ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Е.И. Шмитько

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Том 2

Практические занятия, лабораторный практикум
курсовое проектирование, расчеты аппаратов

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано редакционно-издательским советом Воронежского государственного архитектурно-строительного университета в качестве учебно-методического пособия для студентов, обучающихся по направлению 270100 «Строительство»

Воронеж, 2009

УДК 666.972 (075)
ББК 38.32

Шмитько Е.И. Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий: Учебн. пособие /Е.И. Шмитько/ Воронежский государственный архитектурно строительный университет. – Воронеж, 2009. – Том 2 (практические и лабораторные занятия, курсовое проектирование, расчеты аппаратов)– 383 с.

JSBN 978-5-89040-166-3

Во втором томе учебного пособия предоставлены учебно-методические материалы, касающиеся проведения практических и лабораторных занятий, постановки курсового проектирования (включая расчеты аппаратов) в плане комплексного освоения дисциплины «Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий». Из них содержание практических занятий, методика выполнения курсовых проектов и расчетов аппаратов доступны для реализации в любом вузе, где ведется преподавание данной дисциплины. Постановка же лабораторных работ по излагаемым в учебном пособии методикам требует специального лабораторного оборудования. В отсутствии такого оборудования проводятся другие работы, не выходящие за рамки общего содержания дисциплины. Но при этом важно сохранить общую идею моделирования, оптимизации, управления технологическими процессами, которая заложена в предлагаемом учебном пособии.

Предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по направлению "Строительство". Учебное пособие может оказаться также полезным для аспирантов, работающих по проблемам строительного материаловедения.

Ил. Табл. . Библиогр. … назв.

УДК 666.972 (075)
ББК 38.32

Рецензенты: М.С. Гаркави- заведующий кафедрой «Строительные материалы и изделия» Магнитогорского государственного технического университета;
Кафедра «Технологии бетонов, керамики и вяжущих» Пензинского государственного университета архитектуры и строительства

JSBN 978-5-89040-166-3

© Шмитько Е.И.
© Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2009

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко 2-му тому.....4
Практические занятия.....5
Лабораторный практикум.....53
Курсовое проектирование.....121
Расчеты аппаратов.....227

ПРЕДИСЛОВИЕ КО 2-МУ ТОМУ

В этой части общего учебно-методического комплекса по дисциплине «Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий» представлены методические разработки к практическим и лабораторным занятиям, курсовому проекту. Каждая из этих составляющих комплекса представлена в таком объёме, чтобы совместно с другими составляющими подкрепить все темы теоретического курса. Такой подход важен при том ограниченном лимите учебных часов, который выделяется на изучение всей дисциплины.

При первом взгляде на состав практических и лабораторных занятий ощущаешь их некую неполноту. Но в дальнейшем обнаруживаешь, что они с одной стороны не дублируют друг друга, а с другой – практически полностью охватывают весь лекционный курс. В частности, по вопросам моделирования и оптимизации технологических процессов предусмотрено всего два практических значения. Но зато в лабораторном практикуме четыре из пяти лабораторных работ используют различные методы моделирования настолько непосредственно, что вся эта большая и важная проблема оказывается подкрепленной решением реальных задач. С другой стороны те же самые пять лабораторных работ хорошо подкрепляют другие тематические разделы дисциплины (гидромеханику, тепло-и массоперенос).

Автор принимал в расчет и то, что основные положения теоретической части курса найдут свое развитие и практическое подкрепление в других дисциплинах, как, например, раздел «Методы оптимизации» - в дисциплине «Основы исследования и технического творчества», раздел по механическим процессам – в дисциплине «Механическое оборудование предприятий стройиндустрии», гидромеханические, тепло-массопереносные процессы – в дисциплинах специальности и специализаций.

И, наконец, нельзя не обратить внимания на содержание и методику выполнения курсового проекта. Главная особенность состоит в том, что курсовой проект по представляемой дисциплине выполняется в комплексе с проектами по дисциплинам «Вяжущие вещества» и «Механическое оборудование предприятий стройиндустрии». Такое комплексирование позволяет значительно повысить глубину и конкретность проектных разработок по каждой дисциплине. Кроме того, сокращается суммарный объем трудозатрат по трем проектам из-за исключения дублирующих друг друга разделов, нередко присутствующих в каждом отдельном проекте.

Более чем двадцатилетний опыт комплексного проектирования во ВГАСУ подтвердил эффективность такого методического приема.

Учитывая то, что каждая из представленных во 2-м томе учебно-методических разработок имеет свою специфику, автор счел целесообразным представить их самостоятельными частями, имеющими свои рубрикации, приложения и т.п. Такая автономия разделов упрощает пользование ими.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Общая методика проведения практических занятий.....7
Тема 1. Структурная модель технологического процесса 8
Тема 2. Общие вопросы моделирования технологических процессов (коллоквиум по теме).....12
Тема 3. Основные свойства жидкостей и газов.....13
Тема 4. Инженерные задачи гидростатики.....16
Тема 5. Основные характеристики гидродинамических потоков.....18
Тема 6. Основные уравнения гидродинамики (коллоквиум по теме).....20
Тема 7. Принципы измерения скоростей и расходов жидкостей на основе уравнения Бернулли.....21
Тема 8. Движение тел в жидкостях.....23
Тема 9. Три типа смешанных задач гидродинамики.....25
Тема 10.Расчет гидравлических сопротивлений в трубах и каналах. Аппараты для перемещений жидкостей и газов.....27
Тема 11.Теплопереносные процессы (коллоквиум по теме).....29
Тема 12.Инженерные задачи теплопереноса.....30
Тема 13.Массопереносные процессы (коллоквиум по теме).....33
Тема 14.Влагопереносные (массопереносные) процессы в строительных технологиях.....34
Тема 15.Массопереносные процессы в приложении к процессам сушки строительных материалов и изделий.....39
Приложения к практическим занятиям.....

ОБЩАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Предлагаемые в этой части учебного пособия тематика и содержание практических занятий ориентированы на следующий порядок их освоения.

Преподаватель заблаговременно объявляет студентам тему очередных занятий, уточняет вопросы для самоподготовки.

Очередное занятие начинается с беглого осмотра преподавателем студенческих журналов для оформления практических занятий на предмет выполнения домашнего задания; при необходимости на коллективное обсуждение выносятся отдельные вопросы задания.

Далее проводится коллективное обсуждение теоретических вопросов вынесенных на самоподготовку.

На конкурсной основе студенты выполняют сначала самостоятельно, а затем, после появления первых результатов, коллективно решение нескольких практических задач

По каждому этапу занятий студент тестируется бальной оценкой; по совокупности бальных оценок выставляется итоговая оценка по теме.

Для самоподготовки студентов по предлагаемым по каждой теме вопросам рекомендуются следующие информационные источники:

1. Шмитько Е.И. Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий: Учебное пособие / Е.И. Шмитько. – Воронеж: Изд-во ВГАСУ. – 2009. – Том 1, с.

2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов / Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 14 изд., стереотип. Перепечатка с изд. 1987 г. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 576 с.

3. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. 14 изд., стереотип. Перепечатка с 9-го изд. 1973 г. – М.: ООО ИД «Альянс», 2008. – 753 с.

Тема 1. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1. Цель занятия

Освоить вопросы моделирования технологических процессов на этапе разработки структурной схемы.

1.2 Вопросы для самоподготовки

1.Определения: «технологический процесс», «технологический передел», «технологическая операция»; виды технологических процессов по способу их реализации.

2. Понятие типовых процессов, их виды и определения.

3. Классификация технологических процессов относительно категорий времени и пространства, причинности и случайности.

4. Параметры технологического процесса, их функциональная роль.

5. Основные идеи и принципы функционирования систем автоматизированного управления технологическими процессами (АСУТП).

1.3. Информационные источники

[1] – Введение, п. п. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5.

1.4. Содержание практического занятия

1.4.1. Обсудить содержание и существо вопросов, вынесенных на самоподготовку в п.п. 1 - 5.

1.4.2. Представить технологический процесс в виде совокупности технологических операций. Составить функциональную, технологическую и операторную схемы технологического процесса; предложив для отдельного аппарата из разрабатываемой схемы (по согласованию с преподавателем) структурную схему, как основу автоматического управления технологическим процессом в выбранном аппарате. На схеме представить главные, на взгляд студента, входные (регулируемые, нерегулируемые, случайные) и выходные, параметры процесса; хотя бы в словесных выражениях охарактеризовать внутренние связи между ними, наметив автоматически измеряемые параметры, значения которых в виде обратной связи могут использоваться для управления процессом через АСУТП.

1.5. Методика выполнения задания. Подведение итогов

Студент получает индивидуальный вариант задания (см. таблицу) и переносит его в рабочий журнал.

Выполнение задания производится по следующим позициям.

1. Задание представляется в виде приведенной таблицы с заполненной последней колонкой.

2. В аппаратурном оформлении представляется технологическая схема; для изображения технологического оборудования используются примеры, приведенные в Прил.3 раздела «Курсовое проектирование»-КП настоящего учебного пособия. Пример представления технологической схемы приведен там же в Прил.2.

Таблица 1.1.

Варианты заданий

Технологический процесс	Технологические переделы	Перечень входных параметров*	Перечень выходных параметров	Технологические операции (предлагаются студентом)
Производство комовой негашеной извести с применением шахтной печи	Доставка сырья; подготовка сырья; обжиг; отправка готовой продукции	Содержание $CaCO_3 и MqCO_3$; влажность сырья; крупность кусков; температура обжига-950 ^oC; время пребывания в печи	Производительность технологической линии; содержание активных CaO и MqO; скорость гашения извести; содержание непогасившихся зерен	
Производство строительного гипса	Доставка сырья; подготовка сырья; тепловая обработка - варианты - гипсоварочный котел, - вращающаяся печь; помол; отправка готовой продукции	Содержание $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; влажность сырья; крупность кусков; температура обжига; время пребывания в тепловом аппарате	Производительность технологической линии; содержание $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$; тонкость помола; сроки схватывания; марка по прочности	
Производство керамического кирпича;	Доставка сырья; подготовка сырья; подготовка формовочной массы; формование; сушка; обжиг; отправка готовой продукции	Химический состав сырья; вещественный состав сырья; влажность сырья; формовочная влажность; влажность сушильного агента; температура обжига; время пребывания в печи и др.	Производительность технологической линии; внешний вид изделий; прочность; морозостойкость; плотность; цвет; геометрические размеры	

Продолжение табл. 1.1.

Технологический процесс	Технологические переделы	Перечень входных параметров*	Перечень выходных параметров	
Производство цементно-песчаной тротуарной плитки	Доставка сырья (цемент песок, вода, добавки); приготовление формовочной смеси; формование изделий - варианты: - литье, - виброформование, - прессование; тепловлажностная обработка; отправка готовой продукции	Минералогический состав цемента; тонкость помола цемента; активность цемента; сроки схватывания; зерновой состав песка; примеси в песке; состав формовочной смеси; подвижность смеси; плотность отформованного изделия; температура тепловой обработки; длительность тепловой обработки	Производительность технологической линии; геометрические размеры изделий; чистота поверхности; прочность; морозостойкость; истираемость	

Примечание к табл.1.1: * - входные параметры следует распределить по переделам;
параметры могут повторяться, могут быть введены дополнительно

3. Операторная схема технологического процесса представляется в виде последовательной совокупности типовых процессов, обозначения каждого из которых приведено в Прил. 4, а пример операторной схемы представлен в Прил. 2 (см. раздел КП).

4. Представляется структурная схема управления технологическим процессом в одном из определяющих аппаратов. За основу принимается обобщенный вариант структурной схемы сложного технологического процесса, приведенной на рис.1.1.

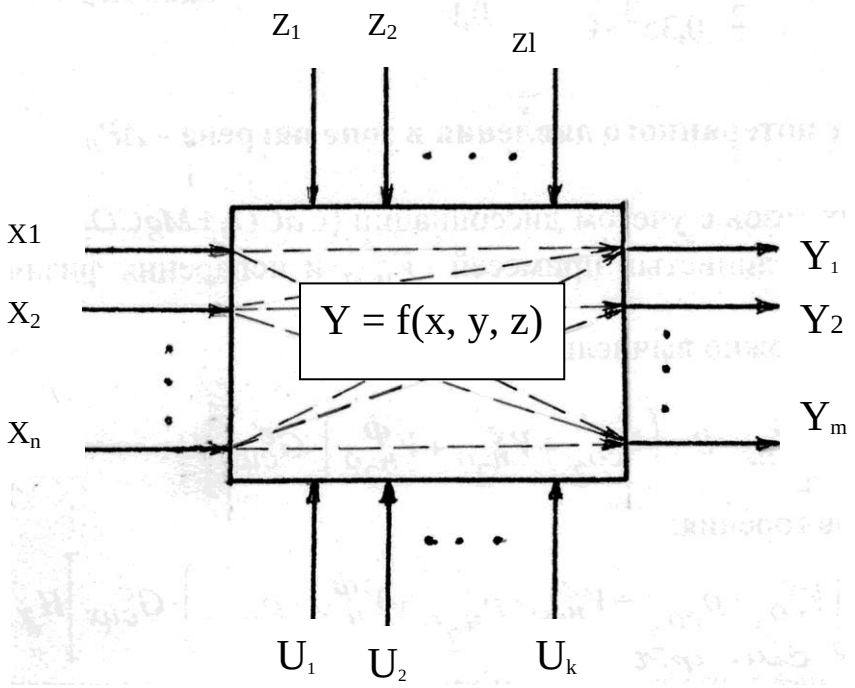


Рис.1.1. К выполнению п. 4

В выполняемом задании количество параметров принимает конечное значение в соответствии с принятыми решениями. Входные параметры исполнитель разделяет на регулируемые, нерегулируемые и случайные, присвоив им соответственно символы x_i, u_j, z_k. Под рисунком приводит перечень символов, наполняя каждый из них определенным технологическим смыслом. При этом состав переменных под символами x и u назначается в соответствии с заданием, а состав переменных под символом z исполнитель предлагает самостоятельно.

В заключение этого раздела исполнитель дает пояснения всем возможным внутренним связям типа y = f(x,y) – на рисунке представлены пунктирными стрелками. При этом кроме сущности, влияния входных переменных на выходные, могут быть представлены пределы изменения этих параметров. На этой стадии разработки исполнитель может принять решение о необходимости ввести дополнительные параметры или перевести их из одной группы в другую.

Тема 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
(коллоквиум по теме)

2.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания, полученные при освоении лекционного курса по вопросам моделирования.

2.2. Вопросы для самоподготовки

1. Моделирование как метод исследования, проектирования, управления. Понятия «модель» и «моделирование». Виды моделей.
2. Общие представления о физическом моделировании. Виды моделей. Привести примеры из технологии строительных материалов и изделий.
3. Понятия подобия. Рассмотреть виды подобия на конкретных примерах. Основные характеристики подобия. Главные условия подобия.
4. Правила (теоремы) подобия. Формулировки и практическое значение.
5. Общая последовательность подобного преобразования дифференциальных уравнений к зависимости между безразмерными переменными.
6. Выполнить подобное преобразование дифференциального уравнения на примере гидродинамического подобия (уравнения Навье-Стокса).
7. Критерии подобия: их свойства и значение (рассмотреть на примере гидродинамического подобия).
8. Сущность, определения математического моделирования.
9. Виды математических моделей, источники их создания.
10. Последовательность построения математических моделей.
11. Методы и средства реализации математических моделей.

2.3. Информационные источники

[1] – глава 3.

2.4. Методика проведения занятия. Подведение итогов

Преподаватель вызывает одного из студентов к доске, вместе с аудиторией заслушивает ответ по предложенному вопросу, предлагает аудитории внести в состоявшийся ответ поправки, дополнения, свои версии, акцентирует внимание на версии, в наибольшей степени раскрывающей суть вопроса.

По совокупности ответов у доски, дополнений и реплик с места каждый студент получает итоговую оценку знаний.

В соответствии с внедряемой в вузах рейтинговой системой оценки знаний рекомендуется студентов, получивших «отличную» оценку, освободить на семестровом экзамене по данной дисциплине от ответов по вопросам моделирования с перенесением оценки «отлично» в общий результат экзамена.

Тема 3. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

3.1. Цель занятия. Восстановить в памяти и систематизировать знания по рассматриваемым вопросам; получить навыки решения практических задач.

3.2. Вопросы для самоподготовки

1. Дать определение плотности для веществ и материалов; объяснить, в чём состоит отличие плотности абсолютной от плотности материала в естественном состоянии.

2. Какое понятие плотности согласно п.1. справедливо для жидкостей и газов?

3. Зависимость плотности жидкостей и газов от температуры.

4. Размерности плотности в системе СИ; единицы измерения плотности в лабораторных исследованиях, в технике; переходы от одних единиц измерения к другим.

5. Дать определение вязкости как коэффициента пропорциональности между напряжением сдвига в движущейся жидкости и скоростью (градиентом скорости) её течения. Динамический и кинематический коэффициенты вязкости.

6. Основные виды ньютоновских жидкостей.

7. Дать определение поверхностного натяжения; поверхностное натяжение на межфазных границах; единицы измерения поверхностного натяжения.

3.3. Информационные источники

[1] – п. 6.2

[2] – глава 1- п.п. 1, 2, 5, 7, 8.

3.4. Содержание практического занятия

3.4.1. Плотность веществ и материалов

Обсудить содержание и существо вопросов 1 - 4, вынесенных на самоподготовку (п. 3.2). Решить предлагаемую ниже или подобную ей задачу, проанализировать результаты.

Задача 3.1. По результатам лабораторного анализа плотность свежеприготовленной смеси для формования ячеистого бетона составила 1,68 г/см^3. Представить полученный результат в кг/м^3, кг/л, т/м^3. При переводе одних единиц в другие рекомендуется пользоваться переходными множителями.

Пример: [г/см^3]→[кг/м^3] =1.68μ_1/μ_2, где μ_1 – множитель перехода от [г] в [кг] – 10^{-3}; μ_2 – множитель перехода от [см^3] к [м^3] – 10^{-6}.

3.4.2. Плотность многокомпонентных жидкостей и шламов

Расчетные формулы

Для многокомпонентных жидкостей:

$$\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + ... + \frac{x_n}{\rho_n}, \qquad (3.1)$$

где x_1, x_2, x_n – массовые доли компонентов смеси;

$\rho_{см}, \rho_1, \rho_2, \rho_n$ – плотности смеси и её компонентов.

Для 2-х компонентного шлама: $\frac{1}{\rho_{см}} = \frac{x}{\rho_t} + \frac{1-x}{\rho_ж}$, (3.2)

где x – массовая доля твёрдой фазы в шламе;

$\rho_т, \rho_ж$ – плотности соответственно твёрдой и жидкой фаз.

Задача 3.2. В результате мокрого помола песка получен шлам плотностью 1,61 г/см^3. Определить содержание (массовые доли) песка (П) и воды (В) в шламе. Представить полученный результат в кг/кг.

Ответ: П = 0,6 кг/кг, В = 0,4 кг/кг.

3.4.3. Плотность газов

Расчётные формулы

Плотность отдельного газа при нормальных условиях, ρ_0, кг/м^3 :

$$\rho_0 = \frac{M}{22{,}4}, \qquad (3.3)$$

где M – молярная масса газа, кг/моль;

плотность газа при температуре Т и давлении Р:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} = \frac{M}{22{,}4} \cdot \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0}, \qquad (3,4)$$

где T_0 – температура для нормальных условий, T_0=273,15 К (в расчётах можно принимать 273 К);

P_0 – давление для нормальных условий, P_0=1,013·10^{5}Па (1атм);

Т и Р – фактические значения температуры в К и давления в Па (в расчётах для удобства можно принимать значения Р и P_0 в атмосферах);

плотность смеси газов, $\rho_{см}$:

$$\rho_{см} = \frac{\rho_1}{y_1} + \frac{\rho_2}{y_2} + \cdot \ldots, \qquad (3.5)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотности входящих в смесь газов, кг/м^3;

y_1, y_2 – объёмные доли этих газов.

Задача 3.3. Определить плотность азота при нормальных условиях и в нагретом до 127° С при атмосферном давлении состоянии.

Ответ: ρ_0 = 1,25 кг/м^3, ρ = 0,85 кг/м^3.

Задача 3.4. (рекомендуется для домашней проработки).

В сушильную камеру поступают дымовые газы при температуре 127 °С следующего состава: CO_2 – 0,095м^3/м^3

H_2O – 0,198м^3/м^3

$$N - 0{,}707 м^3/м^3$$

Определить плотность смеси газов на входе в сушильный аппарат.

Ответ: $\rho_{см} = 0{,}0837 кг/м^3$.

3.4.4. Вязкость жидкостей и газов

Обсудить содержание и существо вопросов 5, 6, предложенных для самоподготовки (п. 3.2).

Задача 3.5. Исходя из закона Ньютона для жидкостного трения

$$F_{тр} = -\mu \cdot \frac{dw}{dl}, \qquad (3.6)$$

где $F_{тр}$ – сила трения между параллельными слоями движущейся жидкости;

S – площадь поверхности трения;

dw/dl – градиент скорости,

определить размерность динамического коэффициента вязкости μ, кинематического коэффициента вязкости ν, как ν = μ/ρ, где ρ – плотность жидкости или газа.

Ответ: [μ] = [Па·с], [ν] = [$м^2$/с].

Задача 3.6 (рекомендуется для домашней проработки).

Предложите схему прибора для определения коэффициента динамической вязкости. В приборе должны быть отражены соотношения формулы (3.6)

3.4.5. Поверхностное натяжение в жидкостях

Обсудить содержание и существо вопроса 7, предложенного для самоподготовки (п. 3.2).

Задача 3.7. Исходя из определения поверхностного натяжения жидкости (σ) как количества работы (A) на образование единицы площади новой поверхности (S)

$$\sigma = \frac{A}{S}, \qquad (3.7)$$

или как отношения силы (F) к длине отрыва плёнки жидкости (l):

$$\sigma = \frac{F}{l} \qquad (3.8)$$

представить размерности [σ] относительно формул (3.7) и (3.8); привести их к общему виду.

Задача 3.8 (рекомендуется для самостоятельной проработки)**.** Предложите схему прибора для определения величины поверхностного натяжения жидкости методом отрыва.

Тема 4. ИНЖЕНЕРНЫЕ ЗАДАЧИ ГИДРОСТАТИКИ

4.1. Цель занятия

Уточнить сущность основного уравнения гидростатики (закон Паскаля), освоить решение инженерных задач гидростатики.

4.2. Вопросы для самоподготовки

1. Дифференциальное уравнение равновесия Эйлера для покоящейся жидкости, вывод уравнения, интерпретация.
2. Основное уравнение гидростатики в интегральной форме.
3. Основные типы практических задач гидростатики

4.3. Информационные источники

[1] – п.п. 6.3, 6.4.

4.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1 - 3, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

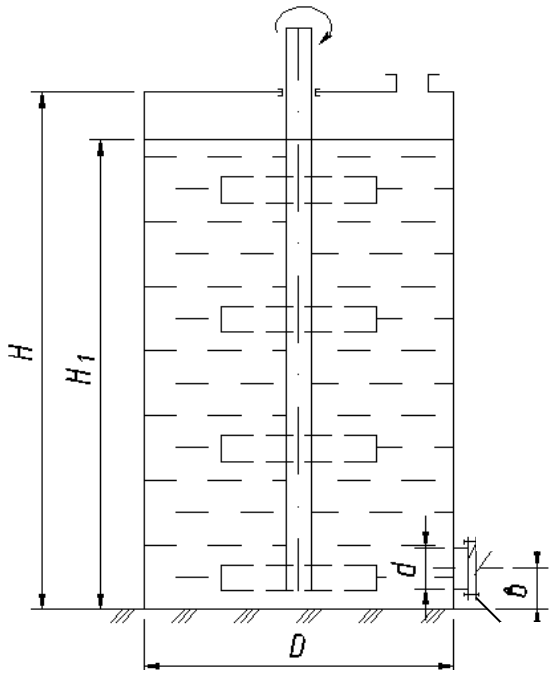


Рис. 4.1. Схема шламбассейна

Задача 4.1. В массоподготовительном цехе завода ячеистобетонных изделий шламбассейн для накопления и хранения песчаного шлама (рис. 4.1) имеет следующие геометрические размеры: высота H = 8,0 м; диаметр D = 5 м. На расстоянии b = 0,6 м от дна бассейна устроен круглый лаз диаметром d = 0,8 м для планового осмотра и обслуживания внутренней мешалки. Крышка лаза крепится к обечайке лаза стальными болтами, располагаемыми по окружности. Диаметр болта 10 мм. Расчётное сопротивление материала болта на растяжение $\sigma_р$ = 180 МПа. Рассчитать необходимое число болтов для восприятия крышкой гидростатического давления шлама плотностью 1600 кг/м^3, если максимальная высота заполнения шламбассейна H_1 = 7,6 м, избыточное давление над поверхностью шлама отсутствует.

Ответ: n = 6 шт.

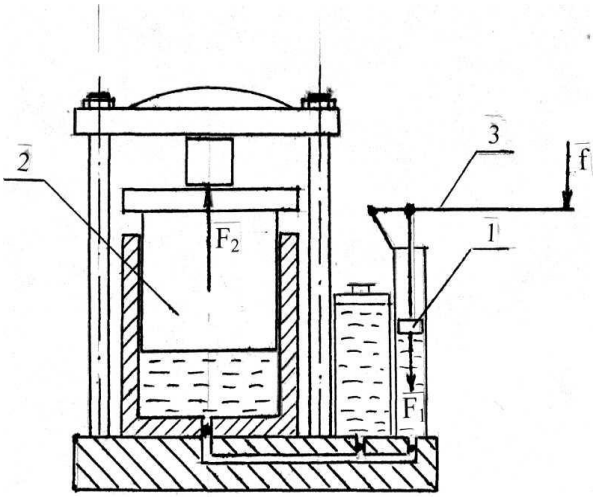


Рис. 4.2. К решению задачи 4.2

Задача 4.2. В лаборатории механических испытаний строительных материалов имеется пресс с ручным приводом для испытания прочности материалов на сжатие (рис 4.2). Диаметр рабочего поршня (2) Д = 300 мм; диаметр поршня гидронасоса (1) d = 40 мм; длина рукояти (3) ручного привода L = 0,6 м. соотношение плеч рычажной системы 10/1.

Рассчитать:

1) силу F_2 передаваемую рабочим поршнем пресса на испытуемый образец, если максимальная сила нажатия рукой на рычаг пресса составляет f = 250 Н.

2) определить максимально допускаемый размер ребра (а) испытуемого образца кубической формы, если предполагаемая средняя прочность на сжатие в нём составляет $R_{сж}$= 28 МПа.

Ответ: F_2 = 140625 Н, а = 7,1 см.

Задача 4.3. (рекомендуется для домашней проработки).

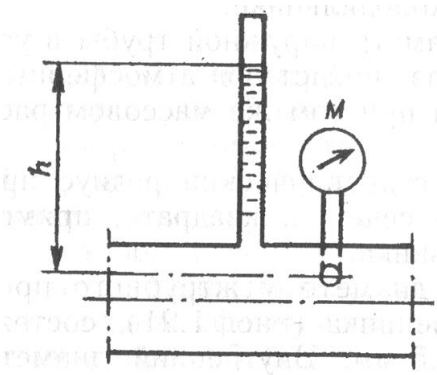


Рис. 4.3. К задаче 4.3

Манометр на трубопроводе, заполненном жидкостью, показывает давление p=0,018 МПа. На какую высоту h над уровнем присоединения манометра поднимется в открытой пьезометрической трубке жидкость, находящаяся в трубопроводе, если эта жидкость:

а) вода

б) 25-% раствор хлористого кальция, ρ=1195 кг/м^3.

Ответ: а) h = 1,83 м, б) h = 1,54 м.

Тема 5. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

5.1. Цель занятия

Усвоить сущность основных терминов и понятий гидродинамики в ходе решения практических задач.

5.2. Вопросы для самоподготовки

1. Определения гидродинамики; задачи, решаемые гидродинамикой.
2. Определение скорости и расхода потока, их взаимосвязь, размерности.
3. Гидравлический радиус и эквивалентный диаметр, их применение.
4. Режимы течения жидкостей, оценочные характеристики, значение для технологии.
5. Распределение скоростей и расход жидкости при устоявшемся ламинарном потоке.
6. Распределение скоростей в турбулентном потоке.

5.3. Информационные источники

[1] – п. 6.5
[2] – по усмотрению студента
[3] – глава 2, раздел 5, 6.

5.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1- 6, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

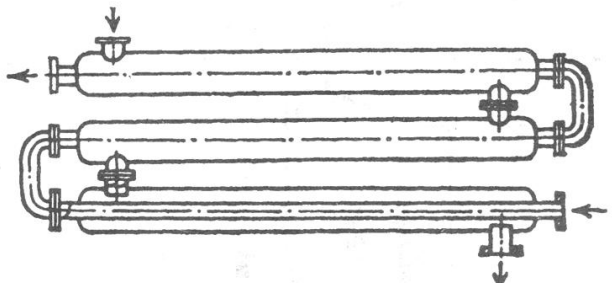


Рис. 5.1. Схема теплообменника типа «труба в трубе»

Задача 5.1. На заводе по производству керамического кирпича с целью экономии тепловых ресурсов осуществляется утилизация дымовых газов, отходящих от обжиговой печи. Для этого установлен теплообменник типа «труба в трубе» (рис.5.1).

По внутренней трубе теплообменника диаметром d = 51×3 мм течет нагреваемая вода, поступающая затем в отопительные батареи. В межтрубном пространстве движется встречный поток дымовых газов под абсолютным давлением 0,15 МПа. Диаметр наружной трубы D = 153×3 мм.

Определить:

1) объёмный расход воды во внутренней трубе – $V_в$;

2) скорость воды в трубе – $w_в$;

3) значение критерия Рейнольдса и режима течения воды на входе в трубу и на выходе;

4) объёмные расходы газа на входе и на выходе из межтрубного пространства – $V_{г1}$, $V_{г2}$;

5) скорости газа – $w_{г1}$, $w_{г2}$;

6) значения критерия Рейнольдса – $Re_{г1}$, $Re_{г2}$ и режимы течения газа на входе и на выходе из межтрубного пространства, если:

1) массовый расход воды составляет $M_в$=500кг/ч, её температура на входе в теплообменник – $t_{в1}$ = 10 °С, на выходе – $t_{в2}$ = 80 °С;

2) массовый расход газа составляет $M_г$ = 550 кг/ч, его температура на входе – $t_{г1}$ = 300 °С, на выходе – $t_{г2}$ = 150 °С.

Указания к расчёту:

1) в указанных размерах труб первая цифра относится к наружному диаметру, вторая – к толщине стенки трубы;

2) необходимые справочные характеристики можно найти в Приложениях к практическим занятиям, при этом плотность и вязкость дымовых газов можно принимать как для азота;

3) при расчётах значения критерия Рейнольдса для межтрубного пространства следует использовать формулу $Re = \rho \cdot w \cdot d_э/\mu$,
где $d_э$ – эквивалентный диаметр межтрубного пространства.

Ответы к задаче 5.1: $w_в$ = 0,088 м/с; $Re_{в1}$ = 3028 – режим переходной; $Re_{в2}$ = 11108 – режим турбулентный; $w_{г1}$ = 12,8 м/с; $w_{г2}$ = 9,44 м/с; $Re_{г1}$ = 31624 – режим турбулентный; $Re_{г2}$ = 39502 – режим турбулентный.

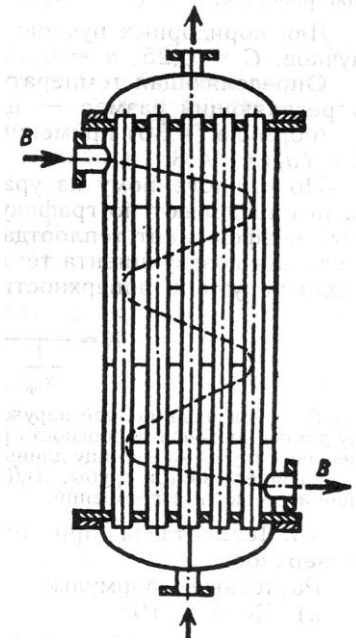


Рис. 5.2. Схема кожухотрубчатого теплообменника с сегментными поперечными перегородками

Задача 5.2 (рекомендуется для домашней проработки).

Кожухотрубный теплообменник имеет 19 внутренних труб диаметром 20×2 мм, по которым (рис 5.2.) протекает вода. Вода подводится с помощью трубы диаметром 57×3,5 мм. Скорость воды в этой трубе составляет 1,4 м/с. (вода движется снизу вверх) Определить скорость воды $w_в$ во внутренних трубах кожухотрубного теплообменника.

Ответ: $w_в$ = 0,72 м/с.

Тема 6. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ (коллоквиум по теме)

6.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания, касающиеся сущности, содержания и путей применения основных уравнений гидродинамики.

6.2. Вопросы для самоподготовки

1. Уравнение неразрывности (сплошности) потока в дифференциальной и интегральной форме.
2. Дифференциальное уравнение движения идеальной жидкости – уравнение Эйлера.
3. Дифференциальное уравнение движения реальной (вязкой) жидкости – уравнение Навье-Стокса.
4. Уравнение Бернулли для идеальной жидкости.
5. Уравнение Бернулли для реальной жидкости.

6.3. Информационные источники

[1] - п. 6.6

[3] – глава 2, п.п. 7, 8, 9.

6.4. Методика проведения занятия. Подведение итогов

Преподаватель вызывает одного из студентов к доске, вместе с аудиторией заслушивает ответ, предлагает аудитории внести в состоявшийся ответ поправки, дополнения, свои версии, акцентирует внимание на версии, в наибольшей степени раскрывающей сущность вопроса.

По совокупности ответов у доски, дополнений и реплик с места каждый студент получает итоговую оценку знаний.

В соответствии с внедряемой в вузах рейтинговой системой оценки знаний рекомендуется студентов, получивших отличную оценку, освободить на семестровом экзамене по данной дисциплине от ответов по рассмотренным вопросам.

Тема 7. ПРИНЦИПЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ И РАСХОДОВ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ

7.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания по теме. Освоить инженерные методы расчетов с применением уравнения Бернулли.

7.2. Вопросы для самоподготовки

1. Измерение скорости течения жидкости в трубопроводе с помощью пневмометрических трубок и дифференциального манометра.
2. Измерение скоростей и расходов жидкостей с помощью дроссельных приборов.
3. Расчёт скорости истечения жидкости из резервуара через донное отверстие.

7.3. Информационные источники

[1] – п. 7.3.

[2] – примеры 1-19; 1-20; 1-21 (аналогичные рассматриваемым задачам).

7.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1 - 3, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

Задача 7.1. На тепловом щите цеха по производству железобетонных шпал установлен автоматический диафрагменный прибор для измерения расходов водяного пара, подаваемого в камеры тепловой обработки изделий. Для его тарировки использован прибор также диафрагменной конструкции, но упрощённого типа (рис 7.1.) со следующими характеристиками:

Диаметр пароподводящей трубы D = 200 мм; диаметр отверстия в диафрагме d_0 = 82 мм; коэффициент расхода в диафрагме α = 0,61.

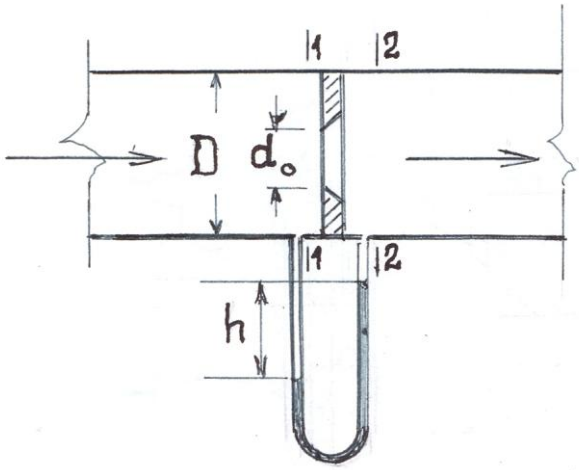


Рис. 7.1. Рисунок к задаче 7.1

Определить расход пара по объему ($V_п$) и по массе ($M_п$), скорость пара в пароподводящей трубе (w), если U-образный манометр зафиксировал между сечениями 1 - 1 и 2 - 2 перепад пьезометрического напора h = 147 мм. рт. ст., насыщенный пар поступает под избыточным давлением $P_{изб}$ = 0,2 МПа (см. Прил. 8).

Ответ: $V_п$ = 2964 м^3/ч, $M_п$ = 1778 кг/ч, w = 26,2 м/с.

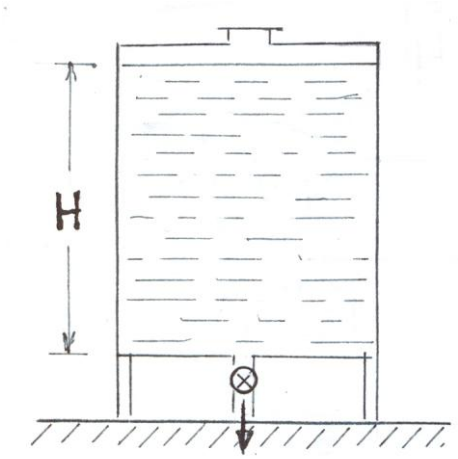


Рис. 7.2. Рисунок к задаче 7.2

Задача 7.2. В бетоносмесительном отделении завода ЖБИ установлена ёмкость на 6м^3 для запаса технической воды, имеющая донное сливное устройство. Избыточное давление над поверхностью воды отсутствует. В вязи с ремонтными работами возникла необходимость в полном опорожнении ёмкости.

Требуется рассчитать необходимое для этого время (τ) при условии, что слив производится через нижнюю отводную трубу диаметром d = 56 х 3 мм с краном, а уровень воды в баке к моменту начала слива H = 2,5 м; принять коэффициент расхода α = 0,61.

Ответ: τ = 1433 с.

Задача 7.3 (рекомендуется для домашней проработки).

По горизонтальному трубопроводу с внутренним диаметром 200 мм протекает минеральное масло с плотностью ρ = 900 кг/м^3. В трубопроводе установлена диафрагма (рис. 7.2) с острыми краями (коэффициент расхода α = 0,61). Диаметр отверстия диафрагмы 76 мм. Ртутный дифференциальный манометр, присоединённый к диафрагме, показывает разность уровней 102 мм. Определить расход масла $V_м$ и его скорость w в трубе.

Ответ: $V_м$ = 0,0154 м^3/ч; w = 0,49 м/с.

Задача 7.4 (рекомендуется для домашней проработки).

Из отверстия диаметром d_0 = 10 мм в дне открытого бака, в котором поддерживается постоянный уровень жидкости высотой H = 900 мм, вытекает 750 литров жидкости в 1 час. Определить коэффициент расхода α. Сколько времени (τ) потребуется для опорожнения бака, если прекратить подачу в него жидкости? Диаметр бака D = 800 мм

Ответ: α = 0,61; τ = 1,25 ч.

Тема 8. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ

8.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания по теме и освоить решение практических задач, связанных с осаждением твердых частиц в газовых и жидких средах.

8.2. Вопросы для самоподготовки

1. Общие закономерности движения тел в жидкостях.
2. Скорость осаждения твердых частиц под действием силы тяжести.
3. Оценка режима осаждения частиц через критерий Архимеда.
4. Скорость осаждения твердых частиц в реальных системах.

8.3. Информационные источники

[1] – п. 6.8.1.
[2] – глава 3 – п.п. 1, 2, 3, 4.

8.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1 - 4, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

Задача 8.1. С какой скоростью будут осаждаться частицы песка условно шарообразной формы диаметром 10 мкм; а) в воде при 20 °С; б) в воздухе при 20 и 110 °С.

Ответ: а) $9 \cdot 10^{-5}$ м/с; б) при 20 °С – $8 \cdot 10^{-3}$ м/с, при 110 °С – $6 \cdot 10^{-3}$ м/с.

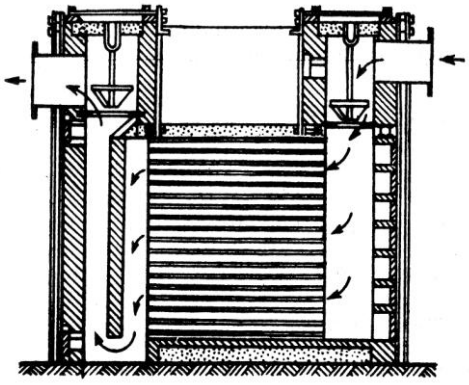


Рис. 8.1. Рисунок к задаче 8.2

Задача 8.2. Через пылеосадительную камеру полочного типа (рис 8.1.) проходят запылённые дымовые газы из сушильного барабана, в котором производится сушка глины. Рассчитать, какого размера частицы глины ($d_ч$) осядут на полках камеры, если: расстояние между полками h = 100 мм; высота камеры H = 4 м, длина L = 4,55 м, ширина B = 1,71 м; массовый расход газов M = 2500 кг/ч.

Состав дымовых газов для нормальных условий: CO_2 – 0,036 м^3/м^3, O_2 – 0,129 м^3/м^3, H_2O – 0,079 м^3/м^3, N_2 – 0,756 м^3/м^3;

Температура дымовых газов на входе – t_1 = 110 °С, на выходе t_2 = 106 °С. Избыточное давление в камере отсутствует. В расчете можно принять значение рабочей скорости $w_р = 0{,}5 w_{ос}$, где $w_{ос}$ – теоретическая скорость осаждения.

Ответ: $d_ч = 0.144 \cdot 10^{-3}$ м.

Рекомендуется следующая последовательность решения задачи 8.2.

1. Для определения средней в камере температуры определяются плотности составляющих дымового газа и плотность смеси газов (см. тему 3).

2. Определяется объемный расход дымовых газов, а через него – скорость их движения вдоль камеры.

3. Определяется время прохождения потоком длины камеры.

4. В соответствии с расстоянием между полками и рассчитываемым временем определяются максимально допустимые значения теоретической w_{oc} и рабочей w_p скоростей осаждения.

5. В Приложениях находят значения вязкости дымовых газов при рабочей температуре и плотность частиц глины; при этом μ_c можно принимать как для N_2, а $\rho_{глины} = 2450$ кг/м^3.

6. В соответствии с рабочей скоростью по основной формуле для скорости осаждения – ф.(6.91) [1] определяется значение $d_ч$ вначале как для ламинарного режима – ф.(6.92) [1].

7. По полученным значениям w_p и $d_ч$ рассчитывается значение критерия Рейнольдса; если выполняется условие $Re < 2$, то полученный результат считается действительным, если не выполняется, то производится новое определение $d_ч$ при коэффициенте сопротивления $\xi = 18{,}5/Re^{0.6}$ и т. д.

Задача 8.3 (рекомендуется для домашней проработки)

Определить скорость осаждения в воде при 25 °С продолговатых частиц угля (ρ = 1400 кг/м^3), пластинчатых частиц сланца ($\rho_т$ = 2200 кг/м^3), имеющих эквивалентный диаметр $d_э$ = 2 мм.

Ответ: а) 0,08 м/с; б) 0,11 м/с.

Тема 9. ТРИ ТИПА СМЕШАННЫХ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ

9.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания по теме и освоить решение практических задач.

9.2. Вопросы для самоподготовки

1. Основные три типа смешанных задач.
2. Движение жидкостей и газов через неподвижные зернистые слои.
3. Гидродинамика кипящего (псевдокипящего) зернистого слоя.
4. Пневмотранспорт порошковых и зернистых материалов.
5. Гидротранспорт порошковых и зернистых материалов.

9.3. Информационные источники

[1] – п. 6.8.3.1. – 6.8.3.5;
[2] – глава 3, п.п. 1 – 35;

9.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1 – 5, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

Задача 9.1. В сушилке с кипящим слоем горячим воздухом сушится кварцевый песок. Определить критическую w_0', рабочую $w_р$, и действительную $w_д$ (в свободном объёме между взвешенными частицами) скорости воздуха.

Исходные данные:

песок имеет следующий фракционный состав:

0 - 0,16 мм – 1 % (0,01);
0,16 - 0,315 мм – 20 % (0,20);
0,315 - 0,63 мм – 62 % (0,62);
0,63 - 1,25 мм – 12 % (0,12);
1,25 - 2,5 мм – 5 % (0,05);
2,5 – 5 мм – 0 % (0,00);

Насыпная плотность песка – 1400 кг/м^3;
Плотность в зерне - 2650 кг/м^3;
Средняя температура воздуха – 250 °С;
Число псевдоожижения $k_w = 2$;
Ответ: $w_0' = 0{,}097$ м/с, $w_р = 0{,}195$ м/с, $w_д = 0{,}4$ м/с.

Рекомендуется следующая последовательность решения задачи 1:

1) вычисляются среднеарифметические размеры зёрен песка d_i во фракциях и эквивалентный диаметр зерна песка, принимаемого в расчёт:

$$d_э = \frac{1}{\Sigma(x_i \cdot d_i)},$$

где x_i – массовая доля песка определённой фракции,

d_i – средний диаметр зерен песка во фракции;

2) в Приложениях находят μ воздуха при 250 °С;

3) вычисляют плотность воздуха при 250 °С;

4) по формуле (6.113) [1] вычисляют критическое значение критерия Архимеда – $Ar_{пс}$;

5) из формулы $$Re_{пс} = \frac{Ar_{пс}}{1400 + 5{,}22 \cdot \sqrt{Ar_{пс}}}$$

определяют критическое значение критерия Рейнольдса - $Re_{пс}$;

6) через критерий $Re_{пс}$ определяют w'_0 как

$$w'_o = \frac{Re_{пс} \cdot \mu_c^2}{\rho_c \cdot d_ч};$$

7) используя значение коэффициента псевдоожижения k_w, находят значение $w_р$: $$w_p = k_w \cdot w_0;$$

8) определяют критическое значение критерия Лященко $Ly_{пс}$;

$$Lj_{пс} = \frac{(w'_0)^3 \cdot \rho_c^2}{\mu_c \cdot (\rho_T - \rho_c) \cdot g};$$

9) используя графические зависимости критерия Лященко от критерия Архимеда (Прил. п. 13.3 к четвертой части настоящего учебного пособия) находят порозность псевдоожиженного слоя ε;

10) действительную скорость в свободном сечении слоя определяют как

$$w_д = w_р/\varepsilon.$$

Задача 9.2. Определить диаметр шарообразных частиц кварцевого песка d плотностью 2650 кг/м^3, которые смогут находиться во взвешенном состоянии при скорости потока воздуха 1 м/с и температуре 20 °С. Для найденного размера зёрен песка определить скорость воздуха, при которой начнётся пневмотранспорт частиц ($w_{св}$) при условии, что выполняется соотношение (6.116) [1].

Ответ: d = 2,1 мм, $w_{св}$ = 10,7 м/с.

Тема 10. РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ТРУБАХ И КАНАЛАХ. АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

10.1. Цель занятия

Освоить методы расчетов сопротивлений в трубах и каналах, мощности приводов к насосам и компрессорным машинам.

10.2. Вопросы для самоподготовки

1.Уравнение Бернулли для реальной жидкости. Расчет потерянного напора.

2.Определение потерь напора из-за трения жидкости о стенки трубы или канала.

3.Определение местных потерь напора.

4.Основные характеристики насосов.

5. Основные характеристики вентиляторов.

10.3. Информационные источники

[1] – 6.7.2.; 6.8.5.

[2] – глава 1, п.п. 20, 21, 22.

10.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1-5, вынесенных на самоподготовку.

Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

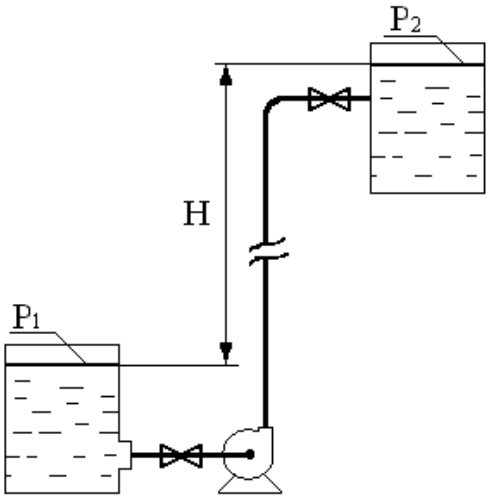


Рисунок 10.1 - Схема узла по приготовлению смазочных составов

Задача 10.1. На заводе ЖБИ функционирует узел по приготовлению смазочных составов (рис. 10.1).

Подача составов к технологическим постам формования осуществляется гидронасосом. Рассчитать, какой дол-жна быть мощность электропривода (N) к насосу, если: перекачка смазочного состава производится по стальным, с незначительной внутренней коррозией, трубам диаметром d = 150 мм, максимальная дальность подачи 60м, высота подъема H = 3 м. На трубопроводе установлены 2 крана, 1 диафрагма d_0 = 32 мм и 5 отводов под углом 90º (R_o/d = 3); при температуре в цехе 15 ºС смазочный состав имеет плотность ρ = 890 кг/м³, вязкость $\mu = 6{,}5\cdot10^3$ Пас, производительность насоса

V = 10 м³/ч. Над жидкостью поддерживается разрежение p_1 = 200 мм рт.ст. (p_2 = 1 атм).

Ответ: N = 0,61 кВт.

Рекомендуется следующая последовательность решения задачи:

1) в соответствии с заданными значениями объемного расхода V и диаметра d определяется скорость течения смазочного состава в трубе;

2) вычисляется значение критерия Рейнольдса и отношение d/e, где e – шероховатость внутренней поверхности трубы (см. Прил., табл. П.3.);

3) с помощью графической зависимости λ = f(Re, d/l) (Прил., рис.П.1) определяется значение коэффициента трения λ;

4) определяется потерянное на трение давление

$$\Delta p_{тр} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2};$$

5) по табл. П.4 определяются коэффициенты местных сопротивлений ζ_1, ζ_2, ζ_3;

6) определяется потерянное на местные сопротивления давление

$$\Delta p_{мс} = (\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}$$

7) определяется давление, затрачиваемое на скоростной напор

$$\Delta p_{ск} = \rho \cdot \omega^2/2;$$

8) определяется давление, необходимое для поднятия жидкости на заданную высоту $\Delta p_{под} = \rho \cdot g \cdot H$;

9) определяется перепад давлений над жидкостью в приемной и отдающей емкостях $\Delta p_{доп} = (p_2 - p_1)$;

10) определяется полное давление, создаваемое в насосе

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{м.с} + \Delta p_{под} + \Delta p_{доп};$$

11) определяется мощность электропривода к насосу

$$N = V \cdot \Delta p/(1000 \cdot \eta), \text{ кВт.}$$

Задача 10.2 (рекомендуется для домашней проработки).

По прямому горизонтальному трубопроводу длиной 150 мм необходимо подавать 10 м³/ч жидкости. Допустимая потеря напора 10 м. Определить требуемый диаметр d трубопровода, принимая коэффициент трения λ = 0,03.

Ответ: d = 50 мм.

Задача 10.3 (рекомендуется для домашней проработки).

По горизонтальному трубопроводу перекачивается жидкость. Во сколько раз возрастет расход энергии (N_2/N_1), если через трубу будет проходить удвоенное количество жидкости.

Коэффициент трения считать постоянным, $\Delta p_{доп} = 0$.

Ответ: $N_2/N_1 = 8$.

Тема 11. ТЕПЛОПЕРЕНОСНЫЕ ПРОЦЕССЫ
(коллоквиум по теме)

11.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания, касающиеся сущности теплопереносных процессов.

11.2. Вопросы для самоподготовки

1. Место тепловых процессов в строительных технологиях.
2. Основные понятия, связанные с теплопереносом.
3. Передача теплоты теплопроводностью, дифференциальное уравнение теплопроводности для неподвижной среды.
4. Передача тепловой энергии конвекцией, дифференциальное уравнение конвективного теплообмена.
5. Передача теплоты на границе между изделием и движущимся газовым потоком. Уравнение поверхностной теплопроводности.
6. Тепловое подобие, критерии теплового подобия.

11.3. Информационные источники:

[1] – п.п. 7.1. – 7.8.
[3] – глава 7, п.п. 3, 4, 5.

11.4. Методика проведения занятия. Подведение итогов

Преподаватель вызывает одного из студентов к доске, вместе с аудиторией заслушивает ответ по предложенному вопросу, предлагает внести в состоявшийся ответ поправки, дополнения, свои версии, акцентирует внимание
аудитории на версии, в наибольшей степени раскрывающей суть вопроса.

По совокупности ответов у доски, дополнений и реплик с места каждый студент получает итоговую оценку знаний.

В соответствии с внедряемой в вузах рейтинговой системой оценки знаний рекомендуется студентов, получивших отличную оценку, освободить на семестровом экзамене по данной дисциплине от ответов на вопросы коллоквиума.

Тема 12. ИНЖЕНЕРНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

12.1. Цель занятия

Освоить практические приемы решения задач теплопереноса.

12.2. Вопросы для самоподготовки

1. Общая характеристика тепловых задач.
2. Задача о двустороннем нагреве строительного изделия.
3. Задача об одностороннем нагреве строительного изделия.
4. Теплопередача через ограждающие конструкции (на примере плоской стенки).

12.3. Информационные источники

[1] – п. п. 7.8.1 – 7.8.4.

[2] – глава 4 п.п. 1 – 23 (используется как справочный материал).

12.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1 - 4, вынесенных на самоподготовку.

Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

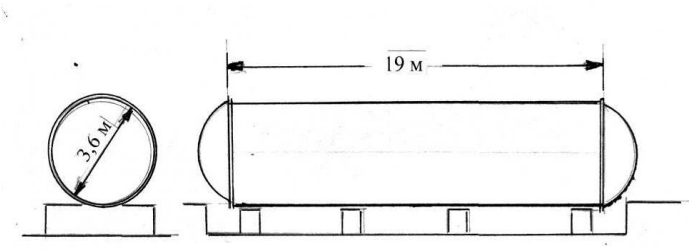


Рис. 12.1. К задаче 12.1

Задача 12.1. Автоклав 3,6×19 м с толщиной стенки 20 мм (торцевые крышки - в виде полусфер, общая площадь крышек – πD^2) имеет наружную обшивку из стальных листов толщиной 1мм, теплоизоляция выполнена из стекловатных сегментов (ρ = 180 кг/м³) толщиной 150 мм (рис 12.1). В автоклаве производится тепловая обработка ячеистобетонных блоков в объеме V = 80 м³ по режиму:

подъем давления до 10 ати – 2 ч;

выдержка при давлении 10 ати – 6 ч;

сброс давления до атмосферного – 3 ч.

Рассчитайте количество тепловой энергии, отданной автоклавом во внешнюю среду на 1-ой и 2-ой стадиях тепловой обработки (Q_1 и Q_2), среднюю (по продолжительности стадий) температуру поверхности обшивки ($t_н^1$ и $t_н^2$), если:

температура в цехе t_c = 15 °С;

средние значения коэффициента поверхностной теплоотдачи составили:

относительно внутренней поверхности автоклава -

на первой стадии α_1^1 = 6300 Вт/(м²·К);

на второй стадии α_1^2 = 12000 Вт/(м²·К);

относительно внешней поверхности автоклава -

на первой стадии α_2^1 = 12 Вт/(м²·К);

на второй стадии α_2^2 = 22 Вт/(м²·К).

Полученное значение тепловой энергии представьте в виде расхода пара общего – П, кг и удельного (на 1м³ изделий) – $П_{уд}$, кг/м³.

Ответ: Q_1 = 34837 кДж; Q_2 = 209497 кДж; П = 80 кг; $П_{уд}$ = 1 кг/м³; $t_п^1$ = 16,8 °С; $t_п^2$ = 17 °С.

Рекомендуется следующая последовательность решения задачи:

1) основное уравнение теплопередачи (см. [1] ф. (7.2)) представляется как для удельного потока, или применительно к приведенным обозначениям оно имеет вид:

$$q = k\cdot(t_{св} - t_{сн}),$$

где $t_{св}$ – температура среды внутри автоклава:

$t_{сн}$ – температура среды снаружи автоклава:

2) так как на первой стадии автоклавной обработки температура в автоклаве равномерно поднимается от начальной $t_{са}^н$ (можно принять 15 °С) до конечной $t_{са}^к$, то для этой стадии в расчет следует включить $t_{са} = (t_{са}^н + t_{са}^к)/2$:

3) определяются значения коэффициентов теплопередачи для 1-ой и 2-ой стадий - $к_1$, $к_2$;

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

необходимые для расчетов значения λ_1, λ_2, λ_3 имеются в Приложениях:

4) по основному уравнению теплопередачи рассчитываются удельные тепловые потоки для 1-ой и 2-ой стадий - q_1 и q_2;

5) рассчитывается поверхность теплообмена автоклава с внешней средой – S_a;

6) рассчитываются полные тепловые потери во внешнюю среду для 1-ой и 2-ой стадий – Q_1 и Q_2 по формуле $Q = 3{,}6\cdot q\cdot\tau\cdot S_a$, кДж,

где τ - продолжительность соответствующей стадии, ч;

7) определяются полные теплопотери $Q = Q_1 + Q_2$;

8) определяется количество пара П, кг, требуемое на компенсацию внешних теплопотерь $П = Q/r$,

где r - энтальпия пара при заданных параметрах;

9) вычисляются удельные потери пара $П = П/V$;

10) по уравнению поверхностной теплоотдачи от наружной поверхности обшивочного листа в воздушную среду цеха:

$$q = \alpha\cdot(t_н - t_с)$$

соответственно найденным значениям тепловых потоков определяются значения $t_н^1$ и $t_н^2$

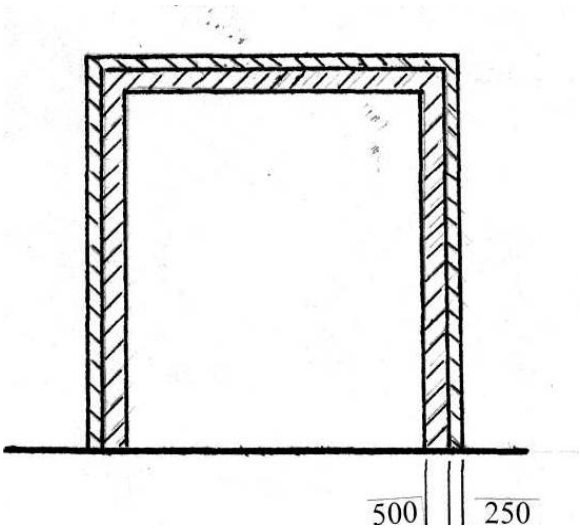


Рис. 12.2. К задаче 12.2

Задача 12.2 (рекомендуется для домашней проработки). Стенка печи (рис. 12.2) состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича (δ_1 = 500 мм) и строительного кирпича (δ_2 = 250 мм). Температура внутри печи t_1 = 1300 °С, температура наружного воздуха t_5 = 25 °С.

Определить:

1) удельные потери теплоты q;

2) температуру t_3 на границе между огнеупорным и строительным кирпичом.

Коэффициент теплопередачи от печных газов к стенке

$$\alpha_1 = 34{,}8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)};$$

коэффициент теплоотдачи от стенки к наружному воздуху

$$\alpha_2 = 16.2 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°С)};$$

коэффициент теплопроводности огнеупорного кирпича

$$\lambda_1 = 1{,}16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)};$$

коэффициент теплопроводности строительного кирпича

$$\lambda_2 = 0{,}58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}.$$

Ответ: q = 1340 Вт/м², t_3 = 684 °С.

Тема 13. МАССОПЕРЕНОСНЫЕ ПРОЦЕССЫ
(коллоквиум по теме)

13.1. Цель занятия

Закрепить теоретические знания, касающиеся сущности массопереносных процессов.

13.2. Вопросы для самоподготовки

1. Виды массопереносных процессов в строительных технологиях; основные термины и понятия.
2. Значение переноса вещества молекулярной диффузией; дифференциальное уравнение массопереноса для неподвижной среды.
3. Массоперенос в подвижной среде.
4. Массоперенос на границе подвижной и неподвижной сред.
5. Массообменное подобие; критерии массообменного подобия

13.3. Информационные источники

[1] – п. п. 8.1. – 8.6.

13.4. Методика проведения занятия. Подведение итогов

Преподаватель вызывает одного из студентов к доске, вместе с аудиторией заслушивает ответ по предложенному вопросу, предлагает внести в состоявшийся ответ поправки, дополнения, свои версии, акцентирует внимание
аудитории на версии, в наибольшей степени раскрывающей сущность вопроса.

По совокупности ответов у доски, дополнений и реплик с места каждый студент получает итоговую оценку знаний.

В соответствии с внедряемой в вузах рейтинговой системой оценки знаний рекомендуется студентов, получивших отличную оценку, освободить на семестровом экзамене по данной дисциплине от ответов на вопросы коллоквиума.

Тема 14. ВЛАГОПЕРЕНОСНЫЕ (МАССОПЕРЕНОСНЫЕ) ПРОЦЕССЫ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

14.1. Цель занятия

Освоить методические приемы расчетов влажностного состояния строительных изделий и конструкций.

14.2. Вопросы для самоподготовки

(могут быть разделены на два занятия)

1. Практические ситуации, для которых необходима оценка влажностного состояния изделий и конструкций.

2. Влагообмен между газовой (паровоздушной) средой и изделием (конструкцией): возможные направления влагообмена, влияние характеристик газовой среды, характеристик структуры строительного материала в изделии:

3. Температура газовой среды по сухому и мокрому термометрам, барометрическое давление общее и парциальное, влагосодержание и относительная влажность, энтальпия: определения, возможные соотношения:

4. Движущая сила влагопереноса. Влажностное равновесие между материалом и средой:

5. Уравнение внутренней молекулярной диффузии влаги.

6. Уравнение поверхностной влагоотдачи.

7. Структурные характеристики строительных материалов, их влияние на массопереносные процессы.

14.3. Информационные источники

[1] –п. 8.1.

[2] – глава 6 п.п. 1, 2, 3, 5, 6: глава 10 п.п. 1, 2, 3, 4, 5.

14.4. Содержание практического занятия

Обсудить содержание и существо вопросов 1-5, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

Задача 14.1. Воздух атмосферного давления, П = 745 мм. рт. ст., при температуре 34°С насыщен водяным паром. Определить парциальное давление воздуха ($p_в$) в смеси с водяным паром, объемное и массовое (абсолютное и относительное) содержание в нем пара ($y, \bar{y}, \bar{Y}$), плотность воздушно-паровой смеси ($\rho_{см}$), сравнить ее с плотностью сухого воздуха ($\rho_в$).

Ответ: $p_в$ = 705 мм. рт. ст., y = 0,0535, $\bar{y}$ = 0,0339, $\bar{Y}$ = 0,0351 кг пара/кг воздуха, $\rho_{см}$ = 1,105 кг/м^3, $\rho_{св}$ = 1,13 кг/м^3.

Последовательность решения задачи.

1. По Прил., табл.8.П, находят давление насыщенного водяного пара – $p_п$ при заданной температуре.

2. Определяют парциальное давление воздуха в смеси с паром по формуле $p_в = П - p_п$.

3. Определяют мольную (объемную) долю водяного пара в смеси:

$$y = p_п/П.$$

4. Определяют массовую долю пара:

$$\bar{y} = \frac{M_п \cdot y}{M_п \cdot y + M_в \cdot (1-y)},$$

где $M_п$ и $M_в$ – молярные массы водяного пара и воздуха (см. Прил., табл.П.1).

