omega = f(\tau)$  в относительных единицах.

5) Аппроксимация полученной кривой по методу наименьших квадратов для получения соответствующего уравнения  $\omega = f(\tau)$ .

6) Определение первой ( $\omega_1(t)$ ) и второй ( $\omega_2(t)$ ) производных функции  $\omega = f(\tau)$  и построение графиков зависимостей их от времени (рис. 4.2).

7) Исследование первой производной функции  $\omega = f(\tau)$  на экстремум. Определение координаты точки экстремума ( $d\omega_1$ ).

8) Определение рационального времени процесса, соответствующего точке экстремума  $d\omega_1$  на рис. 4.2

$$t_{\text{рац}} = d\omega_1 \cdot t.$$



Рис. 4.1. Алгоритм расчета

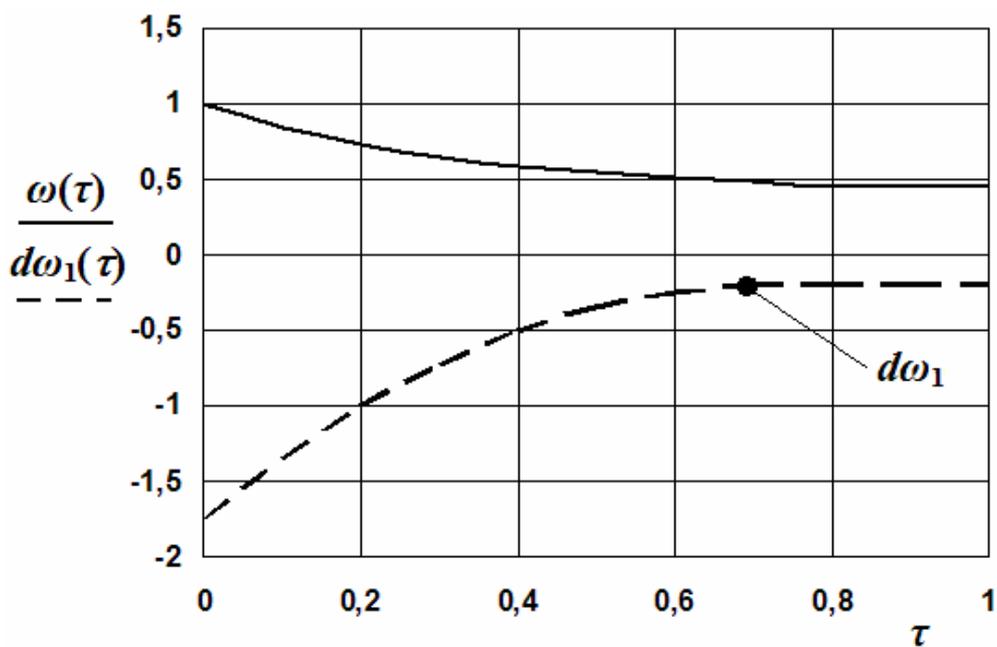


Рис. 4.2. Зависимости функции  $\omega = f(\tau)$  и производной  $d\omega_1(t)$  от времени

Из графика (рис. 4.2) видно, что скорость процесса обезвоживания (кривая  $\omega_1(\tau)$ ) возрастает, достигает максимума (точка  $d\omega_1$ ) и становится постоянной. До точки максимума удаление влаги происходит интенсивно, за этой точкой процесс замедляется. Следовательно, продолжать процесс обезвоживания за точкой экстремума нецелесообразно.

Результаты исследований показали, что при механическом обезвоживании карбоната кальция с технологическими параметрами, рассчитанными по предложенной методике, время процесса обезвоживания уменьшается на 28-30 %. Влажность обезвоженного продукта составляет  $\omega_0 = 0,16-0,18$  при начальной –  $\omega_0 = 0,30-0,35$ .

#### 4.2. Определение рационального давления процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке

По данным экспериментальных исследований зависимости изменения влажности карбоната кальция от давления прессования имеют экспоненциальный характер. Для определения рационального давления механического обезвоживания используем способ на основании определения условного экстремума. Решение задачи осуществляется по экспериментальной зависимости  $\omega = f(p)$ , где  $p$  – давление прессования материала влажностью  $\omega$ .

Рассмотрим логарифмическую зависимость  $\omega = f(p)$

$$w = \ln \frac{w}{w_0} = a \cdot \lg p + b, \quad (4.1)$$

где  $\omega$  и  $\omega_0$  – значения текущей и начальной влажности материала;  $a$ ,  $b$  – параметры, определяемые из эксперимента или экспериментальных кривых.

При достаточно больших величинах давления  $p$ , значительно отличающихся от нуля, величина  $w$  связана линейно с логарифмом  $p$ . Зависимость  $\omega = f(p)$  имеет вид, представленный на рис. 4.3.

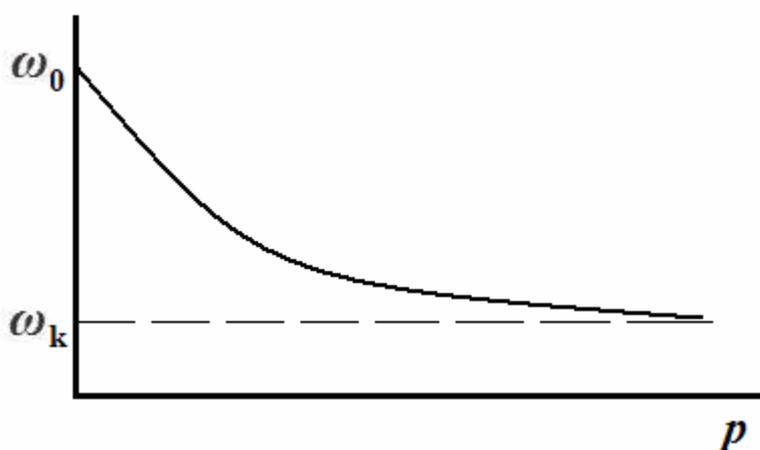


Рис. 4.3. Изменение влажности материала от давления

При приближении к значению  $\omega_k$  влажность практически не меняется даже при очень больших значениях давления. Здесь можно говорить об

условном экстремуме, которому соответствует минимальное давление при заданной, пренебрежимо малой, величине производной  $\frac{dw}{dp}$ .

Дифференцируя выражение (4.1) по  $p$ , получаем

$$\frac{dw}{dp} = \frac{0,434 \cdot a}{p} = \Delta \quad \left( \lim_{p \rightarrow \infty} \Delta = 0 \right). \quad (4.2)$$

Коэффициент  $\Delta$  может быть достаточно малой величиной. Его значение находится в интервале  $\Delta = -0,02 \dots -0,05$ .

Таким образом, при как угодно малых значениях  $\Delta$  производная почти не отличается от нуля. Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются при аппроксимации экспериментальных кривых (рис. 4.3) зависимостью вида  $y = a \cdot \lg p + b$ .

Условный экстремум находим из условия

$$\frac{0,434 \cdot a}{p} = \Delta. \quad (4.3)$$

Отсюда получим выражение для определения рационального давления процесса механического обезвоживания

$$p_{рац} = \frac{0,434 \cdot a}{\Delta}. \quad (4.4)$$

Величину  $w$  находим из выражения (1)

$$w = a \cdot \lg p_{рац} + b. \quad (4.5)$$

Влажность материала, соответствующая рациональному давлению обезвоживания, равна

$$w = w_0 \cdot e^w. \quad (4.6)$$

Подставив формулу (4.5) в (4.6), получим выражение для определения влажности материала в конечном виде

$$w = w_0 \cdot e^{a \cdot \lg p + b}. \quad (4.7)$$

Рассмотрим методику определения рационального давления механического обезвоживания карбоната кальция с начальной влажностью  $\omega_0 = 0,30$ .

1) На рис. 4.4 представлена экспериментальная зависимость влажности материала от давления  $\omega = f(p)$ . Значения влажности материала по оси  $Y$  приведены в относительных единицах, значения давления по оси  $X$  – в МПа.

2) Определяем значения параметров  $a$  и  $b$ . Для этого составим уравнения вида (4.1) или рассмотрим график зависимости  $\omega = f(p)$ .

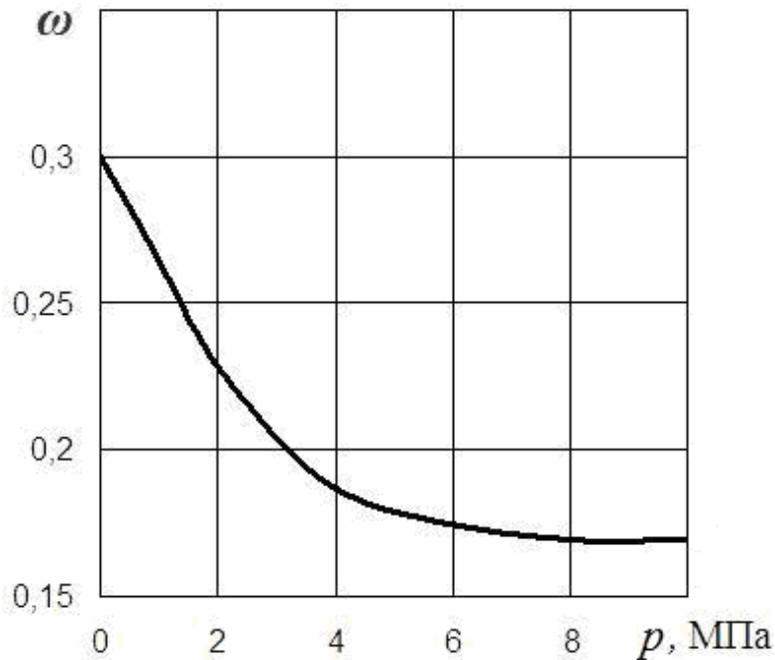


Рис. 4.4. Изменение влажности материала от давления (начальная влажность  $\omega_0 = 0,30$ )

Для влажности материала  $\omega_0 = 0,30$  параметры  $a$  и  $b$  равны  $-0,634$  и  $0,176$  соответственно. Выражение (4.1) запишется в виде

$$w = -0,634 \cdot \lg p + 0,176.$$

3) Из выражения (4.4) при  $\Delta = -0,045$  находим величину рационального давления

$$p_{\text{рац}} = \frac{0,434 \cdot a}{\Delta} = 6,12 \text{ МПа.}$$

4) Конечная влажность материала при давлении  $p_{\text{рац}} = 6,12$  МПа определится из (4.7) и составит  $\omega = 0,17$ .