5. Определяют массовую относительную концентрацию паров воды:

$$\bar{Y} = \frac{\bar{y}}{1-\bar{y}}.$$

6. Определяют плотность воздушно-паровой смеси:

$$\rho_{см} = \frac{T_0 \cdot П}{22{,}4 \cdot T \cdot П_0} \cdot (M_в \cdot \rho_в + M_п \cdot \rho_п),$$

где $T_о$ и $П_о$ – температура и давление для нормальных условий ($П_о$ =760 мм. рт. ст.);

7. Определяют плотность сухого воздуха при тех же температуре и давлении:

$$\rho_в = \frac{M_в \cdot П \cdot T_0}{22{,}4 \cdot T \cdot П_0}.$$

Задача 14.2. Для обеспечения тепловой обработки железобетонных изделий установлен парогенератор, работающий на природном горючем газе. Расход горючего газа составляет V = 145 м^3/ч; коэффициент избытка воздуха на горение α = 1,05: расход воды на парообразование $q_в$ = 1500 кг/ч. Определить относительную влажность ($\varphi_{пг}$) и энтальпию ($J_{пг}$) парогазовой смеси на входе в камеру тепловой обработки, если ее температура $t_{пг}$ = 90 °С.

Дополнительные данные;

- масса сухих продуктов горения (дымовых газов), образующихся при сгорании газообразного топлива с α = 1,05, составила $q_{сг}$ = 12,3 кг/(м^3 горючего газа);

- масса паров воды, образующихся при сгорании топлива, q_{H2O} = 1,7 кг/м^3.

Ответ: $\varphi_{пг}$ = 0,79, J = 2799 кДж/кг.

Последовательность решения задачи 14.2:

1) определяют влагосодержание (то же, что массовая концентрация паров воды $\bar{Y}$) продуктов горения ($x_{пг}$) по формуле:

$$x_{пг} = \frac{G_{пв}}{G_{сг}},$$

где $G_{пв}$ – выход из парогенератора паров воды:

$$G_{пв} = q_в + q_{H_2O} \cdot V;$$

$G_{сг}$ – выход из парогенератора сухих газов:

$$G_{сг} = q_{сг} \cdot V;$$

2) определяют $\varphi_{пг}$, преобразовав относительно $\varphi_{пг}$ формулу:

$$x = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi_{пг} \cdot p_{нас}}{П - \varphi_{пг} \cdot p_{нас}},$$

где П - давление в камере тепловой обработки (можно принять как атмосферное);

$p_{нас}$ – давление насыщенного водяного пара при заданной температуре (см. Прил., табл. П.8.);

3) для определения энтальпии парогазовой смеси (кДж/кг) применима формула $J_{пг} = c_{сг} \cdot t + x \cdot i_п$,

где $c_{сг}$ – удельная теплоемкость сухих газов в кДж/(кг·К); значение удельной теплоемкости в кДж/(м^3·К) можно принять из Прил. к 4 – й части учебного пособия, табл. П.3.1, как для N_2;

окончательно $c_{сг} = c_{N2}/\rho_{N2}$,

где ρ_{N2} – плотность азота при заданной температуре:

$$\rho_{N_2} = \frac{M_{N_2}}{22{,}4} \cdot \frac{T_0}{T}.$$

Задача 14.3 (рекомендуется для самостоятельной проработки).

Рассчитать энтальпию парогазовой смеси, вырабатываемой парогенератором, если требуется получить парогазовую смесь с $\varphi_{пг}$ 60%, $t_{пг}$ = 110°С.

Ответ: $J_{пг}$ = 2629 кДж/кг.

Задача 14.4. Определить интенсивность (q_u) испарения влаги с открытой поверхности керамзитобетонной стеновой панели в процессе ее тепловой обработки продуктами горения природного газа с температурой $t_{пг}$ = 95 °С для следующих условий:

- состав продуктов горения (в объемных долях для нормальных условий):

y_{CO2} = 0,095 м^3/м^3;
y_{H2O} = 0,198 м^3/м^3;
y_{N2} = 0,707 м^3/м^3:

- продукты горения омывают поверхность панели со скоростью 0,2 м/с; давление в камере тепловой обработки - атмосферное;

- влагосодержание продуктов горения непосредственно у поверхности теплообрабатываемого изделия для расчетного периода времени составило $x_п$ = 0,340 кг/кг;

- коэффициент поверхностной влагоотдачи в достаточном для практики приближении можно вычислить, используя следующее критериальное уравнение $Nu' = A \cdot Re^n \cdot (Pr')^{0,33} \cdot Gu^{0,135}$, (А)

где Nu' = $\frac{\beta_u \cdot l}{D}$ (здесь β_u – коэффициент поверхностной влагоотдачи; D – коэффициент молекулярной диффузии паров воды в газовой среде продуктов

горения; l – определяющий линейный размер);

Re = $\frac{\rho \cdot w \cdot l}{\mu}$ – гидродинамический критерий Рейнольдса;

Pr' = $\frac{\mu_{пг}}{\rho_{пг} \cdot D}$ массообменный критерий Прандтля;

Gu = ($T_с$ – $T_м$)/$T_с$ – параметрический критерий Гухмана, где $T_с$ и $T_м$ – температуры сухого и мокрого термометров для теплоносителя; значения коэффициента A и показателя степени n в уравнении (А) можно принять из следующей таблицы

Таблица 14.1

Значения A и n

Re	A	n
1- 200	0,9	0,5
200 – 6000	0,87	0,54
6000 – 70000	0,347	0,65

Стеновая панель в камере расположена горизонтально, открытая поверхность имеет размеры 3×3 м.

Ответ: q_u = 0,0655 кг/(м^2·с)

Последовательность решения задачи 14.4:

1) в качестве расчетной зависимости принимается уравнение поверхностной массоотдачи $q_u = \beta_u \cdot (x_п - x)$, (Б)

где $x_п$ – влагосодержание продуктов горения у поверхности теплообрабатываемого изделия, кг/кг;

x – то же в ядре газового потока;

2) производится расчет значения x:

$$x = \frac{M_{H_2O} \cdot y_{H_2O}}{M_{CO_2} \cdot y_{CO_2} + M_{N_2} \cdot y_{N_2}};$$

3) определяется значение критерия Nu' из зависимости (А), для чего предварительно рассчитываются значения критериев Re, Pr', Gu;

при расчете критерия Рейнольдса (Re = $\frac{\rho_{пг} \cdot w \cdot l}{\mu_{пг}}$) следует принять:

$\rho_{пг}$ – плотность продуктов горения при заданных температуре и давлении:

$$\rho_{пг} = \frac{M_{CO_2} \cdot y_{CO_2} + M_{H_2O} \cdot y_{H_2O} + M_{N_2} \cdot y_{N_2}}{22{,}4} \cdot \frac{T_0}{T};$$

l – размер изделия в направлении движения теплоносителя;

$\mu_{пг}$ – вязкость продуктов горения при заданных параметрах, для ее определения можно воспользоваться диаграммой (Приложение 14 к 4-й части настоящего учебного пособия), приравняв вязкость смеси газов к вязкости азота (N_2):

при расчете критерия Прандтля ($Pr' = \mu_{пг}/(\rho_{пг} \cdot D)$) коэффициент диффузии D можно принять из Приложения, табл.9, как для диффузии паров воды в азот, его значение для рабочей температуры пересчитывается по формуле:

$$D = D_0 \frac{P_0}{P} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}};$$

при расчете параметрического критерия Гухмана ($Gu = (T_c - T_м)/T_c$) значение температурного параметра $T_м$ находится по J - x – диаграмме;

4) определяют значение коэффициента поверхностной влагоотдачи:

$$\beta_u = Nu' \cdot D/l$$

где параметр l должен соответствовать толщине массообменного (влагообменного) пограничного слоя, в первом приближении можно принять l = 20 мм;

5) определяют интенсивность испарения влаги по уравнению (Б); при этом следует принять во внимание, что найденное по п.4 значение β имеет размерность м/с, а окончательный результат относительно q_u должен иметь размерность кг/(м^2·с); с учетом последнего расчетная формула должна иметь вид:

$$q_u = \beta_u \cdot (x_n - x) \cdot \rho_{пг}.$$

Тема 15. МАСООПЕРЕНОСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОЦЕССАМ СУШКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

15.1. Цель занятия

Приобрести навыки расчетов сушильных процессов.

15.2. Вопросы для самоподготовки

1. Сущность конвективного способа сушки.
2. Сушильные свойства газовой фазы, определяемые с помощью J – x - диаграммы для влажного воздуха.
3. Представление на J – x - диаграмме для влажного воздуха теоретического процесса сушки.
4. Представление на J – x – диаграмме действительного процесса сушки.
5. Тепловой баланс процесса конвективной сушки. Расчет количества топлива на процесс.

15.3. Информационные источники

[3] – глава XV, п.п. 1, 2, 3, 6.

15.4. Содержание практического занятия

Обсудить существо вопросов 1 – 5, вынесенных на самоподготовку. Решить предлагаемые ниже задачи, проанализировать результаты решения.

К занятию каждый студент должен подготовить ксерокопию J – x – диаграммы.

Задача 15.1. Определить с помощью J – x – диаграммы влагосодержание (x), энтальпию (J), температуру мокрого термометра ($t_м$), точку росы ($t_р$) для воздуха, покидающего сушилку при $t = 50$ °C и $\varphi = 0,7$.

Ответ: x = 0,06 кг/кг, J = 209 кДж/кг, $t_м = 43$ °C, $t_р = 42$ °C.

Последовательность решения задачи 15.1:

1) состояние воздуха, покидающего сушилку, характеризуется точкой, расположенной на пересечении линии постоянной температуры и постоянной относительной влажности ($t = 50$ °C, $\varphi = 0,7$); которой и соответствуют искомые параметры x и J;

2) температура мокрого термометра соответствует точке пересечения линии J = const с линией, отвечающей значению $\varphi = 100$ %;

3) точка росы соответствует той температуре, при которой паровоздушная смесь найденного влагосодержания становится насыщенной водяным паром, чему соответствует точка пересечения линии x = const с линией $\varphi = 100$ %.

Задача 15.2. Сушильный процесс (СП, см.схему) осуществляется воздухом, нагретым в калорифере (К). Определить необходимое количество воздуха (L), параметры воздуха на выходе из калорифера (t_1,φ_1,x_1,J_1), количество

теплоты, получаемое воздухом в калорифере при следующих исходных данных.

Характеристики воздуха: атмосферного – x_o = 0,01 кг/кг, t_o = 20 °С;

на выходе из калорифера – x_2 = 0,028 кг/кг, t_2 = 34 °С.

Характеристики высушиваемого материала:

влажность (считая на общую массу):

начальная $U_н$ = 50 %,

конечная $U_к$ = 13 %;

температура:

начальная $t_{м1}$ = 18 °С,

на выходе из сушилки $t_{м2}$ = 42 °С,

средняя удельная теплоемкость (при влажности до 13 %) $c_м$ = 1,34 кДж/(кг·К). Производительность сушилки по абсолютно сухому материалу

G_c = 1 т/ч.

Характеристики внутренних транспортных устройств:

материал – сталь,

общая масса – $G_т$ = 600 кг.

Тепловые потери в окружающую среду – 10 % от всех остальных слагаемых теплового баланса.

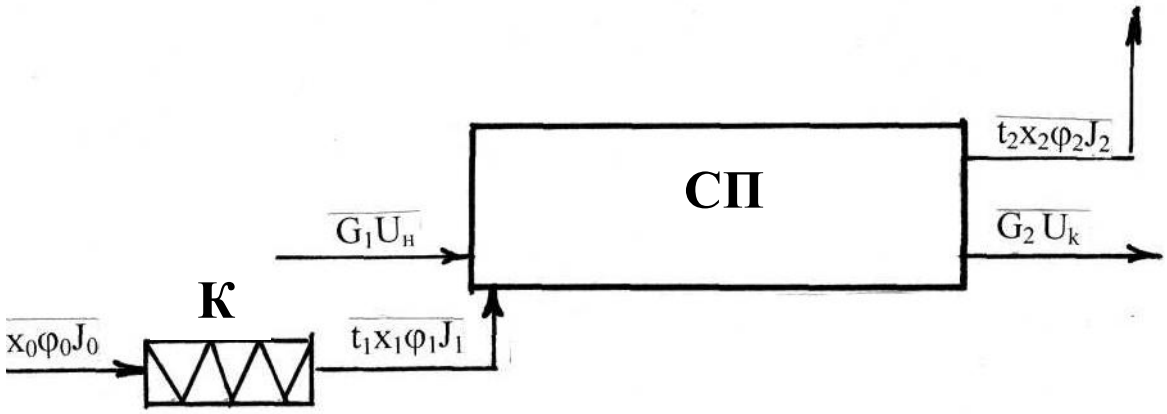


Рис.15.1. Схема сушильного процесса

Последовательность решения задачи:

1) определяют количество испаренной в сушилке влаги (W) по формуле

$$W = G_c \cdot \frac{U'_н - U'_k}{100},$$

где $U'_н$ и U'_k – начальная и конечная влажность материала относительно сухого его состояния, %, для ее определения применима формула

$$U' = \frac{100 \cdot U}{100 - U},$$

где U – влажность материала, отнесенная к его общей массе;

2) по J - x – диаграмме находят параметры состояния воздуха до калорифера (t_o, x_o, φ_o, J_o) и на выходе из сушилки (t_2, x_2, φ_2, J_2);

3) определяют расход воздуха (L, кг/ч) на испарение Wкг/ч влаги:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0};$$

4) определяют расход теплоты в теоретическом процессе сушки (Q_m, кДж/ч): $Q_T = L \cdot (\mathrm{I}_2 - \mathrm{I}_0)$;

5) определяют количество теплоты, привнесенное в сушилку с испаряемой влагой ($Q_в$): $Q_в = W \cdot c_в \cdot (t_{м1} - 0)$

(это количество теплоты следует вычесть из общих затрат, так как энтальпия воздуха J_2 включает энтальпию паров воды, исчисленную относительно 0°С;

6) определяют количество теплоты, затраченное на нагрев материала ($Q_м$): $Q_м = G \cdot c_м \cdot (t_{м2} - t_{м1})$,

где G – производительность сушилки по высушенному материалу, кг/ч:

$$G = G_c \cdot (1 + \frac{U_k}{100});$$

7) определяют количество теплоты, затраченное на нагрев транспортных устройств (Q_m): $Q_T = G_T \cdot c_T \cdot (t_{м1} - t_{v2})$,

где $c_т$ – удельная теплоемкость стали (см. Приложение, табл. П.5.);

8) определяют общее количество тепловой энергии (Q), производимой калорифером с учетом потерь в окружающую среду:

$$Q = (Q_T - Q_в + Q_м + Q_T) \cdot 1{,}1;$$

9) определяют энтальпию воздуха на входе в сушилку (J_1), исходя из следующей зависимости: $\mathrm{I}_1 - \mathrm{I}_0 = \frac{Q}{L}$,

откуда $\mathrm{I} = \frac{Q}{L} + \mathrm{I}_0$;

10) по J - x – диаграмме при известных J_1 и $x_1 = x_0$ находят остальные параметры нагретого воздуха – t_1 и φ_1.

Задача 15.3. (рекомендуется для самостоятельной проработки).

Какое количество влаги (W) удаляется из материала в сушилке, если воздух поступает в сушилку в количестве L = 200 кг/ч (считая на абсолютно сухой воздух) с t_1 = 95 °С, φ_1 = 5 %, а уходит из сушилки с t_2 = 50 °С и φ_2 = 60 %? Определить также удельный расход воздуха (l).

Ответ: W = 4 кг/ч, l = 50 кг/кг.

Задача 15.4 (рекомендуется для самостоятельной проработки).

Воздух перед поступлением в сушилку подогревается в калорифере до t_1 = 113 °С. При выходе из сушилки температура воздуха t_2 = 60 °С и φ_2 = 30%.Определить точку росы воздуха, поступающего в калорифер. Процесс сушки идет по линии J = const.

Ответ: $t_р$ = 25°С.

ПРИЛОЖЕНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

Таблица П.1

Атомные массы некоторых элементов

Наименование	Символ	Атомная масса	Наименование	Символ	Атомная масса
Азот	N	14,0067	Марганец	Mn	54,9380
Алюминий	Al	26,98154	Медь	Cu	$63,54_6$
Аргон	Ar	$39,94_8$	Молибден	Mo	95,94
Барий	Ba	137,33	Мышьяк	As	74,9216
Бериллий	Be	9,01218	Натрий	Na	22,98977
Бор	B	10,81	Никель	Ni	58,70
Бром	Br	79,904	Олово	Sn	$118,6_9$
Ванадий	V	50,9415	Платина	Pt	$195,0_9$
Висмут	Bi	208,9804	Радий	Ra	226,0254
Водород	H	1,0079	Ртуть	Hg	$200,5_9$
Гелий	He	4,00260	Свинец	Pb	207,2
Железо	Fe	$55,84_7$	Серебро	Ag	107,868
Золото	Au	196,9665	Сера	S	32,06
Иод	I	126,9045	Стронций	Sr	87,62
Кадмий	Cd	112,41	Сурьма	Sb	$121,7_5$
Калий	K	$39,098_3$	Титан	Ti	47,90
Кальций	Ca	40,08	Углерод	C	12,011
Кислород	O	$15,999_4$	Уран	U	$238,02_9$
Кобальт	Co	58,9332	Фосфор	P	30,97376
Кремний	Si	$28,085_5$	Фтор	F	18,998403
Криптон	Kr	83,80	Хлор	Cl	35,453
Ксенон	Xe	131,30	Хром	Cr	51,996
Литий	Li	$6,94_1$	Цинк	Zn	65,38
Магний	Mg	24,305			

Таблица П.2

Динамические коэффициенты вязкости воды

Температура, °С	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с (сП)	Температура, °С	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с (сП)	Температура, °С	Динамический коэффициент вязкости, мПа·с (сП)
0	1,792	33	0,7523	67	0,4233
1	1,731	34	0,7371	68	0,4174
2	1,673	35	0,7225	69	0,4117
3	1,619	36	0,7085	70	0,4061
4	1,567	37	0,6947	71	0,4006
5	1,519	38	0,6814	72	0,3952
6	1,473	39	0,6685	73	0,3900
7	1,428	40	0,6560	74	0,3849
8	1,386	41	0,6439	75	0,3799
9	1,346	42	0,6321	76	0,3750
10	1,308	43	0,6207	77	0,3702
11	1,271	44	0,6097	78	0,3655
12	1,236	45	0,5988	79	0,3610
13	1,203	46	0,5883	80	0,3565
14	1,171	47	0,5782	81	0,3521
15	1,140	48	0,5683	82	0,3478
16	1,111	49	0,5588	83	0,3436
17	1,083	50	0,5494	84	0,3395
18	1,056	51	0,5404	85	0,3355
19	1,030	52	0,5315	86	0,3315
20	1,005	53	0,5229	87	0,3276
20,2	1,000	54	0,5146	88	0,3239
21	0,9810	55	0,5064	89	0,3202
22	0,9579	56	0,4985	90	0,3165
23	0,9358	57	0,4907	91	0,3130
24	0,9142	58	0,4832	92	0,3095
25	0,8937	59	0,4759	93	0,3060
26	0,8737	60	0,4688	94	0,3027
27	0,8545	61	0,4618	95	0,2994
28	0,8360	62	0,4550	96	0,2962
29	0,8180	63	0,4483	97	0,2930
30	0,8007	64	0,4418	98	0,2899
31	0,7840	65	0,4355	99	0,2868
32	0,7679	66	0,4293	100	0,2838

Таблица П.3

Средние значения шероховатости труб

Трубопроводы	*e*, мм
Трубы стальные цельнотянутые и сварные при незначительной коррозии	0,2
Старые заржавленные стальные трубы	0,67 и выше
Трубы из кровельной стали проолифенные	0,125
Чугунные трубы водопроводные, бывшие в эксплуатации	1,4
Алюминиевые технически гладкие трубы	0,015 — 0,06
Чистые цельнотянутые трубы из латуни, меди и свинца; стеклянные трубы	0,0015 — 0,01
Бетонные трубы; хорошая поверхность с затиркой	0,3 — 0,8
Бетонные трубы; грубая (шероховатая) поверхность	3—9
Нефтепроводы при средних условиях эксплуатации и паропроводы насыщенного пара	0,2
Паропроводы, работающие периодически	0,5
Воздухопроводы сжатого воздуха от компрессора	0,8
Конденсатопроводы, работающие периодически	1,0

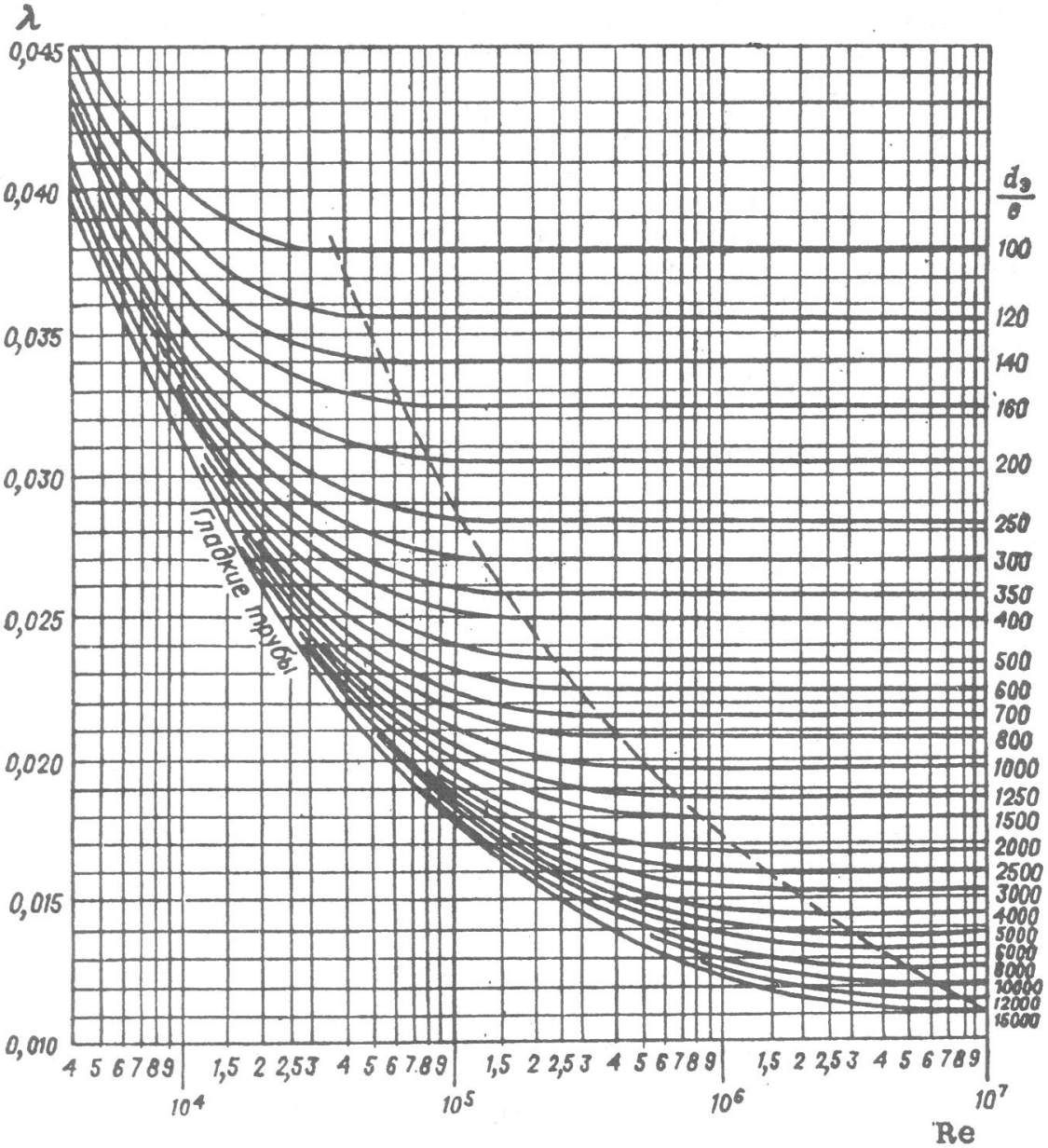
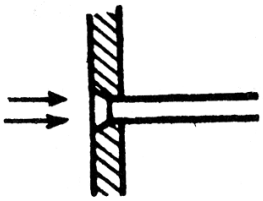
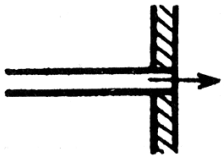
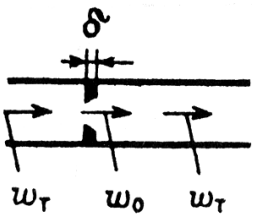


Рис. П.1 Зависимость коэффициента трения λ от критерия Re и степени шероховатости $d_э/e$

Таблица П.4

Коэффициенты местных сопротивлений

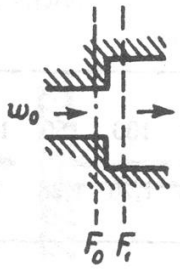
Вид сопротивления	Значение коэффициента местного сопротивления ζ
Вход в трубу 	С острыми краями: $\zeta = 0{,}5$ С закругленными краями: $\zeta = 0{,}2$
Выход из трубы 	При расчете Δp по формуле (1.49) это сопротивление ζ для выхода из трубы учитывать не надо $\zeta = 1$
Диафрагма (отверстие) с острыми краями в прямой трубе  d_0 — диаметр отверстия диафрагмы, м; δ — толщина диафрагмы, м; w_0 — средняя скорость потока в отверстии, м/с; $w_т$ — средняя скорость потока в трубе, м/с; $m = \left(\frac{d_0}{D}\right)^2$; D — диаметр трубы, м	При $\frac{\delta}{d_0} = 0 \div 0{,}015$ потеря давления $\Delta p = \frac{\rho \zeta w_т^2}{2}$ Значение ζ определяется по таблице:

m	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22
ζ	7000	1670	730	400	245	165	117	86,0	65,5	51,5	40,0
m	0,24	0,26	0,28	0,30	0,34	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
ζ	32,0	26,8	22,3	18,2	13,1	8,25	4,00	2,00	0,97	0,42	0,13

Вид сопротивления	Значение коэффициента местного сопротивления ζ
Отвод круглого или квадратного сечения d — внутренний диаметр трубопровода, м; R_0 — радиус изгиба трубы, м	Коэффициент сопротивления $\zeta = AB$ определяется по таблицам: Угол φ, градусы: 20, 30, 45, 60, 90, 110, 130, 150, 180 A: 0,31; 0,45; 0,6; 0,78; 1,0; 1,13; 1,20; 1,28; 1,40 R_0/d: 1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 15; 30; 50 B: 0,21; 0,15; 0,11; 0, 09; 0,06; 0,04; 0,03
Колено (угольник) 90° стандартный чугунный	Условный проход, мм: 12,5; 25; 37; 50 ζ: 2,2; 2; 1,6; 1,1
Вентиль нормальный	Значение ζ при полном открытии вентиля: D, мм: 13; 20; 40; 80; 100; 150; 200; 250; 350 ζ: 10,8; 8,0; 4,9; 4,0; 4,1; 4,4; 4,7; 5,1; 5,5
Вентиль прямоточный	При $Re = \frac{wD}{\nu} \geqslant 3 \cdot 10^5$ значение ζ определяется по таблице: D мм: 25; 38; 50; 65; 76; 100; 150; 200; 250 ζ: 1,04; 0,85; 0,79; 0,65; 0,60; 0,50; 0,42; 0,36; 0,32 При $Re < 3 \cdot 10^5$ коэффициент сопротивления $\zeta = \zeta_1 K$. Значение ζ_1 определяется так же, как и при $Re \geqslant 3 \cdot 10^5$, а значение K приведено в таблице: Re: 5000; 10 000; 20 000; 50 000; 100 000; 20 0000; 300 000 K: 1,40; 1,07; 0,94; 0,88; 0,91; 0,93; 1
Кран пробочный	Условный проход, мм: 13; 19; 25; 32; 38; 50 и выше ζ: 4; 2; 2; 2; 2; 2
Задвижка	Условный проход, мм: 15—100; 175—200; 300 и выше ζ: 0,5; 0,25; 0,15

Вид сопротивления	Значение коэффициента местного сопротивления ζ

Внезапное расширение



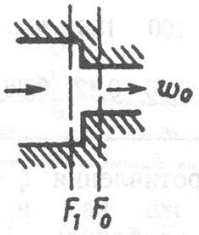
$Re = \frac{w_0 d_э}{\nu}$	F_0/F_1					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
10	3,1	3.1	3,1	3,1	3,1	3,1
100	1,70	1,40	1,20	1,10	0,90	0,80
1 000	2,0	1,60	1,30	1,05	0,90	0,60
3 000	1,00	0,70	0,60	0,40	0,30	0,20
3 500 и более	0,81	0,64	0,50	0,36	0,25	0,16

F_0 — площадь меньшего поперечного сечения, м²;
w_0 — скорость потока в меньшем сечении, м/с;
F_1 — площадь большего поперечного сечения, м²;

$Re = \frac{w_0 d_э}{\nu}$;

$\Delta p_{расш} = \zeta\,(\rho w_0^2/2)$

Внезапное сужение



$Re = \frac{w_0 d_э}{\nu}$	F_0/F_1					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
10	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
100	1,30	1,20	1,10	1,00	0,90	0,80
1 000	0,64	0,50	0,44	0,35	0,30	0,24
10 000	0,5	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
> 10 000	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20

F_0 — площадь меньшего поперечного сечения, м²;
w_0 — скорость потока в меньшем сечении, м/с;
F_1 — площадь большего поперечного сечения, м²;

$Re = \frac{w_0 d_э}{\nu}$;

$\Delta p_{суж} = \zeta\left(\frac{\rho w_0^2}{2}\right)$

Таблица П.5

Средняя удельная теплоёмкость некоторых твёрдых материалов

Алюминий	0,92	Каменный уголь	1,30
Асбест	0,84	Кварц	0,80
Бетон	1,13	Кирпич красный	0,92
Бронза	0,385	Кирпич огнеупорный	0,88—1,01
Винипласт	1,76	Кокс	0,84
Глина	0,92	Латунь	0,394
Дерево (сосна)	2,72	Лед	2,14
Железо	0,50	Литье каменное	0,84
Известняк, известь	0,92	Магнезия	0,92
Каолин	0,92	Медь	0,385
Мел	0,88	Стекло	0,42—0,84
Нафталин	1,30	Текстолит	1,47
Парафин	2,72	Целлюлоза	1,55
Песок сухой	0,80	Цинк	0,38
Пробка	1,68	Чугун	0,50
Резина	1,68	Шерсть	1,63
Свинец	0,13	Шлак	0,75
Сталь	0,50		

Таблица П.6

Мольная теплоемкость газов

Газ	Температура °С			
	0	100	300	600
Азот, кислород, воздух, оксид углерода	29,0	29,3	30,0	31,0
Аммиак	35,3	37,9	43,2	50,1
Водород	29,1	29,3	29,7	30,4
Водяной пар	35,0	35,5	36,7	39,3
Диоксид углерода и диоксид серы	38,6	41,1	45,7	54,3
Метан	35,7	39,7	47,8	59,8
Сероводород	34,3	35,8	38,8	43,3
Хлор	36,3	36,4	36,7	37,0

* С допустимым приближением данными таблицы можно пользоваться и при давлении порядка нескольких атмосфер.

Таблица П.7

Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	Плотность (для сыпучих материалов насыпная плотность), кг/м³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Асбест	600	0,151
Бетон	2 300	1,28
Винипласт	1 380	0,163
Войлок шерстяной	300	0,047
Дерево (сосна) поперек волокон	600	0,140—0,174
» » вдоль волокон	600	0,384
Кладка из обыкновенного кирпича	1 700	0,698—0,814
» » огнеупорного кирпича	1 840	1,05*
» » изоляционного кирпича	600	0,116—0,209
Краска масляная	—	0,233
Лед	920	2,33
Литье каменное	3 000	0,698
Магнезия 85 % в порошке	216	0,070
Накипь, водяной камень	—	1,163—3,49
Опилки древесные	230	0,070—0,093
Пенопласт	30	0,047
Песок сухой	1 500	0,349—0,814
Пробковая мелочь	160	0,047
Ржавчина (окалина)	—	1,16
Совелит	450	0,098
Стекло	2 500	0,698—0,814
Стеклянная вата	200	0,035—0,070
Текстолит	1 380	0,244
Торфоплиты	220	0,064
Фаолит	1 730	0,419
Шлаковая вата	250	0,076
Эмаль	2 350	0,872—1,163
Металлы		
Алюминий	2 700	203,5
Бронза	8 000	64,0
Латунь	8 500	93,0
Медь	8 800	384
Свинец	11 400	34,9
Сталь	7 850	46,5
» нержавеющая	7 900	17,5
Чугун	7 500	46,5—93,0

* При температуре 800 – 1100 °С.

Таблица П.8

Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

Температура, °С	Давление (абсолютное), кгс/см²	Удельный объем, м³/кг	Плотность, кг/м³	Удельная энтальпия жидкости i', кДж/кг	Удельная энтальпия пара i'', кДж/кг	Удельная теплота парообразования r, кДж/кг
0	0,0062	206,5	0,00484	0	2493,1	2493,1
5	0,0089	147,1	0,00680	20,95	2502,7	2481,7
10	0,0125	106,4	0,00940	41,90	2512,3	2470,4
15	0,0174	77,9	0,01283	62,85	2522,4	2459,5
20	0,0238	57,8	0,01729	83,80	2532,0	2448,2
25	0,0323	43,40	0,02304	104,75	2541,7	2436,9
30	0,0433	32,93	0,03036	125,70	2551,3	2425,6
35	0,0573	25,25	0,03960	146,65	2561,0	2414,3
40	0,0752	19,55	0,05114	167,60	2570,6	2403,0
45	0,0977	15,28	0,06543	188,55	2579,8	2391,3
50	0,1258	12,054	0,0830	209,50	2589,5	2380,0
55	0,1605	9,589	0,1043	230,45	2598,7	2368,2
60	0,2031	7,687	0,1301	251,40	2608,3	2356,9
65	0,2550	6,209	0,1611	272,35	2617,5	2345,2
70	0,3177	5,052	0,1979	293,30	2626,3	2333,0
75	0,393	4,139	0,2416	314,3	2636	2321
80	0,483	3,414	0,2929	335,2	2644	2310
85	0,590	2,832	0,3531	356,2	2653	2297
90	0,715	2,365	0,4229	377,1	2662	2285
95	0,862	1,985	0,5039	398,1	2671	2273
100	1,033	1,675	0,5970	419,0	2679	2260
105	1,232	1,421	0,7036	440,4	2687	2248
110	1,461	1,212	0,8254	461,3	2696	2234
115	1,724	1,038	0,9635	482,7	2704	2221
120	2,025	0,893	1,1199	504,1	2711	2207
125	2,367	0,7715	1,296	525,4	2718	2194

130	2,755	0,6693	1,494	546,8	2726	2179
135	3,192	0,5831	1,715	568,2	2733	2165
140	3,685	0,5096	1,962	589,5	2740	2150
145	4,238	0,4469	2,238	611,3	2747	2125
150	4,855	0,3933	2,543	632,7	2753	2120
160	6,303	0,3075	3,252	654,1	2765	2089
170	8,080	0,2431	4,113	719,8	2776	2056
180	10,23	0,1944	5,145	763,8	2785	2021
190	12,80	0,1568	6,378	808,3	2792	1984
200	15,85	0,1276	7,840	852,7	2798	1945
210	19,55	0,1045	9,567	897,9	2801	1904
220	23,66	0,0862	11,600	943,2	2803	1860
230	28,53	0,07155	13,98	989,3	2802	1813
240	34,13	0,05967	16,76	1035	2799	1763
250	40,55	0,04998	20,01	1082	2792	1710
260	47,85	0,04199	23,82	1130	2783	1653
270	56,11	0,03538	28,27	1178	2770	1593
280	65,42	0,02988	33,47	1226	2754	1528
290	75,88	0,02525	39,60	1275	2734	1459
300	87,6	0,02131	46,93	1327	2710	1384
310	100,7	0,01799	55,59	1380	2682	1302
320	115,2	0,01516	65,95	1437	2650	1213
330	131,3	0,01273	78,53	1498	2613	1117
340	149,0	0,01064	93,98	1564	2571	1009
350	168,6	0,00884	113,2	1638	2519	881,2
360	190,3	0,00716	139,6	1730	2444	713,6
370	214,5	0,00585	171,0	1890	2304	411,5
374	225	0,00310	322,6	2100	2100	0

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение к лабораторному практикуму.....55
Лабораторная работа № 1. Моделирование процесса перемешивания в смесителе гидромеханического типа.....57
Лабораторная работа № 2. Моделирование на АВМ и ЭВМ гидромеханического процесса течения неньютоновской жидкости на примере транспортирования по трубе растворной смеси.....65
Лабораторная работа № 3. Моделирование процесса виброуплотнения бетонной смеси.....77
Лабораторная работа № 4. Математическое моделирование теплопереносных характеристик процесса тепловой обработки бетонных изделий 83
Лабораторная работа № 5. Моделирование процесса псевоожижения в аппаратах с кипящим (псевдоожиженным) слоем.....102
Библиографический список.....110
ПРИЛОЖЕНИЯ.....111

ВВЕДЕНИЕ К ЛАБОРАТОРНОМУ ПРАКТИКУМУ

Совместно с практическими занятиями и курсовым проектом лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий» закрепляет теоретические знания по этой важной для будущего инженера-технолога дисциплине, развития навыков практического использования теоретических знаний в исследовании, моделировании, проектировании и оптимизации технологических процессов.

Практикум носит исследовательский характер. В него включены лабораторные работы, каждая из которых представляет собой самостоятельное исследование технологического процесса по одному из основных переделов обобщенной технологии строительных изделий: приготовлению формовочных смесей, их транспортированию по трубам, формованию, тепловой обработке.

При выполнении лабораторных работ студент увидит, как можно практически применить основные теоретические положения гидродинамики, тепло-и массопереноса, химической кинетики для инженерно-технологических решений. Кроме того, это поможет студенту освоить методику физического, математического и численного моделирования технологических процессов производства строительных материалов и изделий. В частности, в лабораторной работе № 1 применяются методы физического моделирования, остальные работы ориентированы на математическое и численное моделирование. Использование в практикуме, наряду с самым современным средством, каковым является цифровая ЭВМ, других средств, эффективно применявшихся в исследовательской практике ранее, помогает студенту лучше усвоить основные идеи и принципы математического моделирования, увидеть более широко возможности каждого метода.

Большинство методических разработок, составивших основу лабораторного практикума, явились итогом многолетних исследований кафедры технологии строительных изделий и конструкций Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Лабораторному практикуму предшествовало издание методических указаний, по отдельным работам: лабораторные работы № 1 и № 5 – д-р техн. наук, проф. Е.И. Шмитько, канд. техн. наук, доц. И.И. Первушиным; лабораторная работа № 2 и № 4 – д-р техн. наук, проф. Е.И. Шмитько, ст. преп. Т.Г. Святской; лабораторная работа № 3 – д-р техн. наук, проф. Е.И. Шмитько, д-р техн. наук, проф. В.Т. Перцевым. Настоящее издание дополнено новым программным обеспечением работ*.

Лабораторные работы рассчитаны на 34 часа учебных занятий.

---

*Примечание: авторы Е.И. Шмитько, Д.Н. Коротких, В.В. Мысков.

Подготовка к каждой лабораторной работе включает изучение лекционного материала в соответствии с представленным перечнем контрольных вопросов, ознакомление с методикой выполнения работы.

По выполненным лабораторным работам составляется отчет, который защищается перед преподавателем. В отчете требуется представить:

1) название работы;
2) цель работы;
3) перечень используемого оборудования и материалов;
4) методику выполнения работы;
5) результаты работы в виде необходимых расчетов, таблиц, графических зависимостей;
6) выводы.

Лабораторная работа №1
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В СМЕСИТЕЛЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТИПА

1.1. Цель работы

Реализовать на лабораторной модели процесс гидромеханического перемешивания смеси, обладающей свойствами вязкой жидкости; установить зависимость мощности, затрачиваемой на перемешивание, от параметров процесса и определить вид критериального уравнения, описывающего процесс перемешивания.

1.2. Краткие теоретические сведения

Эффективность работы гидромеханических смесителей определяется структурой и скоростью потоков, создаваемых мешалкой; в свою очередь структура и скорость потоков зависят от конструкции мешалки, способа установки ее в смесителе, конструкции самого смесителя, частоты вращения мешалки и др.

Процесс перемешивания исследуют обычно на моделях, геометрически подобных натурному смесителю (рис. 1.1.), а результаты иссле-

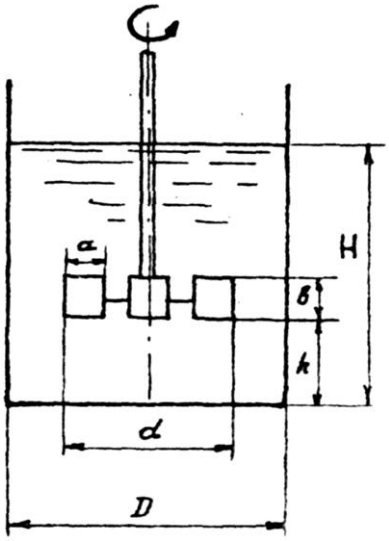


Рис. 1.1. Основные параметры, определяющие геометрическое подобие смесителей гидромеханического типа:

D – диаметр сосуда, H – высота жидкости в сосуде, d – диаметр смесительной лопасти, в – высота лопасти, a – длина лопасти, h – высота расположения лопасти относительно дна сосуда

дования обобщают в виде критериального уравнения вида:

$$Eu_m = C\, Re_m^x\, Fr_m^y, \qquad (1.1)$$

где Eu_m, Re_m, Fr_m – критерии гидродинамического подобия Эйлера, Рейнольдса и Фруда для мешалки, отличающиеся от общеизвестных гидродинамических критериев тем, что входящая в их состав линейная скорость заменена на окружную: $\omega = n\pi d$. С учетом такой замены критерии приобретают вид:

$$Eu_m = \frac{\Delta P}{\rho n^2 d^3}, \qquad (1.2)$$

$$Re_m = \frac{n d^2 \rho}{\mu}, \qquad (1.3)$$

$$Fr_m = \frac{n^2 d}{g}, \qquad (1.4)$$

где ρ и μ – соответственно, плотность и вязкость перемешиваемой жидкости, d – диаметр мешалки, n – частота вращения мешалки, ΔP – перепад давления, создаваемого лопастью мешалки.

От критерия Эйлера переходят к критерию мощности:

$$K_N = \frac{N}{n^3 d^5 \rho}. \qquad (1.5)$$

С учетом последнего, критериальное уравнение процесса перемешивания окончательно принимает вид:

$$K_N = C\, Re_m^x\, Fr_m^y, \qquad (1.6)$$

где C – коэффициент мощности.

Значения постоянной C и показателей степеней x и y зависят от конструкции мешалки и смесителя в целом, соотношения геометрических размеров аппарата и режима работы смесителя.

1.3. Общая последовательность выполнения лабораторной работы

В соответствии с поставленной целью в работе необходимо для данного типа смесителя определить значения характеристик C, x и y. Для этого на лабораторных моделях смесителей с различными геометрическими параметрами реализуют процесс перемешивания при различных режимах на жидкостях с отличающимися значениями ρ и μ; измеряют в каждом случае значения мощности, затрачиваемой на процесс перемешивания. Полученные экспериментальные данные аппроксимируют зависимостью вида (1.6) и получают искомые значения. Делают выводы об ожидаемой эффективности работы исследованных типов смесителей.

1.4. Оборудование, приборы и инструменты

При выполнении лабораторной работы используются следующие оборудование, приборы и инструменты.

1. Модельная установка для исследования процесса перемешивания.
2. Прибор для определения вязкости модельной жидкости.
3. Ареометр для определения плотности или мерный сосуд объемом 250 мл и весы технические лабораторные с точностью взвешивания ± 0,1 г.
4. Набор съемных лопастей турбинного типа.
5. Штангенциркуль, секундомер.
6. Металлический сосуд с крышкой.
7. Емкость разливочная, воронка, ветошь.
8. ЭВМ с установленной прикладной программой «Процесс 1.0».

1.5. Рабочее задание и методика выполнения работы

Звено студентов из 3-4 человек получает задание, в котором обозначены три состава модельных жидкостей, тип турбинной мешалки с определенными типоразмерами – d,b,a,h (согласно рис. 1.1).

В качестве модельных жидкостей рекомендуется использовать цементно-водную суспензию со значениями В/Ц-отношения в пределах от 0,45 до 0,70.

Экспериментальную часть начинают с определения плотности и вязкости каждой жидкости. Результаты заносят в табл. 1.1 и 1.2.

Плотность определяют или с помощью ареометра путем погружения его в модельную жидкость, или путем взвешивания жидкости в мерном цилиндре с последующим делением полученного значения массы жидкости на ее объем.

Таблица 1.1

Результаты определения плотностей модельных жидкостей

Номер жидкости	Плотность, измеренная по ареометру, кг/м^3	Плотность расчетная – ρ = m/V				
		Объем жидкости в мерном сосуде, мл	Масса сосуда без жидкости, г	Масса сосуда с жидкостью, г	Масса жидкости, г	Плотность, кг/м^3
1						
2						
3						

Для определения вязкости жидкостей используется вискозиметр типа РВ-8М. Устройство вискозиметра показано на рис. 1.2.

Принцип определения вязкости на вискозиметре типа РВ-8М основан на измерении скорости вращения внутреннего цилиндра (2) при неподвижном внешнем (1) в испытуемой жидкости под действием определенного груза.

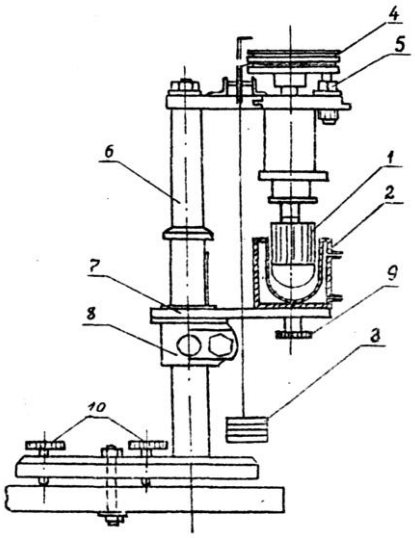


Рис. 1.2. Схема ротационного вискозиметра РВ-8М:

1 - внутренний цилиндр; 2 - наружный цилиндр; 3 - падающие грузы; 4 - шкив; 5- стопор; 6- штатив; 7- столик; 8 - подъемное устройство; 9- крепежный винт; 10- регулировочные винты

Перед проведением испытания необходимо оценить величину нагрузки холостого хода прибора. Для этого путем постепенного нагружения определяется минимальное значение груза P_0, при котором внутренний цилиндр начинает вращение.

При определении вязкости испытуемую жидкость в количестве 15 - 17мл загружают в наружный цилиндр, находящийся в крайнем нижнем положении. Наружный цилиндр с помощью подъемного устройства (8) приводят в рабочее положение и фиксируют с помощью винта (9). Избыток жидкости необходимо убрать. Установив минимальный груз (**P**) на блоке при условии $\mathbf{P > P_0}$, освобождают шкив (4) со стопора (5). При этом создается крутящий момент, приводящий внутренний цилиндр в движение. Сопротивление вязкого трения жидкости передается валу внутреннего цилиндра и фиксируется временем его полного оборота. Опыты повторяют 2 – 3 раза при различных значениях **P**. Вязкость модельной жидкости в Па·с рассчитывают по формуле:

$$\mu = K\frac{P - P_0}{n}t, \qquad (1.7)$$

где K – константа прибора, K=0,393; P – масса груза, г; n – число оборотов; t – время оборота; P_0 – масса груза, обеспечивающего холостой ход прибора.

Таблица 1.2

Результаты определения вязкостей модельных жидкостей

Номер жидкости	Нагрузка холостого хода, P_0, г.	Масса груза и чашек прибора P, г	Длительность 2-х оборотов диска прибора t, с	Расчетное значение вязкости μ, Па·с	Принятое (среднее) значение вязкости, Па·с
1					
2					
3					

После получения исходных данных относительно параметров ρ и μ приступают к выполнению основного задания.

Первым шагом здесь является измерение геометрических параметров смесительного сосуда и мешалки. Затем жидкости последовательно заливают в смесительную емкость (рис. 1.3) и реализуют процесс перемешивания при трех значениях частоты вращения вала мешалки.

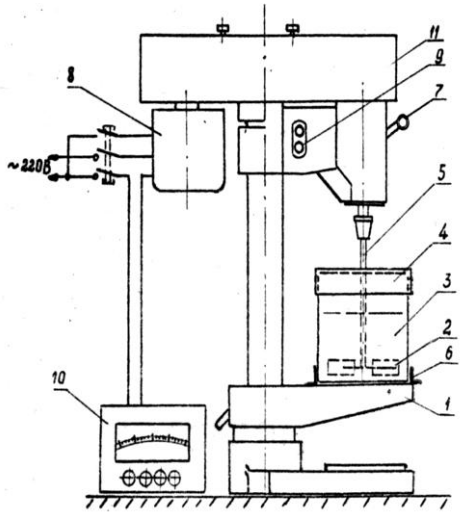


Рис. 1.3. Модель гидродинамического смесителя:

1 - предметный столик; 2 - рабочий орган мешалки; 3 - смесительная емкость; 4 – крышка; 5 - вал мешалки; 6 – крепеж; 7 - устройство для вертикального перемещения вала мешалки; 8 - приводной электродвигатель N = 0,18 кВт; 9 – пульт управления; 10 – ваттметр; 11 – вариатор для обеспечения задаваемых скоростей мешалки: 1-й диапазон – 26,7 $с^{-1}$;2-й диапазон – 16,7 $с^{-1}$; 3-й диапазон – 10 $с^{-1}$

Частота вращения вала мешалки регулируется перестановкой ремней ступенчатой клиноременной передачи. При каждой частоте вращения мешалки измеряются значения затрачиваемой мощности на перемешивание как разности между мощностью под нагрузкой и мощностью холостого хода мешалки. Результаты заносят в табл.1.3. На этом экспериментальная часть работы заканчивается. Дальше приступают к выполнению необходимых расчетов.

1.6. Результаты лабораторного исследования

Таблица 1.3

Результаты измерения мощности

Плотность жидкости, кг/м^3	Частота вращения мешалки, Гц	Мощность двигателя под нагрузкой, Вт	Мощность двигателя на холостом ходу, Вт	Мощность на перемешивание, Вт	Примечания
					Тип мешалки
					Геометрические размеры*
					H=
					d=
					в=
					a=
					h=

* - обозначения даны согласно рис. 1.1.

Исходные данные для расчетов и рассчитанные «вручную» или при помощи программы «Процесс 1.0» значения гидродинамических критериев заносят в табл. 1.4. В основу расчета критериального уравнения заложен метод наименьших квадратов.

Таблица 1.4

Расчет гидродинамических критериев

Номер жидкости	ρ, кг/м^3	μ, Па·с	n, Гц	N, Вт	d, м	Fr_m	Re_m	$K_N^{эксп}$	$K_N^{расч}$
1									
2									
3									

Порядок выполнения расчетов при помощи ЭВМ следующий:

1.Запустить программу «Процесс 1.0».

2.В появившемся диалоговом окне выбрать лабораторную работу № 1 и нажать ДАЛЕЕ.

3.Ввести значения плотности и вязкости 1-й жидкости, следовать указаниям помощника.

4.Ввести значения диаметра мешалки и мощности, затрачиваемой на перемешивание.

5.Записать выведенные на экран значения гидродинамических критериев.

6.Ввести значения плотности и вязкости 2-й жидкости.

7.Ввести значения диаметра мешалки и мощности, затрачиваемой на перемешивание.

8.Записать выведенные на экран значения гидродинамических критериев.

9.Ввести значения плотности и вязкости 3-й жидкости.

10.Ввести значения диаметра мешалки и мощности, затрачиваемой на перемешивание.

11.Записать выведенные на экран значения гидродинамических критериев.

12.Записать полученное аппроксимацией экспериментальных данных методом наименьших квадратов уравнение, сравнить расчетные и экспериментальные значения критериев мощности, пример показан на рис. 1.4.

13.Построить графические зависимости $K_N^{расч} = f(Re_m)$ при $Fr_m = const$.

Завершается лабораторная работа анализом полученных зависимостей. Для этого результаты моделирования всех звеньев объединяются и заносятся в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Характеристики смесителей и критериальные уравнения

Характеристики смесителя							Вид полученного критериального уравнения
тип мешалки	D, м	H, м	d, м	в, м	a, м	h, м	

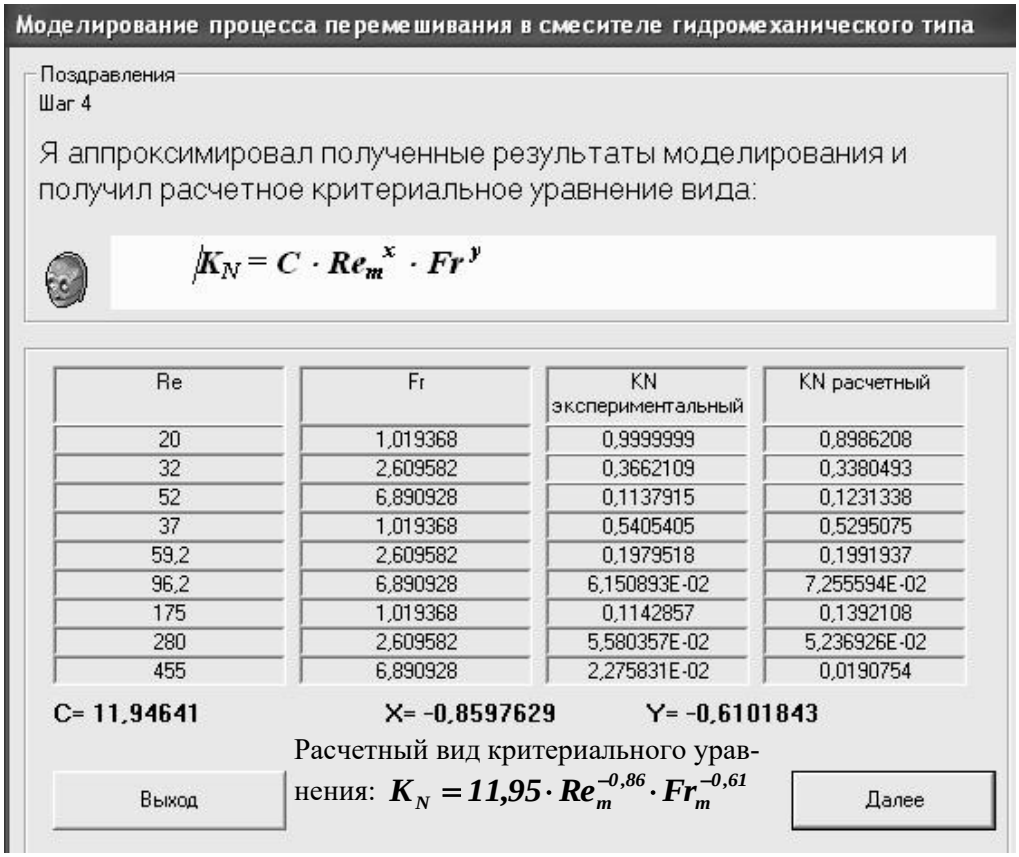


Рис. 1.4. Пример результатов при расчете на ЭВМ критериального уравнения процесса гидромеханического перемешивания

1.7. Выводы

На основании полученных данных, необходимо сделать выводы, как влияют тип мешалки, геометрические размеры мешалки и смесителя на затрачиваемую мощность, какой вариант мешалки можно рекомендовать для практического использования и каким критериальным уравнением можно адекватно описать реальный процесс перемешивания для данного типа смесителя.

1.8. Контрольные вопросы

1. Определение процесса перемешивания.

2. Значение процессов перемешивания в технологии строительных материалов и изделий.

3. Оценки процесса перемешивания по однородности полученной смеси, по затраченной энергии.

4. Охарактеризовать применяемые на практике способы перемешивания.

5. Характеристики циркуляционных потоков, создаваемых мешалками механического типа.

6. Конструктивные особенности смесителей механического типа.

7. Характеристики основных параметров смесителей и процесса перемешивания.

8. Критерии подобия, применяемые для количественного описания процесса перемешивания.

9. Вид, сущность и значение критериального уравнения процесса перемешивания.

1.9. Информационные источники

(согласно библиографическому списку):

[1] – глава VI, п.п. 1,2,3;

[13] – п.6.8.7.

Лабораторная работа № 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА АВМ И ЭВМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ НА ПРИМЕРЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПО ТРУБЕ РАСТВОРНОЙ СМЕСИ

2.1. Цель работы

Освоить методику моделирования на АВМ и ЭВМ гидродинамического процесса транспортирования по трубе вязкопластичной жидкости. Установить зависимости скорости течения вязкопластичной жидкости от величины давления, развиваемого насосом, от диаметра и длины трубы, от свойств жидкости.

2.2. Теоретические предпосылки

При течении вязкой ньютоновской жидкости распределение скорости по диаметру трубы (эпюра скорости) имеет параболический характер. В отличие от этого на эпюру течения вязкопластичной жидкости большое влияние оказывает показатель пластичности или предельное напряжение сдвига (τ_0). Если создаваемое насосом напряжение не превышает эту величину, то течение жидкости не происходит. В реальных условиях давление, создаваемое насосом, обеспечивает такое напряжение сдвига τ, что течение происходит или только по стенке трубы, или охватывает некоторую зону, прилегающую к стенке трубы; в остальном же сечении трубы, где $\tau < \tau_0$, относительного смещения условных слоев вязкопластичной жидкости не происходит и эта ее часть движется как сплошное твердое тело. Соответственно эпюра скорости будет представлена усеченной параболой, для которой r_0 – радиус ядра потока, движущегося как сплошное твердое тело.

Процесс вынужденного течения по трубе растворной смеси можно описать математической моделью течения вязкопластичной жидкости в виде дифференциального уравнения [5]:

$$\frac{\partial w}{\partial r} = -\frac{1}{\mu}\left(\frac{r\Delta p}{2l} - \tau_0\right), \qquad (2.1)$$

где w – истинное значение скорости течения жидкости в кольцевом сечении трубы с радиусом r, ΔP – перепад давления по длине (l) трубы, μ – эффективная вязкость растворной смеси, τ_0 – предельное напряжение сдвига.

Дифференциальное уравнение (2.1) можно записать в другой, более удобной для расчетов и моделирования форме:

$$w = \frac{\Delta P}{4\mu l}(R^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\mu}(R - r). \qquad (2.2)$$

Если в формулу (2.2) вместо r подставим r_0, то получим скорость движения ядра потока, что соответствует максимальной скорости.

При этом радиус ядра потока, в котором межслоевые градиенты скоростей отсутствуют, можно определить по формуле:

$$r_0 = \frac{4l\tau_0}{\Delta P_0}, \qquad (2.3)$$

где ΔP_0 – минимальный перепад давления по длине трубы, при котором действительное напряжение сдвига, действующее на боковой поверхности ядра потока, превысит предельное напряжение сдвига, которым обладает растворная смесь, то есть $\tau > \tau_0$, и, следовательно, только в части трубы, отвечающей условию $R > r > r_0$, будет происходить вязкопластичное течение растворной смеси с межслоевым градиентом скорости.

2.3. Рабочее задание

Смоделировать процесс транспортирования по трубе растворной смеси (рис. 2.1) и определить необходимый перепад давления, развиваемого растворонасосом при перекачке растворной смеси; установить зависимость скорости и расхода в трубопроводе от величины давления в растворонасосе; смоделировать эпюру скоростей в трубопроводе.

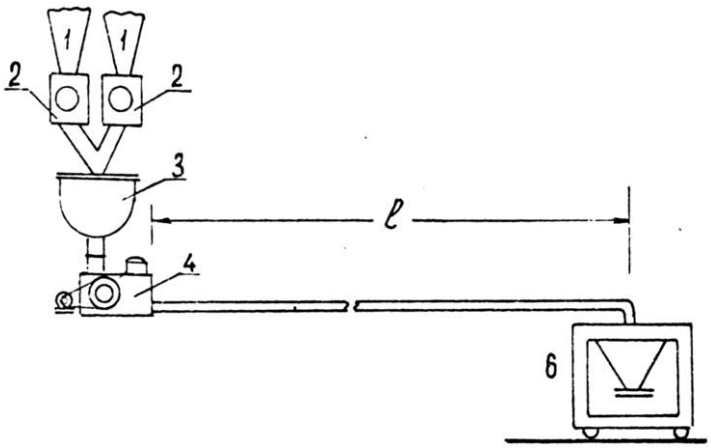


Рис. 2.1. Пример установки приготовления и подачи растворной смеси:
1 - расходные бункера сырьевых материалов;
2 - весовые дозаторы;
3 - растворосмеситель;
4 - растворонасос;
5 - трубопровод;
6 – раствороукладчик

Каждому студенту преподавателем задается одна из комбинаций следующих параметров:

1) производительность растворонасоса – 10, 20, 50 м^3/час;
2) диаметр трубы – 0,10, 0,15,0,20 м;
3) длина трубы – 20, 50, 100 м (труба расположена горизонтально);
4) эффективная вязкость – 20, 50, 100 Па·с (считать величиной постоянной);
5) предельное напряжение сдвига – 300, 500, 700 Па.

2.4. Указания по методике программирования на структурной АВМ

Структурные АВМ представляются в виде набора отдельных блоков, каждый из которых воспроизводит какую либо математическую операцию: сложение, умножение, деление, дифференцирование, интегрирование, преобразование знака и др. В зависимости от вида реализуемого математического уравнения, описывающего реальный процесс, и содержащихся в нем матема-

тических операций собирается схема из операционных блоков так, чтобы в итоге была создана структурная модель АВМ, способная решать это уравнение.

Решение задачи как результат работы структурной АВМ сводится к измерениям значений параметров процесса, представленных через определенные масштабы в виде электрического напряжения, к регистрации их изменения во времени с помощью записывающих приборов, к наблюдению за изменением параметров с помощью осциллоскопической аппаратуры.

Решению задачи на структурной АВМ предшествуют процессы анализа исходных математических данных и выявления схемы соединения отдельных операционных блоков АВМ. Этот процесс называется программированием структурной АВМ. При программировании решаются две задачи:

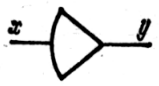
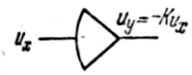
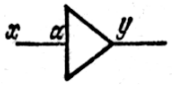
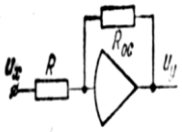
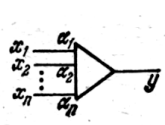
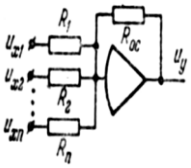
1. Операционные блоки АВМ организуются в соответствии с заданным математическим уравнением в структурно-вычислительную систему.

2. Выбираются масштабы представления исходных математических переменных в виде электрического напряжения и машинного времени.