#### 4.3. Оценка геометрических параметров и расчет производительности прессовой установки для обезвоживания карбоната кальция

На основании проведенных экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию карбоната кальция определим геометрические параметры камеры и производительность прессовой установки.

Для этого имеем:

1. Площадь поперечного сечения лабораторной камеры  $S = 0,0028 \text{ м}^2$ .
2. Начальная высота материала в камере  $H_0 = 0,15 \text{ м}$ .
3. Плотность карбоната кальция до прессования  $\rho_{01} = 1600 - 1900 \text{ кг/м}^3$ .
4. Плотность карбоната кальция после прессования  $\rho_1 = 2100 - 2300 \text{ кг/м}^3$ .

Условия подобия для процесса прессования материалов из [43] имеют вид

$$e = idem; \quad \frac{H_0}{d} = \frac{H_{01}}{d_1} = idem; \quad \frac{r}{r_0} = \frac{r_1}{r_{01}} = idem \quad (4.8)$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация;

$H_0$  – начальная высота материала в лабораторной камере;

$H_{01}$  – начальная высота слоя материала в проектируемой камере;

$d$  – диаметр лабораторной камеры;

$d_1$  – диаметр проектируемой камеры;

$\rho_0$  – плотность материала до прессования;

$\rho$  – плотность материала после прессования.

Данные условия подобия позволяют перейти от лабораторного образца к промышленной прессовой камере. Основные характеристики промышленных брикетировочных прессов [49] приведены в таблице 4.1.

Из таблицы 4.1 принимаем площадь поперечного сечения камеры  $S = 0,36 \text{ м}^2$ . Тогда диаметр камеры будет равен

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\rho}} = 0,68. \quad (4.9)$$

Принимаем  $d_1 = 0,7 \text{ м}$ . На основании условий подобия (4.8) определяем начальную высоту материала в промышленной камере:

$$H_{01} = \frac{H_0 \cdot d_1}{d} = 1,75. \quad (4.10)$$

Таблица 4.1 – Основные характеристики брикетировочных прессов

Параметры	Б-1642	ЧПА-1250	ПЛ-450
Плотность брикета, кг/м <sup>3</sup>	2000-2500	2500-3000	2000-2500
Масса брикета, кг	2500-3000	до 3000	600-1200
Длина камеры, м	2	2	1,5
Площадь поперечного сечения камеры, м <sup>2</sup>	0,81	0,81	0,36
Давление прессования, МПа	16	19	12,9
Производительность, т/ч	12-20	12-18	15-20

Из экспериментальной диаграммы  $\varepsilon = f(p)$  для камеры  $d = 0,06$  м берем значение относительной деформации  $\varepsilon = 0,33$  и рассчитываем перемещение штампа  $\Delta H_1$  и конечную высоту брикета материала  $H_{бр}$ .

$$\Delta H_1 = H_{01} \cdot \varepsilon; \quad H_{бр} = H_{01} - \Delta H_1.$$

$$\Delta H_1 = 0,578 \text{ м}, \quad H_{бр} = 1,172 \text{ м}.$$

Определим объем брикета карбоната кальция и его массу

$$V_1 = H_{бр} \frac{p \cdot d_1^2}{4}, \quad m_{бр} = V_1 \cdot r_1.$$

$$V_1 = 0,451 \text{ м}^3, \quad m_{бр} = 947 - 1037 \text{ кг}.$$

Объем камеры промышленной установки равен

$$V_{01} = H_{01} \frac{p \cdot d_1^2}{4}, \quad V_{01} = 0,673 \text{ м}^3.$$

Определим массу материала, загружаемого в камеру. Плотность карбоната кальция  $\rho_{01} = 1600 - 1900 \text{ кг/м}^3$ .

$$m = 1077 - 1279 \text{ кг}.$$

Производительность промышленной прессовой установки определим по формуле

$$Q = \frac{60 \cdot r_1 \cdot V_1}{t \cdot 1000},$$

где  $V_1$  – объем брикета,  $\text{м}^3$ ;

$\rho_1$  – плотность обезвоженного продукта,  $\text{кг/м}^3$ ;

$t$  – общее время процесса, мин.

Общее время процесса обезвоживания включает в себя:  $\tau_1$  – время загрузки материала,  $\tau_2$  – время обезвоживания материала,  $\tau_3$  – время выгрузки материала,  $\tau_4$  – время подготовительно-заключительных работ. Принимаем  $\tau_1 = 1$  мин;  $\tau_2 = 3$  мин;  $\tau_3 = 1$  мин;  $\tau_4 = 1,5$  мин.

Отсюда производительность прессовой установки равна:

$$Q = 8,742 - 9,575 \text{ т/ч}.$$

#### 4.4. Технологическая линия по переработке карбоната кальция

Механическое обезвоживание позволяет уменьшить исходную влажность карбоната кальция с 25-30 % до 15-17 %. Из таблицы 4.2 видно, что данный процесс менее энергоемкий по сравнению с сушкой. Кроме того, не используется тепловая энергия – дорогостоящая составляющая сушки.

Следовательно, механическое обезвоживание, даже по оценочным данным таблицы 4.2, экономически выгодно применять на предприятиях по переработке карбоната кальция. В технологической цепи оборудования для сушки природного мела его целесообразно использовать на начальном этапе переработки, где исходная влажность материала составляет 25-30 %.

Таблица 4.2 – Сравнительные данные различных видов сушки

Типы сушилок	Время сушки, мин.	Потребляемая энергия, Вт/кг	Удельный расход тепла, Вт/кг
Барабанные	20	55	2900
Шахтные	20-30	25	2320
Вибрационные	4	1,77	1330
Механическое обезвоживание	4-5	12,2	отсутствует

Следовательно, механическое обезвоживание, даже по оценочным данным таблицы 4.2, экономически выгодно применять на предприятиях по переработке карбоната кальция. В технологической цепи оборудования для сушки природного мела его целесообразно использовать на начальном этапе переработки, где исходная влажность материала составляет 25-30 %.

Основная задача предприятия по переработке карбоната кальция состоит в подготовке исходного сырья к измельчению и окончательной сушке. Мельничный сушильно-измельчительный агрегат в комплексе с классифицирующим оборудованием способен перерабатывать материалы с исходной влажностью не выше 5 %. Исходное сырье имеет начальную влажность 25-30 % и более. Поэтому необходимо обеспечить конечную влажность материала, пригодную для окончательной переработки.

Технологическая линия производства карбоната кальция состоит из ряда технологически согласованного и кинематически увязанного оборудования (рис 4.5).

Исходный продукт влажностью 25-30 %, доставленный из карьера, загружается в бункер 1, откуда питателем 2 подается непосредственно в прессовую установку 3 для механического обезвоживания.

Обезвоженный карбонат кальция в виде брикетов влажностью 15-17 % по ленточному конвейеру 4 подается в дробилку 5 для измельчения и затем в вибрационную сушильную установку 6. Одновременно от теплогенератора 7 в виброконвейер подается сушильный агент с температурой до 400°C. Сушильный агент представляет собой продукт сгорания смеси воздуха с природным газом. Газ поступает непосредственно от газовой магистрали низкого давления, а исходный воздух обеспечивается вентилятором 8. Отвод сушильного агента с паром и мелкими частицами мела осуществляется по трубопроводу через циклоны 9 вентилятором 10.

Сушеный карбонат кальция с остаточной влажностью не более 5 % из вибросушильной установки 6 поступает в вентилируемую мельницу 11, где происходит окончательная сушка и измельчение.

Вентилируемая мельница 11 работает в замкнутом цикле с сепаратором 12. Крупный некондиционный материал из сепаратора возвращается на доизмельчение в вентилируемую мельницу, кондиционный продукт из сепаратора 12 поступает в батарейный циклон 13 и рукавный фильтр 14. Работа рукавного фильтра обеспечивается вентилятором 15, через который очищенный газ выбрасывается в атмосферу.

Осажденный карбонат кальция из батарейного циклона 13 и рукавного фильтра 14 шнековым конвейером 16 и элеватором 17 подается в бункер 18 готового продукта. Из бункеров готового продукта карбонат кальция подается на затаривающие машины 19.