Структурные и электрические схемы операционных блоков, правила исчисления коэффициентов передачи представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Операционные блоки структурной АВМ

Операционные блоки и математические действия	Структурная схема	Электрическая схема	Коэффициенты усиления и передачи
Операционный усилитель, $y=Kx$			Коэффициент усиления $K \geq 10^4$
Масштабный усилитель, y=-αx			Uy=-(Roc/R)Ux Коэффициент передачи масштабного усилителя α= Roc/R
Сумматор, $y=-\sum_{i=1}^{n}\alpha_i x_i$			$U_y=-\sum_{i=1}^{n}\frac{R_{oc}}{R_i}U_{xi}$ Коэффициент передачи сумматора по i-тому входу αi= Roc/Ri

Окончание табл. 2.1

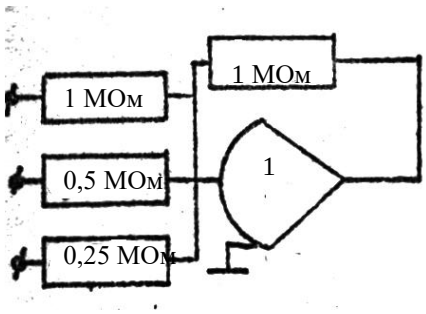
Операционные блоки и математические действия	Структурная схема	Электрическая схема	Коэффициенты усиления и передачи
Интегратор (интегросумматор), $y=-\int_0^t \sum_{i=1}^{n} \alpha_i x_i(t)dt + y(0)$			$U_y=-\int_0^t \sum_{i=1}^{n} \frac{U_{xi}(t)}{R_i C} dt + U_c(0)$ Коэффициент передачи интегратора по i-тому входу $\alpha_i = 1/R_i C$
Потенциометр, $y=\beta x$			$U_y=(r/R)U_x$ Коэффициент передачи потенциометра $0 \le \beta = r/R \le 1$
Блок перемножения, $z=xy$			$U_z=U_x U_y$
Блок деления, $z=x/y$			$U_z=U_x/U_y$

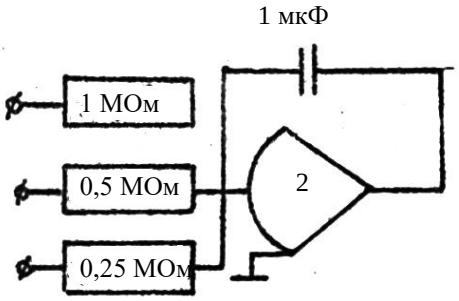
Ниже приведены примеры представления электрических схем в виде структурных схем, составления дифференциального уравнения по структурной схеме, составления структурной схемы по дифференциальному уравнению.

Преставление электрических и структурных схем

Задача 1. Определить назначение операционного блока, его название, коэффициенты передачи изображенных электрических схем, представить соответствующие им структурные схемы.

Задание





Ответ:

Сумматор

$$\alpha_1 = \frac{1}{1} = 1;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{0,5} = 2;$$

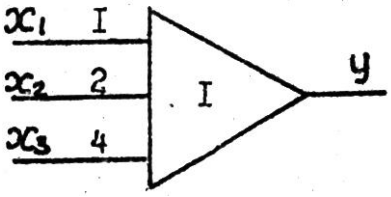
$$\alpha_3 = \frac{1}{0,25} = 4.$$

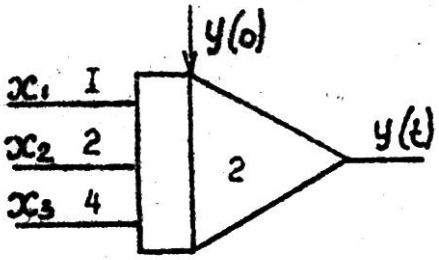
Интегросумматор

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1;$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 \cdot 0,5} = 2;$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{1 \cdot 0,25} = 4.$$



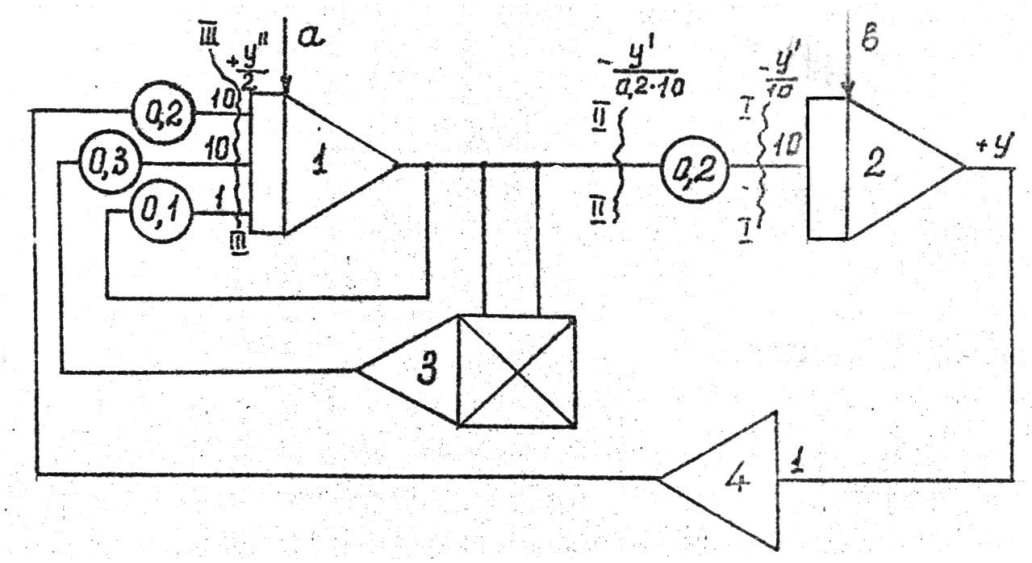


Задача 2. По структурным схемам, полученным при решении задачи 1, составить соответствующие им математические выражения.

Ответ: 1) $y = -(x_1 + 2x_2 + 4x_3);$

2) $y = -\int_0^t (x_1 + 2x_2 + 4x_3)dt + y(0).$

Задача 3. Составить дифференциальное уравнение для следующей структурной схемы.



Пояснения к процедуре составления уравнения

Используется метод искусственных сечений, при этом анализ схемы осуществляется от выхода к входу (входам).

Пусть на выходе схемы имеется электрический сигнал, соответствующий +y. Тогда, чтобы обеспечить требуемую входную величину, на участках цепи сигналы должны иметь значения:

$-\dfrac{y'}{10}$ - в сечении I-I;

$-\dfrac{y'}{0{,}2\cdot 10}$ - в сечении II-II;

$+\dfrac{y''}{2}$ - в сечении III-III;

В свою очередь последняя величина формируется как сумма по трем входам:

$$\frac{y''}{2}=0{,}2\cdot 10\cdot(-1)\cdot y+0{,}3\cdot 10\cdot\left(-\frac{y'}{2}\right)\cdot\left(-\frac{y'}{2}\right)+0{,}1\cdot 1\cdot\left(-\frac{y'}{2}\right).$$

Ответ: $y''+0{,}1y'-1{,}5(y')^2+4y=0$.

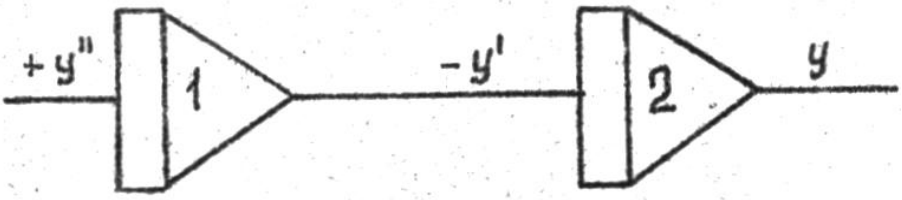
Пусть требуется разработать структурную схему для воспроизведения на АВМ дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами $y''(t)+\alpha_1 y'(t)+\alpha_0 y(t)=f(t)$ и начальными условиями $y'(0)=y_0'; y(0)=y_0$.

Такую процедуру проводят в несколько этапов:

1) уравнение разрешают относительно старшей производной:

$$y''(t)=-\alpha_1 y'(t)-\alpha_0 y(t)+f(t);$$

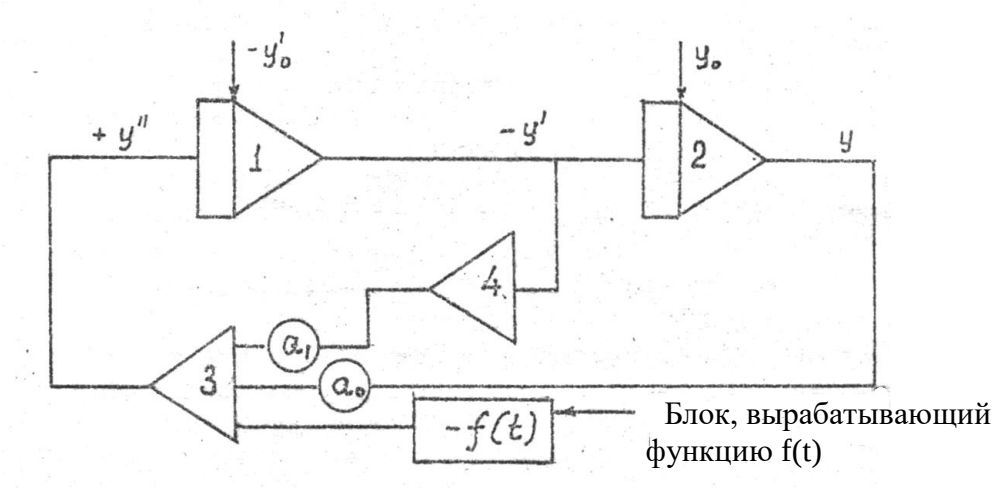
2) схематически изображается цепочка интеграторов (для решения уравнения необходимо столько интеграторов, каков порядок производной в уравнении; в нашем примере требуется 2 интегратора):



3) слева направо производят разметку выходов интеграторов, на вход первого интегратора подается старшая производная уравнения;

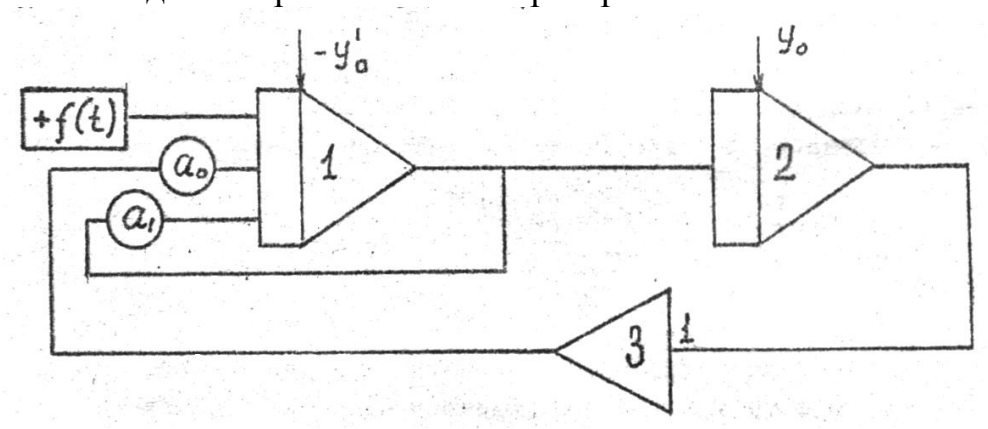
4) разрабатывают схему, воспроизводящую правую часть исходного уравнения;

5) замыкают обратную связь, тем самым устанавливая равенство левой и правой части уравнения:



6) в окончательном виде интегратор 1 и сумматор 3 можно совместить в виде интегросумматора 1, при этом знаки каждого входа должны быть заменены на обратные;

7) производят задание начальных условий интеграторов с учетом знаков выходных переменных интеграторов:



Воспроизведение заданных функций на АВМ.

Для воспроизведения на АВМ заданных функций применяют метод определяющих дифференциальных уравнений.

Дифференциальное уравнение называется определяющим по отношению к заданной функции y(t) , если y(t) является решением этого уравнения.

Отыскание определяющего дифференциального уравнения сводится к многократному последовательному дифференцированию функций.

Например, задано:

$y = 1 + t + t^2 + t^3$	$y = \alpha \sin \omega t$
Находят определяющие уравнения:	
$y' = 1 + 2t + 3t^2$ $y'' = 2 + 6t$ $y''' = 6$	$y' = \alpha \varpi \cos \omega t$ $y'' = -\alpha \varpi^2 \sin \omega t$ так как $\alpha \sin \omega t = y$, то $y'' = -\omega^2 y$

Дальнейшее воспроизведение функции в виде структурной схемы производят так же, как для обычного дифференциального уравнения.

Последовательность подготовки задачи к решению на АВМ

1. Вывод определяющего дифференциального уравнения.

Уравнение (2.1) следует преобразовать в определяющее относительно функции $w(r)$. Дифференцируя искомое уравнение по r , получают:

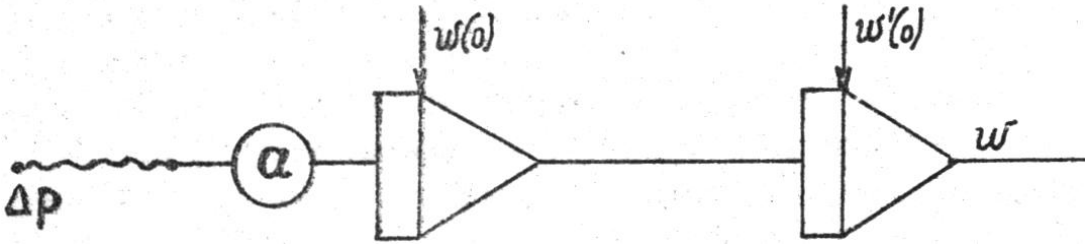
$$w''(r) = \alpha \cdot \Delta p, \qquad (2.4)$$

где $\alpha = -\dfrac{1}{2\mu l}$.

Численные значения начальных условий $w(0)$ и $w'(0)$ можно определить подстановкой $r = 0$ в выражение (1) и ее производной.

2. Составление структурной схемы АВМ.

Независимо от исходных данных она будет иметь следующий вид:



3. Математические и физические величины заменяют электрическими и проводят их масштабирование (в нашей задаче переменные w, w', Δp представляются напряжениями соответственно U_w, U_w', $U_{\Delta p}$, переменная r – машинным временем τ).

4. Рассчитывают коэффициенты передач операционных блоков АВМ.

5. Определяют напряжения, соответствующие начальным условиям.

6. Разрабатывают коммутационную схему, устанавливают коэффициенты передачи напряжений и значения начальных условий (для нашей задачи коммутационная схема для воспроизведения на АВМ типа МН-7Н уравнения (4) показана на рис. 2.2):

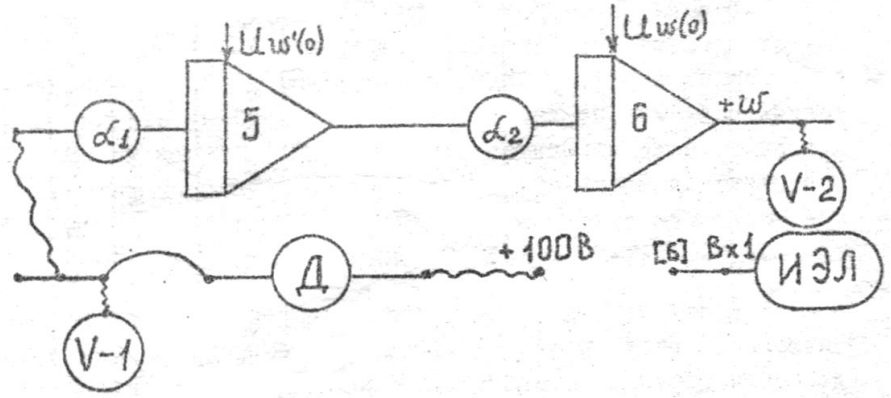


Рис. 2.2. Коммутационная схема:

Д – делитель напряжения, V-1, V-2 – вольтметры;

ИЭЛ – индикатор электронно-лучевой

7. Проводят машинный эксперимент.

2.5. Порядок выполнения расчетов на ЭВМ

1. Запустить программу «Процесс 1.0».
2. В появившемся диалогом окне выбрать лабораторную работу № 2 и нажать ДАЛЕЕ.
3. В появившемся окне ввести заданные преподавателем параметры процесса (пример показан на рис. 2.3).

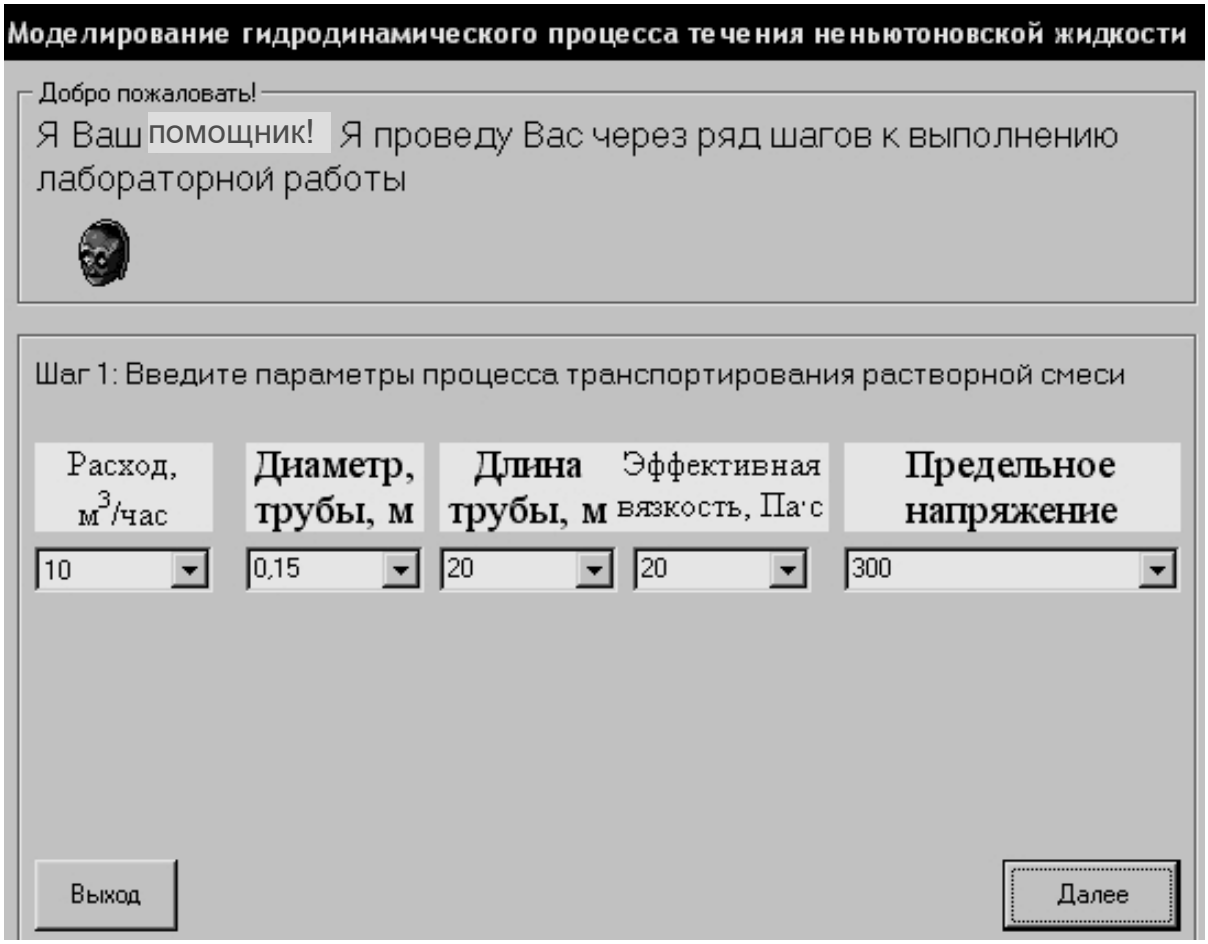


Рис. 2.3. Пример ввода исходных данных

После ввода исходных данных на ЭВМ начинают процесс моделирования течения по трубе растворной смеси, который включает комплекс последовательных вычислений:

а) рассчитывается средняя скорость жидкости в трубе по формуле

$$w_{cp} = \frac{Q}{S}, \qquad (2.5)$$

где Q – расход жидкости, S – площадь сечения трубы;

б) рассчитывают ориентировочную максимальную скорость жидкости

$$w_{max} = 1{,}25 w_{cp}; \qquad (2.6)$$

в) задают $r_0(0) = 0{,}9R$, где R – радиус трубы;

г) рассчитывают ΔP_0 по формуле:

$$\Delta P_0 = \frac{2l\tau_0}{r_0(0)}; \qquad (2.7)$$

д) задают величину $\Delta P_1 > \Delta P_0$;

е) рассчитывают величины $\Delta P_1 \ldots \Delta P_5$ по формуле:

$$\Delta P_{i+1} = \Delta P_i + \Delta P_1; \qquad (2.8)$$

ж) рассчитывают величины $r_0(1) \ldots r_0(5)$ по формуле:

$$r_0(i) = \frac{4l\tau_0}{\Delta P_i}; \qquad (2.9)$$

з) рассчитывают максимальные скорости и действительные скорости движения жидкости в необходимых точках трубы в зависимости от ΔP по формуле (2.2);

и) если $w_0(1) > 0$ и $w_0(5) > w_{max}$, то расчет считается законченным; если хотя бы одно из условий не выполняется, значение ΔP_1 увеличивается и расчеты по п.п. д – з выполняются повторно до достижения поставленных условий;

к) методом половинного деления находят: необходимое давление, которое должен развить насос для подачи запланированного объема растворной смеси, скорость ядра потока и среднюю скорость по сечению трубы.

4. В диалоговое окно ЭВМ выводятся результаты всех расчетов и предлагается просмотреть эпюры скоростей (кнопка ДАЛЕЕ).
5. На монитор выводятся эпюры скоростей для $\Delta P_1 \ldots \Delta P_5$, а также для необходимого перепада давления, значения средней и максимальной скорости (пример эпюры скоростей представлен на рис. 2.4).

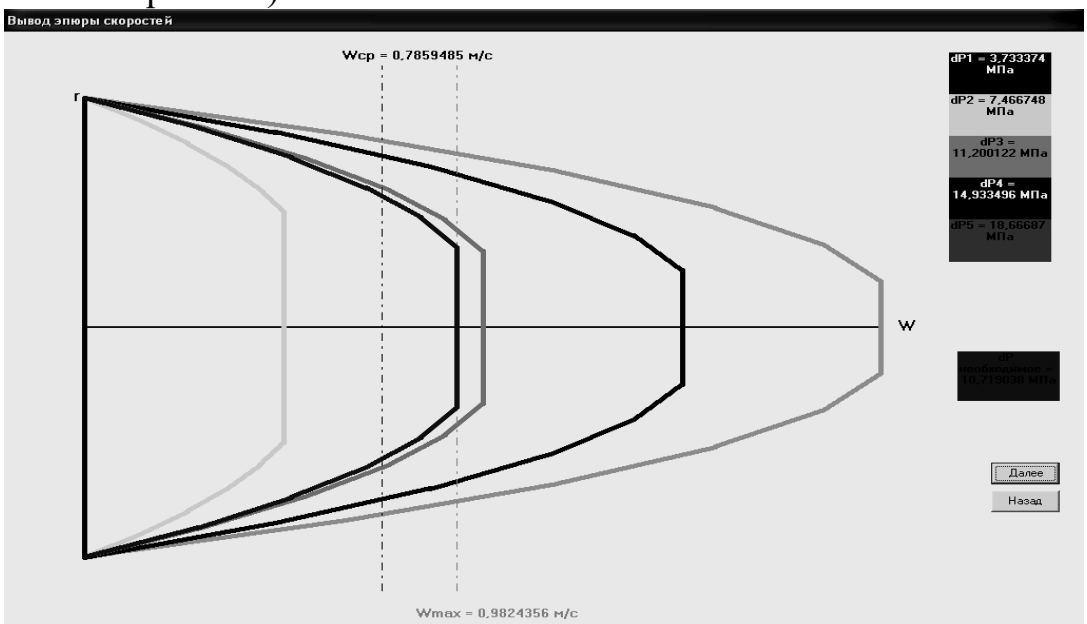


Рис. 2.4. Пример вывода эпюры скоростей

6. При нажатии на кнопку ДАЛЕЕ выводятся координаты точек для построения эпюры в лабораторном журнале студента (пример вывода представлен на рис. 2.5).

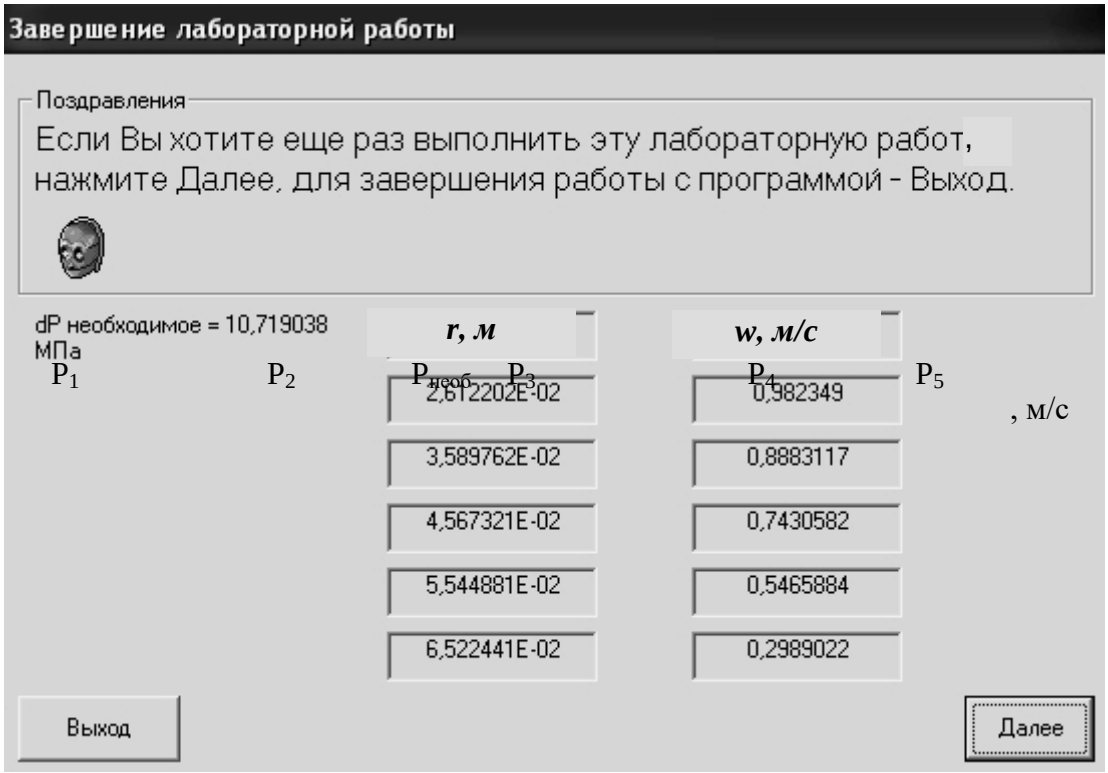


Рис. 2.5. Пример вывода результатов для построения эпюр скоростей

7. Результаты моделирования заносят в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Исходные данные	$\Delta P_{необходимое}$	Скорость ядра потока	Средняя скорость
Производительность, м^3/час. – ***Q*** = Диаметр трубы, м – ***D*** = Длина трубы, м – ***l*** = Эффективная вязкость, Па·с - $\boldsymbol{\mu}$ = Предельное напряжение сдвига, Па – $\boldsymbol{\tau_0}$ =			

2.6. Выводы

Необходимо сделать выводы о структуре потоков растворной смеси в трубопроводе в зависимости от величин давления, создаваемого растворонасосом, о необходимости и достаточности рабочих параметров процесса транспортирования смеси по трубопроводу.

2.7. Контрольные вопросы

1. Основные характеристики течения вязких ньютоновских и вязко-пластичных неньютоновских жидкостей.
2. Понятие предельного напряжения сдвига.
3. Эпюры скоростей при ламинарном течении по трубам вязких и вязко-пластичных жидкостей
4. Зависимость эпюры скоростей цементного раствора от значения водоцементного отношения.
5. Расчетные уравнения транспортирования по трубе растворной смеси.
6. Основные параметры и характеристики процесса транспортирования по трубе растворной смеси.
7. Принятые способы реализации математических моделей.
8. Операционные блоки структурной АВМ.
9. Порядок моделирования процесса транспортирования по трубе растворной смеси на АВМ и ЭВМ.

2.8. Информационные источники

[13] – п.3.13.4;
[4], [5] – выборочно.

Лабораторная работа №3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИБРОУПЛОТНЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ

3.1. Цель работы

Путем математического моделирования определить оптимальные условия проведения процесса виброуплотнения бетонной смеси.

Полученные результаты проверить и уточнить на физической модели.

3.2. Краткие теоретические сведения

В качестве математической модели процесса виброуплотнения с некоторыми допущениями можно принять уравнение физики, описывающее колебательное движение частиц в дисперсной среде, которое можно применить и для частиц крупного заполнителя, совершающих колебания относительно растворной составляющей бетонной смеси. Такое уравнение имеет вид:

$$m_1 \ddot{x} = (m - m_0)g \pm F_c sign\dot{x} + (m - m_0)A\omega^2 \sin\omega t, \qquad (3.1)$$

где $\boldsymbol{m_1}$ – эффективная масса колеблющейся частицы, определяемая как сумма масс непосредственно частицы (m) и вовлеченной в движение массы растворной составляющей бетонной смеси; m_0 – масса среды в объеме частицы; $\dot{x}$, $\ddot{x}$ - скорость перемещения и ускорение перемещения частицы относительно среды; $\boldsymbol{F_c}$ – сила сопротивления среды относительному передвижению частицы, $\boldsymbol{sign\ \dot{x}}$ (от латинского «зигнум») означает «с тем же знаком что и $\dot{x}$»; $\boldsymbol{A\omega^2 \sin\omega}$ - переменная во времени величина ускорения вынужденных колебаний среды; $\boldsymbol{A\omega^2}$ - амплитуда ускорения колебаний; $\boldsymbol{A}$ – амплитуда; $\boldsymbol{\omega}$ – круговая частота колебаний.

Приведенное уравнение не учитывает ряда факторов реального процесса (влияния колебания соседних частиц, их шероховатости, формы и др.), тем не менее, оно может служить достаточно надежным источником получения необходимых данных об оптимальности параметров процесса виброуплотнения бетонной смеси, что и предстоит выяснить в данной работе.

Как известно, при вибрационном воздействии под влиянием сдвиговых деформаций внутреннее трение бетонной смеси существенно уменьшается. Возникающее при этом относительное перемещение составляющих смеси способствует виброожижению смеси и снижению ее вязкости, что в конечном итоге приводит к упорядочению структуры бетона. Виброожиженная бетонная смесь проявляет гидродинамические свойства вязкой жидкости. Это и дает основание использовать для количественного описания процесса уравнение гидродинамики двухфазных сред [6].

Наиболее важным параметром, определяющим эффективность процесса виброуплотнения бетонной смеси, является амплитуда ускорения относительных колебаний среды и частицы, которая в свою очередь определяется

амплитудно-частотными характеристиками вынужденных колебаний, сообщаемых бетонной смеси извне.

Оптимальность процесса виброуплотнения можно оценить по продолжительности процесса виброуплотнения и по величине энергозатрат для достижения заданного эффекта уплотнения смеси. Первый показатель и принят в данной работе в качестве критерия оптимальности процесса.

3.3. Оборудование, инструменты и материалы

При выполнении лабораторной работы используются следующие оборудование, приборы и принадлежности:

1. ЭВМ с установленной программой «Процесс 1.0».
2. Щебень, цемент, песок, вода.
3. Весы лабораторные.
4. Емкость для перемешивания бетонной смеси и смеситель.
5. Секундомер.
6. Виброизмерительный стенд.

3.4. Рабочее задание

1. При помощи ЭВМ реализовать математическую модель (3.1) при различных значениях амплитудно-частотных характеристик и определить оптимальные параметры процесса виброуплотнения бетонной смеси заданного состава (вид вибрационных колебаний, амплитуду ускорений и частоту колебаний).

2. Воспроизвести процесс виброуплотнения бетонной смеси на физической модели при регулируемых амплитудно-частотных характеристиках, близких к предварительному оптимуму, уточнить значение оптимума.

При выполнении работы звено студентов из 3-4 человек получает индивидуальное задание, в которое входят следующие характеристики исходных сырьевых материалов и бетонной смеси:

- истинная плотность цемента - 2900 – 3100 кг/м^3;
- истинная плотность песка - 2630 кг/м^3;
- истинная плотность щебня - 2450 кг/м^3;
- фракционность щебня - 5-10 мм, 10-20 мм;
- состав бетонной смеси (Ц:П:Щ:В): 1:1,9:3,5:0,4, 1:1,9:3,5:0,45, 1:1,9:3,5:0, 5.

3.5. Методика выполнения работы

Математическое моделирование выполняется на ЭВМ при помощи программы «Процесс 1.0».

Порядок выполнения расчетов при помощи ЭВМ следующий:

1. Запустить программу «Процесс 1.0».
2. В появившемся диалогом окне выбрать лабораторную работу № 3 и нажать ДАЛЕЕ.

3. В появившемся окне ввести заданные преподавателем исходные данные (пример показан на рис. 3.1).

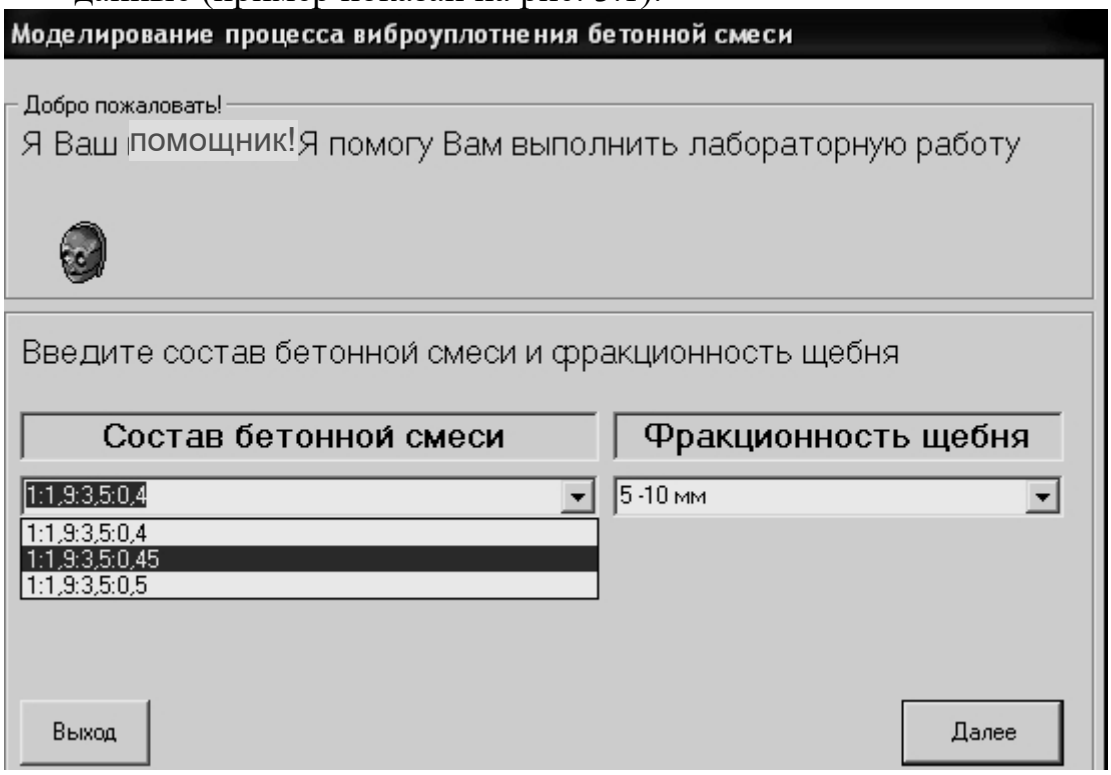


Рис. 3.1. Пример ввода исходных данных

После ввода исходных данных на ЭВМ начинается процесс моделирования, который включает комплекс последовательных вычислений:

а) рассчитывается плотность растворной составляющей по формуле

$$\rho_c = \frac{Ц + В + П}{\frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{В}{\rho_в} + \frac{П}{\rho_п}}, \qquad (3.2)$$

где $Ц$, $В$ и $П$ – расход на 1 м^3 бетонной смеси соответственно цемента, воды и песка в кг; $\rho_ц$, $\rho_в$ и $\rho_п$ – истинные плотности цемента, воды и песка в кг/м^3;

б) уравнение (3.1) приводится к виду

$$\ddot{x} = A \pm B\dot{x}^n + CA\omega^2 \sin\omega t, \qquad (3.3)$$

где n – показатель степени, который при переходном режиме перемещения частицы заполнителя равен 1,4, а при турбулентном – 2; A, B и C – постоянные, получаемые расчетом:

$$A = \frac{(m - m_0)g}{m_1}, \qquad (3.4)$$

$$B = \frac{F_c}{m_1}, \qquad (3.5)$$

$$C = \frac{m - m_0}{m_1}; \qquad (3.6)$$

в свою очередь $$m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_щ, \qquad (3.7)$$

$$m_0 = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_c, \qquad (3.8)$$

$$m_1 = m + \frac{1}{2} m_0. \qquad (3.9)$$

В расчетах форма зерна крупного заполнителя принимается шарообразной, с диаметром, соответствующим среднему диаметру зерна заполнителя в принятой фракции.

Для расчета величины присоединенной массы используется формула, полученная Н.Л. Гранат [6]:

$$m' = \frac{1}{2}\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_c\right) = \frac{1}{2} m_0. \qquad (3.10)$$

Для расчета силы сопротивления используется формула Стокса для силы сопротивления при движении твердых шарообразных тел в жидкой фазе [1]:

$$F_c = \xi S \frac{\rho_c \dot{x}^2}{2}, \qquad (3.11)$$

где S – площадь лобового сечения частицы; ξ – коэффициент сопротивления среды, принимаемый для ламинарного режима (Re<2) равным $\frac{24}{Re}$, для переходного режима (Re=2 – 500) - $\frac{18,5}{Re^{0,6}}$, для турбулентного равным 0,44.

После расчета коэффициентов методом Рунге-Кутта решается дифференциальное уравнение (3.3) и рассчитывается глубина погружения (высота смещения) частицы щебня за продолжительность времени 5 с при различной величине ускорения вынужденных колебаний.

3.6. Результаты работы

Результаты всех расчетов выводятся на монитор (пример вывода расчетных данных представлен на рис. 3.2.)

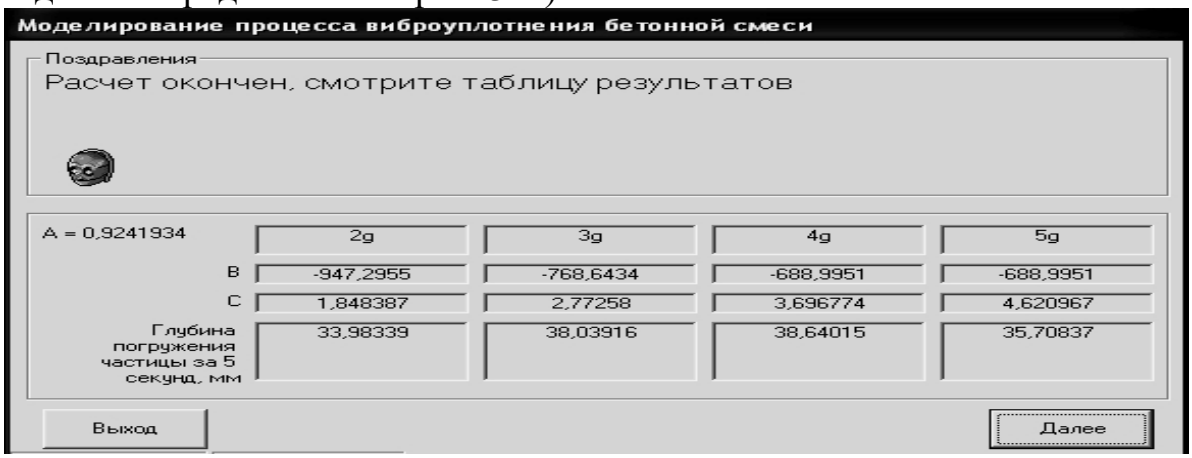


Рис. 3.2. Пример вывода расчетных данных

Расчетные данные заносятся в табл. 3.1.

При нажатии на кнопку ДАЛЕЕ выводится графическая зависимость глубины погружения частицы щебня за 5 с от величины ускорения колебаний, эта зависимость должна быть представлена в тетради для лабораторных работ (пример зависимости представлен на рис. 3..3).

Таблица 3.1

Результаты математического моделирования на ЭВМ

Расчетные величины	Ускорения колебаний			
	2g	3g	4g	5g
A				
B				
C				
Глубина погружения частицы щебня за 5 с				

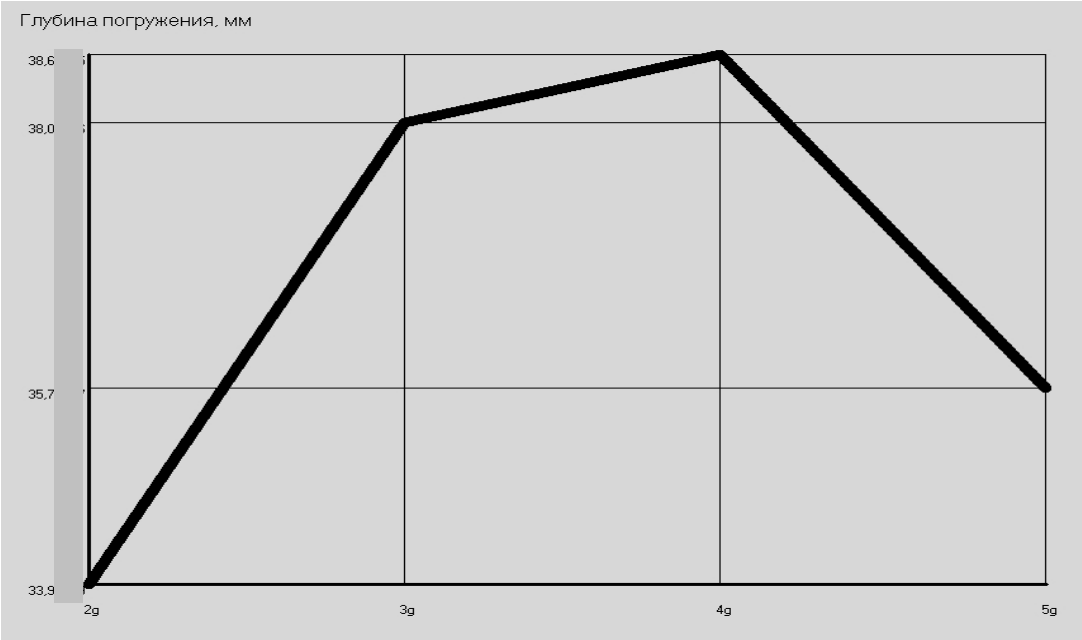


Рис. 3..3. Пример графической зависимости глубины погружения частицы щебня за 5 с от величины ускорения колебаний

На основании анализа результатов математического моделирования за отся три значения ускорения колебаний для физического моделирования: 1 - соответствующее оптимуму, 2 - на 5 м/с^2 выше оптимума, 3 - на 5 м/с^2 ниже оптимума.

Звено студентов, закончившее математическое моделирование, переходит работать на виброизмерительный стенд (схема стенда и порядок работы на виброизмерительном стенде представлены в прил. 1). Здесь используется за-

мес бетонной смеси заданного состава в объеме 2 л, смесь закладывают в форму (или технический визкозиметр, для которого готовят замес объемом 6,5л (методика определения удобоукладываемости бетонной смеси представлена в Прил. 2). Форму с бетонной смесью устанавливают на вибростол и реализуют измерение времени уплотнения по показателю мощности. Результаты заносят в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты физического моделирования

В/Ц	$A\omega^2$, м/с^2	Продолжительность уплотнения, с

По результатам физического моделирования строят графическую зависимость времени уплотнения от ускорения колебаний и определяют окончательный оптимум по времени уплотнения.

3.7. Выводы

В выводах необходимо проанализировать влияние параметра $A\omega^2$ на продолжительность уплотнения бетонной смеси, связать полученные результаты с известной зависимостью изменения вязкости бетонной смеси от ускорения колебательного процесса. Необходимо также сравнить результаты математического и физического моделирования, оценить их близость и сделать выводы о возможности и целесообразности изучения процесса виброуплотнения бетонной смеси на математических моделях и применения для этой цели ЭВМ.

3.8. Контрольные вопросы

1.Какими показателями можно оценить степень уплотнения бетона?

2.Какова связь степени уплотнения бетона с его свойствами?

3.В чем состоит физическая сущность процесса уплотнения бетонной смеси с помощью вибрации?

4.Как работают вибровозбудители?

5.Характеристики вибрационного процесса, уравнения колебательного процесса.

6.Теоретические предпосылки, позволяющие рассматривать виброуплотнение бетонных смесей как гидродинамический процесс.

7.Применительно к математической модели (3.1) рассмотреть силы, действующие на частицу заполнителя в колебательном процессе.

8.Какими параметрами вибрационного процесса можно регулировать продолжительность и энергоемкость уплотнения?

9.По каким признакам и характеристикам можно оценить завершенность процесса уплотнения?

3.9. Информационные источники

[13] – п.6.9; [10] – выборочно.

Лабораторная работа № 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

4.1. Цель работы

Уточнить математическую модель распределения температурных полей в бетонном изделии при его тепловлажностной обработке, т.е. решить обратную задачу математического моделирования. Определить основные теплопереносные характеристики процесса тепловой обработки бетонных изделий: коэффициент температуропроводности и коэффициент поверхностной теплоотдачи.

4.2. Рабочее задание

В процессе работы необходимо:

1. Произвести измерения температуры в сечении модельного бетонного образца при его тепловлажностной обработке.
2. Смоделировать процесс нагрева бетонного изделия на модели прямой аналогии – R-сеточном электроинтеграторе БУСЭ-70.
3. В процессе моделирования определить численные значения коэффициентов поверхностной теплоотдачи и температуропроводности, установить зависимость этих характеристик от температуры в камере тепловлажностной обработки.

4.3. Краткие теоретические сведения

Распределение температуры в изделии можно описать уравнением Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_э \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \qquad (4.1)$$

где t - температура в любой точке по объему изделия с координатами x, y, z; τ - параметр времени; $a_э$ - эквивалентный коэффициент температуропроводности, м^2/с, - переменная характеристика в тепловом процессе, зависящая от уровня температуры в тепловом агрегате, от интенсивности испарения или конденсации влаги в бетоне, от интенсивности тепловыделения цемента. В качестве расчетного варианта примем задачу об одномерном тепловом потоке в плоском изделии, для которого уравнение Фурье запишется в виде

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_э \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}; \qquad (4.2)$$

начальное условие: $t = t_0$; (4.3)

краевое условие: $\alpha_э \cdot (t_c - t_n) = \lambda_c \cdot \frac{\partial t_{cn}}{\partial x}$, (4.4)

где x - координата, соответствующая направлению теплового потока

(рис. 4.1); $\alpha_э$ - эквивалентный коэффициент поверхностной теплоотдачи, Вт/(м^2·К); λ_c - коэффициент теплопроводности среды (газообразного теплоносителя), Вт/(м·К); t_c - температура среды в ядре потока теплоносителя; t_{cn} - температура среды у поверхности изделия; t_n - температура поверхности изделия.

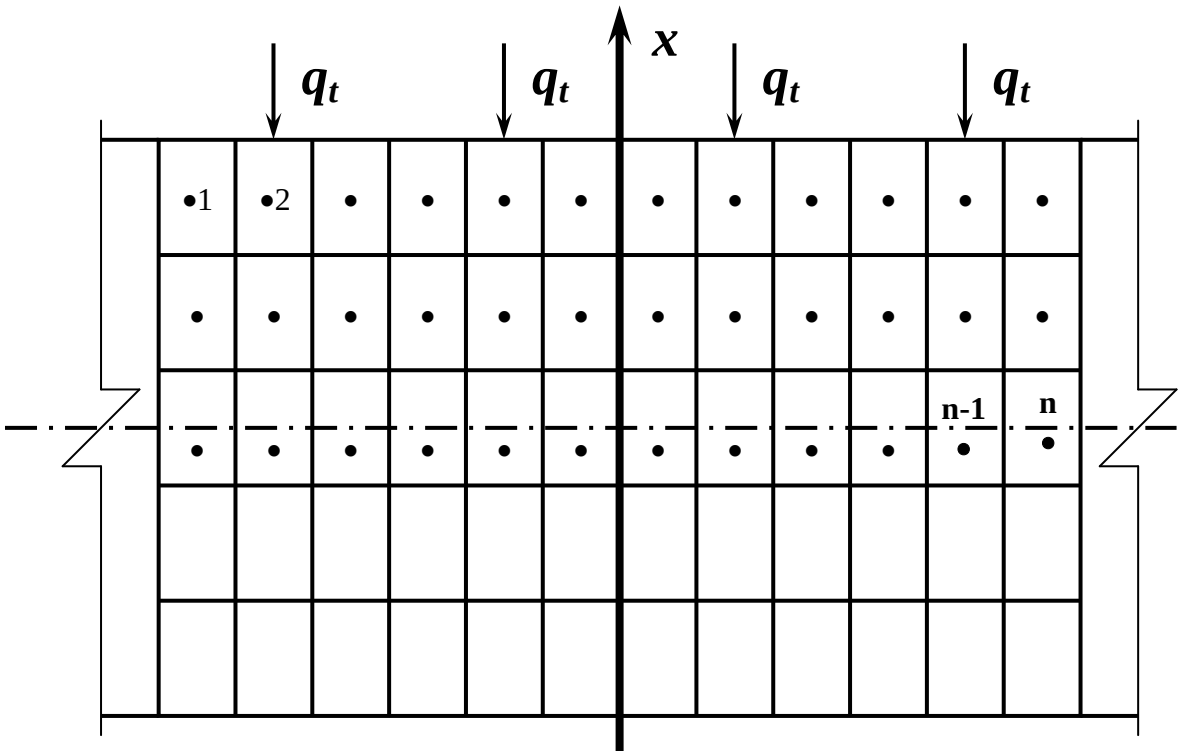


Рис. 4.1. Модельное представление тепловой задачи:
1, 2, …, n-1, n – элементарные площадки в сечении изделия;
q_t – удельный тепловой поток

з-ным теплопереносом, имеет место влагоперенос и связанный с ним дополнительный теплоперенос, а также тепловыделение цемента. Использование эквивалентных характеристик позволяет учесть в уравнениях теплопереноса явления влагопроводности, термовлагопроводности, пьезовлагопроводности, экзотермии цемента.

4.4. Методика выполнения работы

4.4.1. Общая последовательность выполнения работы

Звену студентов из 3-4 человек выдается отдельное задание по моделированию процесса нагрева изделия из бетона заданного вида и состава. Звено приступает вначале к выполнению физического моделирования. Рассчитывают расход сырьевых материалов на рабочий замес и формуют бетонный образец требуемых размеров. После предварительной выдержки в течение 2-х часов образец оснащают термопарами для измерения температур в заданных точках и устанавливают в лабораторную пропарочную камеру. Задают режим работы камеры, в ходе которого непрерывно с помощью термопар и автоматического потенциометра регистрируют температуру среды и бетона.

Результатом эксперимента являются температурные графики по заданным точкам бетонного образца. Они являются исходным рабочим материалом для математического моделирования.

В работе предусматривается два возможных варианта математического моделирования с целью определения эквивалентного коэффициента температуропроводности - $a_э$: первый вариант основывается на использовании решения уравнения Фурье в виде графической зависимости критерия Фурье от значений скорости нагрева бетона на поверхности образца и перепадов температур на поверхности и в центре образца; по найденным значениям критерия Фурье определяются значения коэффициента $a_э$; второй вариант основывается на имитации процесса нагрева модельного образца с помощью электрической модели – аналога БУСЭ-70; на модели создается структура из активных электрических сопротивлений так, что протекание в ней электрического тока происходит аналогично протеканию теплоты в модельном образце, что позволяет, задавая электрические потенциалы пропорционально измеренным значениям температур, подбирать соответствующие значения активных электрических сопротивлений и рассчитывать значения $a_э$.

Значения коэффициента теплоотдачи находят подобным образом.

4.4.2. Требования к модельному образцу

Процесс нагрева моделируют для наиболее распространенных в заводской технологии стеновых панелей и блоков. Эти изделия являются плоскими, т.е. их можно рассматривать как пластину неограниченных размеров, чему соответствуют наиболее простые одномерные температурные поля (по толщине изделия). В связи с этим для модельного образца должны быть выдержаны следующие соотношения размеров, характеризующих плоскую пластину:

$$5H < B(L), \qquad (4.5)$$

где H - толщина образца; B и L - ширина и длина образца.

Минимальную толщину образца выбирают в зависимости от крупности включений или пор:

$$H \geq (8 \div 10)d, \qquad (4.6)$$

где d - диаметр наиболее крупных включений или пор.

Последнее условие обеспечивает сплошность температурных полей в образце.

Состав бетона должен быть таким же, как и в натурном изделии.

При формовании в образце оставляют горизонтальные отверстия диаметром 5 - 6 мм для ввода термопар (рис. 4.2).

4.4.3. Описание установки для физического моделирования

Используется лабораторная пропарочная камера. В качестве теплоносителя применяется водяной пар. Лабораторная пропарочная камера

(рис. 4.2) оснащена паровым котлом (5), насосом-вентилятором (8) для подачи в камеру подогретого воздуха (при использовании ненасыщенного пара), комплектом термопар и самопишущим автоматическим шести-или двенадцатиканальным потенциометром.

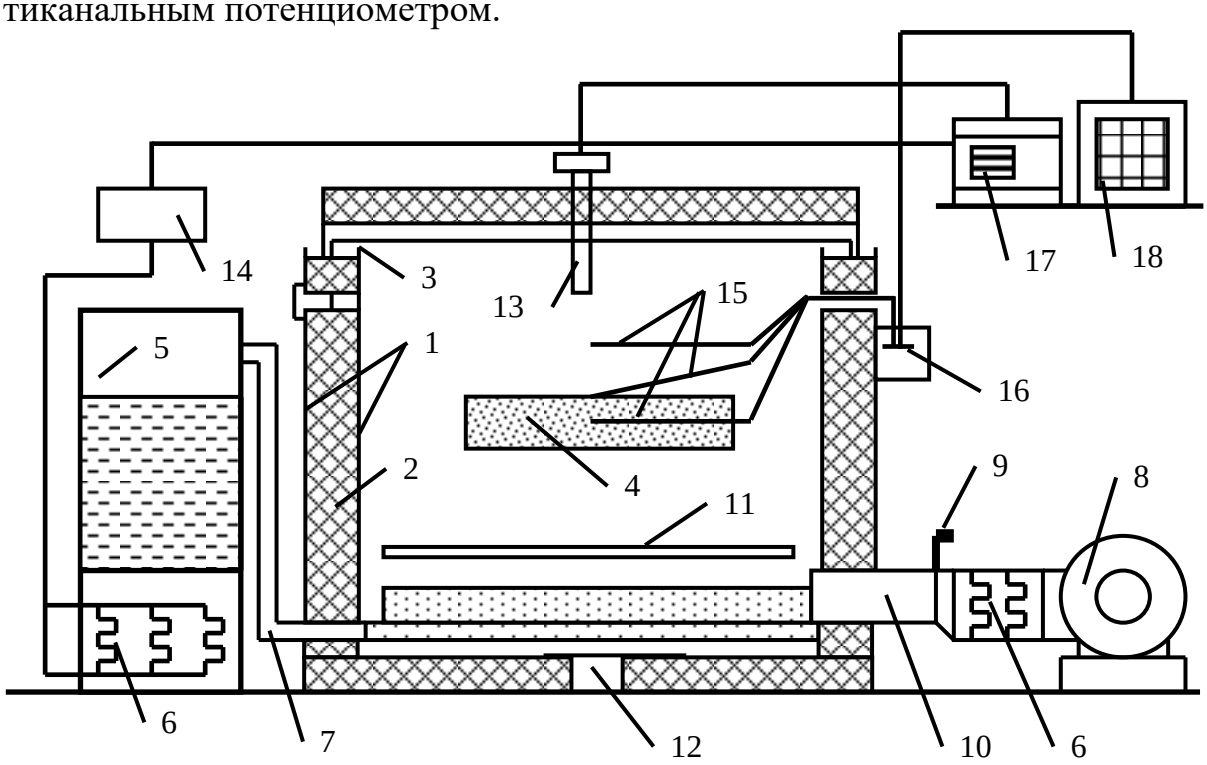


Рис. 4.2. Схема лабораторной пропарочной камеры:
1 – металлический корпус камеры; 2 – теплоизоляция; 3 – гидравлический затвор; 4 – бетонный образец; 5 – паровой котел; 6 – теплоэлектронагреватели (ТЭНы); 7 – паровая труба; 8 – центробежный вентилятор; 9 – задвижка; 10 – воздуховод; 11 – днище-рассекатель; 12 – конденсатоотвод; 13 – термодатчик; 14 – магнитный пускатель; 15 – термопары; 16 – термостат для холодных спаев термопар; 17 – программный регулятор температуры; 18 – потенциометр

4.4.4. Указания по проведению физического эксперимента

Эксперимент может проводиться на одном из следующих видов бетона:

а) тяжелый бетон состава: - 1 : 2 : 4 : 0,45;

б) легкий керамзитобетон состава:

цемент	- 280 кг/м^3;
керамзитовый гравий требуемой крупности	- 600 кг/м^3;
песок	- 300 кг/м^3;
вода	- 150 л/м^3.
Ориентировочная плотность бетона после тепловой обработки	- 1200 кг/м^3;

в) ячеистый безавтоклавный бетон состава:

цемент портландский М-500	- 300 кг/м^3;
известь гашеная в порошке	- 50 кг/м^3;
песок строительный молотый	- 300 кг/м^3;
вода с температурой 80 °С	- 390 л/м^3;
алюминиевая пудра	- 500 г/м^3;
Ориентировочная плотность бетона после тепловой обработки	- 700 кг/м^3.

Размеры формуемых образцов:

- 0,25×0,25×0,05 м	- для 1-го варианта образца (рис. 4.3 а);
- 0,5×0,5×0,1 м	- для 2-го варианта образца (рис. 4.3 б).

Дополнительные указания по изготовлению образцов даются преподавателем в ходе работы. Рабочий состав бетонной смеси в пересчете на объем образца фиксируется в рабочем журнале.

Изготовленные образцы после предварительной выдержки в течение 2 часов устанавливаются в рабочий объем пропарочной камеры так, чтобы была обеспечена равномерная со всех сторон циркуляция теплоносителя. Расположение термопар должно быть следующим (рис. 4.3).

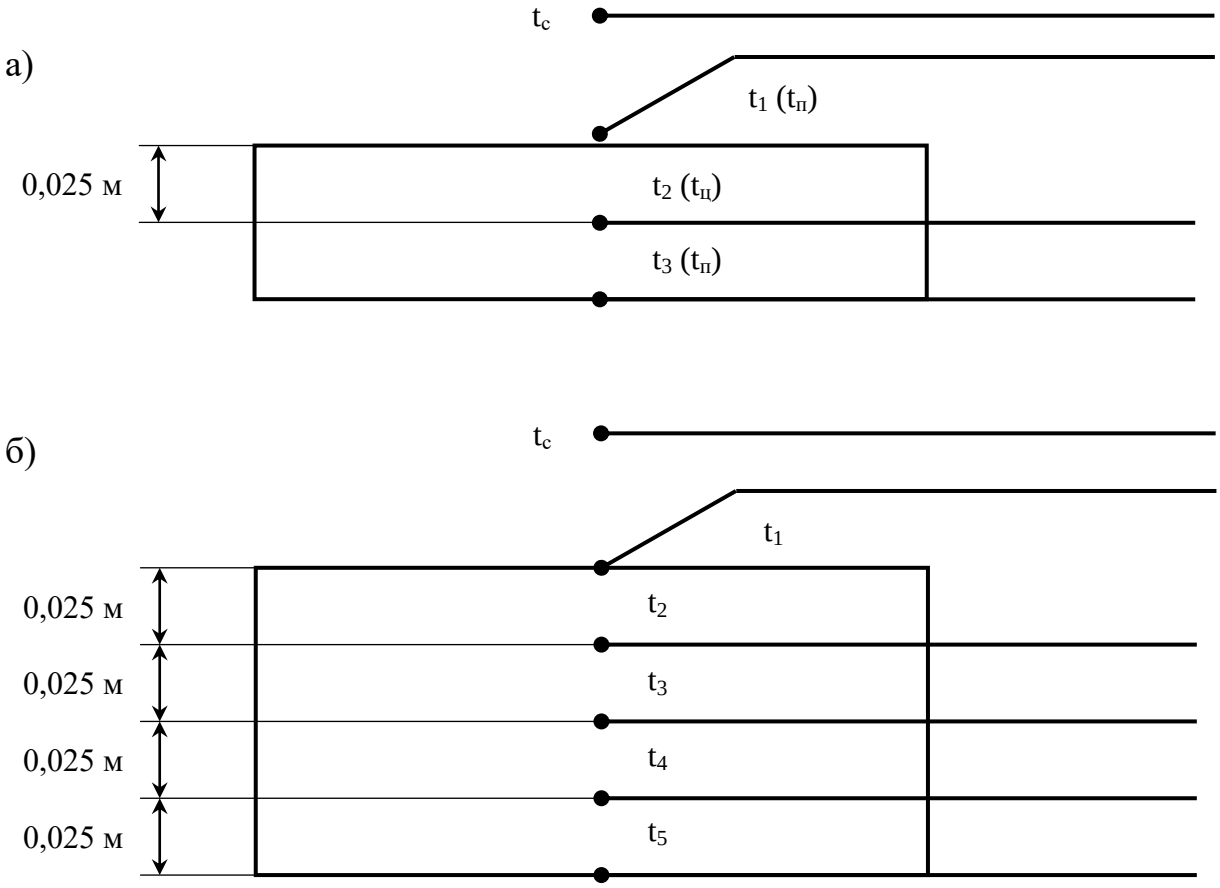


Рис. 4.3. Расположение термопар:
а) в первом варианте; б) во втором варианте

Режим нагрева модельного образца задается индивидуально, регулируется программным регулятором запаривания.

Значения температуры в обозначенных точках записываются с помощью самопишущего потенциометра на диаграммную ленту, а затем по этим данным в рабочем журнале по каждой точке измерения температуры на одном координатном поле стоятся графики типа $t = f(\tau)$.

Физический эксперимент заканчивается после того, как значения температуры в обозначенных точках модельного образца сравнялись.

На том же графике, но справа от основного, следует привести графики нагрева образцов из других видов бетона (по результатам других звеньев).

При моделировании теплопереносных характеристик по первому или второму вариантам образца, результаты физического эксперимента следует представить еще и в виде табл. 4.1 с фиксацией значений температуры в дискретные промежутки времени, например, через 10 минут (т.е. через 1/6 часа).

Таблица 4.1

Результаты физического эксперимента

Текущее время τ	Температура в точках, °С					
	t_c	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5

4.5. Указания по определению эквивалентного коэффициента температуропроводности с помощью графического представления решения уравнения Фурье (первый вариант математического моделирования)

Данный метод может применяться только при линейном изменении температуры поверхности бетонного образца.

Приближенное решение уравнения (4.2) при $x = R$:

$$\frac{\Theta_\tau}{b \cdot \tau} = \frac{R^2}{2 \cdot a_э \cdot K \cdot \tau} - 2 \cdot K \cdot \left(\frac{R^2}{2 \cdot a_э \cdot K \cdot \tau} - \frac{\Theta_0}{b \cdot \tau} \right) \cdot \Phi \qquad (4.7)$$

где b - скорость нагрева поверхности образца, °С/ч; τ - продолжительность нагрева в заданном промежутке времени, ч; $\Theta_0 = t_{п0} - t_{ц0}$ - значение перепадов температуры по толщине образца R в начале заданного промежутка времени, °С; $\Theta_\tau = t_{п\tau} - t_{ц\tau}$ - значение перепадов температуры по толщине образца R в конце заданного промежутка времени, °С; K - коэффициент формы образца; $\Phi = \Phi\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2}, \frac{x}{R}\right)$ - функция, представляющая собой сумму бесконечного ряда; $a_э$ - эквивалентный коэффициент температуропроводности, м^2/ч.