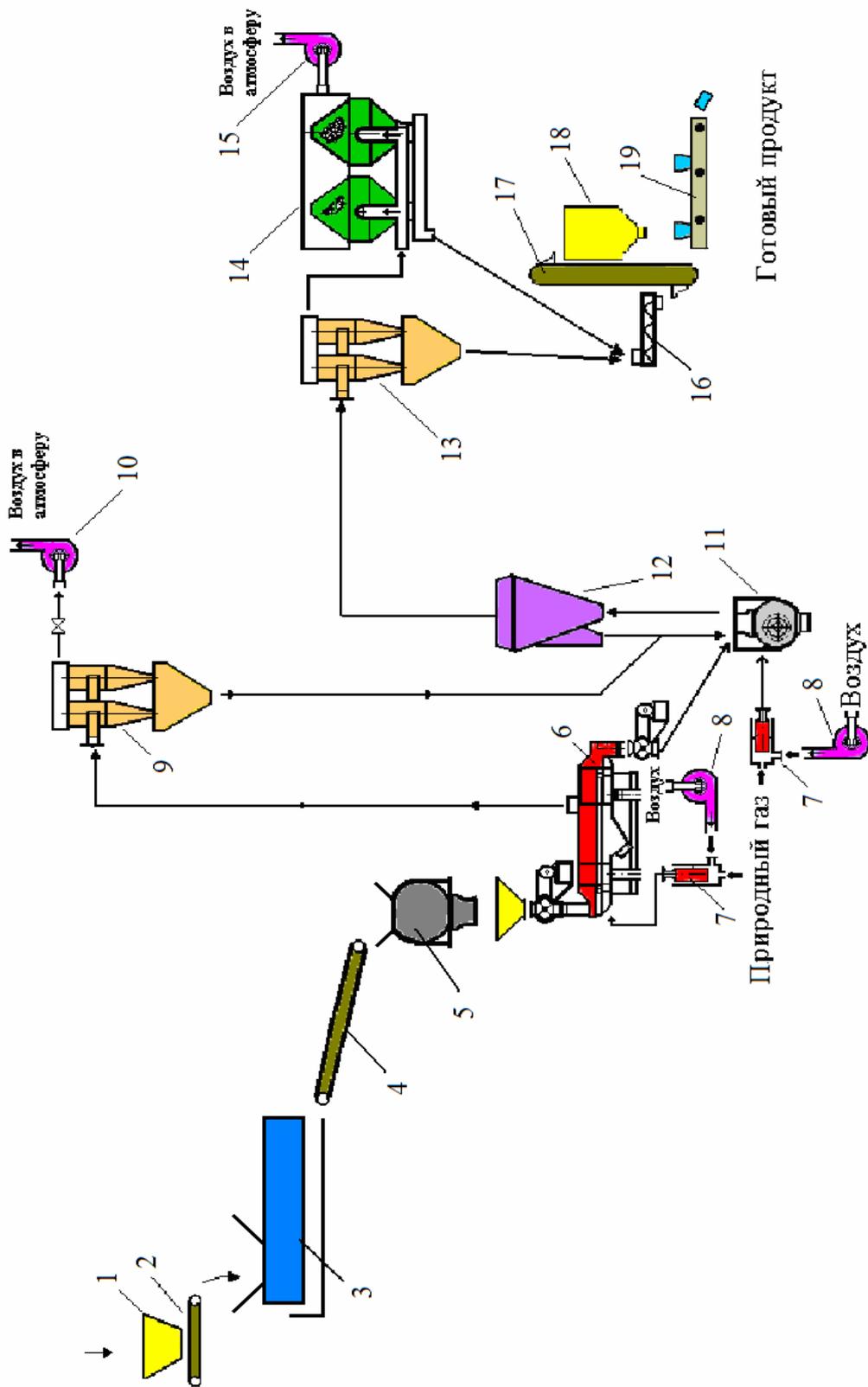


Рис. 4.5. Технологическая линия по переработке карбоната кальция

## Выводы

1. Определено рациональное время процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке. Составлена программа в пакете MathCAD.
2. Определено рациональное давление процесса механического обезвоживания карбоната кальция на прессовой установке
3. Рассчитаны геометрические параметры камеры обезвоживания, производительность прессовой установки
4. Приведена технологическая линия по переработке карбоната кальция, включающая в себя прессовую установку механического обезвоживания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе решена актуальная научно-практическая задача – исследование процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой установке и разработки методики расчета рациональных технологических параметров прессовых установок.

Основные научные результаты и выводы.

1. Проведенные исследования на экспериментальной прессовой установке с камерой обезвоживания позволили установить влияние физико-механических свойств карбоната кальция на кинетику механического обезвоживания.

2. Получены экспериментальные зависимости кинетики отжима влаги из карбоната кальция с различными значениями начальной влажности материала и конструктивными особенностями прессовой камеры.

3. Установлено, что при механическом обезвоживании карбоната кальция, когда давление возрастает по линейному закону во времени, снижения влажности материала происходит по экспоненциальному закону, что позволяет уменьшить влажность до  $\omega = 0,16-0,18$  при начальной влажности в интервале  $\omega = 0,25-0,35$ .

4. Обосновано, что при механическом обезвоживании карбоната кальция в экспериментальной прессовой установке с камерой обезвоживания, рациональное значение давления прессования находится в интервале  $p = 5-6$  МПа, длительность процесса находится в интервале  $\tau_k = 150-300$  с, что позволяет уменьшить влажность материала до  $\omega = 0,16-0,18$ .

5. Установлено, что расположение отверстий в камере не влияет на кинетику изменения влажности, а выход карбоната кальция через отверстия составляет 5-16 % от общей массы исходного продукта.

6. Разработанная математическая модель процесса механического обезвоживания карбоната кальция на основе неоднородного уравнения диффузии позволяет определить изменение влажности по длине образца в любой момент времени с учетом коэффициента диффузии, который изменяется во времени.

7. Разработанная методика расчета рационального времени и давления процесса механического обезвоживания карбоната кальция в прессовой установке позволяет уменьшить время обезвоживания в прессовой камере на 28-30 %.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кусков В.Б. Обогащение и переработка полезных ископаемых / Кусков В.Б., Никитин М.В. – СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т, 2002. – 84 с.
2. Обогащение полезных ископаемых. Комплексное использование сырья, продуктов и отходов обогащения / [Харитонов В.Г., Ремезов А.В., Сорокина О.В., Сорокина Л.В., Ануфриев В.М.]. – Кемерово: КузГТУ, 2006. – 327 с.
3. Гольдберг Ю.С. Процессы и оборудование для обезвоживания руд / Гольдберг Ю.С. – М.: Недра, 1977. – 168 с.
4. Гольдберг Ю.С. Обезвоживание концентратов черных металлов / Гольдберг Ю.С., Гонтаренко А.А. – М.: Недра, 1986. – 182 с.
5. Фридман С.Э. Обезвоживание продуктов обогащения / Фридман С.Э. – М.: Недра, 1988. – 239 с.
6. Руденко К.Г. Обезвоживание и пылеулавливание / Руденко К.Г., Шемаханов М.М. – М.: Недра, 1981. – 352 с.
7. Смирнов В.О. Технология збагачення вугілля / Смирнов В.О., Сергеев П.В., Білецький В.С. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2011. – 476 с.
8. Шкоропад Д. Е. Центрифуги и сепараторы для химических производств / Д. Е. Шкоропад, О. П. Новиков. – М.: Химия, 1987. – 256 с.
9. Лукьяненко В. М. Центрифуги / Лукьяненко В. М., Таранец А. В. – М.: Химия, 1988. – 383 с.
10. Файнерман И.А. Расчет и конструирование шнековых центрифуг / Файнерман И.А. – М.: Машиностроение, 1981. – 133 с.
11. Поникаров И.И. Машины и аппараты химических производств / Поникаров И.И., Перелыгин О.А. – М.: Машиностроение, 1988. – 369 с.
12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / Касаткин А.Г. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
13. Тимонин А.С. Машины и аппараты химических производств / Тимонин А.С. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2008. – 872 с.
14. Леонтьева А.И. Оборудование химических производств / Леонтьева А.И. – М.: КолосС Химия, 2008. – 479 с.
15. Баландин С.М. Фильтрование грубозернистых материалов / Баландин С.М. – М.: Недра, 1988. – 130 с.
16. Ефимов И.Н. Обезвоживание и прессование бумажного полотна / Ефимов И.Н. – Красноярск.: Изд-во Краснояр. ун-та, 1988. – 151 с.
17. Развалов Г.И. Промышленные центрифуги химических производств / Г.И. Развалов, Ю.А. Дулатов, В.Н. Дорония. – Казань: КХТИ, 1978. – 57 с.
18. Казяев М.Д. Конструирование и расчет сушильных агрегатов / Казяев М.Д., Шаврин В.С., Ренжин И.П. – Свердловск: УПИ, 1989. – 76 с.
19. Севернев М.М. Механическое обезвоживание и термическая сушка высоковлажных кормов / Севернев М.М., Терпиловский К.Ф., Майонов В.В. – М.: Колос, 1980. – 149 с.

20. Календерьян В.А. Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое / Календерьян В.А., Корнараки В.В. – Киев, 1982. – 158 с.
21. Губарева В.В. Сушка твердых дисперсных материалов / Губарева В.В. – Белгород: БелГТАСМ, 1999. – 77 с.
22. Іскович-Лотоцький Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 206 с.
23. Наумович В.М. Искусственная сушка торфа / Наумович В.М. – М.: Недра, 1984. – 222 с.
24. Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых / Елишевич А.Т. – Киев: Лыбидь, 1990. – 295 с.
25. Равич Б.М. Брикетирование руд / Равич Б.М. – М: Недра, 1982. – 184 с.
26. Крохин В.Н. Брикетирование углей / Крохин В.Н. – М.: Недра, 1984. – 224 с.
27. Василенко М.Н. Брикетирование твёрдых топлив / Василенко М.Н. – М.: Недра, 1987. – 230 с.
28. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии / Равич Б.М. – М.: Металлургия, 1975. – 232 с.
29. Равич Б.М. Комплексное использование сырья и отходов / Равич Б.М., Окладников В.П. – М.: Химия, 1988. – 288 с.
30. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов / Коротич В.И. – М.: Металлургия, 1986. – 235 с.
31. Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья / Ожогин В.В. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – 442 с.
32. Гриншпун Л.В. Штемпельные прессы для брикетирования бурых углей / Гриншпун Л.В., Кубинцев М.Г. – М.: Недра, 1988. – 262 с.
33. Булышко М.Г. Технология торфобрикетного производства / Булышко М.Г., Петровский Е.Е. – М.: Недра, 1988. – 312 с.
34. Лазарев А.В. Технология производства торфяных брикетов / Лазарев А.В., Лыкин Б.Г., Демьянов Е.С. – М.: Недра, 1984. – 264 с.
35. Горфин О.С. Машины и оборудование по переработке торфа / Горфин О.С. – М.: Недра, 1990. – 317 с.
36. Кожевников И.Ю. Окускование и основы металлургии / Кожевников И.Ю. – М.: Металлургия, 1991. – 303 с.
37. Брагинский В.А. Прессование / Брагинский В.А. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.
38. Гуль В.Е. Основы переработки пластмасс / Гуль В.Е., Акутин М.С. – М.: Химия, 1985. – 400 с.
39. Уманский А.М. Прессование порошковых материалов. / Уманский А.М. – М. Металлургия, 1987. – 80 с.
40. Голенков В.А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / Голенков В.А., Дмитриев Голенков А.М., Яковлев С.С. – М.: Машиностроение, 2004. – 464 с.