Уравнение (4.7) показывает, что критерий $\frac{\Theta_\tau}{b \cdot \tau}$ является функцией критериев $\frac{\Theta_0}{b \cdot \tau}$ и $\frac{R^2}{a \cdot \tau}$. Эта зависимость, полученная экспериментальным путем [11] для пластин неограниченных размеров из материала, в котором отсутствовали массоперенос, фазовые переходы и химические превращения, представлена графически на рис. 4.4. Этот график и можно принять для ориентировочных расчетов $a_э$.

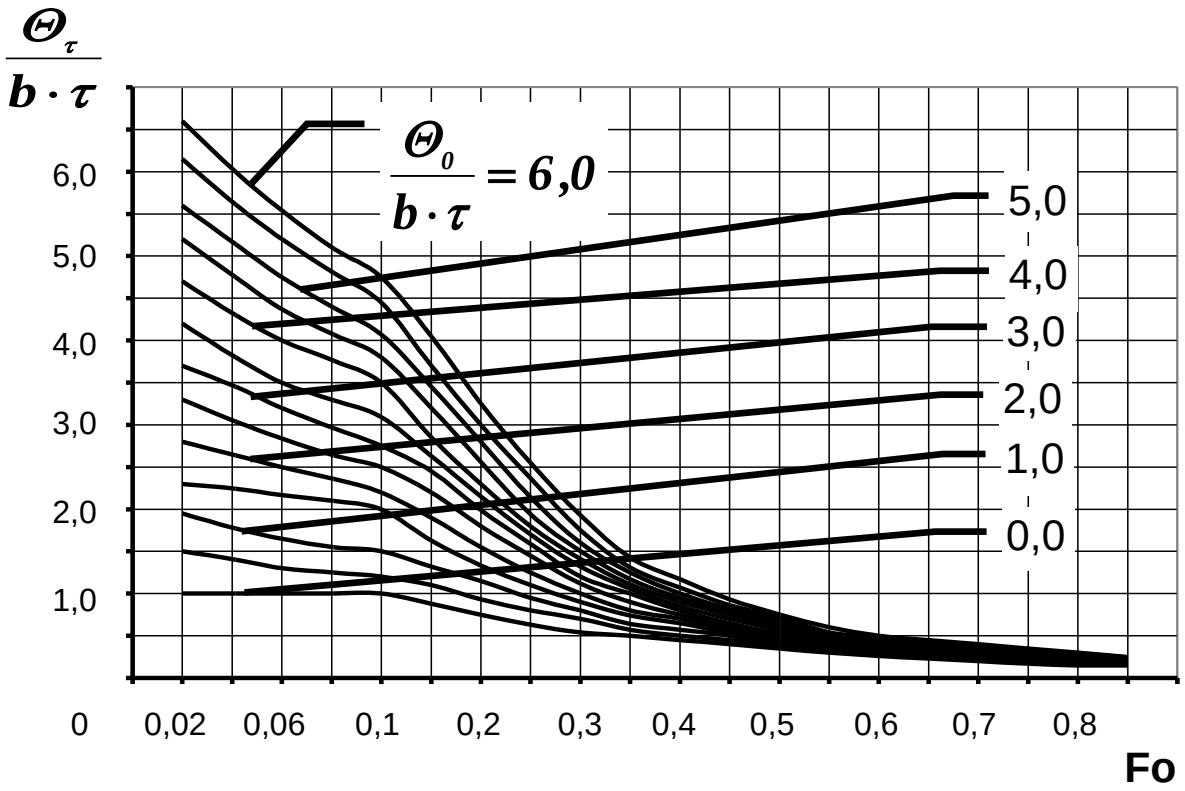


Рис. 4.4. График для определения коэффициента температуропроводности пластины

Расчеты выполняются в следующем порядке.

Графики $t_п = f(\tau)$ и $t_ц = f(\tau)$ разбиваются на интервалы примерно по 1/6 часа так, чтобы на каждом из них изменение температуры поверхности было линейным (рис. 4.5).

На каждом из интервалов производят измерения, которые заносят в расчетную табл. 4.2.

Для каждого участка по значениям $\frac{\Theta_0}{b \cdot \tau}$ и $\frac{\Theta_\tau}{b \cdot \tau}$ с помощью графика (рис. 4.4) определяют значения критерия Фурье ($\boldsymbol{Fo}$), после чего рассчитывают значения эквивалентного коэффициента температуропроводности $a_э$.

Полученные результаты представляют графически, как $a_э = f(t_c)$.

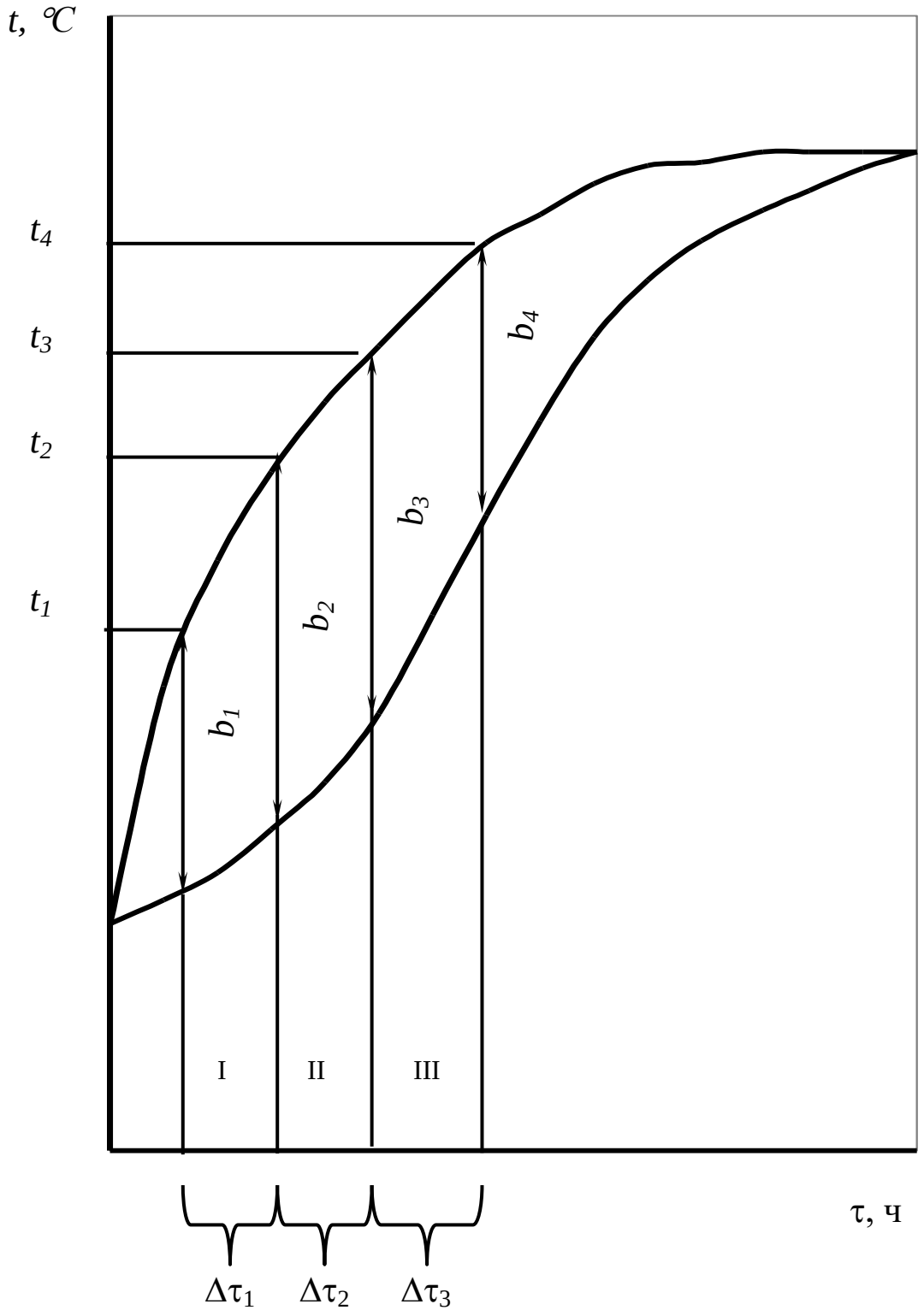


Рис. 4.5. Вспомогательный график для определения коэффициента температуропроводности

Таблица 4.2

Результаты расчетов

Параметры	Численные значения по участкам						
	I	II	II	IV	V	VI	…
$t_{п0}$, °C							
$t_{ц0}$, °C							
$t_{пτ}$, °C							
$t_{цτ}$, °C							
$b = \frac{t_{пτ} - t_{п0}}{\Delta\tau}$, °C/ч							
Θ_0, °C							
Θ_τ, °C							
$\Theta_0 / b \cdot \tau$							
$\Theta_\tau / b \cdot \tau$							
$Fo = \frac{a_э \cdot \tau}{R^2}$							
$a_э = \frac{Fo \cdot R^2}{\tau}$, м^2/ч							

Примечания. 1. Индексами «0» обозначены значения параметров вначале каждого участка, индексом «τ» – в конце каждого участка.

2. Fo – критерий Фурье.

4.6. Указания по моделированию процесса нагрева плоского бетонного изделия на модели прямой аналогии БУСЭ-70 (второй вариант математического моделирования)

4.6.1. Описание принципа действия и устройства электрической аналоговой вычислительной установки электроинтегратора БУСЭ-70

Электроинтегратор представляет собой установку, включающую сетки для набора электрических переменных сопротивлений (резисторов), приспособлений для коммутации сопротивлений в однотипные или разнотипные узлы и электроизмерительные приборы. Каждому условному дискретному элементу изделия (рис. 4.1, 4.6) соответствует электрический узел (рис. 4.7) – резисторы, скоммутированные в определенную структуру, имитируют одно-, двух-или трехмерное поле тепловых сопротивлений.

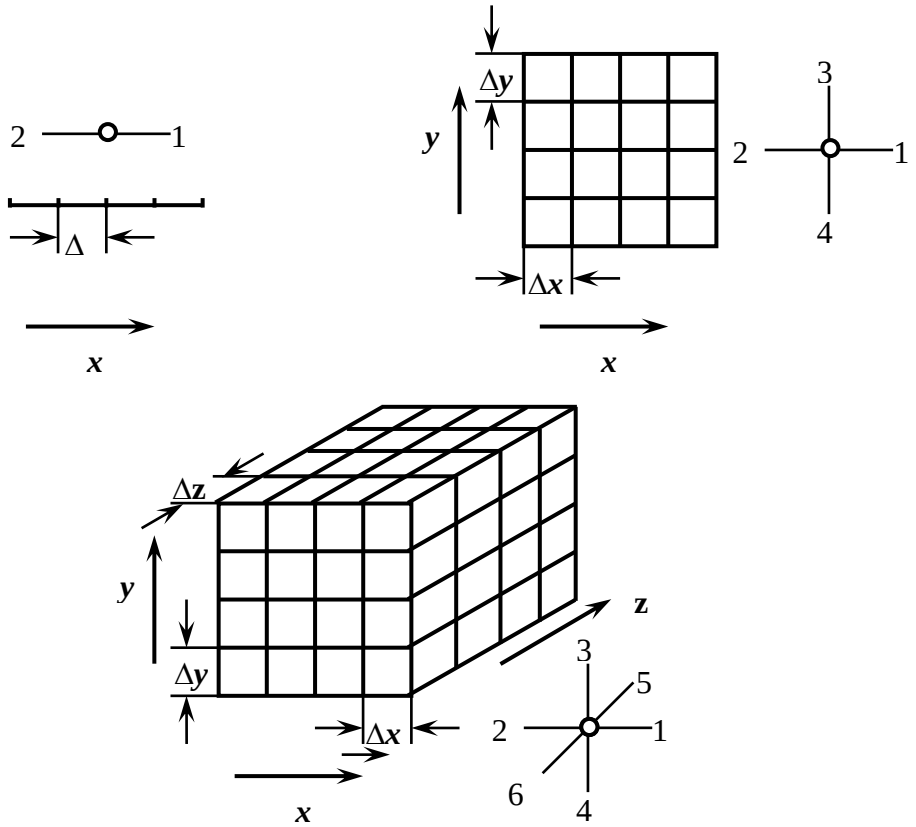


Рис. 4.6. Одномерные, двухмерные и трехмерные области моделируемого изделия при конечно-разностном представлении уравнения Фурье

При моделировании процесса нагрева основное уравнение (4.1) упрощают, приводя его к конечно-разностному виду. Конечно-разностное представление уравнения (4.1) для одномерной задачи нагрева (рис. 4.6) имеет вид:

$$\frac{t_1 - t_0}{\Delta x^2} + \frac{t_2 - t_0}{\Delta x^2} \cong \frac{1}{a} \cdot \frac{t_0 - t_{\tau_0 - \Delta\tau}}{\Delta\tau}, \qquad (4.8)$$

где t_0, t_1, t_2 - температура в узловых точках в момент времени τ_0; $t_{\tau_0-\Delta\tau}$ - температура в узловой точке t_0 в момент времени τ_0-$\Delta\tau$; $\Delta\tau$ - продолжительность интервалов времени между измерениями температур в узловых точках; Δx - расстояние между узловыми точками.

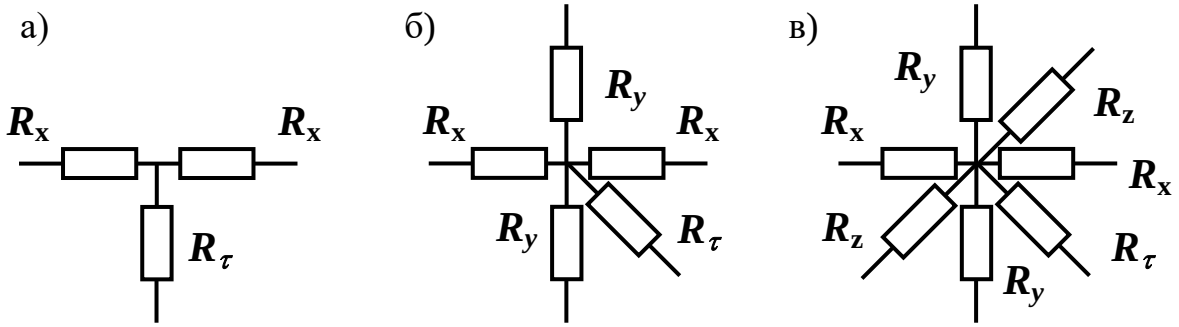


Рис. 4.7. Типовые узловые точки активных электрических сопротивлений при решении одномерного (а), двухмерного (б) и трехмерного (в) уравнений теплопроводности

Уравнение электропроводности Кирхгофа для узловой точки «0» сетки активных сопротивлений в соответствии с одномерной схемой (рис. 4.7 а) аналогично

$$\frac{U_1 - U_0}{R_x} + \frac{U_2 - U_0}{R_x} = \frac{U_0 - U_{\tau_0 - \Delta\tau}}{R_\tau}, \qquad (4.9)$$

где U_0, U_1, U_2 - электрические напряжения в узловых точках в момент времени τ_0; $U_{\tau_0-\Delta\tau}$ - электрическое напряжение в узловой точке U_0 в момент времени τ_0-$\Delta\tau$; R_x,R_τ- электрические сопротивления в узловых точках.

Электроинтегратор состоит (рис. 4.8) из следующих основных функциональных элементов: питающего устройства (1), делителя напряжения низкоомного (2), делителей истоков и втоков (3), делителей напряжения высокоомных (4), множителей одноименных потенциалов (5), полей сеток (6).

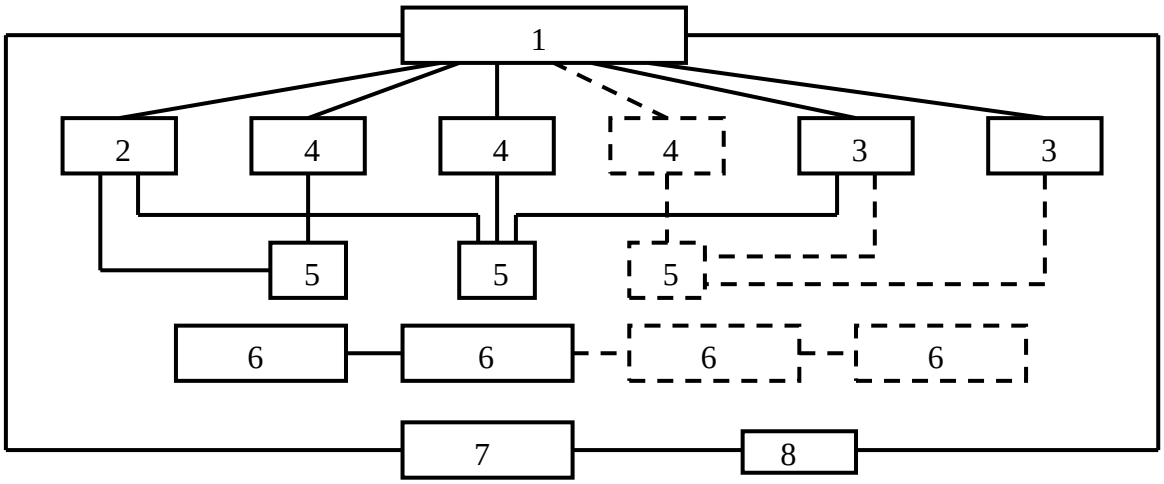


Рис. 4.8. Функциональная блок-схема электроинтегратора БУСЭ-70

Питающее устройство (1) состоит из стабилизатора напряжения, автотрансформатора, выпрямителя и фильтра.

От стабилизатора напряжения через трансформатор, выпрямители и фильтры напряжение подается на делители истоков и втоков и в схему автоматического опроса.

Делители напряжения (2 и 4) предназначены для задания граничных условий I рода.

Делители истоков и втоков (3) предназначены для задания граничных условий II рода.

Множители (5) дают возможность увеличивать число требуемых делителей (2, 3 и 4) в 5 и более раз.

Поля сеток (6) предназначены для установки переменных сопротивлений.

Измерительное устройство (7) предназначено для замеров в относительных величинах результатов моделирования.

Автоматическое опросное устройство (8) предназначено для автоматического соединения измерительного устройства последовательно с любым узлом поля сетки.

Функциональные элементы 1 - 5 смонтированы в пульте управления (рис. 4.9), поля сеток представлены (рис. 4.10) в виде 10-ти гетинаксовых панелей с гнездами для резисторов и разъемов, с помощью которых щиты могут коммутироваться друг с другом.

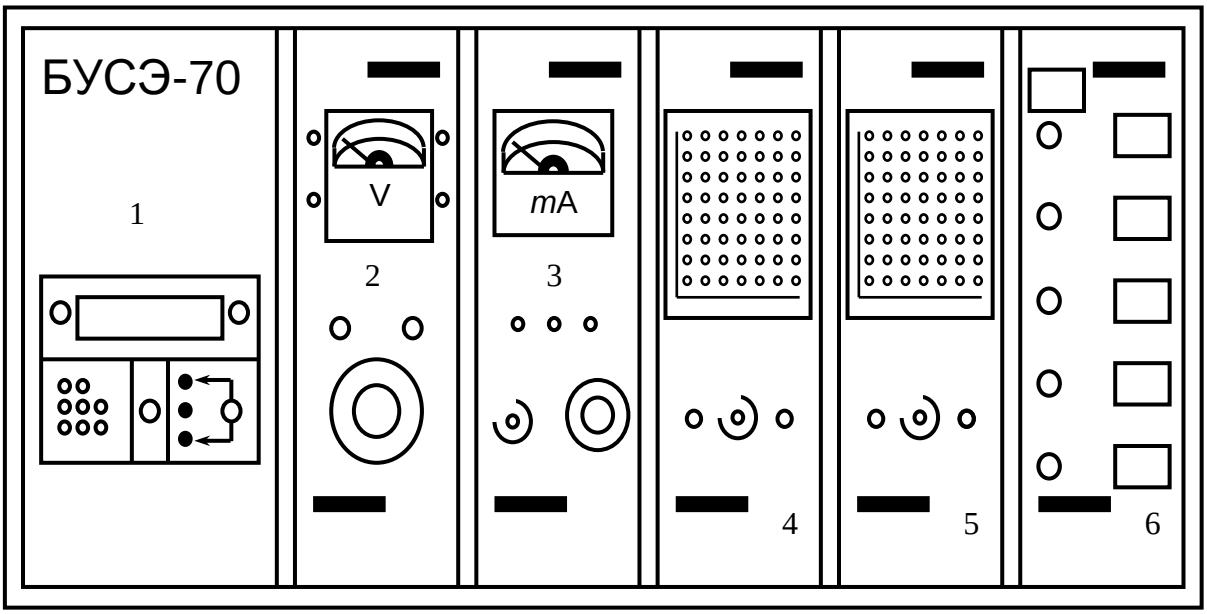


Рис. 4.9. Пульт управления БУСЭ-70:
1 - вольтметр универсальный; 2 - блок автотрансформатора;
3 - блок измерения; 4 и 5 - блоки делителей истоков и втоков;
6 – блок автоматического опроса

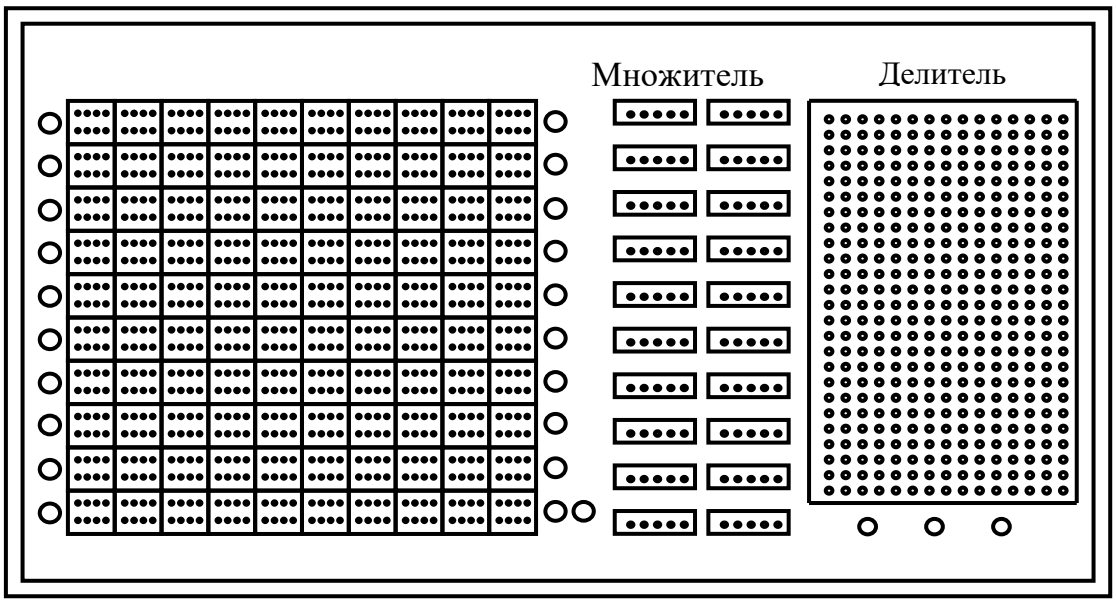


Рис. 4.10. R – сеточная панель электроинтегратора

Каждая панель разбита на 100 узлов по 10 строкам и 10 столбцам. Каждый узел (рис. 4.10) включает 8 гнезд для включения 4 резисторов.

Резистор (рис. 4.11) представляет собой проволочное сопротивление, вмонтированное в пластмассовый корпус. Регулировка величины сопротивления производится проворачиванием с помощью отвертки специального шлица. Измерение сопротивлений при настройке резисторов производится с помощью омметра М 218 (Прил. 3). Порядок работы с электроинтегратором изложен в Прил. 4.

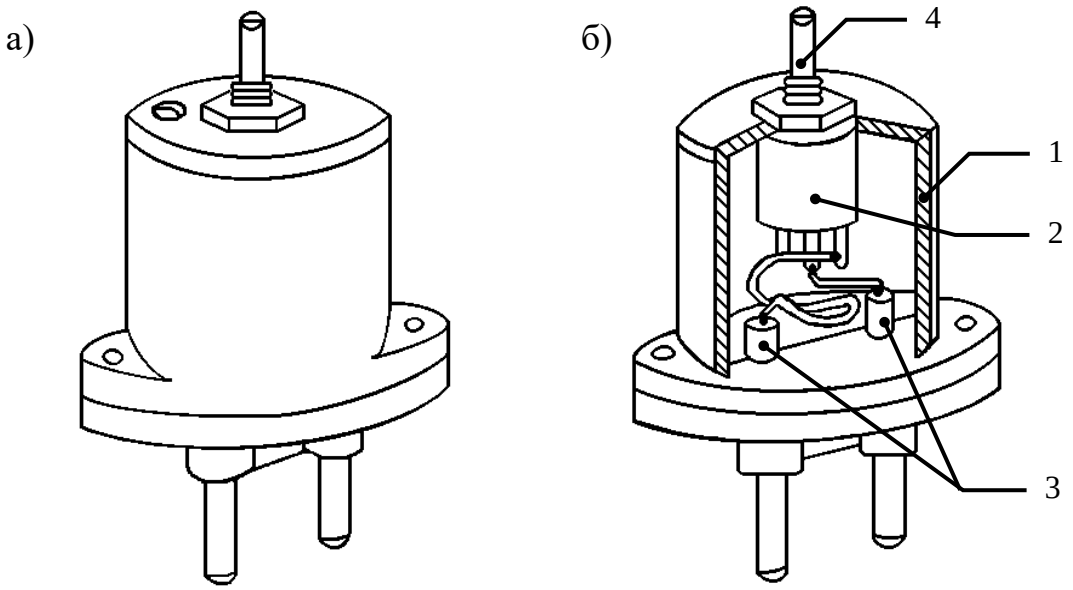


Рис. 4.11. Съемные резисторы:
а - внешний вид; б - вид в разрезе: 1 – пластмассовый корпус; 2 – проволочное сопротивление; 3 – контакты основания; 4 – подвижной контакт

4.6.2. Порядок измерений на БУСЭ-10

В качестве исходных задают температурные параметры, реализованные в физическом эксперименте.

Для того, чтобы определить эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_э$, достаточно смоделировать на R-сетках одномерное уравнение Фурье (4.2) при заданных начальных и граничных условиях. В поставленной задаче в качестве граничных условий можно принять условия 1го рода, т.е. в любой момент времени задавать температуру на поверхности изделия.

Электрические модели одномерного температурного поля для разных (рис. 4.3 а, 4.3 б) вариантов образцов представлены в виде сетки активных сопротивлений на рис. 4.12 и 4.13.

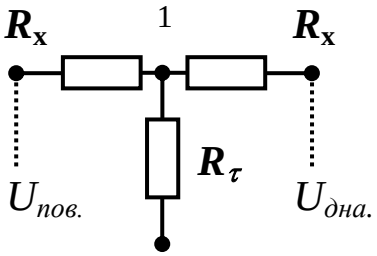


Рис. 4.12. Электрическая модель одномерного температурного поля, описываемого уравнением Фурье (1-й вариант)

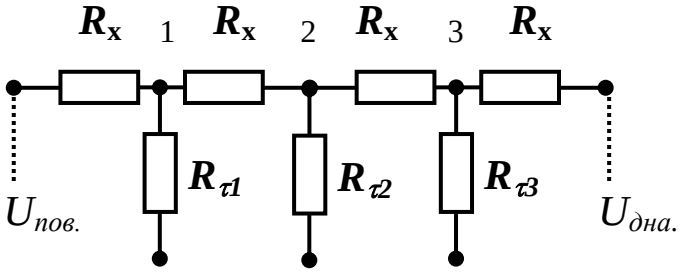


Рис. 4.13. Электрическая модель одномерного температурного поля, описываемого уравнением Фурье (2-й вариант)

Для одномерной задачи значения сопротивлений R_x и R_τ рассчитывают соответственно по формулам

$$R_x = \rho \cdot \Delta x, \tag{4.10}$$

$$R_\tau = \rho \cdot \frac{a_э \cdot \Delta\tau}{\Delta x}, \tag{4.11}$$

где ρ - масштаб «омическое сопротивление – линейный размер», Ом/м.

Для удобства работы и в соответствии с номиналами резисторов, значение ρ можно принять равным 20 000 Ом/м, тогда при Δx = 0,025 м, R_x= 500 Ом.

При решении обратных задач временное сопротивление R_τ не рассчитывают по формуле (4.11), а подбирают таким образом, чтобы получить значения температур в узловых точках, соответствующие результатам измерения температуры в физическом эксперименте.

По найденным значениям R_τ определяют $a_э$

$$a_э = \frac{R_\tau \cdot \Delta x}{\rho \cdot \Delta \tau}. \qquad (4.12)$$

Вместо электрических потенциалов $U_{пов.}$ и $U_{дна.}$, соответствующих значениям температуры в точках t_1 и t_3 (1-й вариант) или t_1 и t_5 (2-й вариант), должен быть подведен потенциал $U_{ср}$, соответствующий температуре среды $t_с$, согласно схеме (для 1-го варианта – рис. 4.14; для 2-го варианта – рис. 4.15).

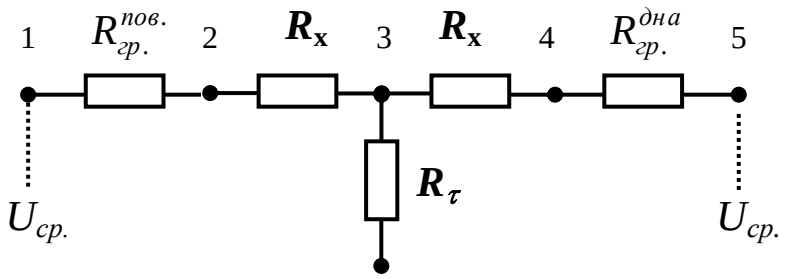


Рис. 4.14. Электрическая схема воспроизведения на БУСЭ-70 одномерной задачи нагрева с учетом граничных условий I рода (1-й вариант)

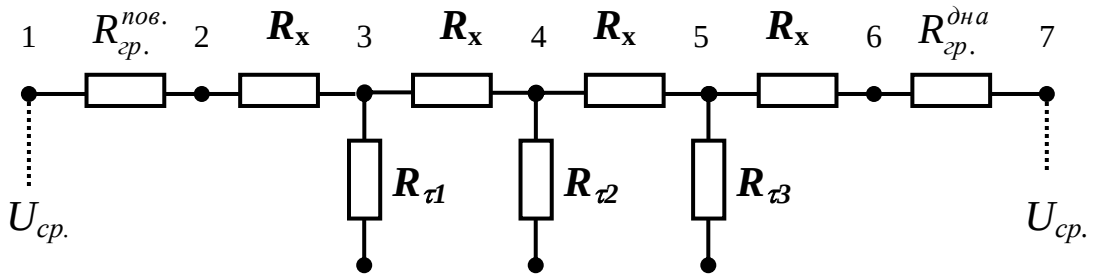


Рис. 4.15. Электрическая схема воспроизведения на БУСЭ-70 одномерной задачи нагрева с учетом граничных условий I рода (2-й вариант)

Коэффициенты теплоотдачи ($\alpha_э$) можно представить как электрическую проводимость поверхностного слоя

$$\alpha_э = \frac{1}{R_{гр.}}, \qquad (4.13)$$

откуда

$$R_{гр.} = \frac{1}{\alpha_э}. \qquad (4.14)$$

Тепловую проводимость слоя бетона толщиной Δx можно представить соответствующей электрической проводимостью:

$$\frac{\lambda_э}{\Delta x} = \frac{1}{R_x}, \qquad (4.15)$$

откуда

$$R_x = \frac{\Delta x}{\lambda_э}; \qquad (4.16)$$

$$R_{гр.} / R_x = \frac{\frac{1}{\alpha_э}}{\frac{\Delta x}{\lambda_э}}, \qquad (4.17)$$

откуда

$$\alpha_э = \frac{R_x \cdot \lambda_э}{R_{гр.} \cdot \Delta x}, \qquad (4.18)$$

где $\lambda_э$ - эквивалентный коэффициент теплопроводности бетона, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

$$\lambda_э = a_э \cdot c \cdot \rho_0, \qquad (4.19)$$

где c - удельная теплоемкость бетона, $\frac{Дж}{кг \cdot к}$; ρ_0 - средняя плотность бетона, $\frac{кг}{м^3}$.

Последовательность операций по определению значения коэффициентов $a_э$ и $\alpha_э$ сводится к следующему.

На R-сетке электроинтегратора составляют схему из цепочки сопротивлений R_x (рис. 4.14 – 4.15).

В центральные узлы (3, 4, 5) модели (рис. 4.15) подают напряжения U_{τ_0}, соответствующие начальной температуре бетона (масштаб напряжение-температура удобно принять 1 В/град.), а в крайние узлы (1 и 7) – напряжение, соответствующее значению температуры среды (по результатам физического эксперимента в момент времени $\tau_0+\Delta\tau$).

Вращением подвижного шлица резисторов устанавливают величины сопротивлений $R_{гр.}^{пов.}$ и $R_{гр.}^{дна}$ такие, при которых напряжения в узлах 2 и 6 будут соответствовать полученным из физического эксперимента температурам верхней и нижней поверхностей изделия в момент времени $\tau_0+\Delta\tau$. Затем устанавливают величины сопротивлений $R_{\tau 1}$ и $R_{\tau 3}$, при которых напряжения в узлах 3 и 5 будут соответствовать температурам t_2 и t_4 физического эксперимента (см. рис. 4.3). Аналогично подбирают такое значение $R_{\tau 2}$, при котором напряжение в узле 4 соответствует температуре t_3 центральной точки изделия.

Полученные значения $R_{гр.}^{пов.}$, $R_{гр.}^{дна}$, $R_{\tau 1}$, $R_{\tau 2}$ и $R_{\tau 3}$ для момента времени $\tau_0+\Delta\tau$ заносят в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Результаты моделирования процесса нагрева образца с целью определения коэффициента температуропроводности $a_э$ и коэффициента теплоотдачи $\alpha_э$

Продолжительность нагрева, мин	Температура в точках, °С						$R_{\tau 1}$, Ом	$R_{\tau 2}$, Ом	$R_{\tau 3}$, Ом	$a_{э1}\cdot 10^{-4}$, м^2/ч	$a_{э2}\cdot 10^{-4}$, м^2/ч	$a_{э3}\cdot 10^{-4}$, м^2/ч	$R_{гр.}^{пов.}$, Ом	$R_{гр.}^{дна}$, Ом	$\alpha_э^{пов.}$, $\frac{кВт}{м^2 \cdot К}$	$\alpha_э^{дна}$, $\frac{кВт}{м^2 \cdot К}$
	t_c	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5										

Далее задают в узлы 3, 4 и 5 напряжения, соответствующие реальным температурам t_2, t_3 и t_4 в момент времени $\tau_0+\Delta\tau$; в узлы 1 и 7 подают напряжение, соответствующее температуре среды t_c в момент времени $\tau_0+2\Delta\tau$, и подбирают такие значения $R_{гр.}^{пов.}$, $R_{гр.}^{дна}$, $R_{\tau 1}$, $R_{\tau 2}$ и $R_{\tau 3}$, чтобы напряжения в узловых точках соответствовали температурам t_1, t_5, t_2, t_3 и t_4 в момент времени $\tau_0+2\Delta\tau$.

В дальнейшем операции повторяют в указанной последовательности до тех пор, пока будет пройден весь температурный график, представленный на рис. 4.5. Полученные результаты заносят в табл. 4.3.

Значения $a_э$ и $\alpha_э$ рассчитывают по формулам (4.12), (4.18) и также заносят в табл. 4.3.

По результатам расчетов строят графики $a_э = f(t_c)$ и $\alpha_э = f(t_c)$ для всех испытанных видов бетона.

4.7. Выводы

1. По результатам физического эксперимента следует сравнить графики нагрева образцов и сделать вывод о связи скорости нагрева бетона с его пористостью и плотностью.
2. Анализируют зависимость $a_э = f(t_c)$ и делают выводы о влиянии температуры среды t_c на значения $a_э$.
3. Сравнивают зависимости $a_{эi} = f_i(t_c)$ для различных видов бетона и дают соответствующие пояснения.
4. Анализируют зависимость $\alpha_э = f(t_c)$ и делают выводы о влиянии температуры среды t_c на значения $\alpha_э$.
5. Сравнивают зависимости $\alpha_{эi} = f_i(t_c)$ для различных видов бетона и дают соответствующие пояснения.
6. Дают сравнительную оценку достоверности результатов по 2-м методам моделирования (при наличии соответствующих экспериментальных результатов).
7. Делают выводы относительно возможности использования полученных данных для расчетов температурных полей в бетонных изделиях.

4.8. Контрольные вопросы

1. Значение тепловлажностной обработки в технологии бетонных и железобетонных изделий; химические и теплофизические процессы, протекающие в ходе тепловой обработки.
2. Основные виды переноса тепловой энергии, способствующие нагреву бетонного изделия; основные уравнения, описывающие процесс теплопереноса.
3. Сущность эквивалентных характеристик теплопереноса: коэффициента поверхностной теплоотдачи, эквивалентного коэффициента температуропроводности; возможности их практического использования.
4. Структура и смысловые аспекты уравнения Фурье, описывающего теплоперенос в неподвижной среде.
5. Структура и смысловые аспекты уравнения теплоотдачи Ньютона.
6. Методы аналогового моделирования на электрических моделях прямой аналогии.
7. Возможные способы измерения температуры паровой среды и бетона.

4.9. Информационные источники

[13] – п. 3.13.4, п.п. – 7.1 – 7.6;

[1] – глава VII п.п. 4,5,7.

Лабораторная работа № 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В АППАРАТАХ С КИПЯЩИМ (ВЗВЕШЕННЫМ) СЛОЕМ

5.1. Цель работы

Общая цель работы сводится к изучению на лабораторной модели процесса псевдоожижения слоя зернистого или кускового материала и освоению методики расчета аппаратов с псевдоожиженным слоем; дополнительная цель предусматривает освоение методики определения объемного расхода газа с помощью диафрагменного прибора.

5.2. Краткие теоретические сведения

Аппараты с псевдоожиженным слоем используются для смешивания сыпучих материалов, для проведения процессов обжига, теплообмена, сушки и других процессов. Так как псевдоожижению подвергаются частицы меньших (от 0,5 до 10 мм), чем в установках другого принципа действия, размеров, то доля отходов, образующихся при подготовке сырья, значительно снижается вследствие более полного использования сырьевого материала.

Псевдоожиженным, кипящим или взвешенным слоем называется такое состояние зернистого или кускового материала, при котором происходит хаотическое перемещение твердых частиц относительно друг друга за счет энергии газа или жидкости, проходящих через слой материала, без выноса материала из слоя.

Если через неподвижный слой твердых частиц, лежащих на решетке, пропускать снизу вверх поток газа и при этом постепенно увеличивать его скорость, то при некоторой скорости газа, называемой критической, весь слой твердых частиц переходит во взвешенное состояние. При дальнейшем повышении скорости газа в аппарате объем взвешенного слоя возрастает. Такой расширившийся взвешенный слой, в котором происходит интенсивное перемешивание твердых частиц, во многом напоминает кипящую жидкость – он «течет», принимает форму сосуда, через него пробулькивают пузыри газа. Поэтому его часто и называют кипящим или псевдоожиженным слоем. При некоторой достаточно высокой скорости газа, называемой скоростью уноса, взвешенный слой разрушается – твердые частицы уносятся из аппарата потоком газа, возникает пневмотранспорт этих частиц.

Переход твердых частиц неподвижного слоя во взвешенное состояние начнется тогда, когда сила P динамического воздействия потока среды на частицу снизу вверх станет равной весу частицы G за вычетом выталкивающей (архимедовой) силы A:

$$\boldsymbol{P = G - A}. \tag{5.1}$$

Для частицы шаровой формы:

$$\boldsymbol{P = \zeta \frac{\pi d_ч^2}{4} \frac{w_д^2 \rho_c}{2}}, \tag{5.2}$$

$$G = \frac{\pi d_ч^3}{6} \rho_ч g, \quad (5.3)$$

$$A = \frac{\pi d_ч^3}{6} \rho_c g, \quad (5.4)$$

где ζ - безразмерный коэффициент сопротивления, зависящий от режима течения среды; $d_ч$ - диаметр частицы материала, м; $w_д$ - действительная скорость среды между частицами материала, м/с; $\rho_ч$ - плотность частицы материала, кг/м^3; ρ_c - плотность среды, кг/м^3; g - ускорение свободного падения, м/с^2.

Действительную скорость газа $w_д$ в промежутках между частицами слоя материала измерить трудно. Поэтому в расчетах аппаратов взвешенного слоя принято использовать так называемую фиктивную скорость среды $w_ф$ (скорость среды, отнесенная к полному поперечному сечению пустого аппарата): $w_ф = \frac{V}{f}$, (5.5)

где V - объемный расход газа (среды) в аппарате, м^3/с; f - площадь поперечного сечения аппарата, м^2.

Важнейшей характеристикой слоя твердых частиц материала (неподвижного или взвешенного) является его порозность ε, которая показывает объемную долю межзерновых пустот в данном слое:

$$\varepsilon = \frac{V_{сл} - V_ч}{V_{сл}} = 1 - \frac{V_ч}{V_{сл}}, \quad (5.6)$$

где $V_{сл}$ - общий объем, занимаемый слоем материала, м^3; $V_ч$ - объем, занимаемый твердыми частицами материала в слое, м^3.

В свою очередь:

$$V_{сл} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H_{сл}, \quad (5.7)$$

$$V_ч = \frac{M_ч}{\rho_ч}, \quad (5.8)$$

где D - диаметр аппарата, м; $H_{сл}$ - измеренная высота слоя материала, м; $M_ч$ - масса частиц исследуемого материала в слое, кг.

Необходимое значение фиктивной скорости, соответствующей состоянию псевдоожижения, можно определить через критерий Лященко (5.9), который в свою очередь находится по диаграммам (прил. П.5.1), отражающим зависимость критерия Лященко (5.9) от критерия Архимеда (5.10):

критерий Лященко:

$$Ly = \frac{w_ф^3 \times \rho_{ct}^2}{\mu_{ct} \times (\rho_ч - \rho_{ct}) \times g}, \quad (5.9)$$

критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d_ч^3 \times (\rho_ч - \rho_{ct}) \times \rho_{ct} \times g}{\mu_{ct}^2}, \quad (5.10)$$

где ρ_{ct} - плотность среды при температуре t, кг/м^3; μ_{ct} - динамический коэффициент вязкости среды при температуре t, Па×с.

5.3. Рабочее задание

С учетом общей цели в данной работе необходимо:

1. По исходным характеристикам зернистого материала и воздушной среды рассчитать значения критической скорости начала псевдоожижения и скорости свободного витания.
2. Освоить методику определения расхода и скорости газа с помощью диафрагменного прибора.
3. Определить для заданных в работе частиц материала фактические значения критической скорости начала псевдоожижения и скорости свободного витания.
4. Установить расчетные и фактические значения порозности псевдоожиженного слоя материала.
5. Представить графическую зависимость порозности слоя материала от скорости гидродинамического потока воздуха.
6. Сравнить расчетные и фактические характеристики процесса псевдоожижения, сделать выводы об адекватности расчетных зависимостей.
7. Сделать выводы о зависимости процесса псевдоожижения от характеристик материала и скорости движения воздуха в межзерновом пространстве.

5.4. Оборудование, инструменты и материалы

При выполнении работы используется оборудование, приборы и принадлежности, представленные на рис. 5.1.

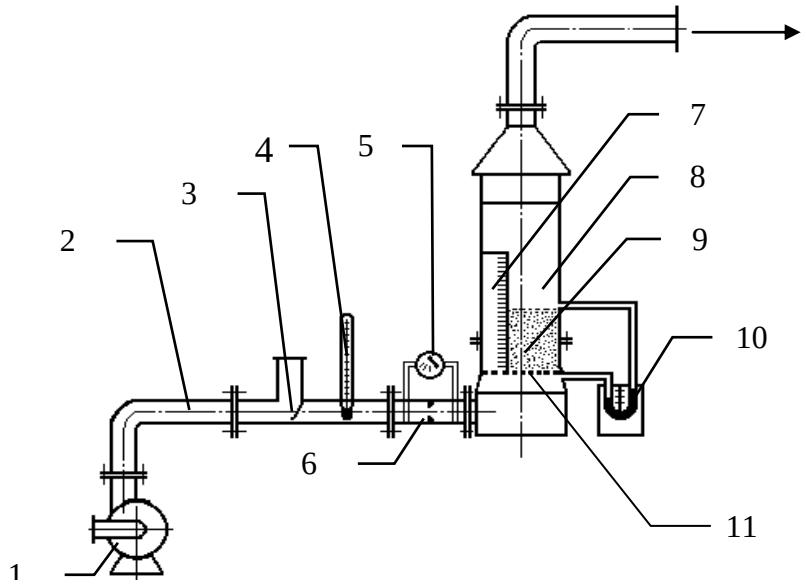


Рис. 5.1. Принципиальная схема установки взвешенного слоя:
1 – вентилятор центробежный; 2 – воздуховод; 3 – регулятор подачи воздуха; 4 – термометр; 5 – дифференциальный манометр; 6 – диафрагма; 7 – измерительная линейка; 8 – аппарат взвешенного слоя; 9 – слой материала; 10 – U-образный дифференциальный манометр, 11 – газораспределительная решетка

Установка взвешенного слоя предназначена для воспроизведения реального процесса псевдоожижения различных материалов при регулируемых и регистрируемых параметрах.

5.5. Методика выполнения работы

Работа выполняется подгруппой, разбитой на 2 – 3 звена.

Звено студентов из 3 – 4 человек получает индивидуальное задание, в которое входят следующие характеристики исходных материалов:

- крупность частиц материала (условный диаметр частиц) - d, м;
- плотность частиц материала - $\rho_ч$, кг/м^3;
- насыпная плотность материала, -$\rho_{нас}$, кг/м^3.

Остальные характеристики лабораторной установки определяются соответствующими измерениями.

На основании задания, выданного преподавателем, вначале рассчитывают и определяют:

1) температуру воздуха в лаборатории t, °С;

2) плотность воздуха при рабочей температуре, кг/м^3:

$$\rho_{ст} = \frac{M_в}{22{,}4} \cdot \frac{273}{273+t}, \qquad (5.11)$$

где $M_в$ – молярная масса воздуха, $M_в$ = 29 кг/кмоль;

3) динамический коэффициент вязкости воздуха при рабочей температуре - $\mu_{ст}$ (табл. П. 5.1);

4) порозность неподвижного слоя материала:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_ч}, \qquad (5.12)$$

5) значение критерия Архимеда для заданных параметров среды и материала, а также значение критерия Лященко Ly (рис. П 5.1), соответствующее началу псевдоожижения (при рассчитанном ранее ε_0);

6) критическое расчетное значение критерия Рейнольдса, при котором начинается псевдоожижение:

$$Re_{кр.}^{расч.} = \frac{Ar}{1400 + 5.22\sqrt{Ar}}; \qquad (5.13)$$

7) критическую расчетную скорость начала псевдоожижения (фиктивную):

$$w_{кр.}^{расч.} = \frac{Re_{кр.}^{расч.} \cdot \mu_{ст}}{\rho_{ст} \cdot d_ч}, \qquad (5.14)$$

или

$$w_{кр.}^{расч.} = \sqrt[3]{\frac{Ly \times \mu_{ст} \times (\rho_ч - \rho_{ст}) \times g}{\rho_{ст}^2}}; \qquad (5.15)$$

8) расчетную скорость свободного витания частиц (фиктивную):

$$w_{св}^{расч.} = \frac{\mu_{ст}}{d_ч \cdot \rho_{ст}} \cdot \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}}. \qquad (5.16)$$

Звенья студентов, закончивших необходимые расчеты, переходят работать на лабораторную установку псевдоожиженного слоя.

Необходимо помнить, что для обеспечения гидродинамической устойчивости струй газа, проходящих через отверстия газораспределительной решетки, должно выполняться условие

$$h \geq 80 \times d_0, \qquad (5.17)$$

где h - высота взвешенного слоя материала в аппарате, м; d_0 - средний диаметр отверстий в газораспределительной решетке, м.

Далее на модельной установке взвешенного слоя, плавно изменяя регулятором 3 (рис. 5.1) подачу воздуха, с помощью дифференциального манометра 5 определяют перепады давления в диафрагме, соответствующие началу псевдоожижения и началу свободного витания частиц материала, находят объемный расход воздуха в аппарате, а затем рассчитывают значения фактической критической скорости начала псевдоожижения (фиктивной) $w_{кр.}^{факт.}$ и фактической скорости свободного витания (фиктивной) $w_{св}^{факт.}$ из соотношения (5.5).

Объемный расход воздуха в аппарате V, м^3/с, измеренный с помощью диафрагменного прибора:

$$V = \alpha \cdot k \cdot f_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho_c}}, \qquad (5.18)$$

где α - коэффициент расхода диафрагмы, принимается по прил.П.5.2; k - коэффициент шероховатости, принимается по прил.П.5.3; f_0 - площадь отверстия диафрагмы, м^2; ΔP - перепад давления в диафрагме, определяется по дифференциальному манометру, Па.

При изменении скорости воздуха в аппарате происходит и изменение значения порозности взвешенного слоя материала. Поэтому экспериментально определяют и значения высот взвешенного слоя, соответствующие двум крайним значениям скорости воздуха в аппарате (критической скорости начала псевдоожижения и скорости свободного витания) и 2-3 промежуточным значениям.

Исходные данные, результаты замеров и расчетов заносятся в табл. 5.1.

Фактическое значение порозности взвешенного слоя $\varepsilon^{факт.}$ определяется для измеренной высоты взвешенного слоя материала:

$$\varepsilon^{факт.} = \frac{h - h_0 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{h}, \qquad (5.19)$$

где h_0 – высота неподвижного слоя материала в аппарате, м; h – высота взвешенного слоя материала в аппарате, м.

Расчетные значения порозности взвешенного слоя $\varepsilon^{расч.}$ находят по ф.(5.6).

По результатам эксперимента строится график зависимости $\varepsilon = f(w)$ с указанием критической скорости и скорости свободного витания.

Таблица 5.1

Результаты экспериментов

Исходные данные	Высота взвешенного слоя зернистого материала h, м	Показание дифференциального манометра диафрагмы ΔP, Па	Объемный расход воздуха в аппарате V, $м^3/с$	Скорость воздуха в аппарате (фиктивная), w, м/с	Критерий Архимеда Ar	Критерий Лященко Ly	$\varepsilon^{факт.}$	$\varepsilon^{расч.}$
$t =$ °C $\rho_{ст} =$ $кг/м^3$ $\mu_{ст} =$ Па·с $d_ч =$ м $\rho_ч =$ $кг/м^3$ $\rho_{нас} =$ $кг/м^3$ $D =$ м $d =$ м $d_0 =$ м $\varepsilon_0 =$ $h_0 =$ м								

5.6. Выводы

Проводится анализ полученных результатов, дается сравнение расчетных и экспериментальных величин критической скорости, скорости свободного витания частиц и порозности взвешенного слоя материала, полученного при различных значениях скорости воздуха в аппарате. Необходимо также отразить влияние плотности и размеров частиц на параметры процесса псевдоожижения.

5.7. Контрольные вопросы

1. Возможные способы измерения объемного расхода газов.
2. Порядок определения объемного расхода газа с помощью диафрагмы.
3. Механизм процесса псевдоожижения зернистых материалов с энергетических позиций.
4. При каком соотношении действующих сил твердые частицы переходят во взвешенное состояние?
5. Возможные схемы аппаратов с взвешенным слоем.
6. Понятие о порозности слоя материала. В каких пределах изменяется порозность взвешенного слоя?
7. Фиктивная, действительная, критическая скорости псевдоожижения и скорость свободного витания частиц материала.
8. Характеристика критериев подобия, применяемых для количественного описания процесса псевдоожижения.
9. Порядок определения критической скорости псевдоожижения частиц материала.
10. Порядок определения скорости свободного витания частиц материала.
11. Гидродинамическое сопротивление аппарата с взвешенным слоем.

5.8. Информационные источники

[2] – с. 104 – 109:

[13] – п.6.8.3.3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. – 14-е изд. стеоретип. перепечатка с 9-го изд. 1973 г.- М: ООО ИД «Альянс», 2008. – 753 с.
2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов / Под ред. член.-корр. АН России П.Г. Романкова. 14-е изд. стереотип. перепечатка с изд. 1987 г.- М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 576 с..
3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетонов. М., Стройиздат – 1981, С. 77-82.
4. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам теплоэнергетики): Учебник для вузов по спец. «Кибернетика электр.систем» - 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
5. Луценко В.А., Фенякин Л.Н. Математическое моделирование химико-технологических процессов на аналоговых вычислительных машинах. – М.: Химия, 1984. – С.57-58.
6. Гранат Н.Л. Движение твердого тела в пульсирующем потоке вязкой жидкости. Изд. Ан СССР, ОТН. Механика и машиностроение, 1960. - №1.
7. Перцев В.Т. Виброуплотнение бетонной смеси в условиях управляемого резонансного режима. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Воронеж – 1983.
8. ГОСТ 7473-94. Смеси бетонные. Технические условия.
9. ГОСТ 10181-2000. Смеси бетонные. Методы испытаний.
10. Баженов Ю.М.. Технология бетонов. - М.: Изд-во АСВ, 2002. - 500 с.
11. Дмитрович А.Д. Тепло- и массообмен при твердении бетона в паровой среде. М., 1967. С.6-17.
12. Коздоба Л.А. Электрическое моделирование явлений тепло- и массопереноса. – М., Энергия, 1972.
13. Шмитько Е.И. Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий: Учебное пособие. – Т.1.....

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ НА ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ

На виброизмерительном стенде (рис. П.1.1) определяют время уплотнения бетонной смеси при варьировании ускорением колебаний.

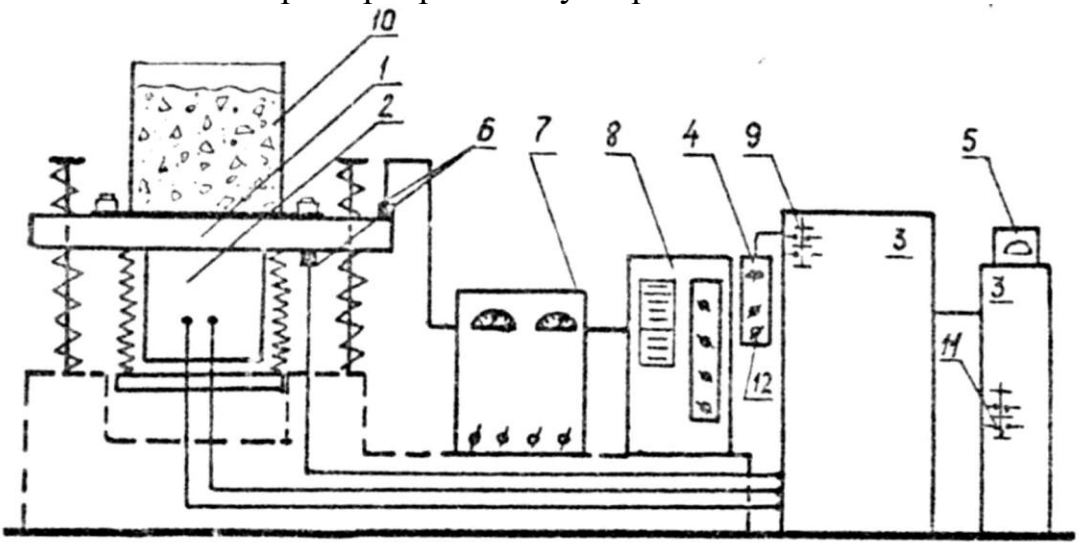


Рис. П.1.1. Виброизмерительный стенд: 1 - виброплощадка, 2 - электромагнитный возбудитель, 3 - блок питания, 4 - пульт управления, 5 - ваттметр, 6 - вибродатчик, 7 - виброизмерительное устройство, 8 - регистрирующий осциллограф, 9 - общий выключатель, 10 – форма с бетонной смесью, 11 - пускатель, 12 - ручной регулятор ускорения колебаний

Испытания проводятся в следующем порядке:

1) приготовленную бетонную смесь объемом 2 л загружают в форму размером 15x15x15 см (испытания могут проводится на техническом вискозиметре);

2) закрепляют форму на виброплощадке;

3) последовательным нажатием клавишей 9 и 11 блока питания 3 включают виброплощадку и одновременно запускают секундомер;

4) с помощью ручного регулятора 12, расположенного на пульте 4, в течение 1-2 с после пуска устанавливается заданная величина ускорения колебаний, которая контролируется по осциллографу 8 и поддерживается постоянной на протяжении всего опыта;

5) по ваттметру 5 следят за изменением мощности, необходимой на уплотнение. Величина мощности в процессе вибрационного воздействия на бетонную смесь будет уменьшаться, асимптотически приближаясь к определенному пределу. Момент времени, когда мощность перестает изменяться, характеризует практически полное уплотнение бетонной смеси ($К_{упл.}$=0,98 – 1,0);

6) примерно через 5 с после достижения минимального значения мощности секундомер выключается, зафиксированное время считается продолжительностью уплотнения бетонной смеси.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТИ БЕТОННОЙ СМЕСИ

Бетонная смесь, различная по подвижности или жесткости, приготавливается в объеме 6.0 л. Приготовление бетонной смеси осуществляется в лабораторном смесителе принудительного действия.

Подвижность бетонной смеси определяют согласно ГОСТ 10181-2000 с помощью прибора - конуса первого типа (рис. П.2.1) для бетонных смесей с наибольшей крупностью щебня (гравия) до 40 мм включительно, конус второго типа - для смесей с наибольшей крупностью щебня (гравия) - 70 и 100 мм. Конус, предварительно смоченный изнутри, устанавливают на гладкий металлический лист, размером не менее 700×700 мм и заполняют бетонной смесью через воронку тремя равными по высоте слоями.

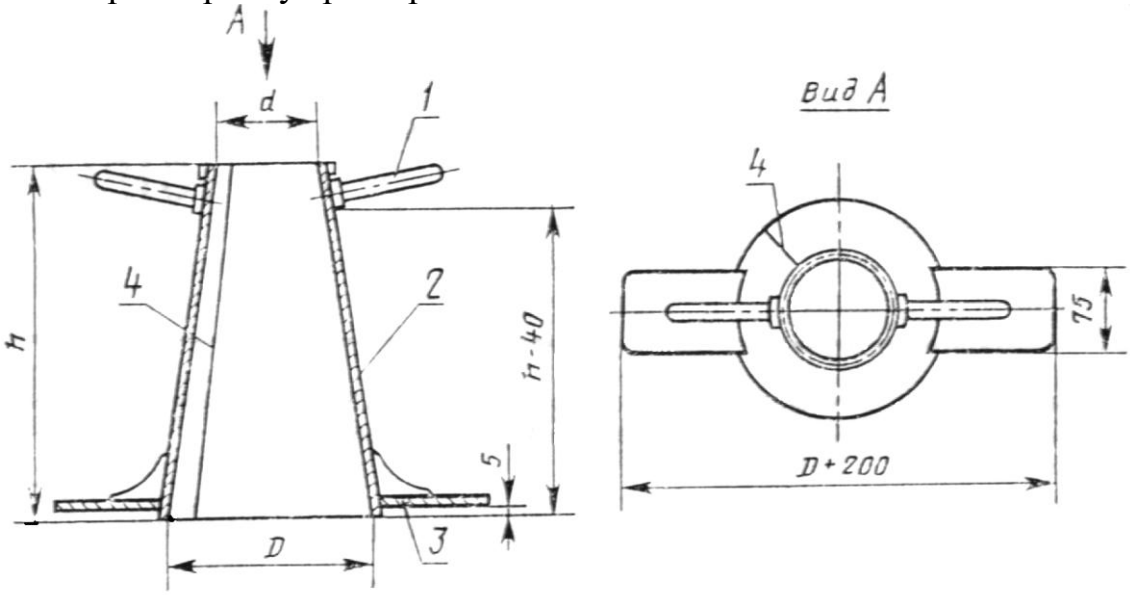


Рис. П.2.1. Стандартный конус для определения подвижности бетонной смеси: 1 - ручка; 2 - корпус прибора; 3 - упоры; 4 - сварной шов

При этом каждый уложенный слой уплотняется в конусе первого типа 25-кратным, а в конусе второго типа 56-кратным штыкованием металлическим стержнем диаметром 16 мм, длиной 600 мм с закругленными концами. Во время наполнения и штыкования конус должен быть плотно прижат к листу. После уплотнения бетонной смеси в конусе воронку снимают и избыток смеси срезают вровень с верхними краями конуса. Затем конус плавно, в течение 3…7 с, снимают с отформованной бетонной смеси и устанавливают рядом с ней. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая металлическую линейку ребром на верх конуса и измеряя расстояние от нижней грани линейки до верха бетонной смеси с точностью до 0,5 см. Подвижность бетонной смеси оценивается величиной осадки конуса (см) как среднее арифметическое результатов двух

определений, отличающихся между собой не более чем на 2 см при ОК ≤ 8 см и на 3 см при ОК ≥ 9 см. Если осадка конуса равна 0 см, то удобоукладываемость бетонной смеси характеризуют показателем жесткости.

Жесткость бетонной смеси оценивается временем вибрирования, необходимым для выравнивания и уплотнения предварительного отформованного конуса бетонной смеси в приборе для определения жесткости (рис. П.2.2).

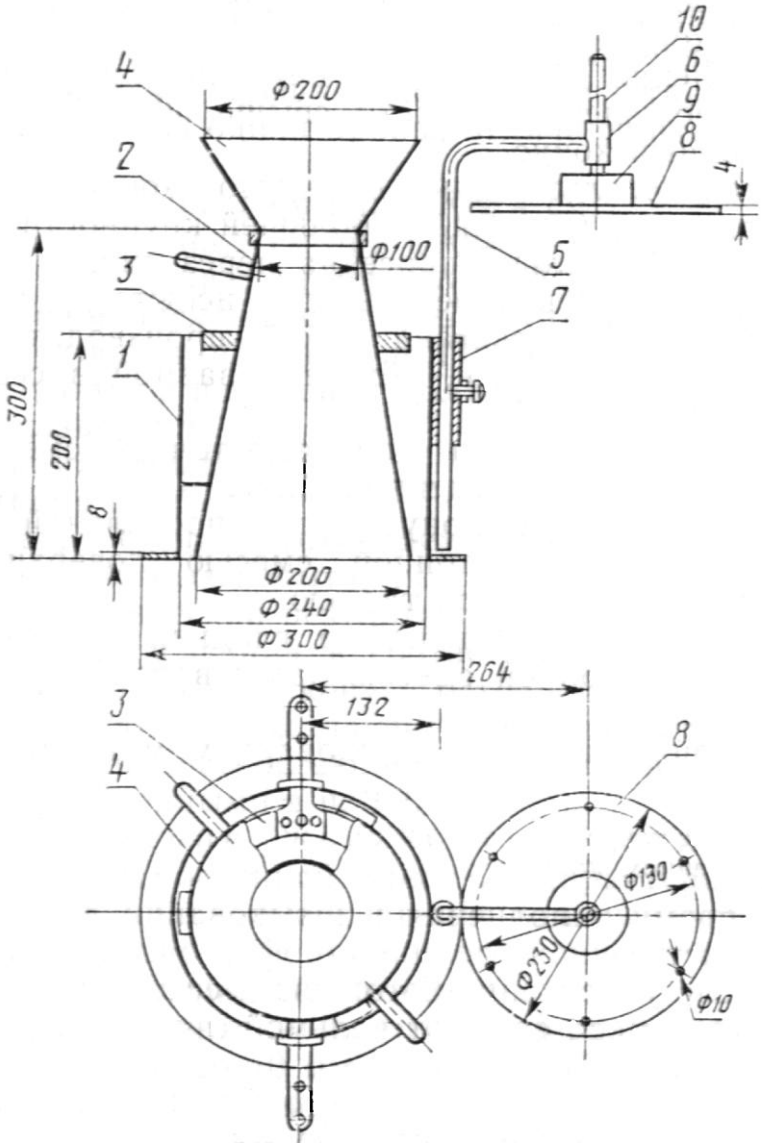


Рис. П.2.2. Стандартный прибор для определения жесткости бетонной смеси: 1 - цилиндрическое кольцо с фланцем в основании; 2 - конус; 3 - кольцо-держатель с ручками; 4 - загрузочная воронка; 5 - штатив; 6 - направляющая втулка; 7 - фиксирующая втулка с зажимным винтом; 8 - диск с шестью отверстиями; 9 - стальная шайба; 10 - штанга

Для определения жесткости бетонной смеси прибор помещают на виброплощадку. При этом жестко закрепляют цилиндрическое кольцо прибора - 3, в которое вставляют конус - 2 и закрепляют его, после чего устанавливают воронку - 4.

Заполнение конуса прибора бетонной смесью, уплотнение ее и снятие конуса с уплотненной смеси производят также, как и описано выше. На поверхность отформованного конуса из бетонной смеси поворотом штатива устанавливают диск - 8. Штатив закрепляют в фиксирующей втулке - 10 зажимным винтом. Одновременно включают виброплощадку и секундомер, вибрирование производится до тех пор, пока не начнется выделение цементного теста из любых двух отверстий диска - 8. Полученное время характеризует жесткость бетонной смеси. Ее вычисляют с точностью до 1 с как среднее арифметическое результатов двух определений. Для определения жесткости бетонной смеси допускается использовать технический вискозиметр по ГОСТ 10181-62, показатель жесткости, на котором в 4 раза больше, чем показатель жесткости бетонной смеси на стандартном приборе по ГОСТ 10181-2000.

ПРАВИЛА РАБОТЫ НА ОММЕТРЕ М 218

1. Включить омметр в сеть.
2. Установить переключатель (1) на необходимый диапазон измерения (рис. П.3.1).
3. Закоротить зажимы и ручкой «УСТ. 0» установить стрелку прибора на нуль.
4. При закороченных зажимах нажать кнопку «КАЛИБР» и ручкой «КАЛИБР» установить стрелку на отметку «100».
5. Отпустить кнопку и произвести измерения, подключив съемное сопротивление по схеме, приведенной на рис. П.3.2.

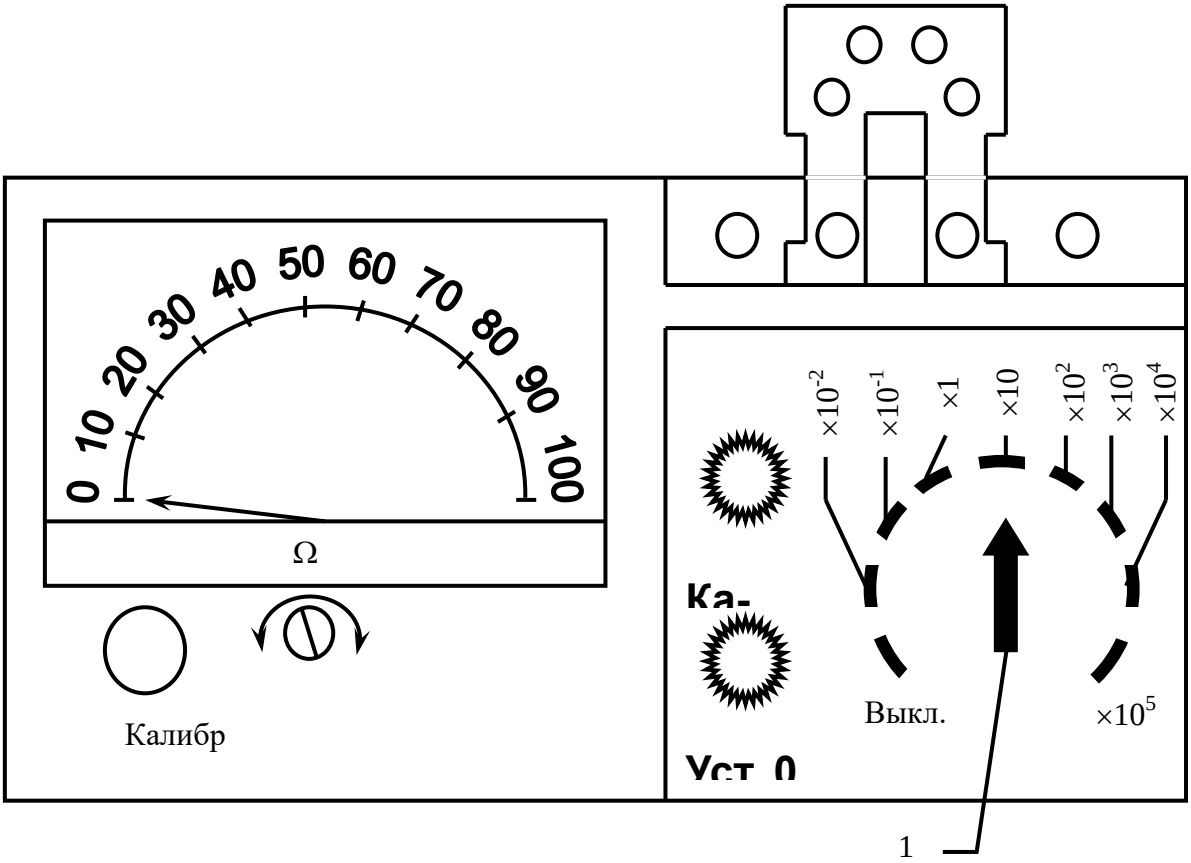


Рис. П.3.1. Панель управления омметром М 218

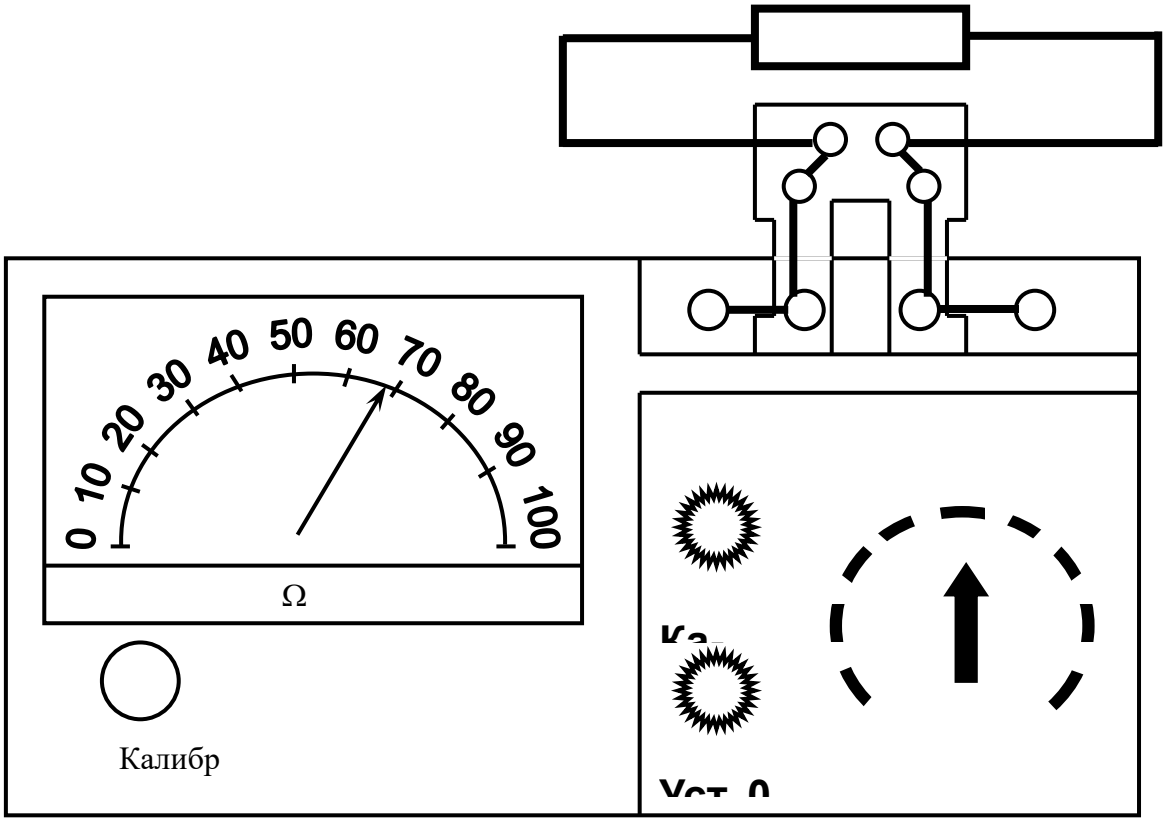


Рис. П.3.2. Схема измерения сопротивления резисторов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

ПОРЯДОК РАБОТЫ НА БУСЭ-70

1. Для решения задачи включить цифровой вольтметр (см. инструкцию по эксплуатации цифрового мультиметра).
2. Для включения электроинтегратора в рабочее положение:
   – включите тумблер «Сеть»;
   – включите тумблер «Блок питания низковольтный»;
   – вращением рукоятки автотрансформатора отрегулируйте выходное напряжение низковольтного блока, величина которого контролируется по вольтметру и должна быть равной 10 В.
3. С помощью омметра, имеющегося в комплекте, устанавливаются требуемые значения сопротивлений; съемные резисторы устанавливаются в соответствующие клеммы поля панелей – сеток, соединяя узлы в условиях одномерной задачи по принятой оси «X», двумерной – по осям «X» и «Y», трехмерной – по осям «X», «Y» и «Z».

   Аналогично производится установка временных съемных сопротивлений R_τ.

   Необходимые потенциалы, моделирующие начальные условия, рассчитанные при помощи соответствующих масштабов, подаются с делителя напряжения сетки, если необходимо – через множитель, с помощью соединительных жгутов на разъемы «R_t».

   Граничное условие I-го рода моделируется подачей в граничные узлы поля сетки электрических потенциалов. Эти потенциалы подаются с соответствующих клемм делителя напряжения сетки с помощью отдельных проводов на множитель, а с множителя при помощи соединительных жгутов – на разъемы «Узлы строк».
4. Замер потенциалов в узлах электрической сетки построенной модели производится вручную с помощью «Иглы» или автоматически. Для замера вручную:
   – клемму «Игла» соедините поочередно с помощью измерительного провода с каждым узлом электрической сетки;
   – снимите результат замера с вольтметра с точностью, обеспечиваемой прибором.

УКАЗАНИЯ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Выполнение работ на электроинтеграторе БУСЭ-70 допускается только в присутствии преподавателя или инженера, работающего на данном приборе, после изучения инструкции по эксплуатации БУСЭ-70, устройства электроинтегратора, правил техники безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

СПРАВОЧНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Таблица П.5.1

Динамический коэффициент вязкости воздуха при различной температуре

t, °C	0	10	20	30	40	50
$\mu_{воздуха}$, мПа·с	0,0175	0,0177	0,0180	0,0183	0,0190	0,0198

Таблица П.5.2

Значения коэффициентов расхода диафрагмы α

$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu}$	m=0,05	m=0,1	m=0,2	m=0,3	m=0,4	m=0,5	m=0,6	m=0,7
5000	0,6032	0,6110	0,6341	-	-	-	-	-
10000	0,6026	0,6092	0,6261	0,6530	0,6890	0,7367	0,7975	-
20000	0,5996	0,6050	0,6212	0,6454	0,6765	0,7186	0,7753	0,8540
30000	0,5990	0,6038	0,6187	0,6403	0,6719	0,7124	0,7650	0,8404
50000	0,5984	0,6032	0,6168	0,6384	0,6666	0,7047	0,7553	0,8276
100000	0,5980	0,6026	0,6162	0,6359	0,6626	0,6992	0,7472	0,8155
400000	0,5978	0,6020	0,6150	0,6340	0,6600	0,6950	0,7398	0,8019

Примечание. d – внутренний диаметр трубопровода, м; *w* – средняя скорость жидкости или газа в трубопроводе, м/с; d_0 –диаметр отверстия нормальной диафрагмы, м; $m = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2$.

Таблица П.5.3

Значения поправочного множителя k

Диаметр трубопровода, м	m=0,1	m=0,2	m=0,3	m=0,4	m=0,5	m=0,6	m=0,7
0,05	1,0037	1,0063	1,0082	1,0118	1,0144	1,0172	1,02
0,10	1,0024	1,0045	1,0064	1,0065	1,0108	1,013	1,0148
0,20	1,0017	1,0023	1,0034	1,004	1,0052	1,006	1,007
0,30	1,0005	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001

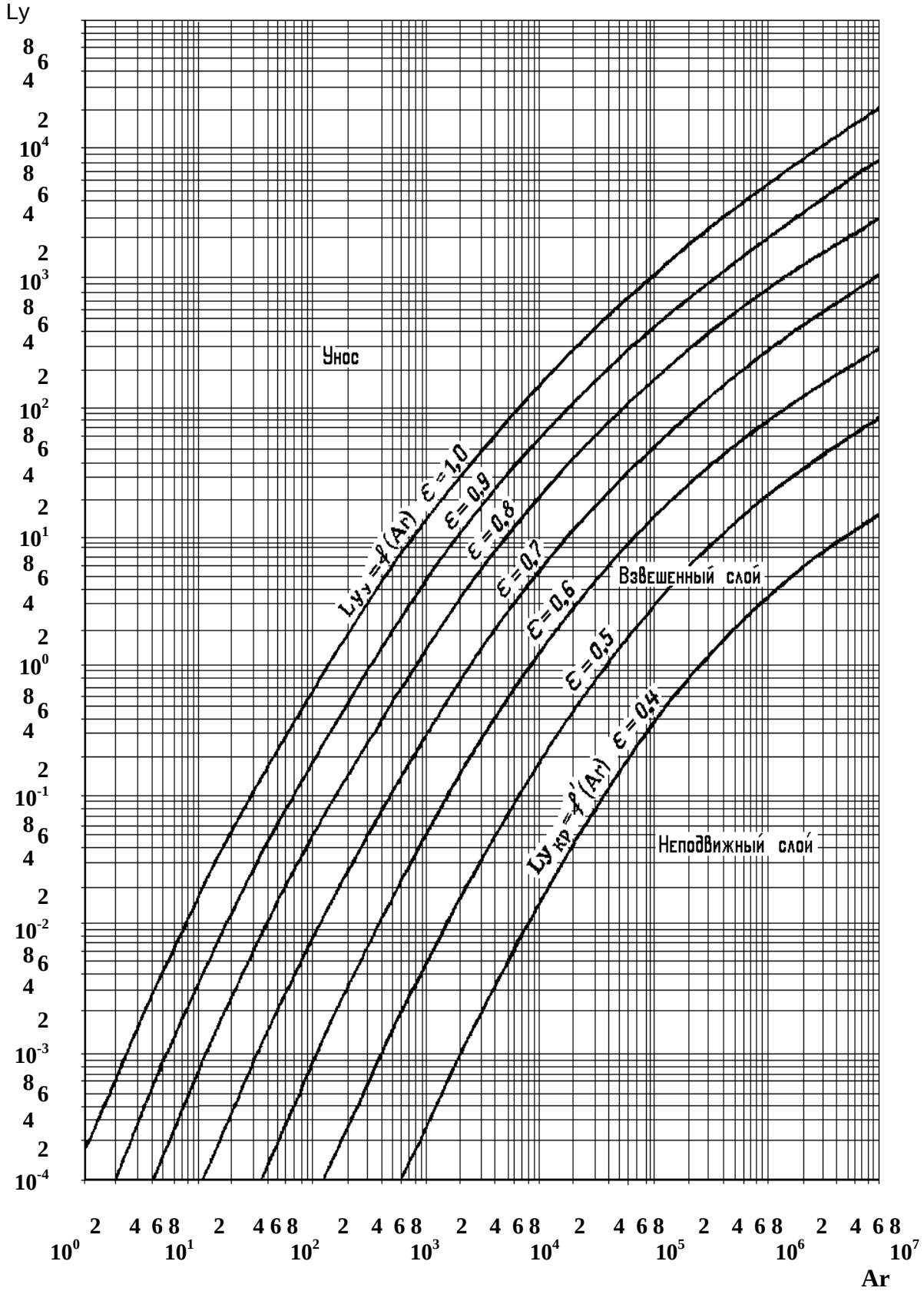


Рис. П.5.1. Зависимость критерия Ly от критерия Ar
и порозности ε слоя

КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ.....……...	124
1.	ТЕМАТИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТА, ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАД ПРОЕКТОМ……	124
2.	СОСТАВ И ОБЪЕМ ПРОЕКТА…….	125
3.	СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА (РАЗДЕЛЫ ПРОЕКТА)……...	126
3.1.	Введение……	127
3.2.	Характеристика района строительства. Характеристика выпускаемой продукции…….	127
3.3.	Характеристика сырьевых материалов……..	127
3.4.	Обоснование общей технологии производства продукции, видов основного оборудования……..	128
3.5.	Режим работы предприятия, производственные программы по выпуску основной продукции и по сырью……...	128
3.6.	Выбор и расчет технологического и транспортного оборудования…	131
3.7.	Параметрический расчет аппарата…….	167
3.8.	Анализ технологического процесса с выявлением определяющих законов его протекания. Разработка технологического регламента.....	168
3.9.	Расчет материальных потоков, уточненный расчет производственной программы……	169
3.10.	Выбор типов и расчет емкости складов сырья и готовой продукции…….....	169
3.11.	Компоновочные решения производства вяжущего вещества…….	171
3.12.	Разработка схемы генерального плана предприятия……	172
3.13.	Организация контроля технологического процесса и качества готовой продукции……	173
3.14.	Мероприятия по технике безопасности, охране труда и защите окружающей среды……..	174
3.15.	Оценка эффективности решений, принятых в проекте……	174
3.16.	Список использованных источников…….	175
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ…….	176
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК…….	176
	Приложение 1. План-график выполнения курсового проекта…….	179
	Приложение 2. Примеры оформления функциональной, технологической и операторной схем……..	181
	Приложение 3. Примеры изображения технологического оборудования и аппаратов на технологических схемах……..	184
	Приложение 4. Обозначения операторов……...	192

Приложение 5. Пример табличного оформления регламента технологического процесса…… 193
Приложение 6. Расчет грузопотоков (пример)……. 203
Приложение 7. Технические характеристики дробилок…… 204
Приложение 8. Гранулометрический состав продуктов дробления в щековых и конусных дробилках…… 210
Приложение 9. Технические характеристики пластинчатых питателей…… 213
Приложение 10. Технические характеристики инерционных грохотов легкого, среднего и тяжелого типов…..... 214
Приложение 11. К выбору и расчету мельниц…… 216
Приложение 12. Технические характеристики обжиговых аппаратов, применяемых при производстве вяжущих веществ …… 220
Приложение 13. Характеристики элеваторов……... 225

ВВЕДЕНИЕ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

Курсовое проектирование занимает важное место в общем цикле подготовки будущего специалиста, так как обеспечивает практическую направленность знаний.

Курсовой проект, который предстоит выполнить, является комплексным: он объединяет в себе по сути три курсовых проекта по трем учебным дисциплинам. Как показывает имеющийся опыт, такое объединение существенно снижает затраты времени студентов на этот вид учебной работы. Главное же состоит в том, что комплексный проект обеспечивает более глубокое овладение студентами знаниями по каждой дисциплине, так как изучаемые вопросы и методы одной дисциплины органически переходят в другую, заставляя автора проекта более глубоко вникнуть в сущность изучаемых вопросов, оценить их прикладное значение.

Вместе с тем комплексность проекта налагает на исполнителя дополнительную ответственность в части установленных сроков выполнения отдельных разделов проекта, иначе при нарушении этих сроков возникает множество труднопреодолимых проблем.

Каждая дисциплина проекта представлена самостоятельными частями, отражающими предусмотренные учебным планом содержание и объем разработок. Вместе с тем в силу комплексного характера всей разработки имеет место взаимопроникновение информации, в связи с чем отдельные разделы проекта нельзя определенно отнести к той или иной дисциплине.

В соответствии с концепцией проникновения разделов проекта предусмотрен особый график его выполнения (прил.1). В нем отсутствует традиционное разделение между дисциплинами общего срока, отведенного на выполнение трех проектов, а вместо этого предусмотрено последовательное или последовательно-параллельное решение задач единого комплекса с максимальным использованием и обогащением информации на каждом этапе. Оформление единой пояснительной записки также отвечает идее взаимопреемственности разделов комплексного проекта.

1. ТЕМАТИКА КУРСОВОГО ПРОЕКТА, ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ НАД ПРОЕКТОМ

Темой комплексного проекта является, как правило, проектирование предприятия (цеха) по производству одного из видов вяжущих веществ: мономинеральных или полиминеральных. К мономинеральным относятся вяжущие вещества, полученные на основе одного вида сырья (строительный гипс, строительная известь). К полиминеральным относятся смешанные, или композиционные, вяжущие, например известково-кремнеземистые, гипсоцементно-пуццолановые и др.

Проект разрабатывается на основании задания, выдаваемого преподавателем – основным руководителем курсового проекта, который одновременно является консультантом по дисциплине «Вяжущие вещества». Задание согласовывается с руководителями проекта по дисциплинам «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий» и «Механическое оборудование предприятий строительной индустрии». При этом не исключаются варианты, когда две или даже все три части проекта выполняются под руководством одного преподавателя.

На выполнение комплексного курсового проекта по учебному плану отводится 14 недель, еще 2 недели необходимо для подготовки проекта к защите, которая проводится по заранее составленному графику.

Для успешного и своевременного выполнения проекта рекомендуется выдерживать последовательность разработки основных его разделов, предусмотренную планом-графиком (прил.1). Работа над проектом заканчивается его защитой на профилирующей кафедре. Открытая защита принимается комиссией из числа преподавателей-консультантов проекта и других преподавателей, участвующих в проектировании. В течение 10 минут, которые отводятся для доклада, автор проекта излагает сущность проектных разработок, обосновывает и защищает технические решения, принятые в проекте.

В соответствии с качеством проектных разработок и по результатам защиты проекта комиссия выставляет оценку. После защиты проект сдается для хранения в архив кафедры.

2. СОСТАВ И ОБЪЕМ ПРОЕКТА

Комплексный курсовой проект по трем дисциплинам состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 60-70 с. и графической части на 3,5-4 листах формата А1. Пояснительная записка и чертежи должны быть выполнены в соответствии с требованиями ЕСКД и СПДС.

На чертежах должны быть представлены: функциональная, технологическая, операторная схемы технологического процесса и конструктивная схема аппарата, для которого выполняется параметрический расчет – 1 лист; компоновочная схема технологического оборудования – 1 лист; схема генерального плана и компоновка основного производства (план и разрезы цеха) – 1,5-2 листа.

План и разрезы цеха должны быть выполнены таким образом, чтобы предельно полно отразить все необходимое технологическое оборудование в соответствии с принятой технологической схемой производства. Масштаб изображения планов и разрезов 1:100, схемы генерального плана – 1:1000, схемы аппарата – 1:10 или 1:20 и общего вида оборудования – 1:50 или 1:100.

3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА (РАЗДЕЛЫ ПРОЕКТА)

Пояснительная записка курсового проекта должна быть составлена со ссылками на листы и позиции графической части, иллюстрирующие принятые решения.

Пояснительная записка содержит следующие разделы:

ВВЕДЕНИЕ

1. Характеристика района строительства
2. Характеристика выпускаемой продукции
3. Характеристика сырьевых материалов
4. Обоснование общей технологии производства продукции, видов основного оборудования
5. Режим работы предприятия, производственные программы по выпуску основной продукции и по сырью
6. Выбор и расчет технологического и транспортного оборудования
   - 6.1. Оборудование для дробления материалов
   - 6.2. Приемный бункер и колосниковый питатель для узла дробления
   - 6.3. Оборудование для сортировки кусковых материалов
   - 6.4. Оборудование для тонкого измельчения материалов
   - 6.5. Оборудование для сушки материалов
   - 6.6. Оборудование для обжига материалов
   - 6.7. Оборудование для дозирования и транспортировки материалов
   - 6.8. Вспомогательное оборудование
   - 6.9. Грузоподъемное оборудование
7. Параметрический расчет аппарата
8. Анализ технологического процесса с выявлением определяющих законов его протекания
9. Разработка технологического регламента
10. Расчет материальных потоков, уточненный расчет производственной программы
11. Выбор типов и расчет емкости складов сырья и готовой продукции
12. Компоновочные решения производства вяжущего вещества
13. Разработка схемы генерального плана предприятия
14. Организация контроля технологического процесса и качества готовой продукции
15. Мероприятия по технике безопасности, охране труда и защите окружающей среды
16. Оценка эффективности решений, принятых в проекте
17. Список использованных источников (библиографический список).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленную последовательность разделов пояснительной записки не следует строго увязывать с последовательностью работы над проектом, так как взаимосвязи решаемых вопросов настолько неоднозначны, что возможны «забегания» вперед и возвраты с целью повышения качества излагаемых разделов.

Требования к примерному содержанию разделов изложены ниже.

3.1. Введение

Введение содержит краткое описание состояния и перспектив развития отрасли, оценку достигнутого уровня отечественного и зарубежного производства и применения в строительстве заданного в проекте вяжущего вещества. Приводятся основные положения, определяющие актуальность разрабатываемой темы проекта, назначение и роль вяжущего в экономике страны. Окончательный вариант «Введения» рекомендуется оформлять после разработки основных разделов проекта.

3.2. Характеристика района строительства. Характеристика выпускаемой продукции

В курсовом проекте район (место) строительства предприятия обычно указывается в задании. Необходимо лишь обосновать целесообразность строительства завода (цеха) в указанном районе, руководствуясь перспективами развития данного района, спросом на данный вид продукции, наличием необходимой сырьевой базы, возможностью использования отходов различных отраслей промышленности.

Для выполнения этого раздела следует использовать данные, опубликованные в печати, общие экономико-географические сведения о регионе и т.п.

В этом разделе приводятся основные показатели, установленные для данного вида вяжущего вещества действующими стандартами и техническими условиями, свойства вяжущего, рассматриваются возможные области его применения.

Дается обоснование выбора состава, марки и других характеристик вяжущего вещества в зависимости от вида используемого сырья и с учетом условий его применения; рассматриваются возможности улучшения качества вяжущего и снижения его себестоимости, в том числе - за счет применения отходов различных отраслей промышленности и побочных продуктов переработки.

3.3. Характеристика сырьевых материалов

При выборе сырьевых материалов следует учитывать мощность месторождения, условия разработки и переработки сырья, стоимость его доставки. Желательно рассмотреть несколько возможных вариантов и выбрать такой видсырья, который обеспечивает получение вяжущего высокого качества

при наименьших затратах. Необходимо дать характеристику свойств выбранных сырьевых материалов, пользуясь действующими стандартами, техническими

условиями, иными документами. К таким свойствам в первую очередь следует отнести химический и минералогический состав, плотность, прочность, карьерную влажность, размеры поступающих в производство кусков.

3.4. Обоснование общей технологии производства продукции, видов основного оборудования

В этом разделе дается обоснование общей технологии вяжущего вещества по всем основным переделам, начиная с рассмотрения вопросов добычи и подготовки сырья и заканчивая условиями хранения вяжущего на складе готовой продукции.

При этом основное внимание уделяется тому, каким видам обработки и при каких параметрах подвергается исходное сырье и полуфабрикаты, какие виды технологического оборудования предусмотрены для этого.
Принятие решений по этим вопросам производится после тщательного изучения информационных источников, а именно: основных учебников, специальной справочной литературы, статей из журналов, рекламных материалов, сведений из Internet. Принятые решения должны отвечать современным требованиям по качеству продукции, по экономии ресурсов (трудовых, материальных, энергетических), отвечать экологическим требованиям и требованиям безопасного труда работающих. Рекомендуется рассмотреть несколько возможных вариантов технологии и принять окончательно лучший из них.
Результаты разработки представляются в пояснительной записке в виде текстового описания; описание иллюстрируется **функциональной схемой** в начале описания и **технологической схемой** в окончательном варианте.

Функциональная схема дает лишь перечень определяющих технологических переделов, последовательная связь между которыми показывается стрелками (табл.П.2.1.)

На **технологической схеме** представляется последовательность технологического оборудования (аппаратов) в условном их изображении

(табл. П. 2.2.). На рассматриваемом этапе разработки на технологической схеме представляют лишь тип оборудования (аппарата) без обозначения его марки. Транспортное, дозировочное и другое вспомогательное оборудование не показывается; материальные потоки обозначаются стрелками. Графические изображения оборудования целесообразно принять из прил. 3.

Результаты разработки по общей технологии согласовываются с преподавателями-руководителями по вяжущим веществам и механическому оборудованию.

3.5. Режим работы предприятия, производственные программы по выпуску основной продукции и по сырью

Под режимом работы понимается количество рабочих дней в году, продолжительность и число рабочих смен для подразделений предприятия.
Обычно режим работы определяется отраслевыми нормами технологического проектирования.
Для предприятий строительных материалов, изделий и конструкций, имеющих в своем составе непрерывно действующие агрегаты, следует предусматривать трехсменную каждодневную работу с остановкой оборудования только для проведения капитального ремонта. В отдельных случаях может предусматриваться двухсменная работа, а трехсменная устанавливается только для подразделений, связанных с приемкой сырья и отгрузкой готовой продукции.
При непрерывном режиме годовой фонд времени предприятия рассчитывается по формуле: $T_{ф.пр.} = (365 - n) \cdot 3 \cdot 8$, *ч/год,* (3.1)
где n – число дней, определяемых на капитальный ремонт (принимается равным 15-20 дней в году).

При двухсменном прерывном режиме годовой фонд времени работы предприятия рассчитывается по формуле

$$T_{год} = (365 - m) \cdot 2 \cdot 8, \quad ч/год,$$

(3.2)

где m – количество выходных и праздничных дней в году.

Для определения годового фонда времени работы технологического оборудования $T_{ф.об.}$ необходимо учесть время на его текущий ремонт, на плановые остановки. Для этого показатель $T_{ф.пр.}$, полученный по формуле (3.2), следует умножить на коэффициент использования оборудования, равный 0,945:

$$T_{ф.об.} = 0{,}945 \cdot T_{ф.пр.}.$$

На основании полученного значения фонда времени предприятия $T_{ф.пр.}$ и его заданной годовой мощности *П, т/г,* рассчитывают производственные программы по выпуску продукции (табл.3.1) и по сырью (табл.3.2).

Таблица 3.1

Производственная программа предприятия по выпуску продукции

Наименование выпускаемой продукции	Количество продукции, т			
	в год	в сутки	в смену	в час

Таблица 3.2

Производственная программа предприятия
по сырью (пример)

Вид сырьевого компонента	Расходы, т			
	в год	в сутки	в смену	в час
Известняк Кварцевый песок				

При определении производственной программы по выпуску продукции вначале рассчитывают показатель последней колонки в табл. 3.2. (выпуск в час - $П_ч$), как

$$П_ч = \frac{П}{T_{ф.пр.}} \quad . \qquad (3.3)$$

Последующие значения (программа на смену, сутки, год) определяется умножением величины часового выпуска на соответствующий фонд времени. Совпадение расчетного значения $П$ с заданным свидетельствует о правильности расчетов.

Расчет производственной программы по сырью (см. табл.3.2) производится с использованием показателей, характеризующих потери массы исходного сырья по ходу технологического процесса.

Различают следующие виды потерь:

- механические;
- массообменные;
- химические;
- технологические.

Механические потери связаны с транспортированием материалов (просыпи, безвозвратный пылеунос и др.). В проекте величину механических потерь можно ориентировочно принимать равной 2 %.

Массообменные потери связаны в основном с удалением свободной влаги из исходного сырья. Показатели исходной влажности можно принять по [32, табл. П.1.1].

Химические потери обычно связаны с термическим разложением исходного сырья и удалением летучих газов (например, карбонатных пород) или химически связанной воды (например, из гипсового камня, глинистых минералов).

В выполняемых ориентировочных расчетах могут быть использованы следующие показатели:

для термического разложения (декарбонизации) известняка, мела - 40 %;
для термического разложения каустического магнезита – 46 %;
для термического разложения каустического доломита - 26 %;
для термического разложения (дегидратации) гипсового камня - 18 %;

для дегидратации глинистого сырья - 14 %.

Технологические потери учитывают возможное отделение включений в сырье (обогащенное), например, камневыделение из глинистого сырья – до 1 %, и отделение неделовой фракции, например, при подготовке известняка дроблением к обжигу – 15-20 %.

В современных технологиях неделовую фракцию используют или в другой технологии получения вяжущего, или как техногенный продукт. Если в

проекте неделовая фракция для заданной продукции не используется, то этот вид потерь следует учитывать.

С учетом того, что каждая последующая потеря исчисляется относительно меньшего числа, полученного на предыдущем шаге расчета, объединяющая расчетная формула для количества исходного сырья приобретает вид:

$$П_c = \frac{П}{\left(1-\frac{n_1}{100}\right)\cdot\left(1-\frac{n_2}{100}\right)\cdot\left(1-\frac{...}{100}\right)}, \qquad (3.4)$$

где $П$ – программа по готовой продукции, т/год;

n_1, n_2 , ... – значения потерь, %;

для полиминерального вяжущего:

$$П_c = K\cdot\frac{П}{\left(1-\frac{n_1}{100}\right)\cdot\left(1-\frac{n_2}{100}\right)\cdot\left(1-\frac{...}{100}\right)}, \qquad (3.5)$$

где K – доля соответствующего компонента в составе вяжущего.

Производственные программы предприятия в дальнейшем используются при выборе и расчете оборудования, в расчетах складов предприятия, в расчетах материальных потоков по отдельным цехам и предприятию в целом.

3.6. Выбор и расчет технологического и транспортного оборудования

В технологическом процессе изготовления минеральных вяжущих веществ широко применяется различное технологическое оборудование для дробления, сортировки, помола, сушки, обжига материалов, в определенной последовательности соединяемое друг с другом, как правило, непрерывными транспортирующими устройствами, к которым относятся питатели, дозаторы, конвейеры, установки пневматического транспорта. На различных этапах технологического процесса применяют всевозможные бункерные установки, исполняющие роль запасников или емкостей для выдерживания материала. В случаях необходимости предусматриваются пылеосаждающие установки, а также грузоподъемные механизмы для монтажа и для технического обслуживания оборудования.

В разрабатываемом проекте требуется обоснованно выбрать типы и марки оборудования, определить его производительность. Начинать следует с ознакомления по информационным источникам с общим устройством и функциональными возможностями оборудования. Затем по ряду определяющих для проектируемой технологии признаков назначают марку оборудования, производят необходимые расчеты.

Характеристики оборудования представляют в пояснительной записке, а его основные конструктивные особенности изображают графически на листе формата А1 в виде компоновочной схемы технологической линии.

Оборудование для дробления материалов

Технологический процесс производства практически любого вида вяжущего вещества начинается с измельчения исходных сырьевых материалов.

Конечная продукция на выходе из технологического процесса также подвергается измельчению. Измельчение бывает двух видов: грубое и тонкое. Грубое измельчение обеспечивается дроблением материалов и переводом относительно крупных его кусков в более мелкие. Оно может производиться в одну или в две и даже более стадий. Для тонкого измельчения используется помольное оборудование, способное превратить кусковой материал в тонкий порошок. На технологических переделах эти два вида обработки следуют друг за другом (например, дополнительное дробление извести после шахтной печи и последующий её помол). Нередки ситуации, когда эти два способа измельчения разделены технологическими процессами иной природы (например, дробление-обжиг-помол). Но в любой из возможных ситуаций дробление рассматривается как технологический этап подготовки материала к последующей переработке. Поэтому, для того, чтобы правильно подобрать дробильное оборудование, необходимо определить требования, выдвигаемые последующими технологическими переделами. Чаще всего это фракционный состав материала, например, поступающего в обжиговую печь. Но не менее важными являются исходные характеристики материала. К ним следует отнести размеры кусков, поступающих на дробление, плотность и прочность материала, его влажность, склонность к прилипанию и др.

Если обратиться к сырьевым материалам, то размеры кусков, поступающих на первичное дробление, осуществляемое, как правило, в карьере, следует считать зависящими от технологии добычи сырья в карьере (применение одноковшовых, многоковшовых, роторных экскаваторов, предварительное разрыхление породы взрывом и др.). Соответственно технологии разработки карьера и свойствам добываемого кускового материала его дробление может осуществляться в одну, две и даже три стадии. Например, для карьеров цементных заводов выполняются рекомендации, приведенные в табл. 3.3. Но технология разработки сырьевых карьеров – это самостоятельная инженерная дисциплина и в данном проекте она не рассматривается. В связи с этим условно можно принять, что первичное дробление материала

производится на сырьевом карьере, а на проектируемом предприятии осуществляется вторичное дробление с выдачей заданного фракционного состава.

Таблица 3.3

Дробилки, используемые для дробления сырьевых материалов

Материал	Прочность при сжатии, МПа	Стадии дробления		
		I	I I	I I I
Известняк, мрамор	100…200	Щековая, конусная или роторная	Молотковая, конусная или щековая	Конусная, молотковая
Известняк плотный, крепкие мергели	60…120	Щековая, конусная или молотковая	Молотковая, конусная или щековая	Конусная, молотковая
Известняк-ракушечник, Плотный мергель	20…60	Щековая или самоочищающая молотковая	Самоочищающая молотковая или конусная	_____
Туф твердый, кремнистые опоки	30…100	Щековая или самоочищающая молотковая	Самоочищающая молотковая или конусная	_____
Глинистые сланцы, мергели	60…150	Щековая, самоочищающая молотковая	_____	_____
Туф, трепел, глина, пемза, гипс	10…30	Валковая или самоочищающая молотковая	_____	_____

Окончание табл. 3.3

Материал	Прочность при сжатии, МПа	Стадии дробления		
		I	I I	I I I
Мергель глинистый, мягкий сланец	20…60	Валковая или самоочищающая молотковая	_____	_____
Глина, мел	2…9	Валковая или самоочищающая молотковая	_____	_____

При этом принимается, что карьер выдает материал заданной проектировщиком предприятия крупности. Доставка материала на предприятие по выпуску вяжущего вещества производится автотранспортом, принадлежащим карьеру как самостоятельному предприятию.

Выбор типа дробилки зависит от вида дробимого материала и его физико-механических характеристик (см. табл.3.3).

Для дробления материала высокой и средней прочности (гранит, базальт, диабаз, плотный известняк) применяют щековые и конусные дробилки. При этом если прочность материала превышает 150 МПа, то из щековых дробилок предпочтение должно быть отдано дробилке с простым движением щеки. Основные характеристики щековых дробилок обоих видов, крупного и мелкого дробления, представлены в табл. П.7.1; конусных дробилок – в табл. П.7.2.

Для измельчения малоабразивных материалов с пределом прочности на сжатие, не превышающим 150 МПа (известняки, доломиты, мергели, гипсовый камень, шлак и др.), рационально применять молотковые дробилки. Их характеристики представлены в табл. П.7.3. Обеспечивая высокую степень измельчения, эти дробилки выдают достаточно мелкий продукт, максимальный размер которого в 1,5…2 раза меньше ширины выпускной щели колосниковой решетки.

Молотковые дробилки могут применяться также для дробления мягких и влажных материалов, имеющих влажность до 20 % (мел, известняк, мергель, глина, трепел, шлак (табл. П.7.4). Они имеют самоочищающие устройства (марки ДМПП-1, СМД-102), а двухроторная дробилка ударно-отражательного действия (СМЦ-209) укомплектована устройством для подсушки материала горячими газами.

Для первичного и вторичного дробления нетвердых сырьевых материалов, обладающих пластичностью и влажностью (слабые известняки, мел, мергель и т.п.), применяются зубчатые дробилки (табл. П.7.5).

Представленные выше сведения позволяют осознанно выбрать тип дробилки. В дальнейшем необходимо определить конкретную марку выбранного типа дробильной машины.

Для обоснования марки дробилки главными критериями являются производительность ($м^3$/ч), фракционный состав получаемого продукта, наибольший размер поступающих на дробление кусков материала (D_{max}). Этот размер определяет минимальный размер приемного (загрузочного) отверстия дробилки в соответствии с отношением

$$D_{\max} < 0{,}8 \cdot B ,$$

где D_{max} - максимальный размер куска, мм;

B - размер меньшей стороны приемного отверстия дробилки, мм.

Характеристики дробилок, выпускаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. П.7.1 - П.7.5. Если из других информационных источников получены сведения о дробилках с лучшими, чем приведены, показателями, то такие дробилки могут быть включены в проект.

Фракционный состав материала, получаемого после дробления, определяется из условий реализации последующего основного технологического процесса, заложенного в технологической схеме. Такими процессами обычно являются сушка и обжиг сырья; в зависимости от характеристик принятого теплового агрегата выбирается крупность фракций материала, поступающего на тепловую обработку. Например, при производстве строительного гипса с обжигом в варочном котле крупность сырья при совместной сушке и помоле в шахтной мельнице – 5-15 мм.

При производстве комовой извести-кипелки с обжигом в шахтной печи крупность сырья должна составлять 40-80 и 80-150 мм, во вращающихся печах – 5-20 и 20-40 мм, а в печах кипящего слоя – 3-12 и 12-25 мм.

Поскольку в проекте рассматривается, как правило, вторая стадия дробления, то выбранная для этой стадии дробилка должна обеспечить максимальный выход деловой фракции при обеспечении заданной производительности.

Для щековых и конусных дробилок определение содержания фракций в материале, получаемого после дробления, производится по графикам гранулометрического состава продуктов дробления, приведенным на рис. П.8.1 и П.8.2, на которых количество фракций представлено в зависимости от ширины выходной щели. Поскольку эта характеристика в щековых и конусных дробилках регулируема, то, следовательно, имеется возможность варьировать зерновым составом. Необходимо иметь в виду, что при наилучшем зерновом составе часть выходящего из дробилки материала, превышающего по своим размерам наибольшую крупность зерна в деловой фракции, обязательно возвращается на повторное дробление.

Соответственно выбранной ширине выходной щели определяется фактическая производительность дробилки. Это достигается методом интерполяции с использованием пределов по производительности и ширине выходной щели, представленных в технических характеристиках дробилок (прил. 7).

Принятое значение производительности дробилки сравнивается с расчетным. Для щековых дробилок применима следующая формула производительности Q, м^3/ч:

$$Q = 30 \cdot C \cdot S_{ср} \cdot L \cdot I \cdot n \cdot (B+1)/(D_{св} \cdot tg\alpha), \qquad (3.6)$$

где C - коэффициент кинематики; для дробилок с простым качанием щеки C = 0,84; со сложным C = 1,0;

$S_{ср}$ - средний ход щеки, м; в первом приближении можно принять $S_{ср}$= (0,03…0,04)$\cdot B$, более точно - по прил. 7;

L - длина приемного отверстия, м;

I - ширина выходного отверстия, м;

n - частота вращения вала дробилки, мин$^{-1}$;

B - ширина приемного отверстия, м;

$D_{св}$ - средневзвешенный размер кусков исходного материала, м; можно принять $D_{св}$ =(0,5…0,52)$\cdot D_{max}$;

α - угол захвата, α = 20 °.

Конструктивная производительность (Q, м^3/ч) конусных дробилок среднего и мелкого дробления определяется по формуле

$$Q = 60 \cdot \pi \cdot e \cdot L \cdot B \cdot n \cdot K_p, \qquad (3.7)$$

где e - ширина выходного отверстия при максимальном отходе конуса, м;

L - длина зоны параллельности, в которой внутренняя поверхность непод вижного конуса параллельна наружной поверхности подвижно го конуса, L = (0,07…0,08)$\cdot D$, м;

D - диаметр основания дробящего конуса, м;

n – частота вращения подвижного конуса, мин$^{-1}$;

K_p - коэффициент разрыхления материала, K_p=0,4…0,5.

Производительность молотковой дробилки (Q, м^3/ч) определяется по формуле

$$Q = 100 \cdot D^2 \cdot L \cdot n/1000 \quad - \quad \text{при } D > L,$$

$$Q = 100 \cdot D \cdot L^2 \cdot n/1000 \quad - \quad \text{при } D < L, \qquad (3.8)$$

где D – диаметр ротора, м;

L – длина ротора, м;

n – частота вращения ротора, мин$^{-1}$.

Производительность зубчатой валковой дробилки (Q, м^3/ч) определяется по формуле

$$Q = 3600 \cdot L \cdot B_{\max} \cdot v \cdot \mu \cdot \gamma, \qquad (3.9)$$

где L – длина валков, м;

v – окружная скорость валков, м/с;

μ – коэффициент разрыхления материала, можно принять $\mu = 0{,}25$;

γ – плотность материала в куске, т/м^3;

B_{max} – размер наибольшего куска в продукте дробления; можно принять $B_{max} = 1{,}5 \cdot l$,

где l – ширина выходного отверстия на холостом ходу.

В заключение расчетов дается анализ причин возможного расхождения полученного расчетом значения производительности с паспортными показателями, приведенными в табл. П.7.1.-П.7.5.

Приемный бункер и колосниковый питатель для узла дробления

Состав и компоновка оборудования узла дробления поступающих на предприятие кусковых сырьевых материалов в большинстве случаев соответствует варианту, представленному на рис. 3.1.

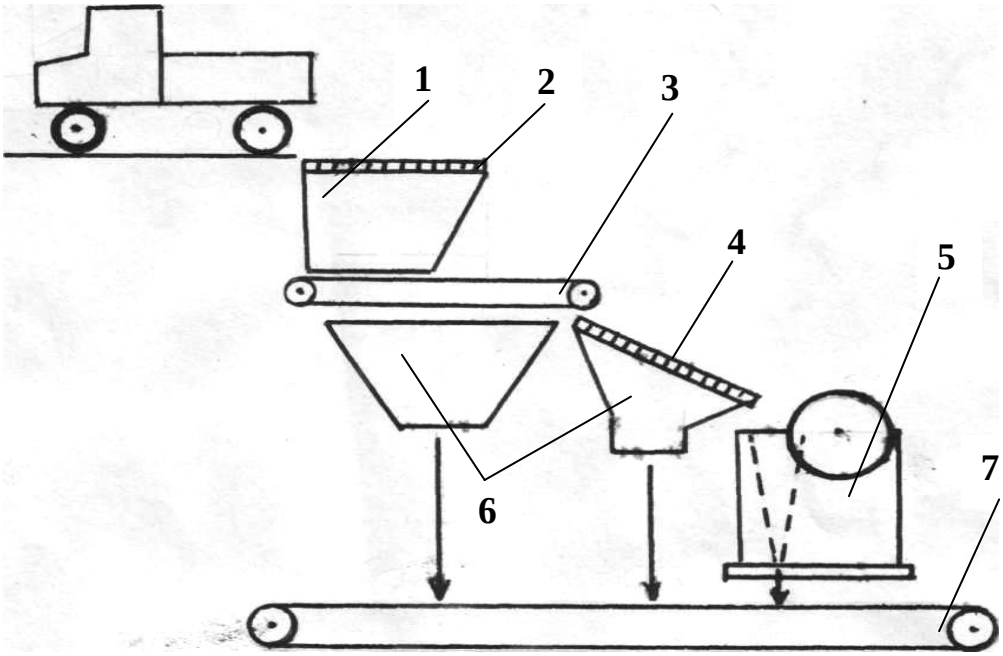


Рис. 3.1. Схема узла дробления

В состав узла дробления (рис.3.1) входят бункер приема исходного материала -1, решетка для отбора негабаритных кусков - 2, пластинчатый питатель - 3, грохот отбора мелочи - 4, дробилка - 5, направляющий кожух для отбора мелочи – 6, сборный ленточный конвейер - 7.

Конструкция и емкость приемного бункера зависят от вида доставляющего материал транспорта, крупности кусков материала, содержания загрязняющих примесей. Он выполняется с наклонными боковыми и задней стенкой. Угол наклона стенок 50…60^0. Выходное боковое окно из бункера должно иметь высоту в 2,5…3 раза больше размеров кусков материала. Длина нижнего отверстия бункера определяется размерами пластинчатого питателя, подобранного сообразно характеристикам поступающего материала (табл. П.9.1.). Вынос осей переднего и заднего барабанов питателя относительно переднего и заднего краев бункера должен быть не менее 800…1000 мм. Ширина нижнего отверстия бункера должна быть не менее двух макси-

мальных размеров куска материала и составлять примерно 0,8 ширины ленты пластинчатого питателя. Над бункером устанавливается решетка для отделения негабаритных кусков материала. Для отбора мелких кусков материала, не требующих дробления, между питателем и дробилкой устанавливается наклонный колосниковый (подвижный или неподвижный) грохот. Для неподвижной колосниковой решетки соотношение между длиной и шириной L/B = 3…4, а угол её наклона должен составлять 30…40^0. Под пластинчатым питателем необходимо предусматривать устройство для улавливания просыпи через щели питателя и направления её на сборный ленточный конвейер.

Необходимую вместимость приемного бункера ($V_б$, м^3) можно определить по формуле

$$V_б = к \cdot Q + W \,, \qquad (3.10)$$

где Q – производительность дробилки первичного дробления, м^3 /ч;

$к$ – коэффициент запаса (ч), обеспечивающий независимую работу дробилок в случае непредвиденных задержек работы транспорта, $к \approx 0{,}3$;

W – вместимость кузова транспортного средства, м^3.

Оборудование для сортировки кусковых материалов

Смесь кусковых материалов, выходящая из дробилки, в большинстве технологий подвергается сортировке по крупности с выделением основной(ных) фракции(ий). При этом куски материала с размерами, превышающими наибольший размер в основной фракции, возвращаются на повторное дробление, а куски меньше наименьшего размера отправляются на склад техногенного продукта, который или перерабатывается в целевой продукт на проектируемом предприятии по иной технологии, или отправляется в другие отрасли производства для использования в ином качестве (раскислитель почвы и др.).

Сортировка материалов производится в дробильно-сортировочном отделении предприятия. Для этой цели могут применяться механические грохоты двух типов: плоские вибрационные и барабанные вращающиеся. Последние обладают бесшумной работой, но имеют низкое качество сортировки. В проекте рекомендуется применять только вибрационные грохоты.

Вибрационные грохоты выпускаются в 4-х исполнениях: гидрационном, инерционном, самобалансном и резонансном.

В строительных технологиях преимущественно применяют инерционные грохоты, представляющие собой набор горизонтально или наклонно установленных сит, решеток, колосников, получающих круговые вибрации от электровибровозбудителя. Различают инерционные грохоты легкие (марки ГИЛ), средние (марки ГИС) и тяжелые (марки ГИТ).

Для предварительной сортировки применяются решетки, расположенные над приемным бункером дробилки первичного дробления, с которых удаляются вручную или грузоподъемными устройствами негабаритные куски сырья.

Для выделения относительно мелких кусков материала, не требующих дробления, выбираются подвижные или неподвижные колосниковые грохоты типа ГИТ, которые располагаются между питателем и дробилкой первичного дробления.

Для сортировки на фракции раздробленного материала выбираются грохоты типов ГИЛ или ГИС. Выбор и расчет грохотов необходимы для определения рабочих параметров грохотов и количества грохотов в технологической линии. Определяющими характеристиками при этом являются производительность грохота и гранулометрический состав поступающего материала.

В начале расчета определяют необходимые площади сит, их количество в грохоте. Для многоситового грохота расчет производится по каждому ситу, после чего выбирается типоразмер грохота по площади наибольшего сита.

Расчет требуемой площади сит (F, м^2) производится по формуле

$$F = Q/(m \cdot q \cdot k_1 \cdot k_2), \qquad (3.11)$$

где Q – расчетная производительность технологической линии, м^3/ч;

m –коэффициент, учитывающий неравномерность питания грохота материалом, форму зерен и положение сит (горизонтальное или наклонное), принимается по табл. 3.4;

q – удельная производительность сита, м^3/ч на 1 м^2 сита; принимается по табл. 3.5 в зависимости от размера ячейки сита; размер ячейки определяется по табл. 3.6;

k_1 –коэффициент, учитывающий предельное содержание фракций нижнего класса в исходном материале, принимается по табл. 3.7;

k_2 –коэффициент, учитывающий предельное содержание в нижнем классе зерен, размер которых меньше половины размера отверстия сита, принимается по табл. 3.8.

Таблица 3.4

Значение коэффициента m

Положение сита грохота	Значение коэффициента	
	Гравий	Щебень
Горизонтальное	0,8	0,65
Наклонное	0,6	0,5

Таблица 3.5

Значение удельной производительности *q*

Размеры в свету квадратной ячейки, мм	5	7	10	14	16	18	20	25	35	37	40	42	65	70
Значения q,, (м³/ч) / м²	12	16	23	32	37	40	43	46	56	60	62	64	80	82

Таблица 3.6

Характеристика проволочных металлических сит для грохочения кусковых материалов

Размер нижнего граничного зерна фракций, мм	Размер квадратной ячейки сита, мм	
	горизонтального	наклонного ($\alpha = 20°$)
5	6	6,5
6	7	7,5
9	10	10,5
15	16	16
20	22	22
25	26	28
35	36	38
40	42	45
45	48	50
50	52	55
60	65	68
75	80	85
80	85	90

Таблица 3.7

Значение коэффициента k_1

Содержание фракций нижнего класса, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90
k_1	0,58	0,66	0,76	0,84	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25

Таблица 3.8

Значение коэффициента k_2

Содержание в нижнем классе зёрен, меньших 0,5 размера ячейки сита, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0
k_2	,63	,72	,82	,91	,00	,09	,18	,28	,37

В соответствии с максимальным расчетным значением площади сита выбирают наиболее подходящий грохот. Характеристики инерционных грохотов приведены в прил. 10. Могут быть использованы другие информационные источники.

Если стандартное значение площади принятого грохота оказывается меньше расчетного максимального, то определяется количество грохотов, устанавливаемых параллельно.

Оборудование для тонкого измельчения материалов

В технологиях вяжущих веществ тонкому измельчению - помолу могут подвергаться многие материалы: известняк, мел, мергель, глина, гипсовый камень, дегидратированный гипс, доменный и топливный шлаки, кварцевый песок, цементный клинкер, комовая известь, опока, трепел и др.

В зависимости от свойств измельчаемого материала и требований к конечному продукту в качестве помольных агрегатов применяют мельницы той или иной конструкции: барабанные, кольцевые, валковые, вибрационные, ударного действия, струйные, мельницы самоизмельчения. В технологиях вяжущих веществ наибольшее распространение получили барабанные мельницы, которые в зависимости от соотношения длины барабана (L) к его диаметру (D) подразделяются на шаровые (L/D – не более 2:1) и трубные (L/D находится в пределах от 3:1 до 6:1).

Шаровые и трубные мельницы представляют собой горизонтально расположенные вращающиеся стальные барабаны, в которых измельчение размалываемого материала происходит при движении (пересыпании) мелющих тел совместно с измельчаемым материалом. Барабанные мельницы бывают однокамерные непрерывного или периодического действия и многокамерные – только непрерывного действия. Многокамерные мельницы обеспечивают более тонкий помол материала в силу более длительного нахождения его в рабочем объеме мельницы и в силу ориентации каждой последующей камеры на более тонкий помол. При этом материал, загружаемый с одного конца барабана, последовательно проходит через все камеры и разделяющие их проницаемые для материала перегородки и выгружается с другого торца через

полую цапфу, снабженную ситом, или через периферийное разгрузочное устройство.

В соответствии с принятой общей технологией производства вяжущего вещества помол сырьевых компонентов может осуществляться мокрым или сухим способом.

При мокром способе сырьевые материалы измельчают и смешивают в присутствии воды до образования сметанообразной водной суспензии – шлама. При сухом способе дробления сырьевые материалы частично подсушивают, дозируют в заданном соотношении и подают в мельницу, где они измельчаются до требуемой тонкости. Имеются мельницы, в которых процессы сушки и измельчения совмещены.

Различные конструкции мельниц обеспечивают помол материала (рис.3.2.) в открытом или в замкнутом цикле.

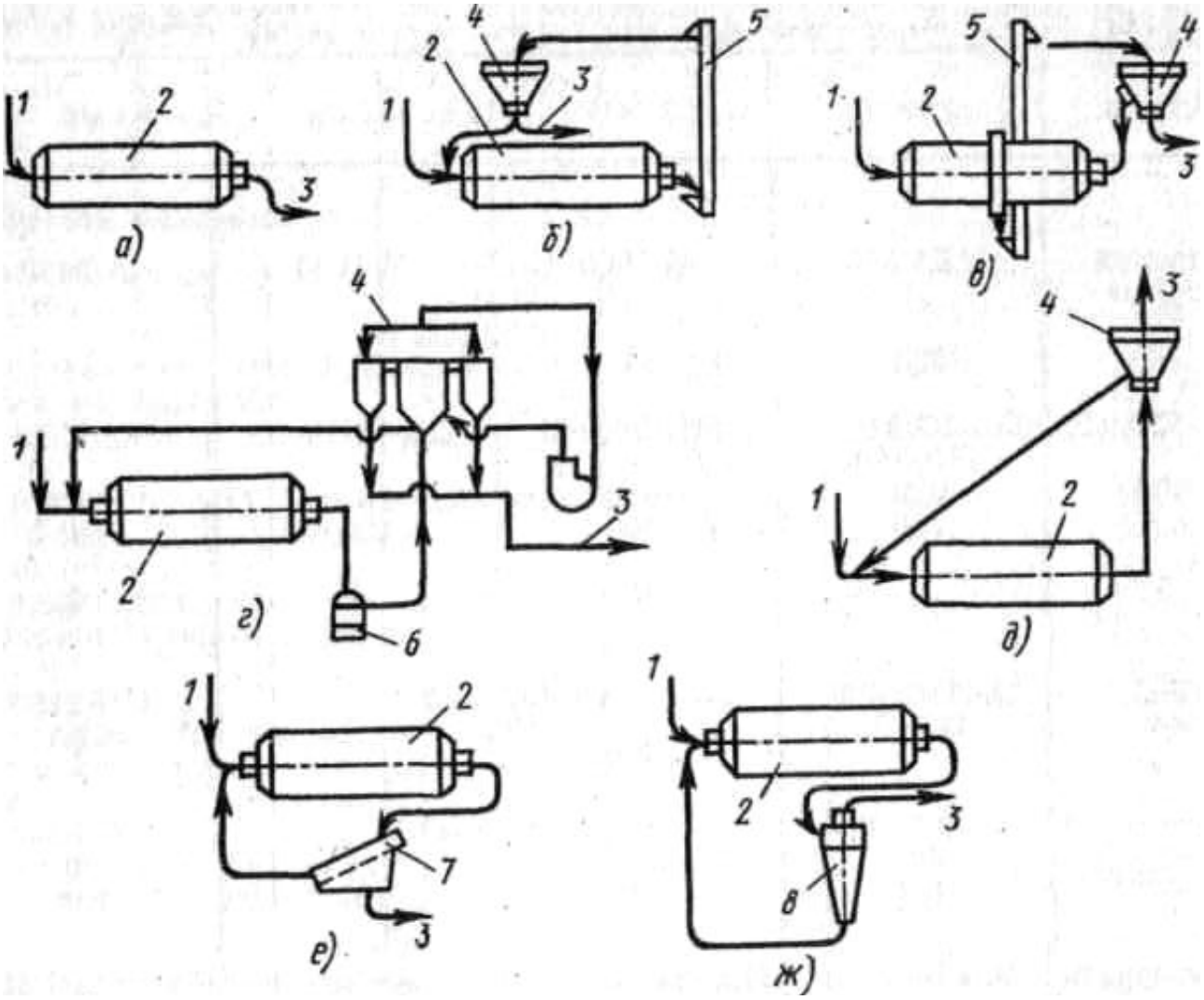


Рис. 3.2. Схемы работы мельниц:
а – по открытому циклу при сухом и мокром помоле; *б…д* – по замкнутому циклу при сухом помоле; *е, ж* – то же при мокром помоле; *1* – подача материала; *2* – мельница; *3* – готовый продукт; *4* – сепаратор; *5* – элеватор; *6* – пневмонасос; *7* – грохот; *8* - гидроциклон

При работе по открытому циклу (схема на рис. 3.2, *а*) весь размалываемый материал 1 при прохождении через мельницу 2 измельчается до заданной конечной тонкости помола и выходит в виде готового продукта 3.

При работе по замкнутому циклу (рис. 3.2, *б…ж*) помол в мельнице производится не до конечной тонкости всего поступающего в неё материала: при сухом помоле (рис. 3.2, *б…д*) весь выходящий из мельницы 2 материал проходит через сепаратор 4, в котором отделяется материал заданной тонкости помола, а оставшаяся часть материала возвращается в мельницу на домол; при мокром помоле (рис. 3.2, *е, ж*) для выделения крупки используют грохот 7 или гидроциклоны 8.

Таким образом, в состав помольной установки кроме мельницы могут входить дозаторы и питатели, сепараторы, циклоны, фильтры, грохоты, гидроциклоны, транспортирующие устройства в виде ленточных конвейеров, элеваторов, аэрожелобов, пневмо-и гидронасосов и др. Комплекс необходимого оборудования обеспечивает единый технологический процесс. Тем не менее, при проектировании начинают с выбора типа и марки мельницы.

Выбор типа (марки) мельницы и конструктивной схемы её установки производится с учетом определения общих технологических характеристик. Определяющими являются вид измельчаемого материала, сухой или мокрый способ производства, требуемая тонкость помола, производительность, размалываемость (размолоспособность) материала.

Размалываемость некоторых материалов в сравнении с размалываемостью цементного клинкера представлена в табл. 3.9.

Таблица 3. 9

Относительные показатели размалываемости материалов

Материал	*Коэффициент размалываемости*
Клинкер вращающихся печей	1,00
Мел	3,70
Глина	3,00…3,50
Мергель	1,4
Известняк	1,2
Гранулированный доменный шлак	0,55…1,10
Кварцевый песок	0,6…0,7
Уголь	0,8…1,6

В промышленности строительных материалов преимущественно применяют барабанные одно-и многокамерные мельницы с загрузкой материала через полую цапфу и выгрузкой материала также через полую цапфу и раз-

грузочную цилиндрическую решетку. Характеристики наиболее ходовых шаровых

и трубных мельниц (комплектующие их сепараторы и грохоты) представлены в прил.11. Более широкий выбор мельниц, укомплектованных дополнительным оборудованием, можно найти в [11].

Выбор конкретной марки мельницы из рекомендуемых информативных источников производится исходя из расчетной производительности мельницы. Затем следует поверочный расчет, учитывающий вид измельчаемого материала, тонкость измельчения (помола). С учетом полученных результатов решается вопрос о количестве принимаемых мельниц.

Производительность (Q, т/ч) мельницы можно определить из следующей эмпирической формулы

$$Q = 6{,}45 \cdot V \cdot \sqrt{D} \cdot (G/V)^{0.6} \cdot q \cdot \kappa, \qquad (3.12)$$

где V – рабочий объем мельницы, м^3;

D– диаметр барабана в свету, м;

G - масса мелющих тел, т;

q - удельная производительность мельницы в зависимости от вида размалываемого материала и вида помола, т/(кВт·ч); её значения можно принять по табл. 3.10;

κ – поправочный коэффициент на тонкость помола (табл.3.11).

Таблица 3.10

Значение удельной производительности q, т/(кВт·ч)

Вид измельчаемого материала	Вид помола	
	мокрый	сухой
Клинкер вращающихся печей	-	0,03…0,04
Шлаки гранулированные	-	0,035…0,04
Мергель	0,07…0,09	0,06…0,07
Песок кварцевый	-	0,03
Сырьевые шихты: - известняк+глина - мел+глина - шлак+известняк	 0,07…0,09 0,15…0,25 -	 0,07…0,08 - 0,04…0,06
Известняк трудноразмалываемый	-	0,05
Трепел	-	0,05…0,06

Таблица 3.11

Значение коэффициента κ

Остаток на сите №008, %						7	0	2	5	0

к	,6	,65	,71	,77	,82	,86	,00	,10	,20	,42

При выполнении расчетов во внимание следует также принять, что производительность мельницы повышается на 15-20 % при её аспирации и работе в замкнутом цикле с сепаратором, на 40 % - с дуговыми грохотами, на 10-15 % - с гидроциклоном при мокром помоле.