41. Кучинскас З.М. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов / З.М. Кучинскас, В.И. Особов, Ю.Л. Фрегер. – М.: Агропромиздат, 1988. – 208 с.
42. Наумович В.М. Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов / Наумович В.М. – М.: Недра, 1971. – 280 с.
43. Богатов Б.А. Моделирование и оптимизация процессов брикетного производства / Богатов Б.А. – М.: Недра, 1976. – 190 с.
44. Бельгейзимер Я.Е. Физическая механика гидростатической обработки материалов / Бельгейзимер Я.Е., Варюхин В.Н., Эфрос Б.М. – Донецк: ДонФТИ НАНУ.- 2000.-196с.
45. Бочаров Ю.А. Винтовые прессы / Бочаров Ю.А. – М.: Машиностроение, 1976. – 247 с.
46. Логинов Ю.Н. Механика валкового брикетирования сыпучих материалов / Логинов Ю.Н. – Екатеринбург: 2011. – 299 с.
47. Мурадов Г.С. Получение гранулированных удобрений прессованием / Мурадов Г.С., Шомин И.П. – М.: Химия, 1985. – 208 с.
48. Кольман-Иванов Э.Э. Таблетирование в химической промышленности / Кольман-Иванов Э.Э. – М.: Химия, 1976. – 200 с.
49. Морозов С.И. Машинист прессовых установок для переработки металлолома / Морозов С.И., Бобылев Л.И. – М.: Metallurgy, 1988. – 150 с.
50. Industrial briquetting: fundamentals and methods / Z. Drzymala; Transl. from polish by T.Bylica. – Amsterdam etc.: Elsevier, 1993. – 442 p.
51. Клешнин А.А. Исследование проницаемости фильтровальных осадков / Клешнин А.А., Гончаренко Е.А. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 9(50). – С. 68-73.
52. Гарковенко Е.Е. Анализ уравнения перемещения границы раздела газ-жидкость в поровой среде осадка / Гарковенко Е.Е. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2003. – Вип. 17(58). – С. 114-120.
53. Безденежных А.А. Математические модели химических реакторов / Безденежных А.А. – “Техніка”, 1970. – 176 с.
54. Марчук Г.И. Математическое моделирование химических реакторов / Марчук Г.И. – Новосибирск.: Наука, 1984. – 163 с.
55. Смирнов М.Н. Химические реакторы в примерах и задачах / Смирнов М.Н., Волжинский А.И. – Л.: Химия, 1986. – 224.
56. Баренблатт Г.И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. – М.: Недра, 1984. – 207 с.
57. Данилов В.Л. Гидродинамические расчеты взаимного вытеснения жидкостей в пористой среде / Данилов В.Л., Кац Р.М. – М.: Недра, 1980. – 264 с.
58. Полубаринова-Кочина П.Я. Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917-1967) / Полубаринова-Кочина П.Я., Нумеров С.Н. и др. – М.: Наука, 1969. – 545 с.
59. Басниев К.С. Подземная гидравлика / Басниев К.С., Власов А.М., Кочина И.Н., Максимов В.М. – М.: Недра, 1986. – 303 с.

60. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации / Леонтьев Н.Е. – М.: Изд-во Центра прикл. иссл-й при мех-мате МГУ, 2009. – 88 с.
61. Dietrich P. Flow and Transport in Fractured Porous Media / Dietrich P., Helmig R., Sauter M., Hötzl H. – Berlin [etc.] : Springer, 2005. – 465 p.
62. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод / Полубаринова-Кочина П.Я. – М.: Наука, 1977. – 664 с.
63. Дерягин Б.В. Вода в дисперсных средах / Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
64. Коновалов А.Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости / Коновалов А.Н. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1988. – 166 с.
65. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л.Г. – М.: ООО «Дрофа», 2003. – 840 с.
66. Баренблатт Г.И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
67. Гиргидов А.Д. Техническая механика жидкости и газа / Гиргидов А.Д. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – 395 с.
68. Лунев В.Д. Фильтрование в химической промышленности / Лунев В.Д., Емельянов Ю.А. – Л.: Химия, 1982. – 72 с.
69. Ганжа В.Л. Фильтрация двухфазных однокомпонентных потоков в дисперсных средах / Ганжа В.Л., Журавский Г.И. – Минск: Наука и техника, 1988. – 112 с.
70. Гаркушин Ю.К. Рациональные пределы влажности при механическом обезвоживании мелкозернистых материалов / Гаркушин Ю.К., Белецкий В.С., Сергеев П.В. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 15(56). – С. 88-92.
71. Пейчев И.Д. Исследование теоретических закономерностей течения жидкости через пористую среду / Пейчев И.Д. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 20(61). – С. 99-104.
72. Пейчев И.Д. Теоретические основы фильтрования угольных суспензий / Пейчев И.Д. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 25(66) – 26(67). – С. 144-148.
73. Полулях А.Д. Определение границ применимости закона Дарси для зернистых сред / Полулях А.Д., Гончаренко Е.А., Кочетов Ю.В. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 10(51). – С. 81-87.
74. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий / Жужиков В.А. – М.: Химия, 1980. – 412 с.
75. Майдуков Г.Л. Технология фильтрования продуктов обогащения углей / Майдуков Г.Л. – М.: Недра, 1975. – 142 с.
76. Гарковенко Е.Е. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов / Гарковенко Е.Е., Назимко Е.И., Самойлов А.И., Папушин Ю.Л. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – 266 с.
77. Гарковенко Е.Е. Анализ уравнения переноса вещества в пористой среде тонкодисперсных осадков / Гарковенко Е.Е. // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – 2003. – Вип. 7. – С. 49-55.

78. Назимко О.І. Аналітичне дослідження впливу проникності осадів на переміщення речовини в порах / Назимко О.І., Гарковенко Є.Є., Морозова В.Г. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 20(61). – С. 83-88.
79. Назимко Е.И. К вопросу об исследовании перемещения влаги в порах осадков при их переменной проницаемости / Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 21(62). – С. 86-92.
80. Назимко Е.И. Влияние закона распределения проницаемости вдоль поры на длительность переходных процессов / Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 22(63). – С. 128-135.
81. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Тихонов А.Н., Самарский А.А. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
82. Полянин А.Д. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики: Точные решения / Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. – М.: Физматлит, 2002. – 432 с.
83. Дезин А.А. Общие вопросы теории граничных задач / Дезин А.А. – М.: Наука, 1980. – 207 с.
84. Амелькин В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях / Амелькин В.В. – М.: Наука, 1987. – 157 с.
85. Дейнека В.С. Модели и методы решения задач в неоднородных средах / Дейнека В.С., Сергиенко И.В. – К.: Наукова думка, 2001. – 605 с.
86. Паус К.Ф. Химия и технология мела / Паус К.Ф., Евтушенко Н.С. – М.: Стройиздат, 1977. – 137 с.
87. Иванов Н.С. Производство и потребление мела / Иванов Н.С., Мясников Н.Ф. – Белгород: Полиграф-интер, 2000. – 263 с.
88. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов / Лысенко М.П. – М.: Недра, 1972. – 320 с.
89. Шеин Е.В. Курс физики почв / Шеин Е.В. – М.: М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
90. Гольдберг В.М. Проницаемость и фильтрация в глинах / Гольдберг В.М., Скворцова Н.П. – М.: Недра, 1986. – 160 с.
91. Богатов Б.А. Искусственная сушка горных пород: Учеб. пособие / Богатов Б.А., Куптель Г.А., Яцковец А.И. – Минск: БНТУ, 2004. – 156 с.
92. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Сажин Б.С. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
93. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности / Лыков М. В. – М.: Химия, 1970. – 430 с.
94. Мел природный обогащенный. Метод определения содержания влаги: ГОСТ 19219-73. Издательство стандартов, 1988.
95. Мел природный обогащенный. Технические условия: ГОСТ 12085-88. Издательство стандартов, 1988.
96. Мел. Виды, марки и основные технические требования: ГОСТ 17498-72. Издательство стандартов, 1988.

97. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды / Шейдеггер А.Э – М.-Ижевск, 2008. – 254 с.
98. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / Маскет М. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006. – 628 с.
99. Каган А.А. Расчетные характеристики грунтов / Каган А.А. – М.: Стройиздат, 1985. – 284 с.
100. Цытович Н.А. Механика грунтов / Цытович Н.А. – М.: Высш. школа, 1983. – 288 с.
101. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: ГОСТ 5180-84. М., 1986.
102. Алексеев В.М. Физико-механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения / Алексеев В.М., Калугин П.И. – Воронеж, 2009. – 89 с.
103. Морозов Ю.П. Механизм структурообразования брикетов из влажных дисперсных материалов / Морозов Ю.П., Петровская Н.И. // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 2004. – № 4. – С. 101-109.
104. Анциферов А.В. Результаты экспериментальных исследований по механическому обезвоживанию мела / Анциферов А.В., Богданов А.А. // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – № 29 (70) – 30 (71). С. 190 – 194.
105. Кривошея С.А. Диференціальні та інтегральні рівняння / Кривошея С.А., Перестюк М.О., Бурим В.М. – К. Либідь, 2004. – 407 с.
106. Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных / Михайлов В.П. – М.: Наука., 1983. – 424 с.
107. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Камке Э. – М.: Наука, 1976.
108. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
109. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / Митропольский А.К. – М.: Наука, 1971. – 576 с.
110. Федоскин В.А. Экспериментальные исследования по обезвоживанию мела в прессовой камере / Федоскин В.А., Богданов А.А. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць, Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 62. – С. 4-9.

Наукове видання

**Богданов Олександр Олександрович**

## **ТЕХНОЛОГІЯ МЕХАНІЧНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ**

Монографія

(Російською мовою)

Друкується в авторській редакції

Підписано до друку 15.12.2015. Формат 30×42/4.  
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 5,6.  
Обл.-вид. арк. 5,6. Тираж 25 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та видруковано  
у Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.  
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.