На предприятиях, производящих строительный гипс с использованием варочных котлов, для предварительной сушки и относительно тонкого измельчения поступающего гипсового сырья применяются молотковые шахтные мельницы (табл. П.11.5). Их выбор производится с учетом крупности поступающего сырья и заданной производительности с последующей проверкой производительности (Q, т/ч) по формуле

$$Q = 3{,}6 \cdot q \cdot n \cdot Z / K_ц, \qquad (3.13)$$

где q - количество материала, поступающего в шахту за каждый удар,

q =0,015…0,02 кг/удар;

n - частота вращения ротора, $с^{-1}$;

Z - количество молотков на роторе;

$K_ц$ – кратность циркуляции материала, $K_ц$ = 4…5.

Технические характеристики помольного и вспомогательного оборудования, входящего в помольный узел, в дополнение к прил. 11 можно найти в [11,12,13].

При проектировании помольного узла большой мощности целесообразно шаровые мельницы и приводы к ним размещать в смежных помещениях, разделенных пыленепроницаемой перегородкой, что повышает ресурс работы приводов. Кроме того, должны быть предусмотрены мостовые краны или кран-балки, обеспечивающие монтаж, ремонт и текущее обслуживание оборудования. Технические характеристики мостовых кранов можно найти в [12].

Оборудование для сушки материалов

Выбор сушильных установок производится с учетом основных характеристик высушиваемых материалов (физического состояния материала, его крупности, начальной и конечной влажности) и расчетной производительности сушильного агрегата по высушиваемому материалу.

Наиболее широко для сушки всех видов сыпучих материалов применяются сушильные установки барабанного типа прямоточного действия.

Весьма эффективными для сушки легкосыпучих материалов (доменного гранулированного шлака, кварцевого песка и др.) являются вихревые сушилки с кипящим слоем; для сушки пластичных слипающихся пород с высокой влажностью (до 25-30 %) - дробилки-сушилки, в которых совмещаются процессы сушки и дробления материала с исходной крупностью до 750 мм.

Все сушильные установки должны быть укомплектованы дозировочно-питающим оборудованием, пластинчатыми конвейерами для отвода после сушки горячего материала, установками для улавливания пыли.

Технические характеристики сушильных установок и вспомогательного оборудования приведены в [12,13,14], а также в [32. прил.1, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

При выполнении комплексного проекта по трем учебным дисциплинам исполнителю проекта может быть выдано задание на параметрический расчет сушильной установки (это задание относится к дисциплине «Процессы и аппараты в технологии строительных материалов и изделий»). В этом случае расчет сушильной установки со вспомогательными устройствами выполняется по методике, изложенной в [32], где также содержатся технические характеристики оборудования, которое соответственно результатам расчета должен окончательно принять исполнитель проекта.

Оборудование для обжига материалов

В производстве вяжущих веществ процесс обжига является основным технологическим переделом, определяющим свойства получаемого продукта. Различают низкообжиговые вяжущие вещества (строительный гипс α - и β – модификаций) и высокообжиговые (безводный гипс, строительная известь, магнезиальные и доломитовые вяжущие, портландцемент и его разновидности). Для их производства применяют соответствующее обжиговое оборудование.

При производстве строительного гипса в зависимости от общей технологии обжиг (термическая обработка) гипсового сырья может производиться в гипсоварочных котлах периодического или непрерывного действия, во вращающихся обжиговых агрегатах; при производстве высокопрочного гипса – в запарниках и автоклавах. Во всех этих вариантах после термической обработки предусматривается тонкое измельчение полученного продукта.

Гипсоварочные котлы периодического действия наиболее широко применяются для термической обработки гипсового сырья, которое предварительно измельчается в шахтных мельницах до размеров частиц менее 2 мм.Термическая обработка в гипсоварочных котлах длится от 2,5 до 3,5 ч в зависимости от степени предварительной сушки в шахтных мельницах. Характеристики гипсоварочных котлов периодического действия отечественного производства представлены в прил. 12.

При производстве строительного гипса во вращающихся агрегатах с целью улучшения качества получаемого продукта сырьевой материал дробится и сортируется на фракции 10…20 и 25….35 мм. В качестве вращающихся агрегатов используют сушильные барабаны производительностью

5…15 т/ч, имеющие длину от 8 до 30 м, диаметр от 1,6 до 3 м. Технические характеристики сушильных барабанов уже рассмотрены в п.3.7.5.

Выходящий из сушильного барабана гипс подвергается помолу в шаровой мельнице, работающей, как правило, по открытому циклу.

Для производства извести, магнезиальных и доломитовых вяжущих используют шахтные и вращающиеся печи, печи с кипящим слоем. Выбор типа

печи зависит от механической прочности, влажности, химического состава сырья, принятого способа производства – сухого или мокрого.

Сухой способ наиболее распространен. Он применяется для производства извести, магнезиальных и доломитовых вяжущих из сырья, имеющего карьерную влажность до 25 %. Для обжига применяются печи шахтные, вращающиеся и кипящего слоя.

Шахтные печи применяются для обжига известняков и других материалов средней и высокой прочности с предварительным их дроблением и разделением на фракции 40…80, 80…120, 120…180 мм.

Вращающиеся печи применяют как для плотного и прочного сырья, так и для мягкого. Соответственно они могут работать по сухому и мокрому способам обжига. Конструктивно они делятся на длинные и короткие.

При плотном сырье, имеющем влажность до 8 %, применяется сухой способ с раздельным обжигом фракций 5…20 и 20…40 мм в коротких печах, а при влажности до 25 % - в длинных печах.

При влажном мажущемся мягком меле с карьерной влажностью более 25% применяется мокрый способ производства с обжигом сырья в виде шлама с влажностью 37…44 % в длинных вращающихся печах.

Характеристики шахтных и вращающихся печей, печей кипящего слоя приведены в [32, прил. 12, 15, 17].

Печи кипящего слоя выбирают, если материалом для получения извести является мелкораздробленное фракционированное сырье с фракциями 3…12 и 12…25 мм, имеющее влажность 2…4 %. Выбор необходимой печи кипящего слоя осуществляется по производительности (табл. П.12.5).

При выборе обжиговых печей следует учитывать интенсивное пылевыделение, связанное с их работой. Это требует обязательного укомплектования обжиговых узлов пылеулавливающим оборудованием: пылеосадительными камерами, циклонами, фильтрами. Ориентировочная эффективность их работы представлена в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Типы пылеуловителей и область их применения

Пылеуловители	Степень улавливания, %	Область применения

Пылеосадительные камеры	3…15	Вращающиеся печи мокрого способа производства, сушильные барабаны, мельницы сухого помола
Циклоны	80…90	Мельницы сухого помола, сушильные барабаны, вращающиеся печи сухого способа, колосниковые холодильники, дробилки, конвейеры

Окончание табл. 3.12

Пылеуловители	Степень улавливания, %	Область применения
Рукавные фильтры: с рукавами из натуральных и синтетических волокон с рукавами из стекловолокна	 97…99,9 97…99,9	 Вращающиеся печи, мельницы, колосниковые холодильники Мельницы, силосы, коррекционные бассейны
Электрофильтры	85…99	Вращающиеся и шахтные печи, мельницы сухого помола, сушильные барабаны

На заводах по производству вяжущих материалов для эффективной очистки отходящих газов и воздуха от пыли применяется, как правило, двухступенчатая система обеспыливания (например, циклон-фильтр и т.п.).

Концентрации пыли, выделяемой каждым видом оборудования, рекомендуемые системы очистки приведены в [32, прил. 17].

Оборудование для непрерывного транспортирования материалов

Машины непрерывного транспортирования весьма разнообразны как по конструкции, так и по принципу действия. Для достижения полной комплексной механизации технологического процесса необходимо выбирать надежные и экономичные машины, в наибольшей степени отвечающие свойствам транспортируемого материала и условиям работы основного технологического оборудования. Нельзя не учитывать также требования техники безопасности, гигиены труда и экологии. Рекомендации по выбору оборудования, учитывающие эти и другие факторы, представлены в табл.3.13. Характеристики материалов, используемые при выборе транспортирующих машин, представлены в табл. 3.14.

Ленточные конвейеры наиболее широко применяются для непрерывного транспортирования как насыпных, так и штучных грузов. Основным элементом конвейера является транспортерная лента, ширина которой проектируется в соответствии с расчетной производительностью данного участка

технологического процесса и видом транспортируемого материала. При этом может использоваться следующая расчетная формула

$$B = 1000 \cdot \sqrt{F/(0{,}14 \cdot tg\varphi_1 + 0{,}039)}\,, \qquad (3.14)$$

где B – ширина ленты, мм;

φ_1 - угол насыпки материала на ленте, зависящий от угла естественного откоса φ_0 (табл. 3.16); можно принять φ_1 =0,35φ_0;

F – площадь поперечного сечения материала на ленте, м^2; определяется по формуле

$$F = Q/(3600 \cdot v \cdot c)\,, \qquad (3.15)$$

где Q – расчетная производительность, м^3/ч;

v - скорость движения ленты, м/с, зависящая от вида транспортируемого материала и ширины ленты (табл. 3.15);

c - коэффициент, принимаемый по табл. 3.17 в зависимости от угла наклона конвейера α_2 (его значение приведено в табл. 3.16).

По полученному в результате расчета значению принимается стандартная ширина ленты из ряда: 400, 500, 650, 1000, 1200, 1400, 1600, 2000 мм. При этом должно соблюдаться соответствие

$$B > 3{,}3d_{max}+200,$$

где d_{max} – максимальный размер куска транспортируемого материала, мм.

Диаметры (D, мм) головного (приводного) и хвостового барабанов конвейера определяются в зависимости от жесткости ленты, которую оценивают по количеству слоев (прокладок) в ленте:

для приводного барабана $D_{пр}$ = $(125 \div 150)^{\cdot}$ i;

для хвостового барабана $D_{хв}$ = $(75 \div 100)^{\cdot}$ i,

где i – количество прокладок в ленте (табл. 3.18).

По полученному значению D принимают стандартное значение диаметра барабана из ряда: 320, 400,500, 630, 1000, 1250, 1600 мм.

Длина барабана:

$$L_б = B + (100 \div 150), \qquad (3.16)$$

где B – стандартная ширина лента, мм.

Мощность привода (N, кВт) ленточного конвейера определяется по формуле

$$N = G_ь \cdot v/102 \cdot \eta \cdot (\sin\alpha_2 + \omega \cdot \cos\alpha_2 + 2 \cdot k \cdot \omega \cdot \cos\alpha_2)\,, \qquad (3.17)$$

где v – скорость движения ленты, м/с;

η - к.п.д. привода, можно принять η=0,9…095;

α_2 - угол наклона конвейера, град.;

k – коэффициент пропорциональности (табл. 3.19);

ω - коэффициент сопротивления (табл. 3.20);

$G_м$ – масса материала на ленте, кг; определяется как

$$G_м = F \cdot L \cdot \gamma,$$

где F – площадь поперечного сечения материала на ленте,

L – длина конвейера по осям, м;

γ - насыпная плотность материала, кг/м^3.

Таблица 3.13

Рекомендации по выбору транспортирующих машин

Виды машин	Оценка машин по характерным факторам													
	Производительность машины, $м^3/ч$				Свойства транспортируемых грузов						Оптимальная длина транспортирования без перегрузки, м			
					липкие, влажные	горячие при $t,^0C$			пылевидные	высокоабразивные				
	до 50	до 100	до 500	> 500		до 60	до 150	> 150			до 50	до 100	до 500	до 1000
Ленточные конвейеры с прорезиненной лентой	+	+	+	+	x	+	-	-	x	+	+	+	+	+
Пластинчатые конвейеры с металлическим настилом	+	+	+	+	x	+	+	+	x	x	+	+	+	+
Конвейеры с погружными скребками	+	+	-	-	-	+	+	+	+	x	+	-	-	-
Скребковые конвейеры общего назначения	+	+	-	-	x	+	+	+	x	x	+	+	-	-
Ковшевые конвейеры	+	+	x	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-
Инерционные конвейеры	+	+	-	-	-	+	+	+	+	x	+	+	-	-
Вибрационные конвейеры	+	+	x	-	-	+	+	+	+	+	+			
Винтовые конвейеры	+	-	-	-	-	+	+	+	+	x	+	-	-	-
Элеваторы ковшевые:														
ленточные	+	x	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-
цепные	+	x	-	-	-	+	+	+	+	x	+	-	-	-
Пневмотранспорт	+	+	-	-	-	+	+	-	+	x	+	+	+	x
Полочные конвейеры	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Подвесные конвейеры	+	+	-	-	-	+	+	+	+			+	+	+
Тележечные конвейеры	+	-	-	-	-	+	+	+				+	x	

Условные обозначения: «+» - наиболее подходящая машина; «-» - машину применять нельзя; «x» - возможно применение машины, но работа её малоэффективна.

Таблица 3.14

Характеристики транспортируемых материалов

Транспортируемый материал	Насыпная плотность материала, кг/м^3	Угол естественного откоса, φ_0		Абразивные свойства
		в покое	в движении	
Гравий	1500-1900	45	30	Абразивен
Щебень	1500-1800	45	35	Абразивен
Песок	1500-1700	45	30	Абразивен
Шлак гранулиров.	650-1000	50	35	Абразивен
Гипсовые вяжущие	650-850	30	-	Слабоабраз.
Гипсовый камень	1400-1600	40	35	Абразивен
Известняковый камень	1200-1600	35	30	Абразивен
Известь комовая	1000-1100	40	-	-
Кусковой мел	1400-1650	40	-	Слабоабраз.
Мел молотый	950-1200	33	-	Неабразивен
Цементный клинкер	1500-1600	33	-	Абразивен
Глина мокрая	1900-2000	20-25	45	Липкая
Глина сухая мелкокусковая	700-1500	50	40	Абразивен
Зола влажная	450-900	55	45	Абразивен
Мергель	1250-2200	45	30	Абразивен
Мрамор (крошка)	1500-1700	-	-	Абразивен
Трепел комовый	500-800	-	-	-
Туф	900-1300	-	-	-
Цемент	1000-1800	-	-	Абразивен

Таблица 3.15

Значения скорости ленты *v*, м/с

Материал	Ширина ленты, мм							
	400	500	650	800	1000	1200	1600	2000
Песок	1,0-1,6	1,25-1,75	1,25-2,0	1,6-2,5	1,6-2,5	1,6-2,5	2,5	2,5
Гравий	1,5	1,75	2,0	2,25	3	3	3	3
Щебень, клинкер, шлак	1,25	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Крупнокусковой камень	-	-	1,75	2	2	2	2	2

Таблица 3.16

Допустимые значения угла наклона ленточных конвейеров

Материал	α_2	Материал	α_2
Песок сухой	15	Шлак	23
Песок влажный	27	Керамзит	15
Глина сухая	18	Клинкер	20
Щебень	20-23	Гравий	15-20

Таблица 3.17

Значения коэффициента *C*

Угол наклона конвейера, град	10	11-15	16-18	18
Значение С	1,0	0,95	0,90	0,85

Таблица 3.18

Количество прокладок в ленте

Ширина ленты, мм	400	500	650	800	1000	1200	1400	1800	2000
Число прокладок	3-5	3-5	3-7	3-8	4-10	5-12	6-12	6-12	8-14

Площадь поперечного сечения потока материала (рис. 3.3) может быть определена по формуле

$$F = (B - 0{,}1)^2 \cdot (tg\varphi_p + tg\varphi_0)/4,$$

где *B* – ширина ленты, м;

φ_p - угол наклона несущих роликов, град;

φ_0 - угол естественного откоса материала в движении, град.

Таблица 3.19

Значения коэффициента пропорциональности

Ширина ленты, мм	Коэффициент k при насыпной плотности, кг/м^3 и форме ленты					
	1000		1250		1500	
	плоская	желоб-чатый	плоская	желоб-чатый	плоская	желоб-чатый
500	0,42	0,23	0,33	0,18	0,28	0,18
650	0,35	0,18	0,28	0,15	0,23	0,13
800	0,31	0,16	0,26	0,13	0.20	0,11
1000	0,29	0,15	0,23	0,12	0,19	0,10

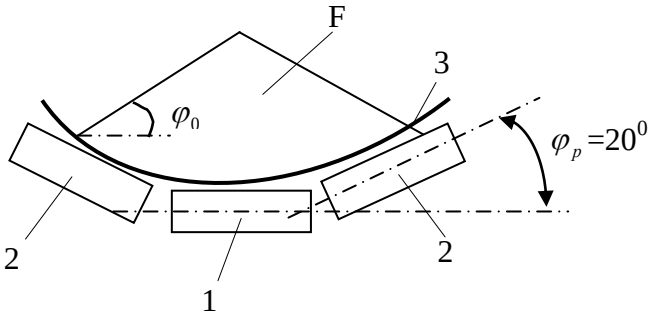


Рис 3.3. Поперечное сечение (F) потока материала на ленте:
1 – несущий горизонтальный ролик; 2 – несущие наклонные ролики; 3 – прорезиненная лента; φ_0 - угол естественного откоса материала в движении; φ_p - угол наклона несущих роликов, град

Таблица 3.20

Значения коэффициента сопротивления ω

Длина конвейера, м	ω	Длина конвейера, м	ω
10	0,30	60	0,15
20	0,25	70	0,13
30	0,22	80	0,12
40	0,19	90	0,11
50	0,17	100	0,10

В соответствии с полученными расчетными характеристиками ленточного конвейера по справочным источникам выбирается тип стационарного конвейера с приводом.
Если технологическим процессом предусматривается размещение ленточного конвейера в закрытой галерее, то размер галереи можно принять по табл. 3.21.

Таблица 3.21

Размеры галерей для одного конвейера без барабанного разгружателя

Ширина ленты, мм	400	500	650	800	1000	1200	1400	1600	2000
Ширина галереи в свету, мм	2300	2300	2800	2800	2800	3300	3300	3800	3800
Высота галереи в свету, мм	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Ширина рамы конвейера, мм	660	780	910	1150	1350	1810	1810	2010	2450

Пластинчатые конвейеры применяются для транспортирования крупнокусковых, остроугольных и абразивных материалов, имеющих повышенную температуру после их сушки или обжига. Они могут устанавливаться горизонтально или наклонно под углом до 35^0. Выбор конвейера производится по расчетной производительности (табл.3.12) с последующим поверочным расчетом по формуле

$$Q = 3600 \cdot \nu \cdot W \cdot \gamma, \qquad (3.18)$$

где Q - производительность, т/ч;

ν - скорость движения полотна, м/с;

W – расчетная вместимость 1 погонного метра полотна, $м^3$/м (табл. 3.22);

γ - насыпная плотность материала, т/$м^3$.

Таблица 3.22

Технические характеристики пластинчатых конвейеров

Характеристики	Ширина ленты, мм							
	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Скорость ленты, м/с	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175	0,175
Производительность, $м^3$/ч	18,90	23,63	28,35	33,17	37,80	42,52	48,83	51,97
Расчетная вместимость полотна, $м^3$/м	0,03	0,038	0,045	0,053	0,06	0,068	0,075	0,083
Наибольший размер кусков транспортируемого материала, мм	100	150	225	250	300	350	400	500
Высота бортов, мм	150	150	300	400	400	400	400	400

Винтовые конвейеры предназначены для транспортирования мелких и среднекусковых сыпучих материалов на сравнительно небольшие расстояния; устанавливается горизонтально и наклонно до 30^0. Выбор и расчет этих конвейеров производится в следующей последовательности.

Соответственно расчетной производительности и виду транспортируемого материала (табл. 3.23) определяют диаметр винта (D, м) по формуле

$$D = \sqrt{Q/(\pi \cdot \varphi \cdot \gamma \cdot S \cdot C \cdot n)}\,, \qquad (3.19)$$

где Q – расчетная производительность, м^3/ч;

φ - коэффициент заполнения сечения желоба (табл. 3.23);

γ - насыпная плотность материала, кг/м^3;

C- коэффициент уменьшения сечения груза на наклонном конвейере (табл. 3.24);

n - частота вращения винта, мин$^{-1}$ (табл. 3.23);

S -шаг винта, м; для горизонтального конвейера $S = D$, для наклонного, а также горизонтального, предназначенного для транспортирования материалов малой сыпучести (например, влажный песок) $S = 0{,}8D$.

При $S = D$ расчетная формула (3.19) принимает вид:

$$D = 0{,}683\sqrt[3]{Q/(\varphi \cdot \gamma \cdot C \cdot n)}\,;$$

при $S = 0{,}8$D: $$D = 0{,}736\sqrt[3]{Q/(\varphi \cdot \gamma \cdot C \cdot n)}\,.$$

Таблица 3.23

Значения расчетных характеристик φ, ω, n
для различных насыпных материалов

Характеристики насыпных материалов	*Вид насыпного материала*	*Значения*		
		φ	ω	n
Легкие, неабразивные	Известняковая мука, графит, древесные опилки	0,4	1,2	190-100
Легкие, малоабразивные	Гипс, мел, асбест	0,32	1,6	150-80
Тяжелые, малоабразивные	Глина сухая	0,25	2,5	100-50
Тяжелые, абразивные	Цемент, зола, песок, глина сырая, шлак	0,125	4,0	70-30

Таблица 3.24

Значение коэффициента С в зависимости
от угла наклона винтового конвейера β

β	0^0	5^0	10^0	15^0	20^0
C	1,0	0,90	0,8	0,7	0,6

Мощность привода винтового конвейера (N, кВт) определяется по формуле

$$N = Q \cdot L \cdot (\omega + \sin\alpha)/(367 \cdot \eta), \qquad (3.20)$$

где Q - производительность, т/ч;

L – длина конвейера по осям загрузочного и разгрузочного патрубка, м;

ω- коэффициент сопротивления (табл. 3.23).

Ковшовые элеваторы применяются для вертикального транспортирования сыпучих пылевидных, мелко-и среднекусковых материалов. Возможна также транспортировка под углом 60 - 70^0 наклона элеватора к горизонту.

Выбор типа элеватора производится в зависимости от вида транспортируемого материала (табл. 3.25).

При выборе конкретного типоразмера элеватора можно воспользоваться данными, приведенными в прил. 13.

Производительность элеватора (Q, м^3/ч) проверяется по формуле:

$$Q = 3{,}6 \cdot v \cdot q_к \cdot к_н / a, \qquad (3.21)$$

где v - скорость движения ковша, м/с;

a - расстояние между ковшами, м;

$q_к$ - вместимость ковша, л;

$к_н$- коэффициент заполнения ковшей (табл. 3.25).

Таблица 3.25

Рекомендуемые типы элеваторов в зависимости
от транспортируемого материала

Транспортируемый материал	Тип элеватора	Тип ковшей	Скорость движения, м/с		Коэффициент заполнения ковшей
			ленты	цепи	
Цемент, гипс, порошковая известь, сухой мел	Быстроходный с центробежно-самотечной	Глубокие	1,25-1,80	-	0,75

	отгрузкой				

Окончание табл. 3.25

Транспортируемый материал	Тип элеватора	Тип ковшей	Скорость движения, м/с		Коэффициент заполнения ковшей
			ленты	*цепи*	
Песок, зола (сухие)	Быстроходный с центробежно-самотечной отгрузкой	Глубокие	1,60-1,80	-	0,7-0,8
Гравий крупностью до 60 мм	Тихоходный с самотечно направленной отгрузкой	С бортовыми направляющими	0,8-1,0	0,8-1,0	0,7-0,85
Щебень, шлаки крупностью до 60 мм	Тихоходный с самотечно направленной отгрузкой	С бортовыми направляющими	-	0,5-0,8	0,6-0,8
Песок, порошковый мел (влажные)	Быстроходный с центробежно-самотечной отгрузкой	Мелкие	1,25-1,60	1,25-1,6	0,4-0,6

Пневмотранспортные желоба (аэрожелоба) предназначены для транспортировки порошкообразных материалов. Надежная работа пневможелоба обеспечивается при его уклоне не менее чем на 3-4^0. Технические характеристики пневможелобов представлены в табл. 3.26.

Таблица 3.26

Технические характеристики пневможелобов

Ширина желоба, мм	Высота слоя материала в желобе, мм	Длина желоба, м	Производительность,м^3/ч	Количество вентиляторов
125	50	До 150	20	1
250	50	До 150	40	1
400	60	До 80	30	1
400	60	Свыше 80	80	2
500	60	До 60	120	1

500	60	Свыше 60	120	2

Расчет производительности пневможелоба (Q, т/ч) производится по формуле

$$Q = 3240 \cdot F \cdot v \cdot \gamma, \qquad (3.22)$$

где F – площадь поперечного сечения слоя материала, м^2;

γ - насыпная плотность материала, кг/м^3;

v - скорость движения слоя материала, м/с, определяется по формуле

$$v = k_1 \sqrt{R \cdot i},$$

где i – уклон желоба (i=0,03…0,05);

k_1- коэффициент (k_1=21,1…26,5);

R- гидравлический радиус потока материала, м, определяется по формуле

$$R = B \cdot h_1 / (2B + 2h_1),$$

B – ширина желоба, м;

h- высота слоя материала в желобе, м.

Пневмотранспорт широко применяется для транспортирования сыпучих материалов. В пневмотранспортных установках транспорт материала обеспечивается или пневмокамерными или пневмовинтовыми насосами. В строительных технологиях широко используются пневмовинтовые насосы.

Выбор пневмовинтового насоса производится по показателям производительности, высоты и дальности подачи (табл. 3.27).

Таблица 3.27

Технические характеристики пневмовинтовых насосов

Характеристики	Численные значения для марок				
	НПВ-36-2	НПВ-36-4	НПВ-63-2	НПВ-63-4	НПВ-110-2
Производительность, т/ч	36	36	63	63	110
Приведенная дальность подачи, м,	230	430	230	430	230
в том числе по вертикали	30	30	30	30	30
Рабочее давление в смесительной камере, кПа	2	3	2	3	2
Диаметр транспортного цементовода, мм	140	175	175	175	250
Расход сжатого воздуха, м^3/мин.	18	25	22	41	38
Установившаяся мощность привода, кВт	30	75	55	132	110
Масса, кг	980	2700	2500	3150	2900

Поверочный расчет параметров пневмотранспортной установки производится с учетом требуемой производительности установки и дальности транспортирования материала.

Расчету подлежат следующие характеристики:

- приведенная длина транспортного трубопровода;
- концентрация материала в смеси с воздухом;
- рабочая емкость воздуха в трубе;
- расход воздуха на транспортирование материала;
- внутренний диаметр транспортного трубопровода.

Приведенная длина трубопровода ($L_{пр}$, м) рассчитывается как

$$L = \sum L_г + \sum L_d + \sum L_{эк} + \sum L_{эп}, \qquad (3.23)$$

где $\sum L_г$ - сумма длин горизонтальных участков, м;

$\sum L_в$ - сумма длин вертикальных участков, м;

$\sum L_{эк}$-сумма условных длин, эквивалентных по гидравлическому сопротивлению количеству колен на трубопроводе, принимается по табл. 3.28;

$\sum L_{эп}$-сумма условных длин, эквивалентных количеству переключателей на трубопроводе; для одного двухходового переключателя $L_п$=8 м.

Таблица 3.28

Значение $L_{эк}$

Вид транспортируемого материала	Значение $L_{эк}$, м, при отношении радиуса колена к диаметру трубы			
	4	6	10	20
Пылевидный	4-8	5-10	8-10	8-10
Зерновой однородный	-	8-10	12-18	16-20
Среднекусковый	-	-	28-35	38-45

Концентрация материала в смеси с воздухом и рекомендуемые для них скорости воздушного потока представлены в табл. 3.29.

Таблица 3.29

Массовые концентрации материала
и рабочие скорости воздушного потока

Транспортируемый материал	Массовая концентрация, кг/кг	Рабочие скорости Воздушного потока, м/с
Цемент и другие вяжущие	20-100	18-25
Угольная пыль	20-100	9-25

Песок и подобные ему материалы	3-20	30-40

Расход воздуха ($G_в$, м^3/с) определяется по формуле

$$G_в = Q/(6{,}6 \cdot \rho_в \cdot \mu), \qquad (3.24)$$

где Q – расчетная производительность установки, т/ч;

$\rho_в$ - плотность воздуха при атмосферном давлении и рабочей температуре 20^0С, $\rho_в$=1,2 кг/м^3;

μ - массовая концентрация материала в воздухе, кг/кг.

Внутренний диаметр трубопровода (d_m, мм) определяется по формуле

$$d_m = 1000\sqrt{4 \cdot G_в/(\pi \cdot v_p)}, \qquad (3.25)$$

где v_p- рабочая скорость потока, м/с.

По полученному расчетному значению принимается стальная бесшовная труба (табл. 3.30).

Таблица 3.30

Трубы стальные бесшовные

Диаметр наружный, мм	Толщина стенки, мм	Диаметр наружный, мм	Толщина стенки, мм
89; 95; 102 108; 114;121;127;133 140;146;152;159 168; 180; 194	3,5 4,0 4,5 5,0	203; 219 245;273 299;325 351	6,0 6,5 7,5 8,0

Выбор и расчет оборудования для дозирования материалов

Правильный выбор дозировочного оборудования обеспечивает оптимальный режим работы основного технологического оборудования (сушилок, печей, мельниц, смесителей и др.).

На заводах вяжущих материалов подача и дозирование производятся или по объему, или по массе.

Для наиболее распространенного объемного дозирования применяются пластинчатые, ленточные, тарельчатые, шнековые, лопастные и другие типы питателей.

Пластинчатые питатели предназначены для подачи из бункеров в дробильные машины крупнокусковых материалов с размерами от 200 до 1200 мм. Они изготовляются с шириной полотна 800-2000 мм, длиной до 28 м и могут устанавливаться с наклоном до 15^0. Производительность пластинчатых питателей составляет от 90 до 1500 м^3/ч (прил. 9).

Ленточные питатели предназначены для непрерывной подачи сыпучих материалов из бункеров в машины или на транспортерные ленты конвейеров. Их характеристики представлены в табл. 3.31.

Таблица 3.31

Технические характеристики ленточных питателей

Характеристики	Численные значения по маркам				
	ПЛ-1	ПЛ-2	ПЛ-4	ПЛ-5	ПЛ-6
Ширина ленты, мм	400	400	400	400	400
Скорость движения ленты, м/с	0,018-0,262	0,018-0,262	0,018-0,262	0,018-0,262	0,018-0,262
Максимальная крупность питания, мм	50	50	50	50	50
Габаритные размеры, мм					
длина	1485	1920	2320	3320	3820
ширина	788	788	788	788	788
высота	920	920	920	920	920
Масса, кг	405	458	525	557	589

Максимальная производительность ленточных питателей (Q, т/ч) определяется по формуле

$$Q = 3600 \cdot b \cdot h \cdot v \cdot f \cdot \gamma, \qquad (3.26)$$

где b – расстояние между бортами, м, можно принять b=0,9B (где B – ширина ленты);

h - высота бортов, м; обычно h=(0,4…0,5)B;

v- скорость ленты, м/с;

f- коэффициент наполнения желоба, f=0,7…0,8;

γ - насыпная плотность материала, т/м^3.

Тарельчатые питатели предназначены для непрерывной подачи насыпных материалов крупностью до 50 мм в сушильные барабаны, шаровые мельницы. Устанавливаются под бункерами или силосами. Выбираются по производительности. Характеристики представлены в табл. 3.32.

Ячейковые (лопастные) питатели применяются для подачи и объемного дозирования сыпучих материалов (сухой сырьевой муки), удаления пыли из бункеров, рукавных или электрических фильтров. Их характеристики приведены в табл. 3.33.

Весовые дозаторы применяют для непрерывного дозирования сыпучих материалов (песка, гипса, клинкера, добавок и т.п.). Обычно применяют ленточные весовые дозаторы с автоматическим управлением (табл. 3.34).

Таблица 3.32

Технические характеристики тарельчатых питателей

Характеристики	Марки питателей								
	СМ-86А	СМ-179А	4131	ДЛ-12А	ДЛ-16А	ДЛ-20А	Д-100	Д-160	Д-200
Диаметр тарелки, м	0,5	0,75	1,0	1,3	1,6	2,0	1,0	1,6	2,0
Частота вращения тарелки, мин$^{-1}$	4,2	4,2	7,2	4,8	4,2	4,2	6,6	6,6	6,6
Производительность, м^3/ч	1,5	3,0	10,0	15,0	28,0	35,0	10,0	25,0	35,0
Мощность электродвигателя, кВт	0,6	0,6	1,0	1,7	2,8	4,5	1,7	2,8	7,0
Габаритные размеры, м:									
длина	1,06	1,13	1,30	--	2,80	2,20	1,59	2,24	2,50
ширина	0,52	0,77	1,27	1,34	1,80	2,30	1,0	1,60	2,00
высота	0,73	0,97	1,03	1,38	1,80	1,78	0,62	0,70	0,79
Масса, т	0,21	0,24	0,45		2,56	3,20	0,80	1,28	0,75

Таблица 3.33

Технические характеристики лопастных питателей

Характеристики	Размеры питателя, мм				
	200x200	300x300	400x400	500x800	500x800

Производительность, $м^3/ч$	5	16	32	90	15
Частота вращения лопастей, $мин^{-1}$	25	25	25	15,3	23,6
Мощность электродвигателя, кВт	1,0	1,0	2,8	7,0	7,0
Общая масса питателя, т	0,29	0,44	0,6	1,6	1,6

Таблица 3.34

Технические характеристики автоматических весовых дозаторов типа ЛДА

Характеристики	ЛДА-12Н	ЛДА-32Н	ЛДА-26Н	ЛДА-60Н	ЛДА-100Н
Ширина ленты, мм	500	500	800	800	1000
Скорость движения ленты, м/с	0,17	0,17	0,35	0,35	0,35
Производительность, $м^3/ч$	1,5	8	25	40	100
Габаритные размеры с вибропитателем, мм:					
длина	4500	4500	4500	4500	4500
ширина	1135	1135	1435	1435	1635
высота	1290	1290	1350	1350	1425
Масса, кг:					
дозатора	560	560	600	600	600
вибропитателя	690	690	640	640	1300
Мощность привода, кВт	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0

Выбор и расчет расходных бункеров

Форма бункера может быть различной. В разрабатываемом проекте рекомендуется применять бункеры пирамидальной формы. Геометрический объем такого бункера составляет

$$V = A \cdot B \cdot H_2 + 1/3 \cdot H_1 \cdot (AB + ab + \sqrt{A \cdot B \cdot a \cdot b}),$$

где H_2 – высота призматической части бункера, м;

H_1 – высота пирамидальной части бункера, м;

A, B – размеры в плане призматической части бункера, м;

a, b - размеры выпускного отверстия, м.

Угол наклона стенок пирамидальной части бункера принимается в пределах $50\text{-}55^0$.

Объем расходного бункера перед технологическим оборудованием принимают из расчета обеспечения запаса материала на 2 - 3 часа работы этого оборудования. Считается, что такой запас исключает остановку работы основного оборудования из-за возможных непредвиденных остановок транспортирующего оборудования.

Расчет пирамидального бункера ведется в следующей последовательности:

1. Конструктивно назначают размеры верхнего основания бункера (*A* и *B*).

2. Определяют размеры нижнего отверстия (*a* и *b*). Наименьшие размеры этих параметров, мм, определяются по формуле

$$a(b) = \kappa \cdot (d_{\max} + 80) \cdot tg\varphi,$$

где κ = 2,6 – для сортированного материала; κ = 2,4 – для рядового материала;

d_{max} – максимальный размер кусков, мм;

φ - угол естественного откоса материала в состоянии покоя (табл.3.35).

Минимальные размеры выпускных отверстий бункера составляют:

для песка сухого - 150 х 150 мм;
для песка влажного - 450 х 450 мм;
для цемента - 225 х 225 мм;
для дробленных материалов крупностью
до 60 мм - 300 х 300 мм;
до 100 мм - 450 х 450 мм;
до 150 мм - 650 х 650 мм.

3. Определяют углы наклона к горизонту (град) стенок бункера как

$$\alpha = \varphi + (5...10^0),$$

где φ - угол естественного откоса для материала в состоянии покоя (табл. 3.35).

4. Определяют высоту пирамидальной части бункера; для бункера квадратного сечения

$$H_1 = \frac{A-a}{2} \cdot tg\varphi.$$

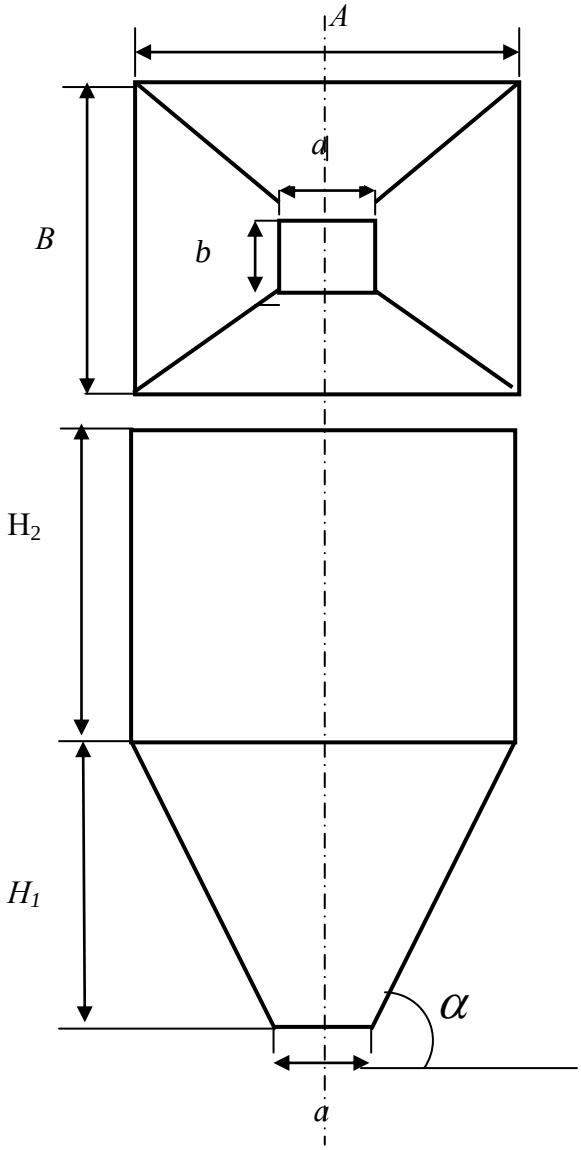


Рис.3.4. Схема пирамидального бункера

5. Исходя из общего объема запаса материала в бункере и вычисленного объема пирамидальной части, определяют высоту призматической части бункера

$$H_2 = \frac{V - 1/3 \cdot H_1 \cdot (A \cdot B + a \cdot b + \sqrt{A \cdot B \cdot a \cdot b})}{A \cdot B}.$$

6. Общая высота бункера (H) составляет

$$H = H_1 + H_2.$$

Таблица 3.35

Углы естественного откоса, φ, некоторых материалов в состоянии покоя

Материал	φ
Гипс мелкокусковой	40^0
Глина сухая мелкокусковая	50^0
Гравий	$30…45^0$
Зола сухая	$40…50^0$
Известняк мелкокусковой	$40…45^0$
Песок сухой	$30…35^0$
Шлак	$35…50^0$
Цемент	40^0
Щебень сухой	$33...35^0$

Выбор грузоподъемного оборудования

На предприятиях, изготовляющих разнообразные строительные материалы, в том числе вяжущие, применяют весьма габаритное и тяжелое технологическое оборудование, для монтажа, обслуживания и ремонта которого обязательно применение разнообразных грузоподъемных средств. В ряде случаев, например при проведении складских операций, грузоподъемные устройства выполняют технологические операции.

Наиболее широко применяются мостовые краны, которыми укомплектовываются дробильно-сортировочные, помольные, сушильные, обжиговые цеха заводов, а также склады материалов и полуфабрикатов.

Выбор мостового крана производится по грузоподъемности крана и ширине пролета цеха.

Для дробильно-сортировочных цехов при выборе необходимого крана необходимо учитывать не только общую массу дробилки, но и массу отдельных узлов (табл. 3.36), так как наиболее мощные дробилки поставляются заводами-изготовителями не в собранном виде, а по узлам.

Выбор мостовых кранов для сушильных и помольных цехов производится по массе наиболее тяжелых и габаритных узлов. Ориентировочно можно принимать в сушильных отделениях грузоподъемность мостовых кранов 15 т, в помольных - до 30 т. При этом следует учитывать, что привод шаровых мельниц, состоящий из электродвигателя и редуктора, располагается за стеной в соседнем пролете, и для их монтажа и обслуживания принимаются собственные мостовые краны с грузоподъемностью до 30...35 т.

Таблица 3.36

Рекомендуемые грузоподъемности кранов
для монтажа щековых и конусных дробилок

Характеристики дробилок			Грузоподъемность крана, т
Тип оборудования	Общая масса, т	Масса наиболее тяжелой сменной детали, т	
Дробилки щековые			
600 х900 мм	21,37	5,1	10
900 х 1200 мм	72,9	13,47	15
1200 х 150 мм	140,5	24,5	30
1500 х 2100 мм	255,6	35,8	50
Дробилки конусные крупного дробления - ККД			
ККД-500/75	38,54	7,743	10
ККД-900/1600	134,58	25,7	30
ККД-1200/150	216,75	39,97	50
ККД-1500/180	409,66	77,56	100
ККД-1500/300	610,9	132,21	150
Дробилки среднего дробления – КСД			
КСД-600	3,45	0,67	1
КСД-900	9,79	1,15	2
КСД-1200А	22,432	3,812	5
КСД-1200В	22,428	3,808	5
КСД-1750В	46,895	7,9	10
КСД-2200В	79,27	17,04	20
Дробилки мелкого дробления – КМД			
КМД-1200	22,583	3,372	5
КМД-1750	47,02	8,796	10
КМД-2200	95,37	16,44	20

В складских помещениях для загрузки сыпучих и мелкокусковых материалов (шлака, клинкера, комковой извести-кипелки и т.п.) в расходные бункеры применяются мостовые грейферные краны грузоподъемностью от 5 т до 20т.

На предприятиях промышленности строительных материалов, имеющих технологические процессы с невысокой требуемой грузоподъемностью кранов, широко применяются подвесные кран-балки с грузоподъемностью, не превышающей 5 т, которые монтируются на конструкциях пролетных балок или ферм.

Краткая техническая характеристика мостовых кранов приведена в табл. 3.37.

Таблица 3.37

Краткая техническая характеристика кранов*

Элементы характеристики	Тип грузоподъемного устройства		
	мостовой кран общего назначения	мостовой грейферный кран	мостовой подвесной однобалочный кран
Грузоподъемность, т	5...20	5...20	0,25...5
Пролет, м	10,5...31,5	10,5...31,5	3...12
Высота подъема груза, м	16...12	16...23	6
Скорость перемещения крана, м/мин	50	72...100	30
Скорость подъема груза, м/мин	2,5	40...50	8

*Примечание. В пояснительной записке студент приводит однозначные показатели грузоподъемности выбранного крана и принятые размеры пролетов производственных цехов.

3.7. Параметрический расчет аппарата

Для параметрического расчета выбирается (по согласованию с руководителем) один или несколько аппаратов, являющихся определяющими в принятой технологической схеме производства. В результате расчета должны быть получены численные значения основных характеристик (параметров), определяющих ход технологического процесса в заданном аппарате, а также геометрические размеры аппарата.

Методика расчета аппарата изложена в учебном пособии [32].

Чтобы убедиться в правильности выполненных расчетов, целесообразно сравнить основные расчетные характеристики с таковыми для серийно выпускаемых аппаратов. Сведения о них можно найти в справочной литературе и в приложениях к [32].

В соответствии с выполненными расчетами в графической части дается схематическое изображение аппарата. В качестве прототипа может быть ис-

пользован близкий по характеристикам серийно выпускаемый аппарат. На схеме аппарата необходимо дать разметку материальных и энергетических потоков с указанием входов, выходов и предполагаемых траекторий движения, а также места установки датчиков контроля режимных параметров технологического процесса. Для разметок используются условные обозначения, расшифровка которых приводится под схемой.

Дополнительно к расчету основного аппарата выполняется расчет вспомогательного оборудования (вентиляторов, дымососов, пылеосадительных устройств и т.п.). Это оборудование также изображается на чертеже в виде монтажной схемы к основному аппарату.

3.8. Анализ технологического процесса с выявлением определяющих законов его протекания. Разработка технологического регламента

Исходной базой для представления этого раздела комплексного проекта является технологическая схема, представленная в разделе 4 пояснительной записки. Теперь, после того, как основное содержание технологии представлено, оборудование рассчитано или подобрано, выполняется дальнейший анализ технологического процесса, который состоит в глубоком рассмотрении существа физико-химических превращений на каждом технологическом переделе и в каждом аппарате. Принципиальным здесь является выявление тех или иных превращений, характеристика материальных и энергетических потоков, сопровождающих эти превращения. Результаты анализа представляются в виде **операторной схемы**, которая с помощью набора символов (прил.4) отражает существо всех процессов технологии, материальных и энергетических потоков, включая пылеочистку и прочее. Пример оформления операторной схемы приведен на рис. П.2.3. Общее описание операторной схемы представляют в пояснительной записке.

На основе операторной схемы составляется регламент технологического процесса. В регламенте дается сводка и описание всех элементарных процессов, уточняются материальные и энергетические потоки, составляются материальные и энергетические балансы по отдельным технологическим операторам, аппаратам и по процессу в целом. С учетом физико-химической сущности процессов выявляются и вносятся в регламент все количественные характеристики. Регламент представляется в виде таблицы (табл. 3.38).

Таблица 3.38

Регламент технологического процесса

Технологический	Количественные характеристики	Операторы	Материальные и

передел, процесс и его содержание	параметров процесса		энергетические потоки, балансы

Пример оформления технологического регламента приведен в прил.5

3.9. Расчет материальных потоков, уточненный расчет производственной программы

На основании материальных балансов технологического регламента производства вяжущего вещества выполняется уточненный расчет производственной программы, т.е. определяется количество материалов, проходящих через отдельные технологические операции. Для этого из уравнения материального баланса всего технологического процесса находится в общем виде количество сырья, поступающего на склад (т/ч). Далее проводится уточненный расчет количества материалов (сырья) по всем технологическим переделам в соответствии с разработанным регламентом. Проверка правильности расчетов выполняется решением уравнения материального баланса всего технологического процесса (прил. 7). Если отклонение от заданной производительности составляет менее 1 %, то расчет выполнен правильно.

В конце раздела дается сводка грузопотоков (табл. 3.39).

Таблица 3.39

Грузопотоки при производстве вяжущего вещества

Наименование грузопотоков	Величина грузопотоков, m			
	в год	в сутки	в смену	в час

В соответствии с рассчитанными грузопотоками производится сверка соответствия производительности выбранного оборудования. При несоответствиях вносятся необходимые изменения в его характеристики.

3.10. Выбор типов и расчет емкости складов сырья и готовой продукции

Склады проектируются на основании норм технологического проектирования, с учетом величины грузопотоков и принятых условий организации работы технологической линии.

Сырье поступает в производственные цеха с заводских сырьевых складов. Запасы сырья на складах необходимы для бесперебойной работы предприятия в периоды между поставками. Чтобы обеспечить ритмичную непрерывную работу оборудования, создаются промежуточные склады в виде бункеров или других емкостей.

Выбор типов складов определяется технологическими и технико-экономическими показателями. В основном склады следует принимать в закрытом исполнении, что обеспечивает стабильность качественных характеристик хранимого материала. При правильном выборе склада обеспечивается быстрая

разгрузка прибывающего транспорта, бесперебойная подача сырья в производство, наименьшая стоимость транспортных операций.

В данном проекте степень проработки вопроса о складах сводится к определению типа склада, запаса сырья на складе (в днях, в м^3) и размеров склада.

Величина запаса на складе должна быть минимально необходимой, что позволяет улучшить использование оборотных фондов предприятия. В табл. 3.40 приведены нормы запаса материалов на складах.

Таблица 3.40

Нормы запаса материалов на складах

Вид материала	Расстояние транспортирования, км	Вид транспорта	Запас сырья на складе, сут.	
			текущий	страховой
Сырьевые материалы	до 10	Автотранспорт, подвесной конвейер, ж/д транспорт	1-2 1-2 2-3	1 1 1
Технологические добавки	до 50 до 500	Автотранспорт, ж/д транспорт ж/д транспорт	2-3 3-5 3-5	1 2 4
Готовая продукция	до 100 до 1000	Автотранспорт ж/д транспорт	2-4 до 5	- -

На основании этих данных рассчитывается требуемый объем хранящихся на складе сырьевых материалов:

$$V_{мат.}=Q_{сут}\cdot З, \qquad (3.27)$$

где $Q_{сут}$ - суточный расход сырьевого материала, м^3,

$З$ - норма запаса материала на складе, сутки.

Объём склада вычисляется по формуле

$$V_{скл} = \frac{V_{мат}}{K}, \qquad (3.28)$$

где K – коэффициент использования объёма склада (K = 0,75 - 0,85).

Ширина склада назначается исходя из принятой его высоты с учетом угла естественного откоса хранимого материала. Длина склада определяется по формуле

$$L_{скл.} = \frac{V_{скл.}}{F_{скл.}}, \qquad (3.29)$$

где $F_{скл.}$ – часть поперечного сечения склада, заполненная материалом, (определяется путем эскизного изображения).

Общий объем склада ($V_{скл}$) может рассчитываться суммарно для нескольких материалов, предусмотренных технологией, если для них приемлем один тип склада. В этом случае для каждого материала предусматривается лишь отдельный отсек.

Склад оборудуется приемными устройствами (бункерами). Транспортное оборудование, с помощью которого происходит подача сырья и материалов в производство, размещается на эстакадах, галереях и т.п.

Для хранения промежуточных запасов обычно применяют бункера прямоугольного вида с пирамидальной нижней частью. Угол наклона стенок бункера и течек к горизонту – не менее 50 - 55^0. Если применяются сблокированные бункера, то их проектируют одной высоты, причем размеры бункеров не должны резко отличаться. Обычно емкость промежуточных бункеров принимается с учетом обеспечения 1 - 2 часового запаса материала.

$$V_{бункер} = \frac{B_ч \cdot \tau}{K_1}, \qquad (3.30)$$

где $B_ч$ - количество материала, выходящего из бункера в час, м^3/ч, т/ч;

τ - время, на которое создается запас, ч;

K_1 - коэффициент заполнения бункера (K_1=0,9).

Для хранения готовой продукции обычно предусматриваются силосы-цилиндры с днищем, оборудованные разрыхляющими устройствами. При проектировании силосов обычно принимаются типовые решения. При необходимости готовую продукцию загружают в контейнеры или затаривают в битумизированные бумажные мешки. Для затаривания используются упаковочные машины.

Склады для хранения материалов представляют в эскизном изображении в пояснительной записке и на схеме генерального плана предприятия.

3.11. Компоновочные решения производства вяжущего вещества

В данном разделе решаются вопросы общего расположения и взаимной увязки оборудования (основного технологического и транспортного), а также взаимной увязки цехов и отделений, входящих в состав всего предприятия по выпуску вяжущего вещества, в том числе складов сырья и готовой продукции (дробильно-сортировочного отделения, цехов сушки, обжига и помола).

Целесообразно вначале составлять эскиз генерального плана. На нем производственные здания располагаются в соответствии с технологической схемой, с учетом поточности производства, при минимуме транспортных операций.

При компоновке оборудования в основных цехах (помола, обжига) необходимо стремиться к созданию таких условий, при которых оно будет использовано наиболее эффективно. Необходимо тщательно продумать организацию

рабочих мест, установить размеры необходимых проходов для обслуживания и ремонта машин, учесть установку обеспыливающих устройств, средств контроля, автоматизации и т.п.

Как правило, размещение оборудования осуществляется в унифицированных пролетах промышленных зданий с шагом колонн 6 или 12 м, пролетами 18 и 24 м.

Начинать компоновку в цехе следует с расстановки основного технологического оборудования. При этом последовательность размещения оборудования может быть принята в соответствии с направлением технологического потока, либо исходя из условий компактного расположения ведущих агрегатов с последующим размещением остального технологического оборудования, имеющего вспомогательное назначение. Компоновка должна быть такой, чтобы производственный процесс протекал без возвратных движений и пересечений; желательно применять вертикальную схему подачи материалов самотеком, при этом сокращается количество транспортных единиц.

Компоновка предполагает размещение оборудования не только в плане, но и в объеме здания, что требует одновременной увязки плана и разрезов проектируемого цеха. Оптимальный вариант компоновки характеризуется наименьшей площадью и наименьшим объемом производственного помещения, но при достаточных площадях, необходимых для обслуживания и ремонта оборудования, для выполнения всех требований техники безопасности и наилучших условий организации производства. Окончательный вариант компоновки должен быть согласован с руководителем проектирования, после чего он вычерчивается на листе формата А1.

3.12. Разработка схемы генерального плана предприятия

В данном разделе решаются вопросы размещения на территории предприятия основных и вспомогательных производственных помещений, дорог, проездов и проходов, благоустройства территории.

Основой для разработки схемы генерального плана являются принятая технологическая схема производства вяжущего, компоновочные решения производственных и вспомогательных цехов, грузооборот сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, интенсивность и направление людских потоков.

При проектировании генерального плана территория, занимаемая промышленным предприятием, разбивается на зоны: *производственную, складскую, подсобную и предзаводскую.* Производственные помещения располагаются с учетом поточности производства. Для сокращения заводской территории, протяженности коммуникаций и инженерных сетей необходимо предусматривать блокировку цехов. Возможности блокировки могут быть ограничены только по пожаровзрывоопасным и санитарным условиям производства.

Размещение производственных зданий и сооружений на генплане не должно носить хаотичного характера; следует стремиться к стройному их размещению, по возможности обеспечивая прямолинейность проездов, соблюдая нормы противопожарных и санитарных разрывов между зданиями.

При проектировании подъездных путей следует соблюдать нормы в отношении ширины дорог и радиусов закругления. Количество подъездных путей и их расположение должно обеспечивать бесперебойную и безопасную работу транспорта.

При разработке генплана необходимо предусматривать санитарно-защитную зону, которую следует благоустраивать и озеленять. Озеленению подлежат предзаводские площадки, территории вдоль ограждения предприятия, площадки у проходных, мест отдыха и т.д. Площадь озеленения должна составлять 10-15 % площади территории предприятия. При разработке схемы генерального плана необходимо руководствоваться требованиям СНиП 11-89-80* «Генеральные планы промышленных предприятий» (издание 1995 г.).

3.13. Организация контроля технологического процесса и качества готовой продукции

Организация контроля имеет целью обеспечение выпуска продукции, отвечающей требованиям действующих стандартов и технических условий.

На предприятии осуществляют входной контроль качества исходных материалов, текущий пооперационный контроль соблюдения технологических режимов и выходной контроль качества готовой продукции.

Особое внимание уделяется использованию автоматических средств контроля и регулирования технологических процессов, приборов для автоматического отбора проб, химического анализа сырья, определения влажности материалов и т.д.

Описание этого раздела должно носить конкретный характер и содержать количественные данные по контрольным характеристикам технологических процессов, качества сырья и готовой продукции. Система организации контроля увязывается с разработкой технологического регламента. Решения по организации контроля рекомендуется представлять в виде табл. 3.41.

Таблица 3.41

Карта контроля технологического процесса
производства _____
(указать вид вяжущего)

Технологическая операция, процесс, продукция	Контролируемые характеристики	Место контроля	Периодичность	Контролирующее лицо	Метод контроля

3.14. Мероприятия по технике безопасности, охране труда и защите окружающей среды

В данном разделе дается обзор основных мероприятий по технике безопасности и охране окружающей среды, заложенных в проекте, приводится характеристика профессиональных вредностей и мер, мероприятий, разработанных проектировщиком, для предотвращения их воздействия на производственный персонал и окружающую среду. Описание защитных устройств и мероприятий должно носить конкретный характер. Это, прежде всего, касается вопросов обеспыливания и степени очистки воздуха, снижения производственного шума, защиты от ожогов, поражения электрическим током, травм другого характера.

3.15. Оценка эффективности решений, принятых в проекте

На основании выполненных разработок рассчитываются и приводятся в пояснительной записке технико-экономические показатели запроектированного цеха, а также дается сравнение их с показателями действующих предприятий. Определяются следующие технико-экономические показатели: расходы энергетических ресурсов (топлива, электроэнергии), затраты труда (трудоемкость), производительность труда (выработка в натуральных единицах), энерговооруженность, съем продукции с 1 м^2 производственной площади.

Указанные показатели могут быть определены следующим образом.

Расход топлива на единицу продукции устанавливается в результате расчета (см. п. 9) или по характеристикам принятого оборудования.

Удельный расход электроэнергии, $Э_{уд}$, определяется по формуле

$$Э_{уд} = \frac{Э_г}{П}, \qquad (3.31)$$

где $Э_г$ – годовой расход электроэнергии, кВтч;

$П$ – годовая производительность предприятия, т.

$$Э_г = \frac{N \cdot F \cdot K_в \cdot K_з}{\eta} \cdot 1{,}1 \ , \qquad (3.32)$$

где N - установленная мощность оборудования, кВт;

F - годовой фонд времени работы предприятия, ч;

$K_в$- коэффициент использования оборудования во времени;

$K_з$ – коэффициент загрузки мощности двигателя;

η - коэффициент полезного действия электродвигателя;

1,1- коэффициент, учитывающий потери в электросети.

Затраты труда на единицу продукции (трудоемкость) определяются как частное от деления годового количества человеко-часов, отработанных основными и вспомогательными производственными рабочими (явочная численность), на годовой выпуск готовой продукции.

Потребное количество основных рабочих определяется исходя из количества выбранного оборудования и принятого количества производственных рабочих на технологической линии. Численность вспомогательных рабочих составляет 25-40 % от численности основных производственных рабочих.

Производительность труда – количество продукции, приходящейся в год на одного списочного рабочего.

Списочное число рабочих (K_c) равно

$$K_c = K_я K_п \, , \qquad (3.33)$$

где $K_я$ - явочное количество рабочих, чел.;

$K_п$- коэффициент, учитывающий количество нерабочих дней в году.

Энерговооруженность - мощность (кВт) всех установленных электродвигателей, приходящаяся на одного производственного рабочего.

Съем с 1 м^2 производственной площади (C) равен

$$C = \frac{П}{F}, \qquad (3.34)$$

где F – производственная площадь цехов, м^2.

Все технико-экономические показатели следует представить в виде сводной табл. 3.42.

Таблица 3.42

Основные технико-экономические показатели
запроектированного предприятия

		Величина показателя

Наименование показателей	Единицы измерения	запроектированного предприятия	аналогичного предприятия

3.16. Список использованных источников (библиографический список)

В конце пояснительной записки должен быть приведен список использованных источников.

При разработке проекта студент должен постоянно вести записи в рабочей тетради обо всех использованных источниках (учебниках, справочниках, журнальных статьях, проектах) с точным указанием автора, наименования, года издания и сразу же присваивать выбранным источникам порядковые номера.

Список источников составляется по правилам, изложенным в ГОСТе 7.32-2001. В качестве примера оформления можно использовать библиографический список рекомендуемой литературы к настоящему изданию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После того, как проект выполнен, необходимо подвести итоги этой сложной работы, оценить ее значение для освоения студентом специальности. Полезно оценить с более глубоких позиций, какое же место занимает каждая дисциплина, представляемая в проекте, в общем образовательном цикле, какие теоретические положения этих дисциплин нашли свое отражение в проекте, насколько важны получаемые знания для практической подготовки специалиста. Если исполнитель проекта смог ответить на эти вопросы, то можно считать, что цель выполнения комплексного проекта достигнута.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества: учебник / А.В. Волженский.- М.: СИ, 1986.- 462 с.

2. Волженский А.В. Применение золошлаков в производстве строительных материалов / А.В. Волженский, И.А. Иванов, В.Н. Виноградов.- М.: СИ, 1984.- 246 с.

3. Волженский А.В. Гипсовые вяжущие изделия / А.В. Волженский, А.В. Ферронская.- М.: СИ, 1974. - 328 с.

4. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов / П.И. Боженов.- Л.: СИ, 1978. - 267 с.

5. Монастырев А.В. Производство извести / А.В. Монастырев.- М.:СИ, 1972. - 270 с.

6. Табунщиков Н.П. Производство извести / Н.П. Табунщиков.- М.:СИ, 1984. - 295 с.

7. Саталкин А.В. Технология изделий из силикатных бетонов / А.В. Саталкин, П.Г. Комохов, К.Ф. Ломунов, А.А. Федин, А.К. Яворский.- М.: СИ, 1972. - 344 с.

8. Гладких К.В. Изделия из ячеистых бетонов на основе шлаков и зол / К.В. Гладких. - М.: СИ, 1976. - 256 с.

9. Волженский А.В. Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие вещества / А.В. Волженский, И.В. Стамбулко, М.И. Роговой.- М.: СИ, 1971. - 392 с.

10. Вихтер Я.И. Производство гипсовых вяжущих веществ: монография / Я.И. Вихтер. - М.: СИ, 1974. - 280 с.

11. Строительные машины: справочник / под ред. В.А. Баумана, Ф.А. Лапиро. - М.: Машиностроение, 1977. - Т.1. - 502 с. - Т.2. - 496 с.

12. Таранукин М.А. Справочник молодого рабочего цементного производства / М.А. Таранукин, Б.В. Алексеев.- М.: СИ, 1988. - 175с.

13. Степанов Л.П. Устройство и монтаж дробильно-обогатительного оборудования: учеб. пособие / Л.П. Степанов, А.И. Косарев.- М.: Высшая школа, 1969. - 224 с.

14. Лапшин А.Б. Обеспыливание в производстве извести / А.Б. Лапшин.- М.: СИ, 1988. - 72 с.

15. Справочник по кранам / под ред. А.И. Дукельского.- М.: Машиностроение, 1974. - 450 с.

16. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. - М.: Химия, 1974. - 368 с.

17. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности / под ред. Д.Б. Гинзбурга, В.А. Зилина. - 2-е изд., перераб - М.: СИ, 1964.- 496 с.

18. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник / А.Г. Касаткин. - М.: Химия, 1977. - 752 с.

19. Роговой М.И. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов: учеб. пособие / М.И. Роговой, М.Н. Кондакова, М.Н. Сагановский. - М.: СИ, 1975. - 320 с.

20. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учеб. пособие / В.В. Перегудов, М.И. Роговой.- М.: СИ, 1983. - 416 с.

21. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков.- 10-е изд., перераб. и доп. - Л.: Химия, 1987. - 576 с.

22. Роддатис К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф. Роддатис, Я.Б. Соколовский. - М.: Энергия, 1976. - 363 с.

23. Романков П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии: учеб. пособие / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. - Л.: Химия, 1982. - 260 с.

24. Ахундов А.А. Обжиг в кипящем слое в производстве строительных материалов / А.А. Ахундов, Г.А. Петрихина, А.И. Полинковская, В.Л. Пржецлавский. - М.: СИ, 1975. - 248 с.

25. Семидуберский М.С. Насосы, компрессоры, вентиляторы: учеб. пособие / М.С. Семидуберский. - М.: Высшая школа, 1966. - 408 с.

26. Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий (курсовое проектирование): учеб. пособие / П.Д. Лебедев, А.А. Щукин. - М.: Энергия, 1970. - 408 с.

27. Справочник по обогащению руд / под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. - М.: Недра, 1982. - 366 с.

28. Строительные машины: справочник / под ред. М.Н. Горбовца.- М.: Машиностроение. - Т. 2., 1991. - 496 с.

29. Сапожников М.Я. Справочник по оборудованию заводов строительных материалов / М.Я. Сапожников, Н.Е. Дроздов. - М.: СИ, 1970. - 488 с.

30. Строительные машины: справочник / под общ. ред. М.Н. Горбовца. - 3-е изд., перераб. и доп. - Т.2. - М.: Машиностроение, 1991. - 496 с.

31. Справочник современного проектировщика: справочник / под общ. ред. Л.Р. Маиляна. - Ростов-Дон: Феникс, 2005. - 544 с.

32. Шмитько Е.И. Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий (расчет аппаратов): учеб. пособие / Е.И. Шмитько. - 2-е изд., перераб. и доп. - Воронеж: ВГАСУ, 2006. - 165 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОГО ПРОЕКТА

Основные разделы проекта	К какой дисциплине относится раздел	Учебные недели													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Характеристики района строительства, выпускаемой продукции, сырьевых материалов	«Вяжущие вещества»	—													
Обоснование общей технологии производства вяжущего и видов основного оборудования	«Вяжущие вещества», «Механическое оборудование…», «Процессы и аппараты…»		—	—											
Определение режима работы предприятия, расчет производственной программы	«Вяжущие вещества»			—											
Выбор и расчет технологического и транспортного оборудования	«Механическое оборудование…»				—	—	—								
Параметрический расчет аппарата	«Процессы и аппараты…»						—	—							
Анализ технологического процесса, разработка технологического регламента, уточненный расчет производственной программы	«Вяжущие вещества», «Процессы и аппараты…»								—	—					

Окончание прил. 1

Основные разделы проекта	К какой дисципли-не относится раздел	Учебные недели													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Расчет складов сырья и готовой продукции.	«Вяжущие вещест-ва»														
Компоновочные решения производственного цеха, генерального плана	«Вяжущие вещест-ва»														
Оценка эффективности решений, принятых в проекте	«Вяжущие вещест-ва»														
Подготовка к защите и защита проекта	«Вяжущие вещест-ва», «Мех. обору-дование…», «Про-цессы и аппара-ты…»														

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ И ОПЕРАТОРНОЙ СХЕМ

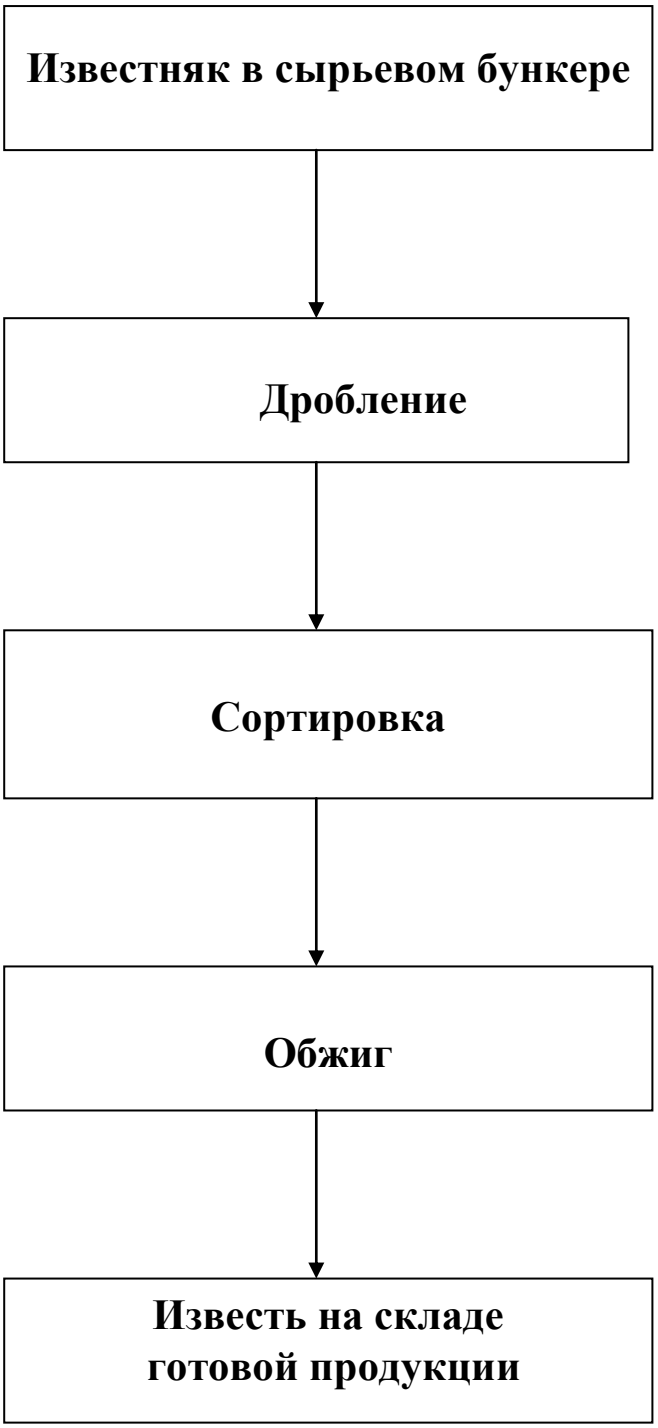


Рис. П.2.1. Функциональная схема получения комовой негашеной извести (пример)

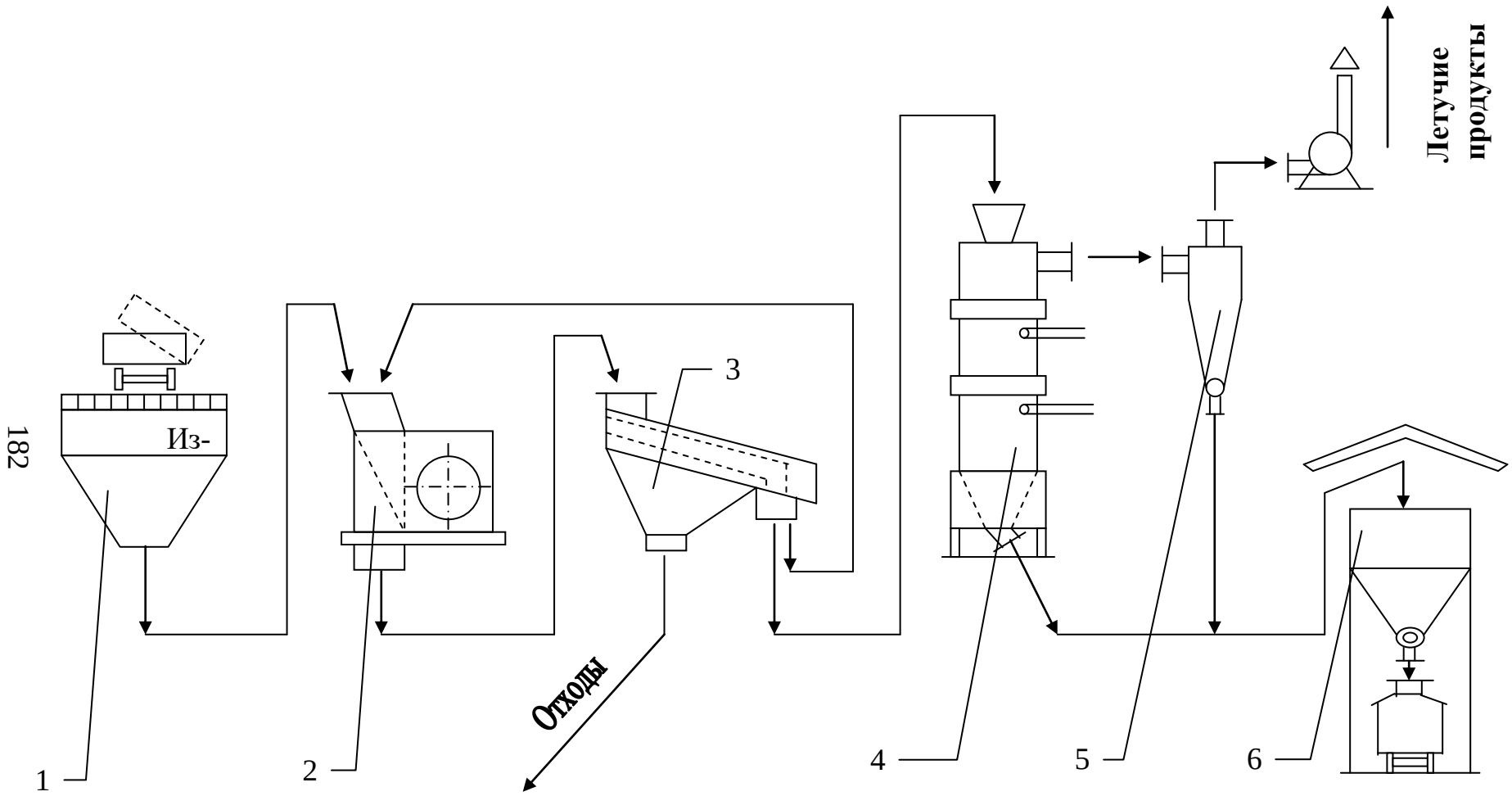


Рис.П.2.2. Технологическая схема получения комовой негашеной извести (пример)

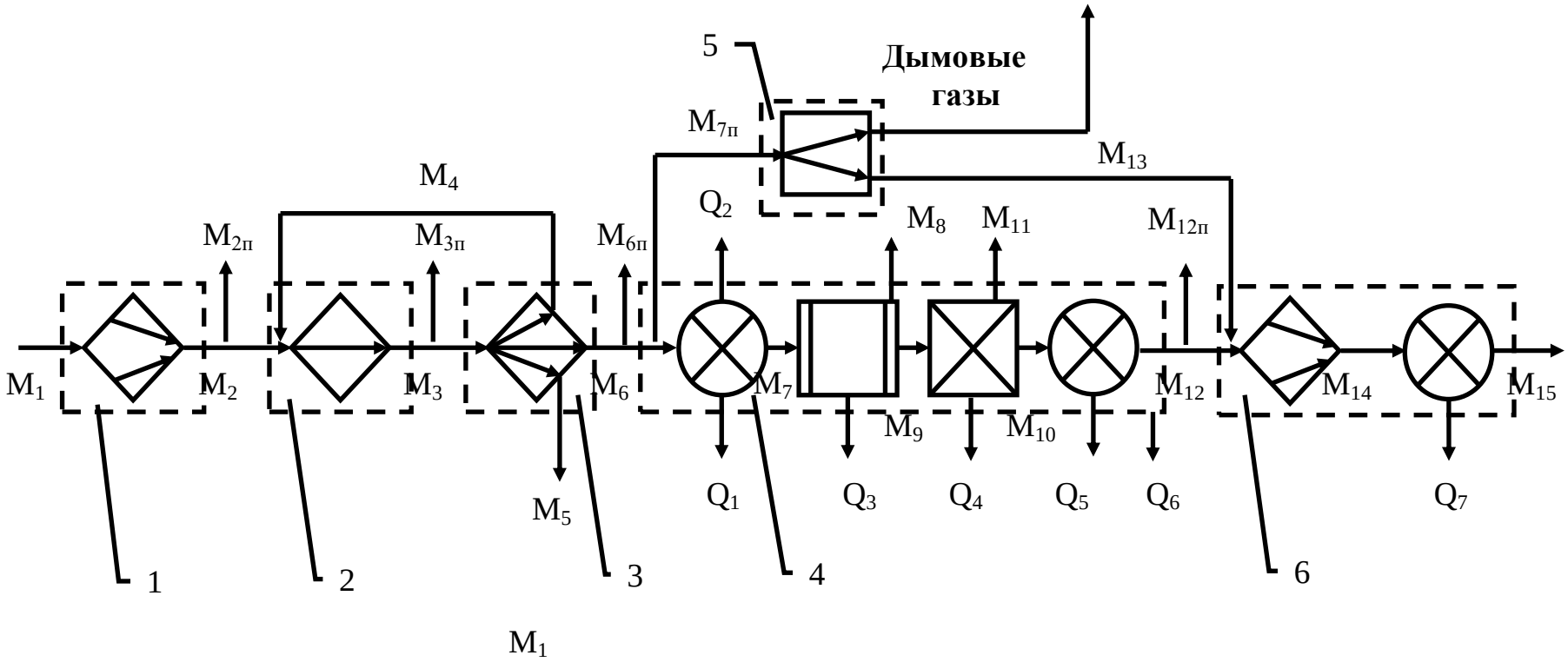


Рис.П.2.3. Операторная схема технологического процесса получения комовой негашеной извести (пример)
1,2,3,4,5,6,7 – обозначения оборудования согласно рис. П.2.2

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ПРИМЕРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И АППАРАТОВ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ

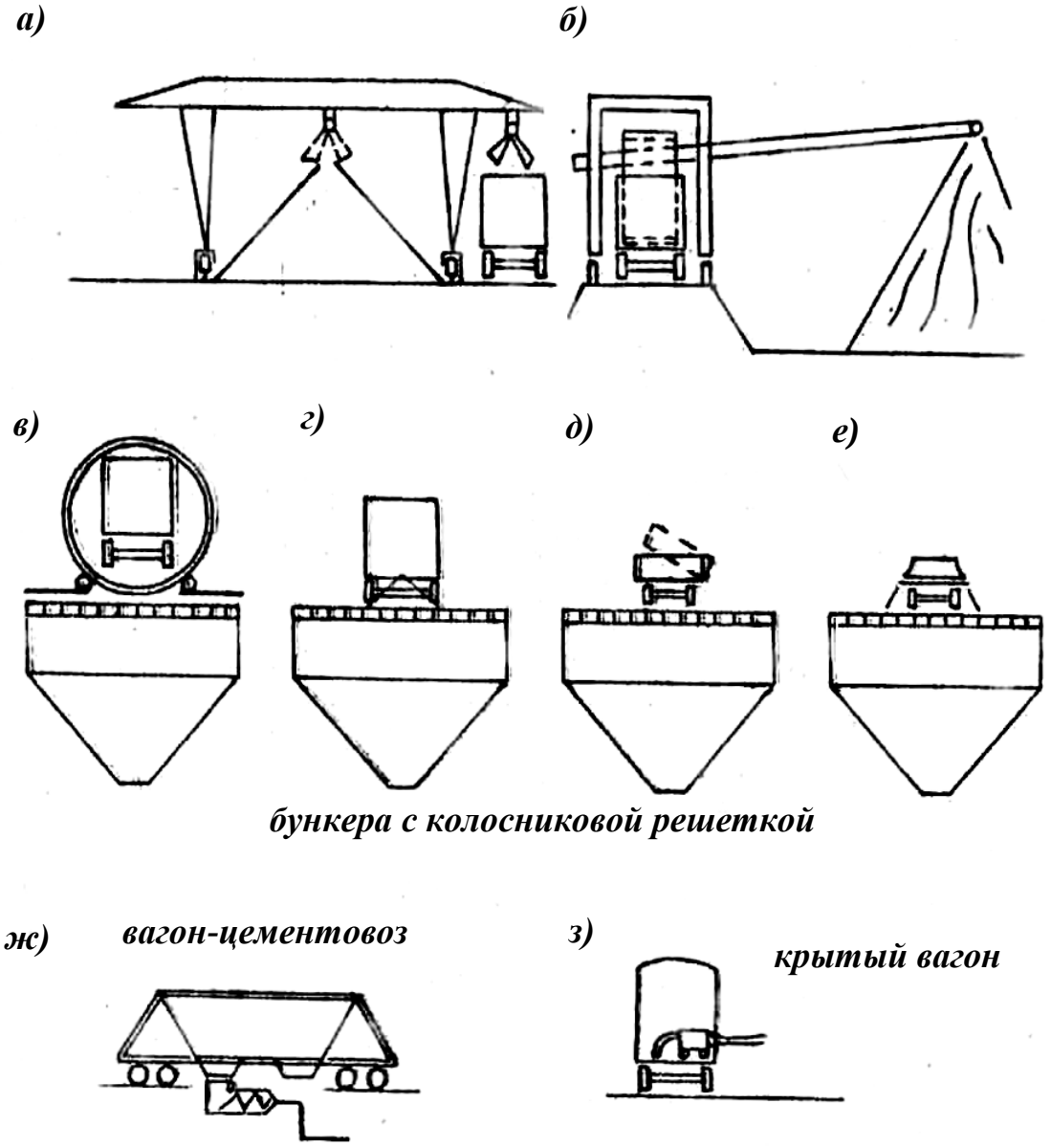


Рис. П.3.1. Изображение схем разгрузки сырьевых материалов с железнодорожных средств:
а) козловым краном; ***б)*** путевым разгружателем вагонов;
в) опрокидывающим устройством; ***г)*** через открывающееся днище вагона;
д) с опрокидывающейся платформы; ***е)*** плужковым сбрасывателем;
ж) пневмовинтовым насосом (порошковые материалы);
з) вакуумным разгружателем

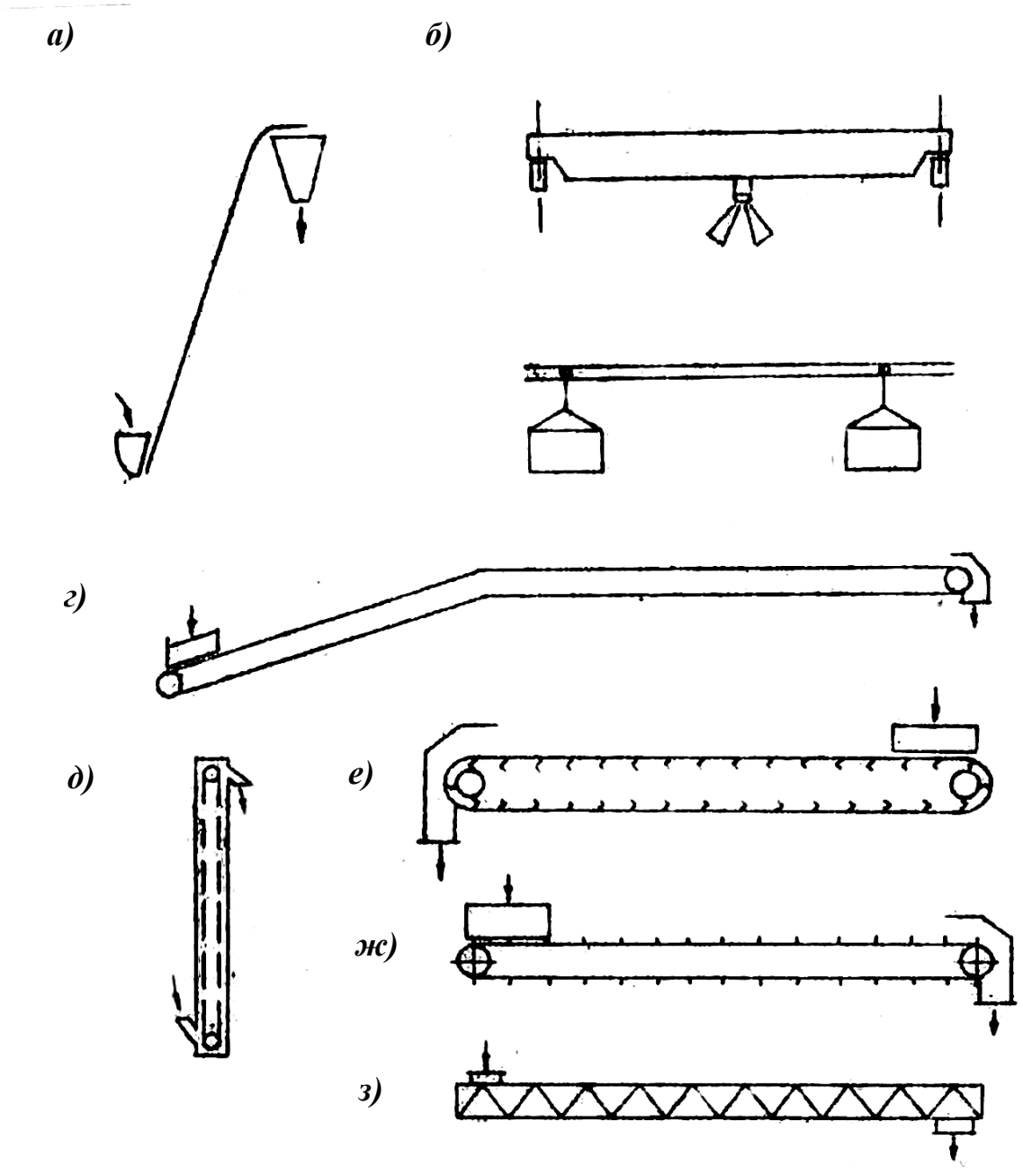


Рис. П.3.2. Схематическое изображение подъемно-транспортного оборудования:

а) скиповый подъемник; ***б)*** мостовой кран с грейферным ковшом; ***в)*** подвесной конвейер; ***г)*** ленточный конвейер; ***д)*** ковшевой элеватор; ***е)*** пластинчатый конвейер; ***ж)*** скребковый конвейер; ***з)*** шнековый конвейер

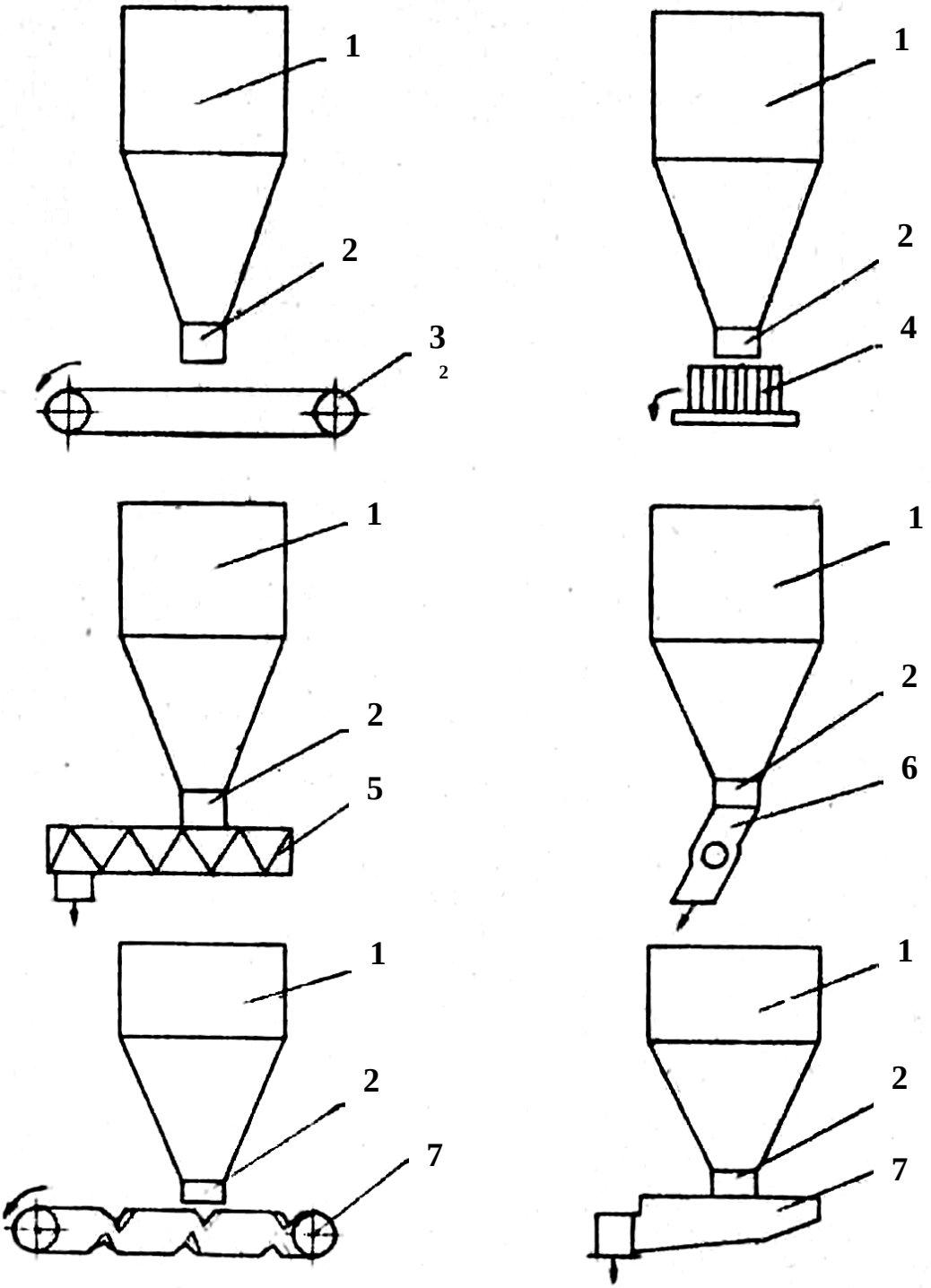


Рис. П.3.3. Расходные бункеры с питателями (схемы):

1 – бункер; 2 – воронка; 3 – ленточный питатель; 4 – тарельчатый питатель; 5 – шнековый питатель; 6 – барабанный питатель; 7 – пластинчатый питатель; 8 – лотковый питатель

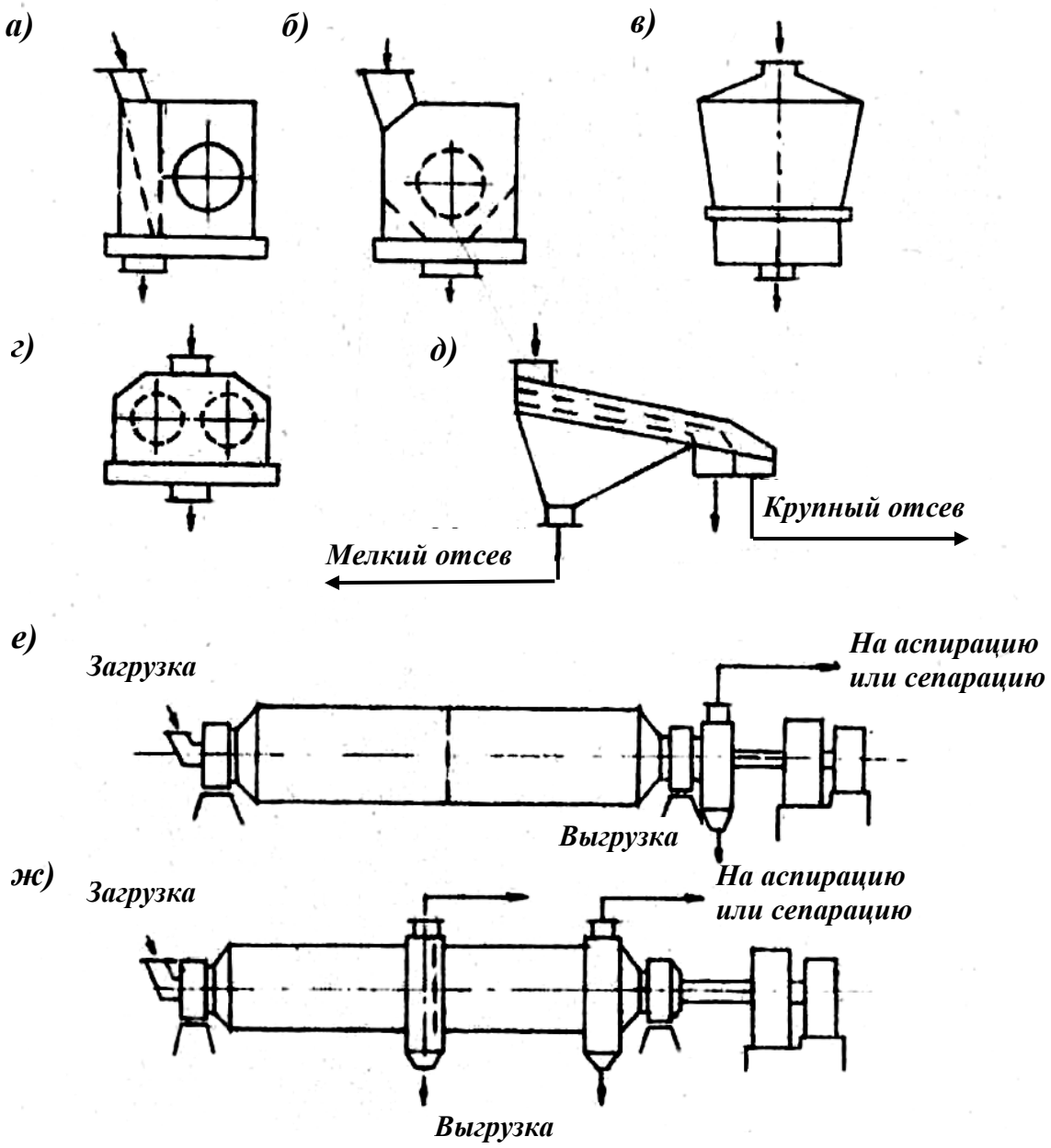


Рис. П.3.4. Дробильно-сортировочное и помольное оборудование:

а) дробилка щековая; ***б)*** молотковая дробилка; ***в)*** конусная дробилка; ***г)*** валковая дробилка; ***д)*** грохот сортировочный; ***е)*** мельница шаровая двухкамерная с центральной разгрузкой;
ж) то же с периферийной разгрузкой

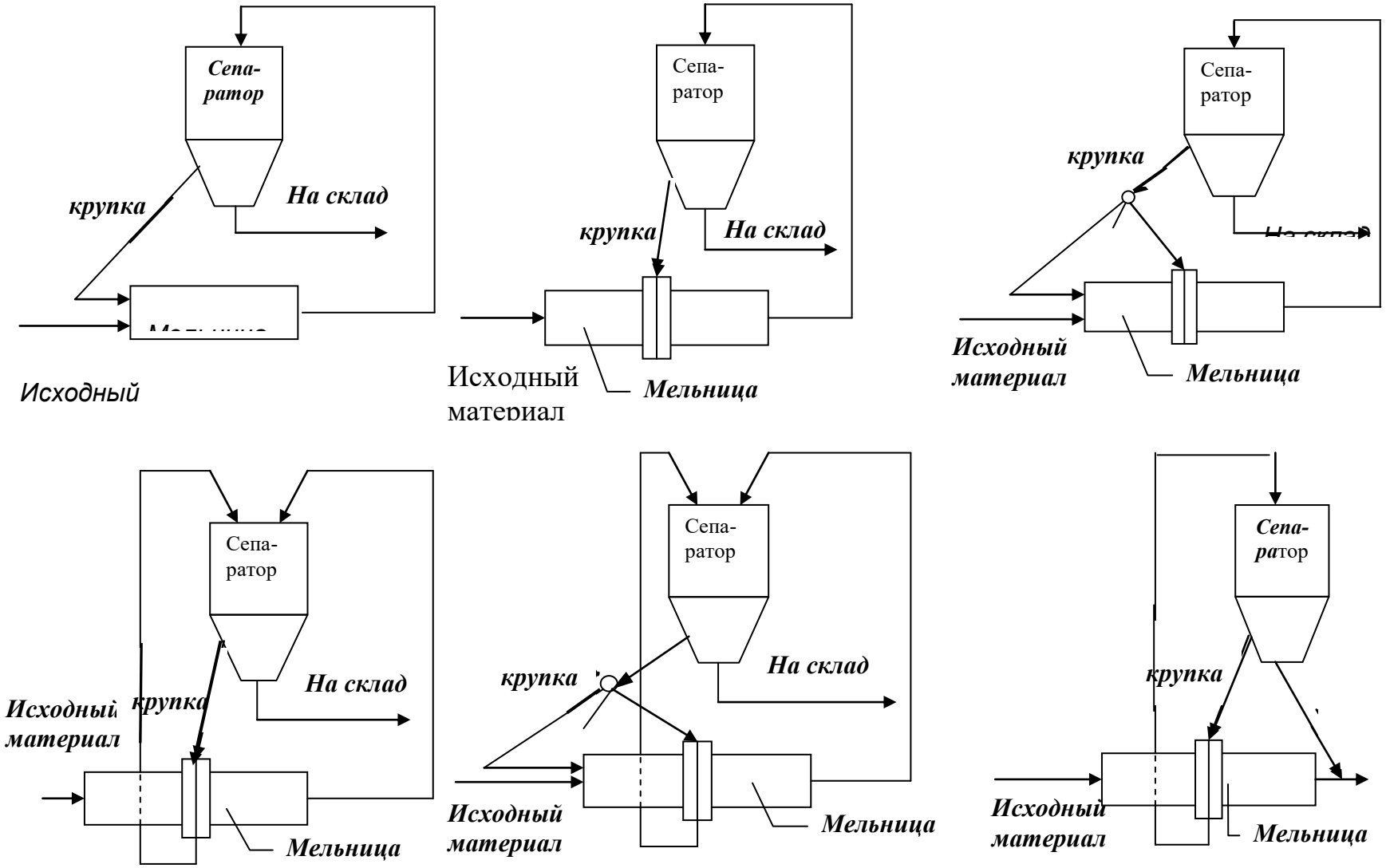


Рис.П.3.5. Варианты помола вяжущего в сепараторных мельницах в замкнутом цикле

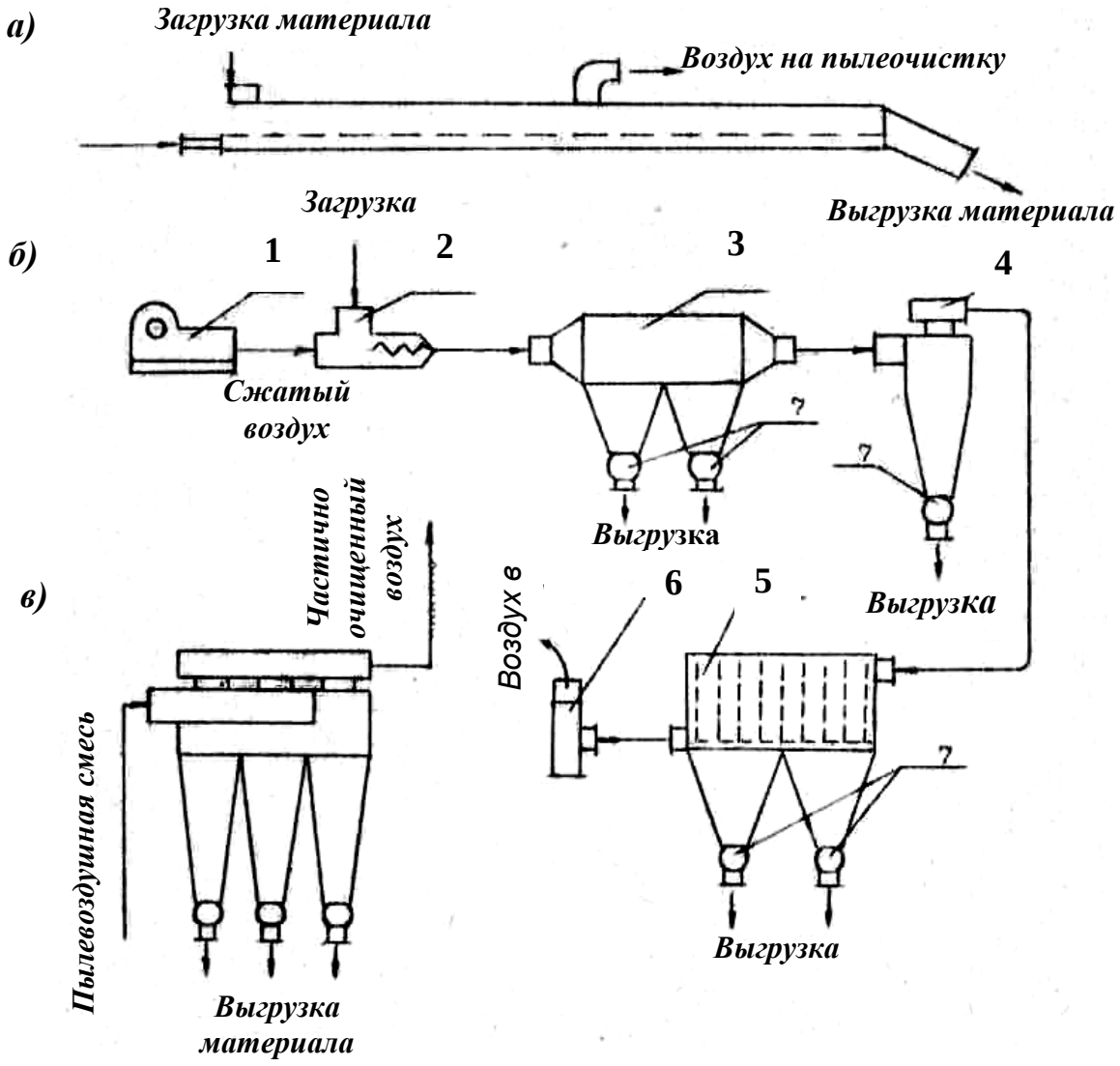


Рис. П.3.6. Схемы средств пневмотранспорта порошковых материалов, пылеосаждения и пылеочистки:
а) аэрожелоб; ***б)*** система пневмотранспорта: 1- компрессор; 2 – винтовой питатель; 3 – пылеосадительная камера; 4 – циклон (батарея циклонов); 5 – электрофильтр; 6 – отсасывающий вентилятор; 7 – барабанный выгружатель; ***в)*** батарея циклонов

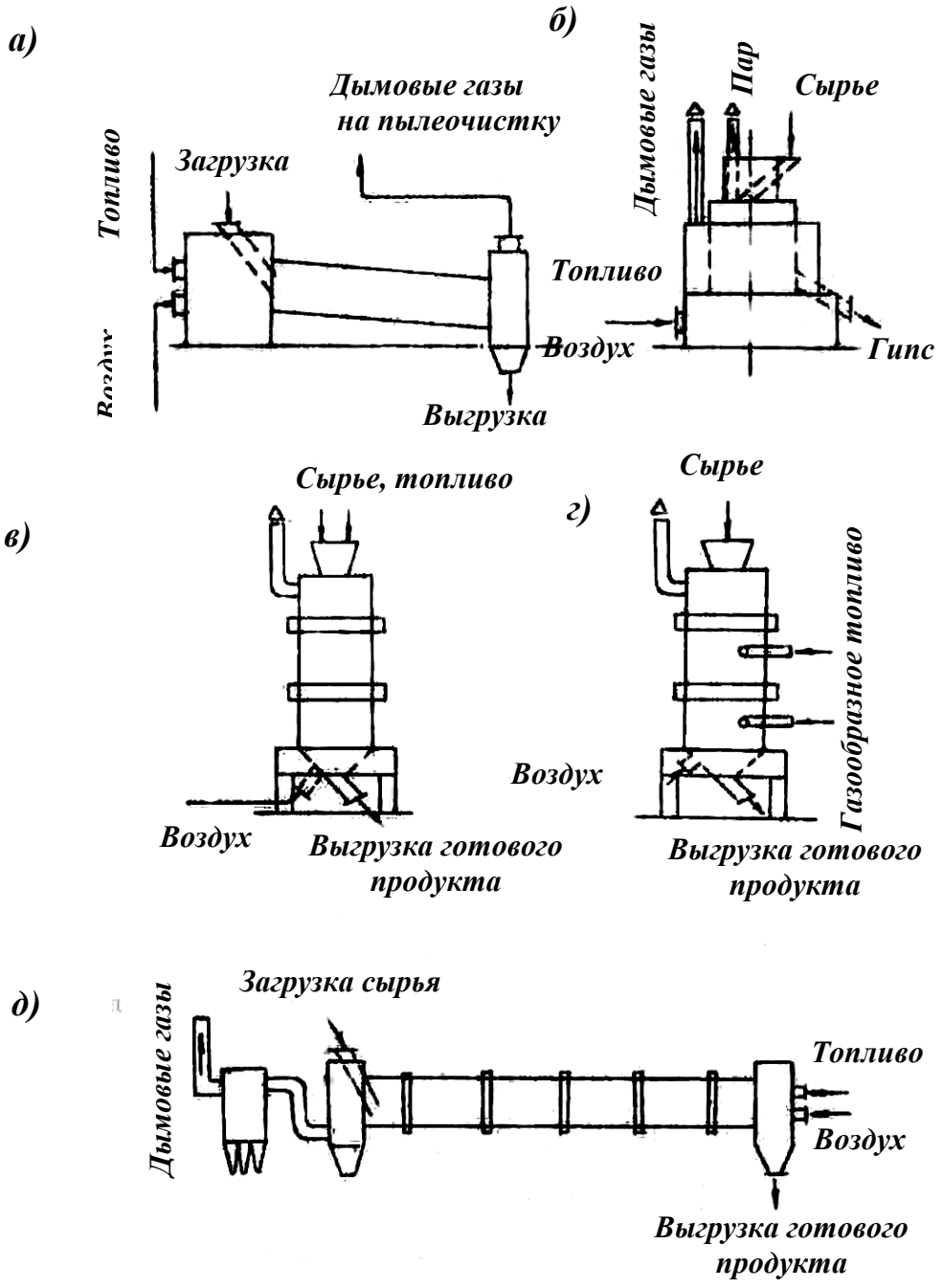


Рис. П.3.7. Схемы тепловых аппаратов:

а) сушильный барабан; ***б)*** гипсоварочный котел; ***в)*** шахтная пересыпная печь; ***г)*** шахтная газовая печь; ***д)*** вращающаяся печь

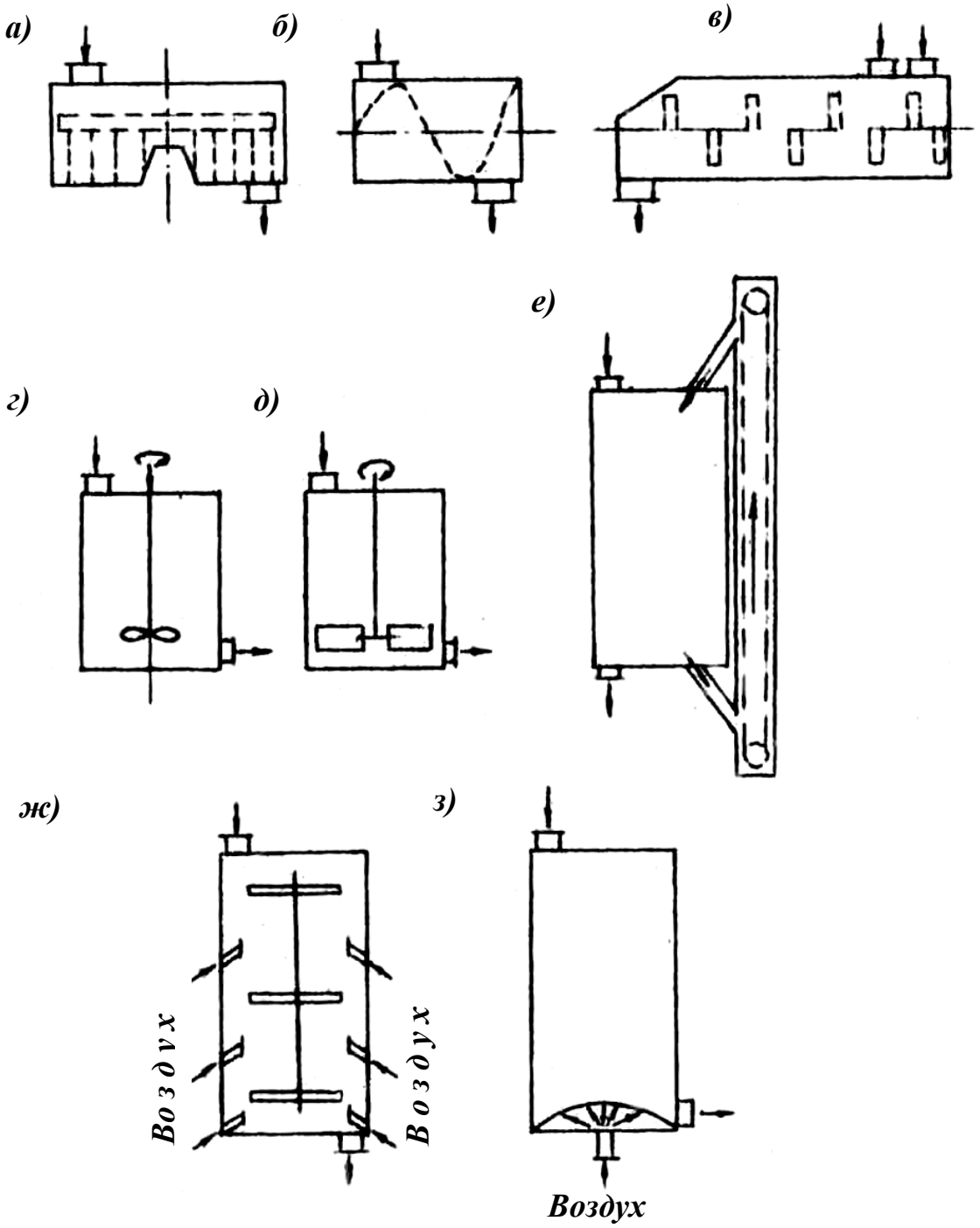
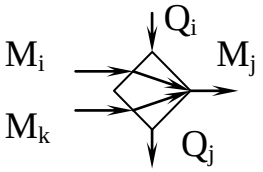


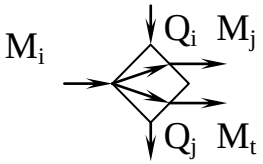
Рис. П.3.8. Схемы смесительных аппаратов:
а) для приготовления глиняных суспензий; ***б)*** лопастной смеситель;
в) двухвальный смеситель; **г)** пропеллерный смеситель; ***д)*** турбинный или роторный смеситель; ***е)*** усреднитель (гомогенизатор) механического действия; ***ж)*** усреднитель пневмомеханического действия;
з) усреднитель пневматического действия

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

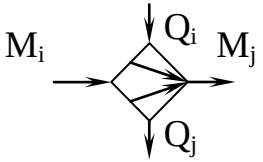
ОБОЗНАЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ



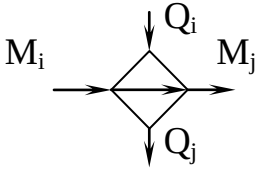
- ***смешение механическое***



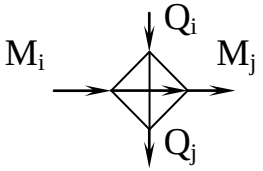
- ***разделение механическое***



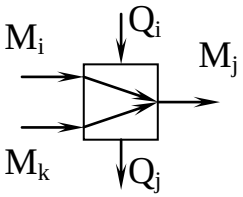
- ***усреднение механическое (гомогенизация)***



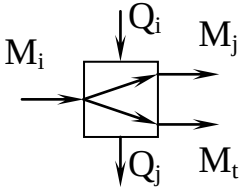
- ***дробление механическое***



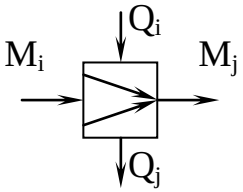
- ***измельчение механическое***



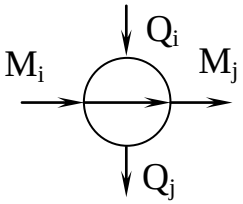
- ***смешение гидродинамическое***



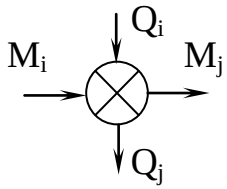
- ***разделение гидродинамическое***



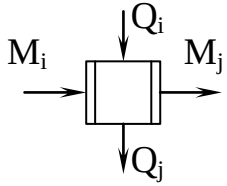
- ***усреднение гидродинамическое (гомогенизация)***



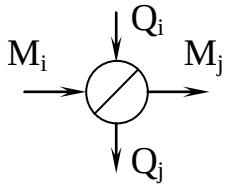
- ***сжатие или расширение***



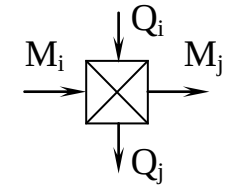
- ***нагрев или охлаждение***



- ***межфазный массообмен***



- ***изменение агрегатного состояния вещества***

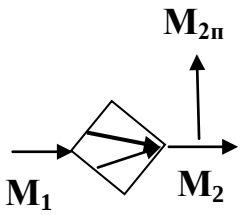


- ***химическое превращение вещества***

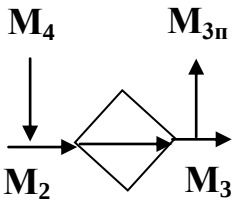
Рис. П.4.1. Условные обозначения элементарных процессов с материальными (M_i, M_k, M_j, M_t) и энергетическими (Q_i, Q_j) потоками

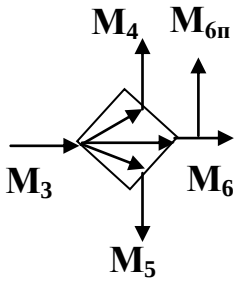
ПРИЛОЖЕНИЕ 5

ПРИМЕР ТАБЛИЧНОГО ОФОРМЛЕНИЯ РЕГЛАМЕНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
(производство комовой негашеной извести)

Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
1. Складирование известняка; процесс механический: загрузка и выдача материала с частичным усреднением зернового состава; технологическое оборудование – сырьевой бункер	Характеристики известняка [1]: наибольшая крупность кусков – 300 мм; наименьшая крупность кусков – 100 мм; плотность в куске – 2600 кг/м^3; плотность насыпная – 1450 кг/м^3; влажность – 5 %; прочность на сжатие – 25 МПа; содержание $CaCO_3$ = 95 %		M_1 - количество известняка, поступающего в сырьевой бункер; M_2 - количество известняка, выходящего из бункера; $M_{2п}$-механические потери в питателе и в транспортирующем устройстве. ***Материальный баланс:*** $M_1 = M_2 + M_{2п}$ или $M_2 = M_1 – M_{2п}$. Примем $M_{2п} + 0{,}001M_1$, тогда $M_2 = 0{,}999M_1$ (1)

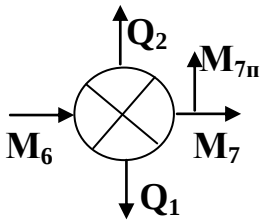
Продолжение прил. 5

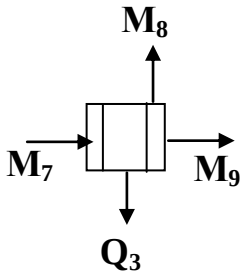
Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
2. Дробление известняка; процесс механический: измельчение раздавливанием и истиранием; аппарат – щековая дробилка	Наибольшая крупность загружаемых кусков – 300 мм; крупность дробления: фракция известняка по требованиям к загрузке известеобжиговой печи [1] - 50-100 мм. Возможно применение дробилок со следующими параметрами: размеры приемного отверстия (мм) – 400 х 600 (1-й вариант); 600 х 900 (2-й вариант); 900 х 1200 (3-й вариант); ширина выходной щели равна соответственно (мм) - 60±40; 100±25; 130±25; выход фракций (прил. 8): > 100 мм – 5 %, 30 %, 45 %; 50 – 100 мм – 42 %, 42 %, 35 %; < 50 мм – 47 %, 28 %, 20 %. Принимаем вариант 2		M_3 – количество выходящего из дробилки известняка; M_4 – возврат известняка после сортировки; $M_{3п}$-механические потери известняка при транспортировании и в аспирационных устройствах. ***Материальный баланс:*** $M_2 + M_4 = M_3 + M_{3п}$ или $M_3 = M_2 + M_4 – M_{3п}$. По 2-му варианту выбора дробилки $M_4 = 0,3M_3$; примем $M_{3п} = 0,001M_2$, тогда $M_3 = M_2 + 0,3M_3 – 0,001M_2$, $0,7M_3 = 0,999M_2$, $M_3 = 1,427M_2$, с учетом (1) $M_3 = 1,427 \cdot 0,999M_1 = 1,426M_1$ (2)

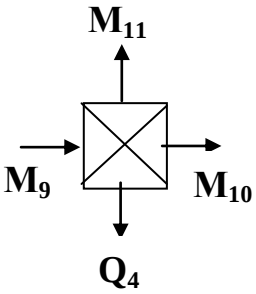
Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
3. Сортировка известняка по крупности; процесс механический: разделение смеси зерен на фракции рассеиванием сквозь сита; аппарат – вибрационный грохот	Зерновой состав известняка, поступающего на грохот: > 100 мм – 30 %; 90 – 100 мм – 8 %; 80 – 90 мм - 8 %; 70 – 80 мм - 7 %; 60 – 70 мм - 10 %; 50 – 60 мм - 9 %; < 50 мм - 28 %		M_4 – количество верхнего отсева, $M_4 = 0{,}3M_3$; M_5 – нижний отсев (отходы), $M_5 = 0{,}28M_3$; M_6 – выход деловой фракции, $M_6 = 0{,}42M_3$; $M_{6п}$ – механические потери при грохочении и транспортировании. *Примечание:* значения M_4, M_5, M_6 приняты по графику зернового состава щебня, выходящего из дробилки. ***Материальный баланс:*** $M_3 = M_6 + M_{6п} + M_4 + M_5$; $M_6 = M_3 – M_{6п} – M_4 – M_5$. С учетом значений M_4 и M_5, а также приняв $M_{6п} = 0{,}002M_3$, получим $M_6 = M_3 – 0{,}002M_3 – 0{,}3M_3 – 0{,}28M_3$ или $M_6 = 0{,}418M_3$, с учетом (2) $M_6 = 0{,}418 \cdot 1{,}426M_1 = 0{,}596M_1$ (3)

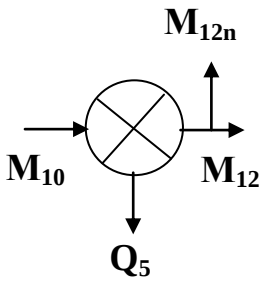
Продолжение прил. 5

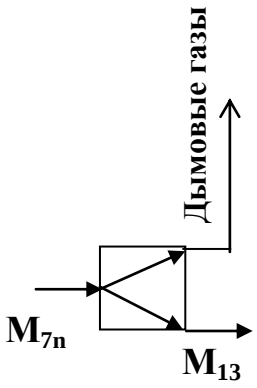
Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
4. Обжиг известняка; аппарат – шахтная печь на газовом топливе; совокупность процессов	Крупность известняка, загружаемого в печь [1]: 50 – 100 мм; фракционный состав: 50 – 60 мм – 21 %; 60 – 70 мм – 24 %; 70 – 80 мм – 17 %; 80 - 90 мм – 19 %; 90 – 100 мм – 19 %		

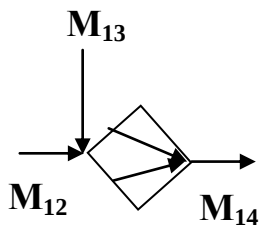
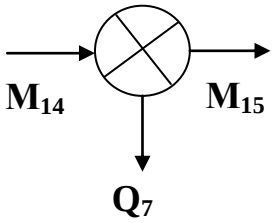
Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
4.1. Тепловой процесс: нагрев известняка до температуры обжига	Температура известняка на входе +10°С; начало разложения известняка при t = 850 °С; температура известняка (извести) в зоне обжига [1] t = 950°С; температура отходящих дымовых газов [4] t = 200 °С		$M_{7п}$ – потери в виде выноса пыли из печи [4]; $M_6 = M_7 + M_{7п}$ или $M_7 = M_6 - M_{7п}$. Примем, что $M_{7п} = 0{,}03M_7$, тогда $M_7 = M_6 - 0{,}03M_7$, с учетом (3) $1{,}03M_7 = 0{,}596M_1$ или $M_7 = 0{,}579M_1$. (4) Q_1 – количество теплоты на нагрев известняка: $Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot \Delta t_1$, где m_1 – масса загружаемого в единицу времени известняка; c_1 – удельная теплоемкость известняка; Δt_1 – интервал температуры нагрева известняка; Q_2 – потери теплоты с отходящими дымовыми газами: $Q_2 = c_2 \cdot m_2 \cdot \Delta t_2$, где m_2 – масса (или объем) отходящих дымовых газов; c_2 – средняя удельная теплоемкость смеси газов по массе (или по объему); Δt_2 – разность температур газов на выходе из печи и на входе в печь (газообразного топлива и воздуха)

Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
4.2. Массообменный процесс: обезвоживание известняка (испарение воды)	Исходная влажность известняка – 5 %, конечная влажность – 0 %		Q_3 – количество теплоты на испарение воды: $Q_3 = c_3 \cdot m_3 \cdot \Delta t_3 + r \cdot m_3$, где m_3 - масса испарившейся воды; c_3 – удельная теплоемкость воды; r – теплота парообразования; $\Delta t_3 = 90\ ^oC$ - температурный интервал нагрева воды до начала испарения (от 10 до 100 ^oC). M_7 – количество известняка, поступающего в зону испаре ния; M_9 –количество обезвоженного известняка; M_8 – количество испаренной воды ($M_8 = m_3$). $M_7 = M_9 + M_8$ или $M_9 = M_7 – M_8$. Так как $M_8 = 0{,}05M_9$, то $M_9 = M_7 – 0{,}05M_9$; $1{,}05M_9 = M_7$; с учетом (4) $1{,}05M_9 = 0{,}579M_1$ или $M_9 = 0{,}551M_1$ (5)

Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
4.3.Химический процесс: декарбонизация известняка, переход известняка в известь	Содержание CaO + MgO в готовом продукте 90 % (известь первого сорта). Этому показателю соответствует степень превращения $\frac{0{,}56 \cdot n \cdot M_9}{0{,}56 \cdot n \cdot M_9 + (1-n) \cdot M_9} = 0{,}9$, n = 0,94		Уравнение реакции: $CaCO_3 \xrightarrow{950^oC} CaO + CO_2 - Q_4$. Массовые доли: $CaCO_3$ – 40 + 12 + 48 = 100 (100 %); CaO – 40 + 16 = 56 (56 %); CO_2 – 12 + 32 = 44 (44 %); Q_4 – затраты теплоты на химическую реакцию, Q_4 = 1782 кДж/кг [1]; M_{10} – количество получаемой извести; M_{11} – количество летучего CO_2 (потери массы). При полном превращении известняка в известь: $M_{10} = 0{,}56M_9$; при степени превращения n: $M_{10} = 0{,}56nM_9 + (1-n)M_9$; при n = 0,94: $M_{10} = 0{,}56 \cdot 0{,}94M_9+(1-0{,}94)M_9=0{,}59M_9$; с учетом (5): $M_{10} = 0{,}59 \cdot 0{,}551M_1 = 0{,}325M_1$ (6)

Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
4.4. Тепловой процесс: охлаждение выходящей извести воздухом	Температура извести на выходе из печи [4] 100 ^{o}C; температура воздуха, подаваемого в печь 10 ^{o}C		M_{12} – количество выходящей из шахтной печи извести; M_{12n}-механические потери извести при транспортировании на склад. $M_{10} = M_{12} + M_{12n}$ или $M_{12} = M_{10} – M_{12n}$. Примем $M_{12n} = 0{,}001M_{12}$, тогда $M_{12} = M_{10} - 0{,}001M_{12n}$; с учетом (6) $1{,}001M_{12} = 0{,}325M_1$ или $M_{12} = 0{,}324M_1$ (7) Q_5 – теплота, уносимая известью: $Q_5 = c_5 \cdot m_5 \cdot \Delta t_5$, где m_5 – масса выгружаемой из печи извести, $m_5 = M_{12} + M_{12n}$; c_5 – удельная теплоемкость извести; Δt_5 – температурный перепад между выгружаемой из печи известью и загружаемым известняком. Общий тепловой баланс печи: $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$, где Q_6 – потери теплоты в окружающую среду через ограждения печного пространства

Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
5. Очистка отходящих из печи газов от пыли; процесс гидродинамический; технологическое оборудование: электрофильтры, циклоны, рукавные фильтры, дымососы (отсасывающие вентиляторы)	Концентрация пыли в выбрасываемом в атмосферу газе не должна превышать 30 мг/м^3, степень очистки отходящих газов – не менее 99 %		M_{13} – количество пыли, осаждаемой в пылеосадительной системе. $M_{7n} = 0{,}03M_7$, с учетом (4) $M_{7n} = 0{,}03 \cdot 0{,}579M_1 = 0{,}0174M_1$. Материальный баланс: $M_{7n} = M_{13}/0{,}99$ или $M_{13} = M_{7n} \cdot 0{,}99 = 0{,}0174M_1 \cdot 0{,}99 = 0{,}0172M_1$ $M_{13} = 0{,}0172M_1$ (8)
6. Складирование извести; технологическое оборудование – бункер извести	Браковочные характеристики извести: содержание активных CaO + MgO ≥ 90 %, скорость гашения 8 - 25 мин, содержание трудно гасимой извести ≤ 7 %, максимальный размер кусков извести 150 мм, плотность в куске 1500 кг/м^3, насыпная плотность 900 кг/м^3		

Технологический передел, процесс и его содержание, аппарат	**Количественные характеристики параметров процесса**	**Операторы**	**Материальные и энергетические потоки, балансы**
6.1. Механический процесс: загрузка извести в складские емкости, выгрузка в транспортные средства с частичным усреднением зернового и химического составов			M_{14} – количество извести на складе. ***Материальный баланс:*** $M_{12} + M_{13} = M_{14}$, с учетом (7; 8) $0{,}324M_1 + 0{,}0172M_1 = M_{14}$ или $M_{14} = 0{,}3412M_1$ (9)
6.2. Тепловой процесс – самопроизвольное остывание извести на складе	Температура извести, отгружаемой в транспортные средства, $t_п \leq 50\ ^oC$		M_{15} – количество извести, отгружаемой потребителям со-склада; Q_7 - потери теплоты известью при остывании. $Q_7 = Q_5$. ***Материальный баланс***: $M_{14} = M_{15}$. Окончательно $M_{15} = 0{,}3412M_1$ (10)

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

РАСЧЕТ ГРУЗОПОТОКОВ
(пример)

Количество известняка, поступающего на склад:

$$M_1 = \frac{M_{14}}{0{,}3412} = \frac{8{,}5}{0{,}3412} = 24{,}92 \quad т/ч.$$

Количество известняка, поступающего в дробилку:

$$M_2+M_4=0{,}991M_1+0{,}3M_3=0{,}991M_1+0{,}3\cdot 1{,}426M_1=$$
$$= 1{,}419M_1=1{,}419\cdot 24{,}92=35{,}36 \ т/ч.$$

Количество известняка, поступающего на грохот:

$$M_3=1{,}426M_1=1{,}426\cdot 24{,}92=35{,}54 \ т/ч.$$

Количество известняка, поступающего в печь:

$$M_6=0{,}596M_1=0{,}596\cdot 24{,}92=14{,}85 \ т/ч.$$

Количество извести, поступающей на склад готовой продукции – 8,5 т/ч.

Проверочный расчет:

$M_1=M_{14}+M_{2n}+M_{3n}+M_5+M_{6n}+M_{7n}+M_8+M_{11}+M_{12n}-M_{13}$;

$M_{3n}=0{,}001M_2=0{,}001\ M_1$;
$M_5=0{,}28M_3=0{,}399\ M_1$;
$M_{6n}=0{,}002M_3=0{,}003\ M_1$;
$M_{7n}=0{,}03M_7=0{,}017\ M_1$;
$M_8=0{,}05M_9=0{,}028\ M_1$;
$M_{11}= M_9 - M_{10} =0{,}551\ M_1 -0{,}325\ M_1= 0{,}226\ M_1$;
$M_{12n}=0{,}001M_{12}=0{,}0003\ M_1$;
$M_1=(0{,}3412+0{,}001+0{,}001+0{,}399+0{,}003+0{,}017+0{,}028+0{,}226+0{,}0003-$
$- 0{,}0172)\ M_1$;
$M_1=0{,}9993\ M_1$.

Расчет выполнен правильно, так как расхождение не превысило 0,5 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБИЛОК

Таблица П.7.1

Технические характеристики щековых дробилок

Тип дробилки	*Размеры приёмного отверстия, мм*	*Наибольший размер загружаемого материала, мм*	*Диапазон регулирования выходной щели, мм*		*Частота вращения эксцентрикового вала, мин$^{-1}$*	*Ход подвижной щеки у разгрузочного отверстия, мм*	*Производительность, м^3/ч*		*Мощность электродвигателя, кВт*	*Масса без электродвигателя, т*	*Габаритные размеры, мм*
			min	*max*			*min*	*max*			
Дробилки с простым движением щеки											
СМД-117А	1500x2100	1300	135	225	124,8	44	310	600	250	257,9	7500x510x5120
СМД-118А	1200x1500	1000	110	190	150	40	175	300	160	195,7	5355x6430x4300
СМД-111А	900x1200	750	95	195	200,4	36	100	180	90	61,5	4980x4450x3300
С-664	400x600	350	40	100	300	38	10	25	28	7,6	1850x1742x1742
СМ-204А	600x900	510	75	200	240-270	30	28	120	80	2,6	3570x240x3000
СМ-221	500x800	430	50	125	225	30	25	60	40	19,2	3420x2330x2150
Дробилки со сложным движением щеки											
СМД-110А	600x900	500	75	130	274,8	12	50	50	100	75	3000x2500x2600
СМД-109А	400x900	340	40	90	289,8	9,5	10	10	40	45	2600x2400x2200
СМД-108А	250x900	210	30	60	289,8	10	7	7	30	45	2300x2400x1900
СМД-116А	250x400	210	20	80	274,8	11	3,5	3,5	12	17	1330x1300x1435
	160x900	130	12	40	210	-	2,5	2,5	8,0	12	1200x1800x1200

Продолжение прил. 7

Таблица П.7.2

Технические характеристики конусных дробилок среднего и мелкого дробления

Тип дробилки	*Диаметр основания дробящего конуса, мм*	*Наибольший размер загружаемых кусков материала, мм*	*Ширина приёмного отверстия, мм*	*Диапазон регулирования выходной щели, мм*		*Частота вращения вала, об/мин*	*Мощность электродвигателя, кВт*	*Производительность, $м^3/ч$*		*Масса, т*	*Габаритные размеры, мм*
				min	*max*			*min*	*max*		
КСД-600А	600	30	40	6	16	350	75	3	13	8,0	2300x1350x2500
КСД-600Б	600	60	75	12	25	370	75	12	25	4,3	1600x1500x1500
КСД-900Б	900	100	115	15	50	350	55	30	55	11,6	2800x2500x2400
КСД-900А	900	60	75	5	20	350	55	8	40	11,6	
КСД-1200Б	1200	150	170	20	50	260	75	70	105	24,0	
КСД-1200А	1200	100	115	8	25	260	75	30	35	24,0	
КСД-1750Б	1750	225	250	25	60	245	160	160	300	47,0	

Окончание табл. П.7.2

Тип дробилки	*Диаметр основания дробящего конуса, мм*	*Наибольший размер загружаемых кусков материала, мм*	*Ширина приёмного отверстия, мм*	*Диапазон регулирования выходной щели, мм*		*Частота вращения вала, об/мин*	*Мощность электродвигателя, кВт*	*Производительность, $м^3/ч$*		*Масса, т*	*Габаритные размеры, мм*
				min	*max*			*min*	*max*		
КСД-1750А	1750	190	215	10	30	245	160	60	100	47,0	
КСД-2200Б	2200	300	350	30	60	224	280	340	580	85,0	
КСД-2500Б	2500	380	450	45	70	200	2x280	620	810	--	
КСД-2200А	2200	250	275	10	30	225	280	120	340	85,0	
КСД-3000А	3000	400	475	15	40	--	--	275	700	--	
КМД-1200	1200	35	45	3	13	260	75	12	55	24	3300x2600x3500
КМД-1750	1750	85	100	5	15	245	160	40	120	47	3850x3050x4400

Таблица П.7.3

Технические характеристики молотковых дробилок

Характеристики	*Однороторные*					*Двухроторные*
	СМД-97 А	*СМ-170 В*	*СМД-147*	*СМД-112*	*СМ-19А*	*СМД-114*
Размеры ротора, мм: диаметр длина	 2000 2000	 1300 1600	 800 600	 600 400	 800 600	 1000 800
Частота вращения ротора, мин$^{-1}$	600	735	1000	1250	1300	1000
Размер загружаемых кусков, мм	до 600	до 300	250	150	до 100	300
Крупность дроблёного продукта, мм	до 15	0…20	0…13	0…30	0…15	0…25
Производительность, т/ч (по известняку)	до 670	210	10…14	22	до 27	35…45
Мощность электродвигателя, кВт	800	260	55	18,5	2х75	115
Масса дробилки (без электродвигателя), кг	46000	11000	2110	1100	6000	5500

Таблица П.7.4

Технические характеристики молотковых дробилок для измельчения влажных материалов

Характеристики	*Самоочищающиеся*		*С подсушкой*
	ДМПП-1	*СМД-102*	*СМЦ-209*
Размеры ротора, мм: диаметр длина	 1200 1000	 2000 2000	 1600 1650
Размер загружаемых кусков материала, мм	400	600	300
Размер куска материала после измельчения, мм	0…50	0…100	0…40
Частота вращения ротора, мин$^{-1}$	735	600	500
Производительность, т/ч	250	600	100
Мощность электродвигателя, кВт	160	800	150
Масса дробилки, т	25	62	55

Окончание прил. 7
Таблица П.7.5

Технические характеристики зубчатых валковых дробилок

Характеристики	*Численные показатели по маркам машин*					
	ДДЗ-4	*ДДЗ-6*	*ДДЗ-10*	*ДДЗ-16*	*ДДЗ-9х9*	*ДДЗ-15х12*
Размеры валков (LxD), мм	450х500	630х800	1000х1250	1600х2000	900х900	1500х1200
Частота вращения валков, мин$^{-1}$	64	50	36	41	42	40
Максимальная крупность кусков питания, мм	300	600	1000	1300	360	900
Максимальная крупность дроблёного продукта, мм	100	125	200	300	100	150
Ориентированная производительность, т/ч	50	125	320	1000	120	150
Мощность электродвигателя, кВт	11	20	50	320	40	75
Масса дробилки без электрооборудования, т	3,1	5,2	--	124	13,3	32

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРОДУКТОВ ДРОБЛЕНИЯ В ЩЕКОВЫХ И КОНУСНЫХ ДРОБИЛКАХ

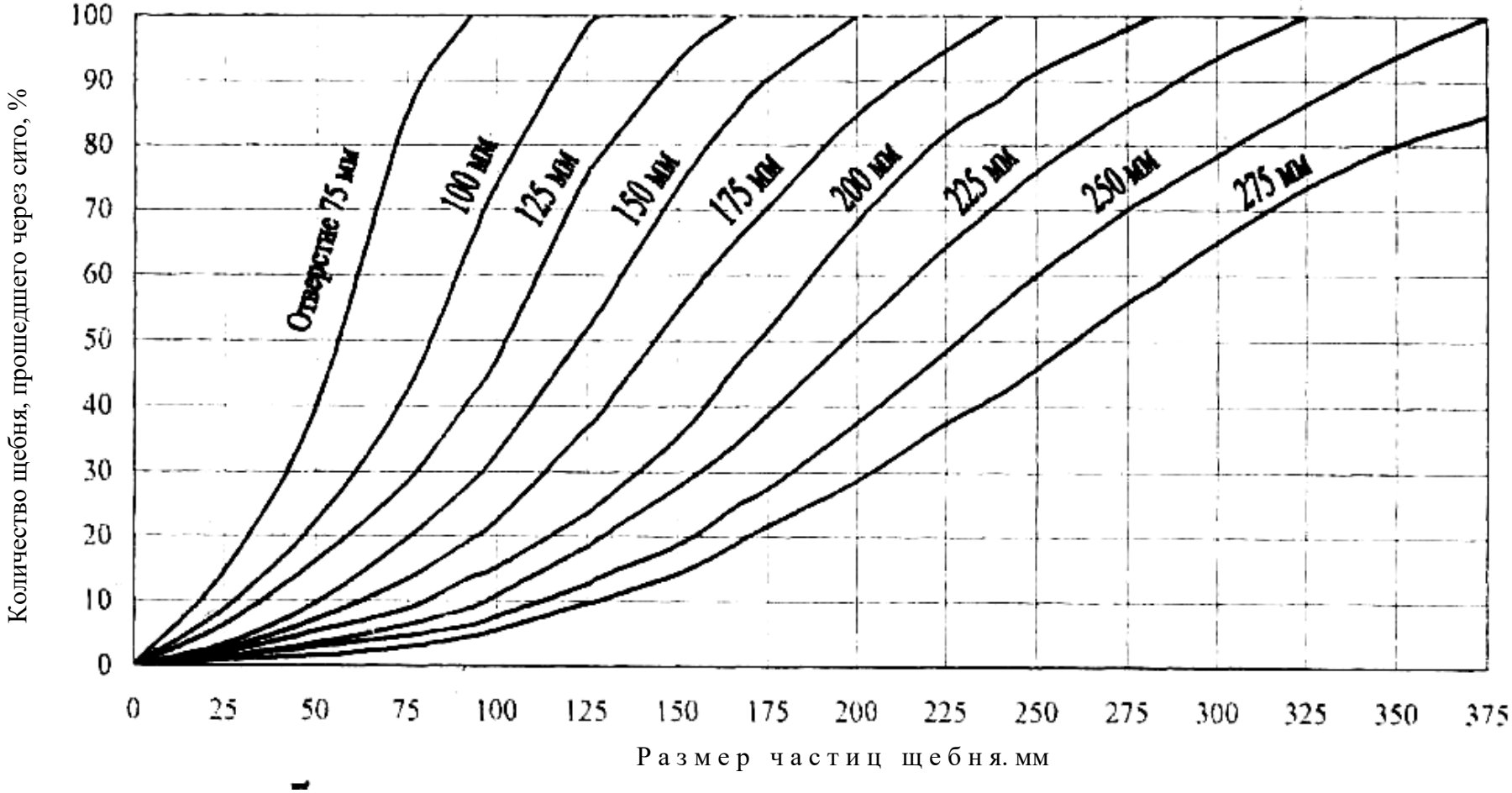


Рис. П.8.1. График гранулометрического состава продуктов дробления в щековых и конусных дробилках крупного дробления

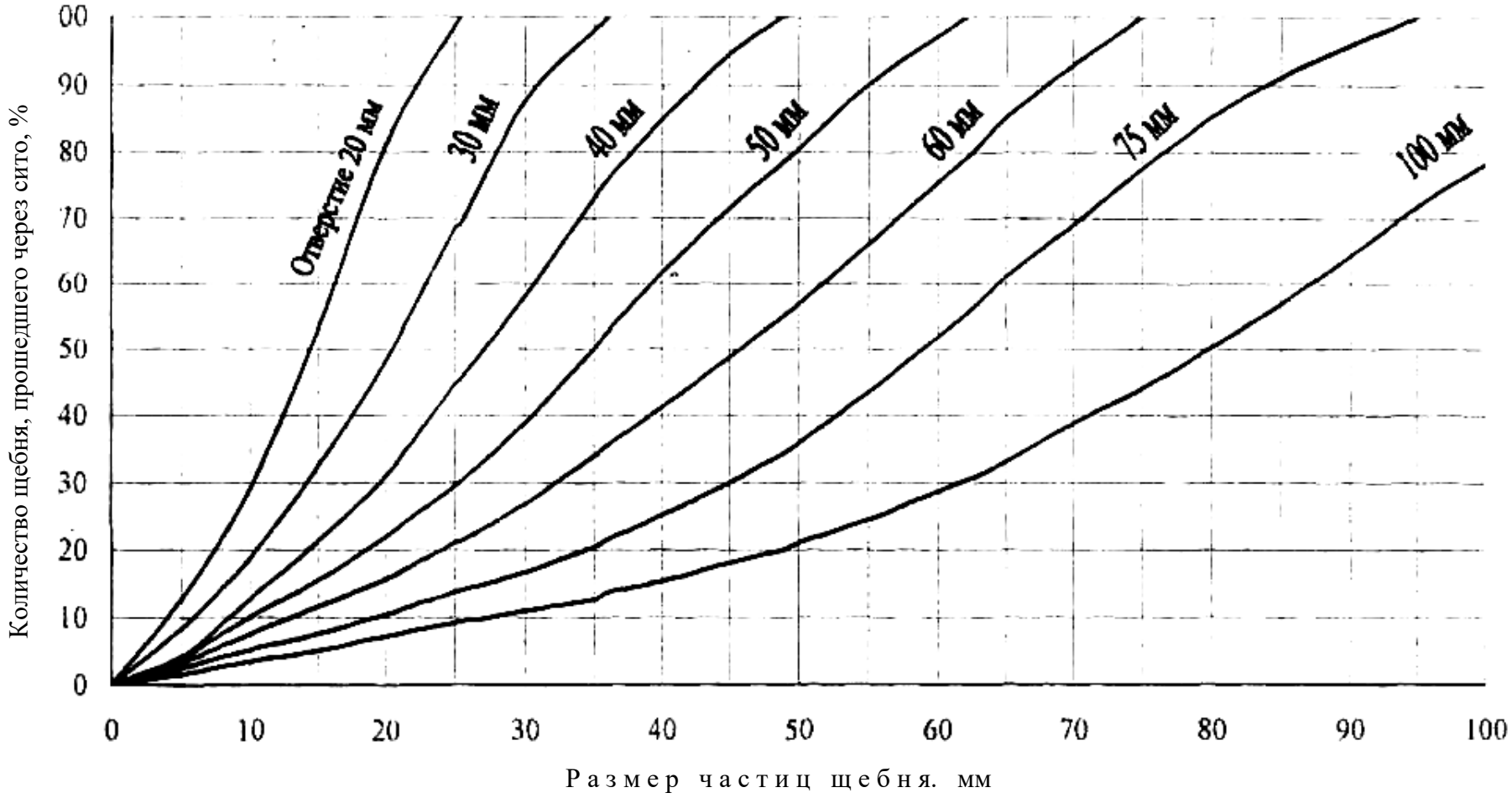


Рис. П. 8.2. График гранулометрического состава продуктов дробления в щековых дробилках малых размеров

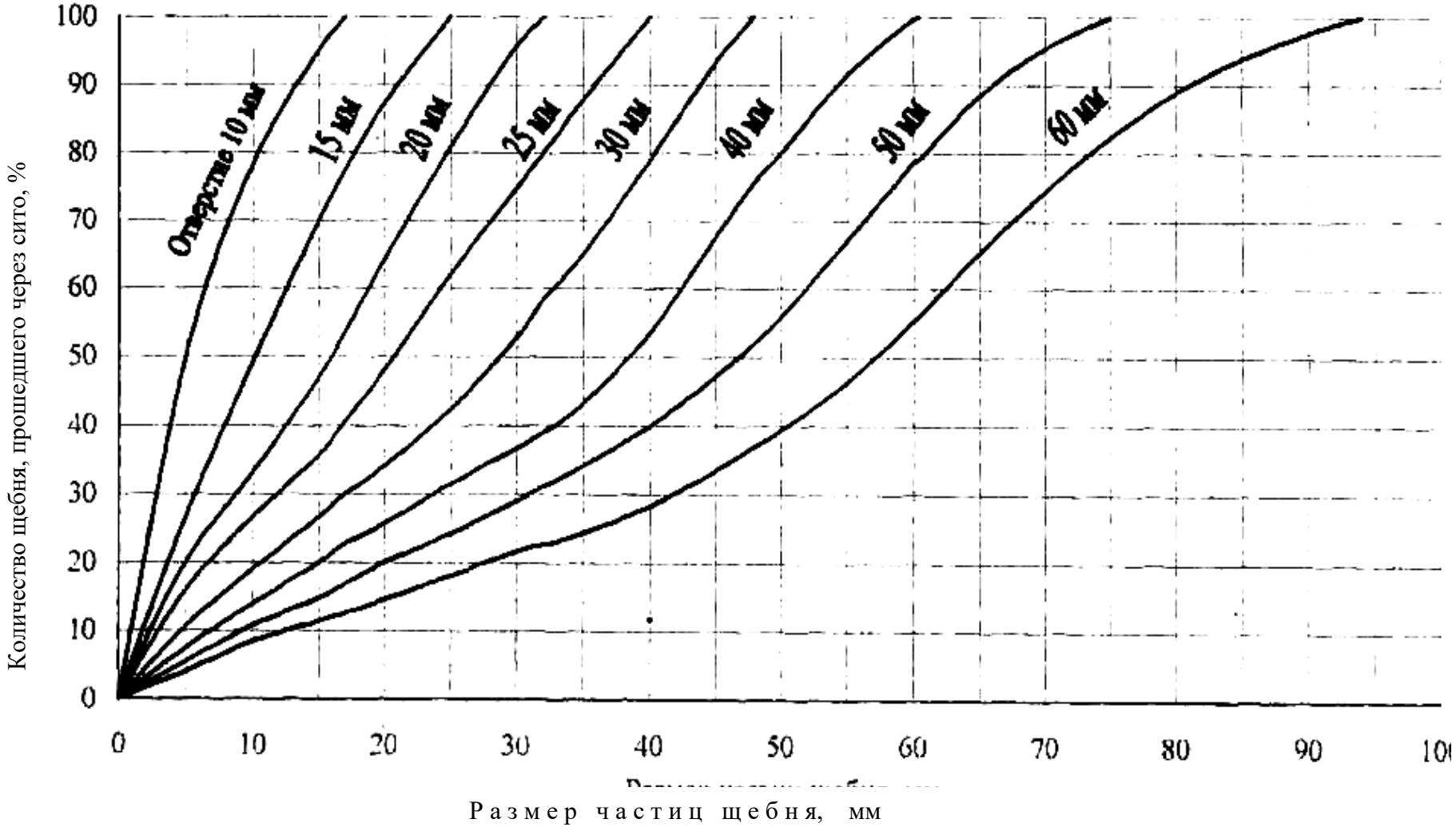


Рис. П. 8.3. График гранулометрического состава продуктов дробления в конусных дробилках среднего дробления

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Технические характеристики пластинчатых питателей

Показатели	*СМ-97В*	*СМ-59В*	*С-640*	*С-641*	*С-704*	*Новокраматорский машиностроительный завод*	
	к дробилкам с размером загрузочного отверстия, мм						
	400х600 500х800	*600х900 500х800*	*600х900 900х1200*	*500х800 600х900*	*600х900 900х1200*	*900х1200 600х900*	*900х1200 600х900*
Производительность, $м^3$ /ч, при горизонтальном положении (в зависимости от скорости)	28;35; 44,6;54	81;103; 127; 158	110-225	33-66,5	93-270	120	120
Ширина ленты, мм	800	1000	1000	800	1200	1200	1200
Длина ленты, мм	6000-7000	3000	6000	9000	4500	10000	6000
Угол наклона ленты, град.	0-25	0-15	--	--	15	0-15	0-15
Мощность эл. двигателя, кВт	4,5	4,5	5,3	5,3	20	13	29
Частота вращения, $мин^{-1}$	1440	1440	950	950	1440	1440	1440
Масса питателя, т	8,4	5,8	4,4	6,8	12,2	39,5	63,2
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	 7120 2700 1300	 4120 2800 1400	 4180 3120 1100	 7060 2930 1055	 10110 4000 1400	 7076 5142 2346	 12576 5522 2346

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Технические характеристики инерционных грохотов лёгкого, среднего и тяжёлого типов

Параметры	*Численные показатели по маркам грохотов*								
	ГИЛ-32	*ГИЛ-42*	*ГИЛ-43*	*С-740 (ГИС-32)*	*С-784 (ГИС-42)*	*С-785 (ГИС-52)*	*С-724 (ГИС-32)*	*СМ-690 (ГИТ-41)*	*172 ГР (ГИТ-42)*
Размеры просеивающей поверхности, мм: ширина длина	1230 2500	1500 3750	1500 3750	1250 3000	1500 3750	1750 4500	1250 2500	1500 3000	1500 3000
Площадь одного сита, м²	3,125	5,625	5,625	3,745	5,625	7,875	3,125	4,495	4,495
Количество сит	2	2	3	2	2	2	1	1	2
Размеры квадратных ячеек сит, мм: верхнего нижнего	50 6,8,10,13 20,25	50 6,8,10, 13,20, 25	50 6,8,10, 13,20, 25	40x40 12x12	40x40 12x12	40x40 12x12	Колос- ник.	Колос-ник.	80x80 12x12
Максимальная крупность кусков исходного материала, мм	100	До 150	До 200	100	До 150	До 150	750	1000	До 2000

Окончание прил. 10

Параметры	*Численные показатели по маркам грохотов*								
	ГИЛ-32	*ГИЛ-42*	*ГИЛ-43*	*С-740 (ГИС-32)*	*С-784 (ГИС-42)*	*С-785 (ГИС-52)*	*С-724 (ГИС-32)*	*СМ-690 (ГИТ-41)*	*172 ГР (ГИТ-42)*
Угол наклона короба, град.	10-15	20-25	10-25	15-33	10-25	10-25	15-30	15-30	25
Ориентировочная производительность, т/ч	до 100	180	170	200	-	-	до 350	до 450	400
Амплитуда колебаний короба, мм	2,5	3;3,5	2,5;3	3	4,5	3,7	3	3	4
Частота вращения вала вибратора, мин$^{-1}$	1150	900; 1000	900; 1000	1170	900	900	800	800	750
Мощность электродвигателя, кВт	4	10	10	7,5	10	10	10	13	-
Масса грохота, кг	1500	3055	3800	2150	3250	3700	3000	5100	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

К ВЫБОРУ РАСЧЕТА МЕЛЬНИЦ

Таблица П.11.1

Технические характеристики шаровых мельниц

Характеристики	*Сухое измельчение*			*Мокрое измельчение*		
	900x1800	*1500x1600*	*1500x5600*	*МШР 1500x1600*	*МШР 2100x3000*	*МШР 2700x3600*
Внутренний диаметр барабана, мм	900	1500	1500	1500	2100	2700
Длина барабана, мм	1800	1600	5600	1600	3000	3600
Рабочий объём барабана, м³	1,0	2,2	8,0	2,3	8,8	18
Частота вращения барабана, мин⁻¹	42	30	29	30	24,4	21
Количество камер	1	1	2	1	1	1
Ориентировочная производительность, т/ч (по извести)	1,5	6,0	6…7	--	--	--
Масса шаровой загрузки, т	1,6	3,0	11,0	4,8	18,3	37
Мощность электродвигателя, кВт	20	55	125	55	200	400
Габаритные размеры в сборе, мм: длина ширина высота	5120 1400 1430	7270 2215 2280		4900 3100 2500	8900 4800 380	9700 6400 5050
Масса мельницы (без двигателя и шаров), т	3,7	14,9	37	16,5	45,5	78

Продолжение прил. 11

Таблица П.11.2

Технические характеристики трубных многокамерных мельниц

Характеристики	*2,0x10,5*	*2,6x13*	*3,2x8,5*	*3,2x15*	*4,0x13,5*	*4,2x10,0*
Производительность, т/ч	10-56	26-120	36-105	50	75-100	130
Диаметр барабана, мм	2000	2600	3200	3200	4000	4200
Длина барабана, мм	10500	13000	8500	15000	13500	10000
Количество камер	4	4	2	3	2	2
Частота вращения барабана, $мин^{-1}$	21	16	18,8	16,3	16,2	16,53
Масса мелющих тел, т	32	70	85	140	226	140
Мощность электродвигателя, кВт	350	820	1250	2000	3200	2000
Масса мельницы (без привода и шаров), т	69	137	215	356	486	330

Примечания.

1. Мельница (4,2x10 м) предназначена для помола сырья с одновременной его подсушкой при работе по замкнутому циклу с проходным сепаратором.

2. Мельница (3,2x8,5 м) выпускается в двух вариантах:

1) для мокрого помола мягкого сырья по открытому и замкнутому циклам; 2) для помола сырьевых материалов с подсушкой в замкнутом цикле с проходным сепаратором при загрузке крупки на домол во вторую камеру через вторую опорную цапфу.

3. Мельница (3,2x15 м) применяется для мокрого помола сырья и клинкера в открытом цикле; для помола клинкера по замкнутому циклу с центробежным сепаратором с промежуточным разгрузочно-загрузочным устройством после первой помольной камеры.

4. Мельницы (4x13,5 м), (2,6x13 м) и (2x10,5 м) применяются как для мокрого, так и для сухого способов помола.

Таблица П.11.3

Технические характеристики сепараторов

Характеристики	*Проходные*				*Центробежные*			
Диаметр, м	2,5	2,85	3,42	3,6	2,8	3,5	4,0	6,8
Высота, м	4,18	4,65	5,35	3,8	5,0	5,3	5,8	8,18
Частота вращения, $мин^{-1}$	-	-	-	-	2,55	200	180	-
Производительность при 10-процентном остатке на сите № 008, $м^3/ч$	-	-	-	-	17	28	45	90
Пропускная способность, $м^3/ч$	22500	30000	43500	84000	-	-	-	-
Потребляемая мощность, кВт	-	-	-	-	16	26	27	228
Масса, *т*	2,49	3,25	5,0	6,3	7,2	10,8	13,4	-

Таблица П.11.4

Технические характеристики дуговых грохотов

Характеристики	*СД-1*	*СД-2А*	*СД03*	*299ГрА*
Размеры решётки, мм: ширина длина	1100 865	1170 1730	1200 2500	720 1200
Радиус кривизны, мм	550	550	800	2290
Центральный угол, гр.	90	180	180	30
Размер щели решётки, мм	0,5-3	0,5-2	0,5	0,01-1,0
Щель питающего патрубка (регулируемая), мм	10-30	0-30	90-140	-
Скорость пульпы на выходе из питающей щели, м/с	до 4	4,5-9	4,5-6	1-2
Производительность по питанию, $м^3/ч$	до 200	300-400	450-500	20-60
Габаритные размеры, м длина ширина высота	 0,8 1,3 2,6	 1,4 1,3 2,6	 1,9 1,5 2,6	 0,9 1,5 1,35
Масса, кг	290	508	836	560

Таблица П.11.5

Технические характеристики шахтных мельниц

Характеристики	*Тип мельницы*					
	ШМА 800x391	*ШМА 1000x470*	*ШМА 1000x707*	*ШМА 1500x944*	*ШМА 1500x1230*	*ШМА 1500x1655*
Диаметр ротора, м	0,8	1,0	1,0	1,3	1,5	1,5
Длина ротора, м	0,391	0,470	0,707	0,944		1,655
Частота вращения ротора, $с^{-1}$	16	16	16	12,1	12,1	12,1
Количество бил: по окружности по длине	 3 5	 4 6	 4 9	 4 12	 6 15	 6 21
Крупность исходного материала, мм	0-20	0-20	0-20	0-20	0-20	0-20
Производительность, при остатке на сите № 009 – 60 % (по углю), *т*/ч	2,75-3,4	4,15-5,1	6,25-7,7	10,8-13,2	15,6-19,5	22-27
Мощность электродвигателя, кВт	30	45	75	125	175	250
Габаритные размеры, м: длина ширина высота	 0,91 1,505 0,855	 1,12 1,675 1,09	 1,12 1,915 1,09	 1,42 2,324 1,4	 1,62 2,63 1,6	 1,624 3,408 1,6
Масса без электродвигателя, *т*	2,1	2,7	3,1	5,11	7,6	9,9

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЖИГОВЫХ АППАРАТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Таблица П.12.1

Техническая характеристика гипсоварочных котлов

Характеристики	Емкость котла, $м^3$		
	2,5	3,5	15
Продолжительность варки, мин	80…90	80…90	80…90
Продолжительность загрузки котла гипсовым сырьем, мин	15	15	15
Продолжительность выгрузки котла, мин	4	4	6
Общий цикл варки гипса, мин	100-110	100-110	100-115
Температура варки гипса, ^0C	150…170	150…170	150…170
Число оборотов мешалки, $мин^{-1}$	18	18	18
Мощность электродвигателя привода мешалки, кВт	3	4,5	19
Максимальная температура в топке котла, ^0C	900…1000	900…1000	900…1000
Расход условного топлива на 1 кг гипса, кг	54	54	50…52

Таблица П.12.2

Технические характеристики шахтных печей

Характеристики	Производительность, т/сутки			
	50	100	200	450
Высота печи, м:				
рабочая	18,2	17,0	19,0	24,0
строительная	27,2	30,0	34,6	45,0
Внутренний диаметр шахты, м	2,5	3,2	4,3	6,13
Полезный объем шахты, $м^3$	89	127	265	666
Съем с 1 $м^3$ полезного объема, $т/м^3$ в сутки	0,56	0,785	0,75	0,676
Расход условного топлива, кг/т	133	152,5	133	129
Удельный расход электроэнергии, $кВт·ч/м^3$	16	15	13	10
Температура, ^{0}С:				
отходящих газов	120	145	120	110
выгружаемой извести	80	80	80	80

Таблица П.12.3

Техническая характеристика коротких вращающихся печей с запечными теплообменниками

Характеристики	Размеры печи (D x L), м			
	4x70	3,6x70	3,6x7,5	2,7x52,6
Вид обжигаемого сырья	Известняк			
Производительность, т/ч (по извести)	15	16	13,5	7,5
Частота вращения корпуса, $мин^{-1}$	1,1	1,0	1,0	1,0
Содержание активных CaO+MgO в извести, %	85	90	90	80
Удельный расход сырья с учетом пылеуноса, кг/кг	2	2	2,08	2,17
Вид топлива	Мазут	Природный газ	Природный газ	Мазут
Тип теплообменника	Конвейерная решетка 3,9x25	Шахтный	Два котла утилизатора КУ-80-3	Конвейерная решетка 3,x10,5
Температура подогрева сырья в теплообменнике, ^0C	700	800	-	400
Температура газов на выходе из теплообменника, ^0C	370	300	200	200
Тип холодильника	Однобарабанный 3,6 x 38 м	Шахтный	Колосниковый «Волга» 25СН40	Однобарабанный 1,8 x 20,7 м
Температура извести на выходе из холодильника, ^0C	100	70	70	240

Таблица П.12.4

Техническая характеристика длинных вращающихся печей для обжига извести

Характеристики	Мокрый способ			Сухой способ		
	4,5х170м	3,6х110м	2,5х75м	4х150м	3,6х81м	2,7х65,6м
Вид обжигаемого сырья	Меловой шлам			Мел		
Влажность, %	37	40	45	10	24..30	22..26
Размер кусков, мм	-	-	-	5..20	5..20	5..20
Производительность, т/ч	31,8	13,5	5,9	20..40 24	20…40 11,5	20..40 4,9
Частота вращения корпуса, мин$^{-1}$	0,7..1,4	0,25-1,17	0,5..1,2	0,57-1,14	0,65-1,34	0,5-1,17
Удельный расход сухого сырья с учетом пылеуноса, кг/кг	1,86	1,8	1,74	1,92	1,96	1,95
Пылеунос, %	8	5	8	10	15	12
Вид топлива	Природный газ	Природный газ	Природный газ	Мазут	Природный газ	Природный газ
Содержание в извести активных CaO+MgO, %	90	80	70	90	85	80
Температура извести на выходе из холодильника, ^{0}C	50	50	120	150	120	150
Тип холодильника	Колосниковый (Волга-350)	Однобарабанный 2,5 х 38 м	Рекуператорный, 12 барабанов 0,8 х 4,4 м	Однобарабанный 3,6 х 56 м	Рекуператорный, 10 барабанов 1,25 х 6 м	Рекуператорный, 12 барабанов 0,88 х 4,7 м

Таблица П.12.5

Технические характеристики печей кипящего слоя

Характеристики	Производительность, т/сутки		
	200	400	1000
Рабочие размеры шахты в зоне обжига, м:			
диаметр (в свету)	2,75	3,93	4,554
высота	4,0	11,3	7,7
Полезный объем печи, $м^3$	62	242	2,85
Удельный съем извести, т/ $м^3$ в сутки	3,23	1,65	3,5
Содержание в извести активных CaO+MgO, %	88	85	90
Вид сырья	Известняк	Доломит	Известняк
Размеры кусков, мм	3..12	2,5..10	12..25
Влажность сырья, %	2,0	4,0	2,0
Удельный расход сырья с учетом пылеуноса, кг/кг	2,1	2,04	2,0
Температура, ^{0}C:			
отходящих газов	470	400	450
выгружаемой извести	80	120	102

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕВАТОРОВ

Таблица П.13.1

Типоразмеры и основные параметры ленточных элеваторов

Типо-раз-меры	Спо-соб раз-грузки	Располо-жение ковшей	Тип ковшей	Шири-на ковшей, мм	Ем-кость ковшей, л	Шаг ковшей, мм	Скорость движения, м/с	Произво-ди-тель-ность, $м^3/ч$	Ширина ленты, мм	Длина приводно-го бараба-на, мм
ЭЛГ-135	Цен-тро-беж-но-само-теч-ный	С рас-став-ленными ковшами	Глубо-кие с цилин-дри-ческим днищем	135	0,75	200	1,0-1,6	3,5	150	165
ЭЛГ-160				160	1,1	300		8,13	200	250
ЭЛГ-200				200	2,0	300		14,23	250	300
ЭЛГ-250				250	3,2	400		17,28	300	350
ЭЛГ-350				350	7,3	500		30,34	400	450
ЭЛГ-450				450	14,5	600		52,84	500	550
ЭЛМ-160			Мелкие с ци-линдри-ческим днищем	160	0,65	300	1,0-1,6	3-5	200	250
ЭЛМ-200				200	1,1	300		5-8	250	300
ЭЛМ-250				250	2,6	400		9-15	300	350
ЭЛМ-350				350	7,0	500		20-32	400	450
ЭЛМ-450				450	15,0	600		38-58	500	550
ЭЛО-160	Само-теч-ный	С сомк-ну-тыми ковшами	Остро-уголь-ные с борто-выми направ-ляю-щими	160	1,5	160	0,4-0,63	5-8	200	250
ЭЛО-250				250	3,6	200		9-14	300	350
ЭЛО-350				350	7,8	250		15-22	400	450
ЭЛО-450				450	16,3	320		26-40	500	550
ЭЛО-600				600	34,4	400		43-87	650	700

Таблица П.13. 2

Типоразмеры и основные параметры цепных элеваторов

Типо-раз-меры	Способ раз-грузки	Располо-жение ковшей	Тип ковшей	Ширина ковша, мм	Ем-кость ковша, л	Шаг ковша, мм	Ско-рость движе-ния, м/с	Произ-води-тель-ность, $м^3/ч$	Шаг цепи, мм
Одноцепные	Центробежно-самотечные	С расстав-ленными ковшами	Глубокие с ци-линдрическим днищем						
ЭЦГ-160				160	1,1	300		6-10	100
ЭЦГ-200				200	2,0	300	0,8-1,25	12-13	100
ЭЦГ-250				250	3,2	400		22-34	100-125
ЭЦГ-350				350	7,8	500		38-60	125-250
ЭЦМ-160			Мелкие с ци-линдрическим днищем	160	0,65	300		5-7	100
ЭЦМ-200				200	1,1	300	0,8-1,25	6-10	100
ЭЦМ-250				250	2,6	400		12-18	100-125
ЭЦМ-350				350	7,0	500		23-36	125-250
ЭЦО-160	Самотечный	С сомкну-тыми ков-шами	Остроугольный с бортовыми направляю-щими	160	1,5	160		7-10	100
ЭЦО-250				250	3,6	200	0,32-0,5	12-20	200
ЭЦО-350				350	7,8	250		15-24	250
Двухцепные									
Э2ЦО-450				450	16,0	320		25-38	160-320
Э2ЦО-600				600	34,0	400		39-61	200-400
Э2ЦО-750				750	67,0	500	0,32-0,5	62-96	250-500
Э2ЦО-900				900	130,0	630		100-160	630

РАСЧЕТ АППАРАТОВ

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение к учебному пособию по расчетам аппаратов …… 231
1. Содержание и общая последовательность технологического расчета аппарата 232
2. Расчет сушильных аппаратов 234
2.1. Выбор типа сушильного аппарата и последовательность расчета 234
2.2. Исходные данные для расчета 235
2.3. Материальный баланс сушилки 236
2.4. Расчет процесса горения топлива и параметров продуктов горения на входе в сушилку 236
2.5. Представление процесса сушки на *I-x*-диаграмме, определение параметров продуктов горения на выходе из сушилки, определение расходов сушильного агента и топлива 244
2.6. Расчет барабанной сушилки 251
2.6.1. Устройство барабанной сушилки 251
2.6.2. Содержание расчета 252
2.6.3. Определение интенсивности процесса сушки и объема сушильного барабана 252
2.6.4. Определение геометрических размеров барабана и выбор серийной марки оборудования 258
2.7. Выбор и расчет вспомогательных устройств 260
2.7.1. Выбор и расчет циклонов и фильтров 260
2.7.2. Расчет и выбор тягового вентилятора (дымососа) 266
2.8. Расчет аппарата барабанного типа для получения β-полуводного гипса 267
2.8.1. Общие указания к расчету 267
2.8.2. Материальный баланс процессов сушки и дегидратации 268
2.8.3. Представление процессов сушки и дегидратации гипса на *I-x*-диаграмме. Определение параметров продуктов горения на выходе из сушильного барабана, определение расходов сушильного агента и топлива 268
2.8.4. Определение интенсивности процесса сушки и объема сушильного барабана 269
2.9. Расчет сушилок с кипящим слоем 269
2.9.1. Общие указания 269
2.9.2. Содержание расчета 271
2.9.3. Определение рабочей скорости сушильного агента в слое зернистого материала 272
2.9.4. Определение диаметра решетки, параметров отверстий в решетке, высоты кипящего слоя, высоты сепарационного пространства, высоты сушилки 277

2.9.5. Расчет гидравлического сопротивления сушилки с кипящим слоем 282
3. Расчет обжиговых аппаратов для получения вяжущих веществ 283
3.1. Общие указания 283
3.2. Расчет вращающейся печи для обжига извести 283
3.2.1. Исходные данные для расчета 285
3.2.2. Расчет процесса горения топлива 287
3.2.3. Материальный баланс печи 287
3.2.4. Тепловой баланс печи (на 1 кг извести) и расход топлива . . . 291
3.2.5. Расчет температуры теплоносителя и построение графика распределения температуры по длине печи 294
3.2.6. Расчет основных размеров вращающейся печи 306
3.2.7. Выбор и расчет вспомогательных устройств 314
3.3. Примерная методика расчета шахтных печей для получения извести и магнезиального (магнезиально-доломитового) вяжущего 321
3.3.1. Исходные данные для расчета 327
3.3.2. Расчет процесса горения топлива 327
3.3.3. Материальный баланс печи 327
3.3.4. Тепловой баланс печи (на 1 кг извести) и расход топлива . . . 327
3.3.5. Расчет времени пребывания материала в печи 327
3.3.6. Расчет конструктивных размеров печи 333
3.3.7. Аэродинамический расчет печи, расчет и выбор дымососа, циклона 334
Библиографический список 341
Приложения к учебному пособию по расчетам аппаратов
Приложение 1. Опытные данные по сушке некоторых материалов в барабанных сушилках 342
Приложение 2. Состав природных горючих газов 343
Приложение 3. Удельные теплоемкости газов при различных температурах 344
Приложение 4. Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры 345
Приложение 5. Технические характеристики сушильных барабанов . 346
Приложение 6. Технические характеристики фильтров типа ФВ . . . 347
Приложение 7.Производительность циклонов типа ЦН 348
Приложение 8. Концентрация, гранулометрический состав пыли отходящих газов из печей, сушильных барабанов, мельниц 349
Приложение 9. Парциальные коэффициенты очистки газа для циклона ЦН-15 диаметром 600 мм 350
Приложение 10. График для пересчета коэффициента очистки газов на другой диаметр циклона 350

Приложение 11. Дымососы одностороннего всасывания серии Д-0,7-37 351
Приложение 12. Характеристики установки с кипящим слоем для сушки формовочного песка по типовому проекту института «Теплопроект» 352
Приложение 13. К расчету сушилки с кипящим слоем 353
Приложение 14. Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости газов 354
Приложение 15. Ориентировочные данные о работе печей промышленности вяжущих веществ 355
Приложение 16. Распределение по длине барабана печи температуры и содержания активных *CaO+MgO* в извести при обжиге мелового сырья 357
Приложение 17. Извлечения из общесоюзных норм технологического проектирования предприятий по производству извести – ОНТП-10-85 358
Приложение 18. Технические характеристики дымососов для вращающихся печей 377
Приложение 19. Характеристика аэрозолей печей и мельниц 378
Приложение 20. Электрофильтр горизонтальный двухсекционный трехпольный ДГП-55-3 380
Приложение 21. Характеристики электрофильтров, применяемых для очистки газов клинкерообжигательных печей . . . 382
Приложение 22. Размеры циклонов типа ЦН 383

ВВЕДЕНИЕ
К УЧЕБНОМУ ПОСОБИЮ ПО РАСЧЕТАМ АППАРАТОВ

Курсовой проект по дисциплине «Процессы и аппараты технологии строительных материалов и изделий» занимает важное место в общем цикле инженерной подготовки, обеспечивая возможность целенаправленного применения теоретических знаний в практических расчетах, в решении производственных задач.

Содержание этого проекта может быть существенно различным в зависимости от сложившихся в каждом вузе научных и учебных традиций, состава ведущих преподавателей, контингента студентов и др. Но общими для проекта должны быть два момента: глубокий анализ технологических процессов на конкретной технологической линии и расчет на уровне технологических параметров одного или нескольких аппаратов из этой линии. Соответственно и курсовой проект разделяется как бы на две части. Первая часть, касающаяся общих принципов построения и анализа технологии, методически может быть представлена достаточно компактно вне зависимости от конкретного содержания технологии. Вторая же часть не может обойтись указаниями общего вида, так как каждый отдельный аппарат имеет определенную специфику анализа и расчета. В связи с этим представляется оправданным выделить методику расчетов аппаратов в самостоятельное учебное пособие, освободив тем самым основные методические указания по выполнению проекта от излишней громоздкости.

Тематическая направленность предлагаемого учебного пособия во многом предопределена организационными особенностями учебного процесса, реализуемыми с участием автора в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете. Особенности связаны с тем, что курсовой проект по «Процессам и аппаратам…» выполняется в комплексе с курсовыми проектами по дисциплинам «Вяжущие вещества» и «Механическое оборудование». Соответственно темой проекта может быть только технология одного из видов вяжущего, а аппаратом для расчетов – сушильное или обжиговое оборудование со вспомогательными устройствами, так как оборудование чисто механического действия (дробильное, помольное, транспортное и т.п.) является предметом анализа и расчетов третьей части комплексного проекта.

Содержание и методика расчетов, представленных в учебном пособии, ориентированы на то, чтобы в курсовом проекте нашли по возможности максимальное применение основные уравнения и формулы, касающиеся закономерностей протекания гидродинамических, тепло-и массообменных, химических процессов, составляющих теоретическую основу курса «Процессы и аппараты…». При этом материал пособия построен по нисходящему принципу: сначала для аппаратов определенной группы излагаются общие принципы расчета и приводятся соответствующие расчетные зависимости, в последующих разделах по каждому виду аппаратов приводятся лишь допол-

нительные указания. Такой принцип позволил существенно уменьшить объем пособия, устранить повторы.

Приведенные методики расчетов сопровождаются многочисленными примерами, что должно существенно облегчить работу студента над проектом.

Сведения, представленные в учебном пособии, настолько универсальны, что обеспечивают достаточно широкую тематику заданий по расчетам аппаратов, прежде всего, за счет расширения номенклатуры вяжущих. Например, изложенная методика расчета обжиговых аппаратов для извести с небольшими изменениями может быть применена в расчетах обжиговых аппаратов для получения гипсовых, магнезиальных и других вяжущих. Также для весьма широкого спектра материалов может быть использована методика расчета сушилок. Методика аэродинамических расчетов и выбора вспомогательного оборудования в пособии рассмотрена в прикладном аспекте (в составе расчетов сушильных и обжиговых аппаратов). Вместе с тем, она может быть применена и самостоятельно, например, для расчета процесса аспирации помольных установок и т.п.

Автор счел необходимым сопроводить учебное пособие значительным объемом справочного материала (приведенного в Приложениях), учитывая то, что поиск такого материала иногда занимает большую часть времени, затрачиваемого студентом на выполнение расчетов.

Материалы учебного пособия прошли предварительную проверку в учебном процессе. По его содержанию и оформлению со стороны преподавателей и студентов поступил ряд замечаний и предложений, которые в основном учтены.

В заключение автор выражает благодарность преподавателям и сотрудникам кафедры технологии строительных изделий и конструкций Воронежского государственного архитектурно-строительного университета за их помощь в работе над учебным пособием.

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЩАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА АППАРАТА

Технологический расчет предусматривает определение физических и геометрических параметров, обеспечивающих заданные производительность аппарата и качество получаемого продукта при минимальных затратах сырья и энергии. К физическим параметрам можно отнести температуру, влажность и давление в аппарате, скорости перемещения рабочих органов, скорости газовых и жидкостных потоков, концентрации веществ и др. К геометрическим параметрам относят геометрические размеры аппарата в целом и отдельных его частей. Итогом технологического расчета аппарата являются также количество исходных материалов, поступающих в аппарат, и мощность привода.

Технологический расчет является основанием для конструктивного расчета аппарата и его проектирования.

Общая последовательность технологического расчета сводится к следующему. Вначале глубоко изучают вопрос, обосновывают тип аппарата, в наибольшей степени пригодного для реализации проектируемого процесса. Затем определяют предельные значения физических параметров и движущую силу процесса в виде значений температур, давлений, концентраций, скоростей и др. При этом руководствуются необходимостью достижения наибольшей скорости процесса за счет высокой движущей силы, но с обязательным учетом ограничений, накладываемых физико-химической сущностью процесса и требованиями к качеству получаемого продукта. Например, завышение температуры в аппарате при получении строительного гипса увеличивает в готовом продукте содержание обезвоженного сульфата кальция и снижает качество готового продукта.

Следующим этапом расчета является составление материальных и энергетических балансов для технологического процесса, реализуемого в аппарате, и определение на их основе расходов сырья, топлива, энергии. Эти расчеты будут тем точнее, чем дифференцированнее и глубже отражены в балансах происходящие в аппарате превращения, в также всевозможные переносные и обменные потоки, энергетические эффекты и т.п.

Важнейшим этапом в расчете аппаратов является расчет или определение каким-либо иным способом скорости происходящих в аппарате процессов и превращений, предопределяющих в конечном итоге скорость технологического процесса в целом и производительность аппарата при оптимальных его размерах. На основании данных о скоростях процесса и, соответственно, производительности аппарата рассчитывают необходимые объемы, площади и геометрические размеры аппаратов, их количество. Вопрос о скоростях процесса является весьма сложным; для ряда процессов в технологии вяжущих веществ, связанных, например, с химическими превращениями, скорости не поддаются прямому расчету. Поэтому в подобных случаях приходится привлекать экспериментальные и практические результаты в виде, например, зависимости продолжительности процесса от исходных и режимных параметров или в виде интенсивности процесса, отнесенной к единице площади или объема аппарата, и т.д. Найти такие данные можно в учебниках, справочниках, монографиях, специальной литературе.

Определение геометрических размеров аппарата является заключительным этапом расчетов.

Но расчеты по проекту на этом не заканчиваются. Запроектированный аппарат необходимо укомплектовать вспомогательным оборудованием. К вспомогательному оборудованию относят насосы, вентиляторы, газодувки, пылеосадительные и пылеочистительные установки. Вспомогательное оборудование выбирается по справочникам. Однако для этого требуется ряд характеристик, которые приходится дополнительно рассчитывать, например, производительность по газу или жидкости, напор, необходимый для преодоления сопротивлений в трубопроводах, зернистых слоях, фильтрах и др.

В некоторых проектах такие расчеты составляют предмет самостоятельной разработки.

Запроектированный аппарат представляется схематично на отдельном чертеже. При этом указывают все необходимые размеры аппарата, массовые и тепловые потоки, точки контроля параметров процесса и намечают способы измерения параметров.

В пояснительной записке приводятся все необходимые расчеты и комментарии.

Ниже приведены указания по расчету некоторых наиболее характерных для технологии вяжущих веществ аппаратов.

2. РАСЧЕТ СУШИЛЬНЫХ АППАРАТОВ

2.1. Выбор типа сушильного аппарата и последовательность расчета

В производстве вяжущих веществ сушке подвергают сыпучие материалы, такие как глина, песок, мел, известняк, трепел, диатомит, отходы промышленности, например, золы, шлаки, а также жидкообразные или пастообразные массы типа шламов, шликеров.

Сушка, как правило, не бывает абсолютно полной, вплоть до удаления адсорбционно связанной воды, так как полная сушка требует повышенных энергетических затрат, снижает производительность сушильных аппаратов. Поэтому нижний предел высушивания в каждом случае обосновывают, исходя из технологических и других требований.

Проектирование сушильного аппарата начинается с выбора его типа. В зависимости от вида высушиваемого материала и производительности технологической линии, а также сообразно ресурсам и производственным условиям проектируемой технологической линии могут быть предусмотрены различные способы сушки и типы сушилок.

В настоящем учебном пособии рассматриваются сушилки с конвективным подводом теплоносителя. Их можно классифицировать по ряду конструктивных, технологических и других признаков. По виду обрабатываемого материала их подразделяют на сушилки для сыпучих, кусковых и штучных материалов. По конструкции сушильного устройства – туннельные, шахтные, барабанные, камерные. По способу подачи и перемещения материала – распылительные, конвейерные, пневматические (в том числе сушилки с кипящим слоем), размольно-сушильные. По схеме движения материала и сушильного агента – прямоточные и противоточные.

Расчет сушилок включает следующие этапы.

1. На основании технологического регламента составляют сводку исходных данных для расчета.

2. По заданной часовой производительности сушилки и соответственно технологическим требованиям составляют материальный баланс сушилки.

3. Выполняют расчет горения топлива и определяют все необходимые параметры сушильного агента.

4. Составляют тепловой баланс сушилки и определяют расходы тепловой энергии и сушильного агента.

5. По расчетному или заданному технологическому режиму определяют длительность сушки или принимают ее по данным практики.

6. В зависимости от производительности технологической линии и длительности сушки или по показателю интенсивности процесса определяют объем сушилки и размеры ее отдельных элементов.

7. Производят расчет (или выбор) горелки, вентилятора, дымососа и другого вспомогательного оборудования.

2.2. Исходные данные для расчета

В исходных данных необходимо представить численные значения тех характеристик и параметров, которые будут фигурировать в расчетах. Большинство из этих показателей переходят из технологического регламента, некоторые требуется обосновать по ходу расчета, пользуясь различными справочными данными.

Исходные данные целесообразно представить в табличной форме (табл.1).

Таблица 1

Исходные данные для расчета_____,
(вид сушильного аппарата)
высушиваемый материал_____

Наименование	Обозначение, единицы измерения	Численные значения	Источники информации
Производительность по высушенному материалу	$П$, кг/ч		В соответствии с технологическим регламентом
Плотность в зерне	$\rho_з$, кг/м^3		Прил. 1
Размеры кусков (зерен)	$d_з$, мм		Прил. 1
Влажность: начальная конечная	 $U_н$, % $U_к$, %		 Прил. 1 Прил. 1
Температура теплоносителя: на входе на выходе	 t_1, ^oC t_2, ^oC		 Прил. 1 Прил. 1
Топливо – природный газ_____ месторождения			Прил. 2

Окончание табл. 1

Наименование	*Обозначение, единицы измерения*	Численные значения	Источники информации
Наименование	Обозначение, единицы измерения	Численные значения	Источники информации
Состав газа (%% по объему)	CO_2 CH_4 C_2H_6 C_3H_8 C_4H_{10} C_5H_{12} N_2		Прил. 2
Теплота сгорания	$Q_н^р$, кДж/м^3		Прил. 2

2.3. Материальный баланс сушилки

Производительность сушилки по абсолютно сухому материалу ($П_с$)

$$П_с = \frac{П_в}{1+\frac{U_н}{100}}, \text{ или } П_с = \frac{П}{1+\frac{U_к}{100}} \qquad (1)$$

где $П_в$ - производительность сушилки по влажному материалу, кг/ч;

$П$ – производительность сушилки по высушенному материалу, кг/ч;

$U_н, U_к$ – начальная и конечная влажности материала, исчисленные относительно его абсолютно сухого состояния, %%.

Количество влаги, удаляемой при сушке (W, кг/ч)

$$W = П_с \cdot \frac{U_н - U_к}{100}. \qquad (2)$$

2.4. Расчет процесса горения топлива и параметров продуктов горения на входе в сушилку

В большинстве сушильных аппаратов в качестве сушильного агента используется смесь атмосферного воздуха и дымовых газов, получаемая сжиганием топлива в собственном топочном устройстве. Такую смесь в технической и справочной литературе называют продуктами горения топлива.

Расчет процесса горения топлива является неотъемлемой частью расчета тепловой установки.

В результате расчета должны быть получены следующие характеристики:

- температура дымовых газов, выходящих из камеры сгорания;

- коэффициент избытка воздуха;
- состав продуктов горения топлива;
- их влагосодержание и теплосодержание (энтальпия).

Общие принципы расчета процесса горения топлива вне зависимости от его вида исходят из стехиометрических соотношений и термодинамических характеристик химических реакций, имеющих место при горении. Поэтому в задании на расчет должны быть представлены вещественный и химический составы топлива и характеристики воздуха для его горения.

В практике расчетов применяют обычно один из двух хорошо освоенных и широко представленных в специальной литературе [3-5 и др.] методов. Первый из них построен на использовании аналитических зависимостей, второй – табличный.

Ниже приведен пример табличного расчета процесса горения газообразного топлива (табл.2).

Пусть требуется рассчитать температуру дымовых газов, коэффициент избытка воздуха, состав, количество и влагосодержание продуктов горения от сжигания природного газа следующего состава (в % по объему): CO_2 – 0,14, CH_4 – 98,9, C_2H_6 – 0,38, C_3H_8 – 0,06, C_4H_{10} – 0,02, N_2-0,05, требуемая температура продуктов горения на входе в сушилку t_1=800°С.

Характеристики воздуха, используемого для сжигания топлива:

t_{BO} = 10°С; φ_{BO} = 50%; x_O = 0,005 кг/кг (эти данные приняты условно по *I-x*-диаграмме – рис.1).

Сначала (табл. 2), исходя из состава природного газа и стехиометрических соотношений реакций горения каждой горючей составляющей газа, рассчитывают количество продуктов горения CO_2, H_2O и количество кислорода O_2, необходимого для горения. Так как источником поступления кислорода является воздух, то рассчитывают также количество азота N_2, вовлекаемого в состав дымовых газов с воздухом, при этом принимается, что в составе атмосферного воздуха содержание азота составляет 79 % по объему, а воздуха используется точно столько, сколько его требуется на химическую реакцию, то есть коэффициент избытка воздуха α =1.

Необходимо заметить, что при расчете горения объемы газов соответствуют их нормальному состоянию, то есть t = 0°С и P=10^5Па.

Расчеты при α =1 заканчиваются определением общих объемов (см. табл.2) каждой составляющей дымовых газов по всем реакциям и дополнительным источникам их поступления.

Определяют также действительную температуру ($t_д$) горения газа при α =1, исходя из следующего уравнения теплового баланса процесса горения 1м^3 топлива:

$$Q_н^p \cdot \eta + c_T \cdot t_T + \alpha \cdot V_{TB.} \cdot c_{BO} \cdot t_{BO} = \left(V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{N_2} \cdot c_{N_2} \right) \cdot t_д,$$

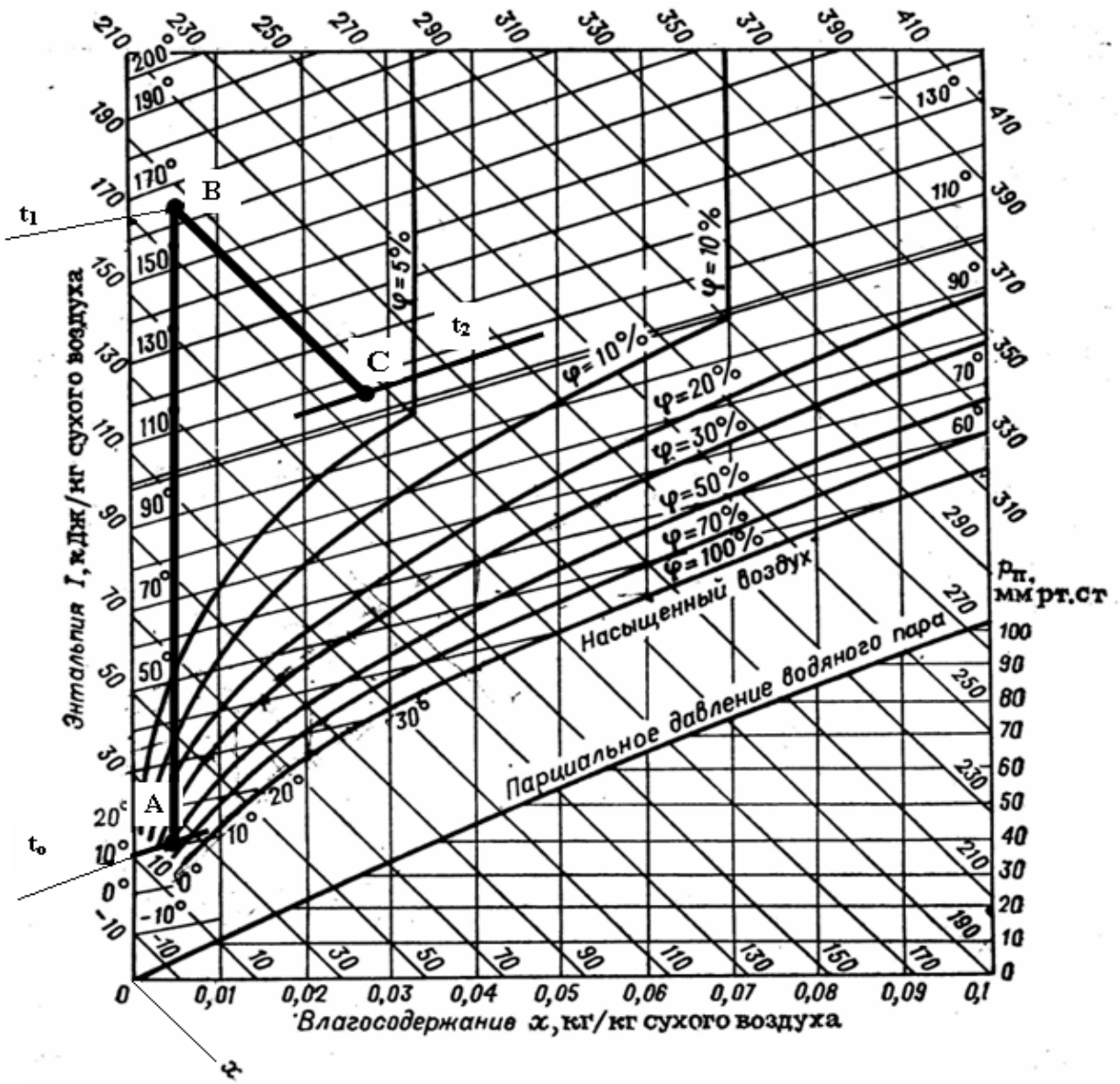


Рис.1. *I-x*-диаграмма влажного воздуха в интервале температур (-20…+200) °С, влагосодержаний – (0…0,1) кг/кг

откуда
$$t_{\partial} = \frac{Q_н^p \cdot \eta + c_T \cdot t_T + \alpha \cdot V_{T.B.} \cdot c_{BO} \cdot t_{BO}}{V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}}, \qquad (3)$$

где $Q_н^p$ – низшая теплота сгорания (согласно прил. 2 для выбранного в примере природного газа можно принять $Q_н^p$ = 35740 кДж/м^3);

η - к.п.д. топки (для газообразного топлива во всех случаях можно принимать η = 0,9);

Таблица 2

Расчет горения природного газа (выполнен на 100 м^3 газа)

Исходные данные для расчета		Удельный расход кислорода, м^3/м^3	Расход кислорода, м^3 на 100 м^3 газа	Состав и количество продуктов горения, м^3, при нормальных условиях					Расход сухого воздуха, м^3
состав газа (по объему), %	реакции горения			CO_2	H_20	O_2	N_2	Всего	
Состав продуктов горения при α =1,00									
CH_4=98,9	$CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O$	2,0	197,8	98,9	197,8	-	-	296,7	-
C_2H_6=0,38	$C_2H_6+3,5O_2=2CO_2+3H_2O$	3,5	1,33	0,76	1,14	-	-	1,9	-
C_3H_8=0,06	$C_3H_8+5O_2=3CO_2+4H_2O$	5,0	0,3	0,18	0,24	-	-	0,42	-
C_4H_{10}=0,02	$C_4H_{10}+6,5O_2=4CO_2+5H_2O$	6,5	0,13	0,08	0,1	-	-	0,18	-
CO_2=0,14	CO_2т $\longrightarrow$ CO_2 д.г.	-	-	0,14	-	-	-	0,14	-
N_2 = 0,5	N_2т $\longrightarrow$ N_2 д.г.	-	-	-	-	-	0,5	0,5	-
Всего при горении		-	199,56	100,06	199,28	-	0,5	299,85	-
Вовлекается N_2 с воздухом: 199,56 · 79/21		-	-	-	-	-	750,7	750,7	-
Вовлекается паров H_2O с воздухом при x_o=0,005: (199,56+750,7)· 1,293 · 0,005/0.805 (здесь 1,293 – плотность воздуха, а 0,805 – плотность пара)		-	-	-	7,63	-	-	7,63	-
Итого при α =1,00		-	-	100,06	206,31	-	751,2	1058,17	950,26

Окончание табл.2

Исходные данные для расчета	Удельный расход кислорода, $м^3/м^3$	Расход кислорода, $м^3$ на 100 $м^3$ газа	Состав и количество продуктов горения, $м^3$, при нормальных условиях					Расход сухого воздуха, $м^3$
			CO_2	H_20	O_2	N_2	Всего	
Состав продуктов горения при α=2,81								
Содержание O_2: 199,56 · 2,81, в том числе свободного: 560,76 – 199,56		560,76			361,2		361,2	
Дополнительно вовлечено с воздухом N_2: 750,7(2,81-1)						1358,77	1358,77	
Объем паров воды, вовлеченных с дополнительным воздухом: 7,63(2,81-1)				13,81			13,81	
Итого при α=2,81 -			100,06	220,12	361,2	2109,97	2791,35	2670,23
Объем сухих продуктов горения, $м^3$							2571,23	
Плотности продуктов горения при нормальных условиях: $\rho=M/22,4$, где M – молярная масса, кг/кмоль			1,964	0,803	1,429	1,250	1,264	
Масса продуктов горения, кг			196,52	177,24	516,15	2637,46	3527,37	
Масса сухих продуктов горения, кг							3350,13	
Плотность сухих продуктов горения,$кг/м^3$							1,303	
Состав продуктов горения: в% по объему в % по массе			3,58 3,57	7,9 5,02	12,94 14,63	75,58 74,78	100,00 100,00	

t_T, t_{BO} - температуры подаваемых на горение топлива и воздуха (можно условно принять равными 10°С);

c_T, c_{BO} – удельные объемные теплоемкости топлива и воздуха, их значения, как и для всех других газов в последующих расчетах, следует принимать для *соответствующей* температуры (согласно прил. 3 при t = 10°С c_T=1,56 кДж/(м$^{3\cdot}$°С), c_{BO}= 1,29 кДж/(м$^{3\cdot}$°С); здесь c_T принято как для CH_4);

$V_{TB.}$ – теоретический расход воздуха при α=1, согласно табл.2 V_{TB}.=9,58м^3 на 1 м^3 горючего газа);

$V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{N_2}$ - объемы составляющих дымовых газов, согласно табл.2.

V_{CO_2} = 1,0 м^3/м^3; V_{H_2O} = 2,06 м^3/м^3; V_{N_2} = 7,51 м^3/м^3;

$C_{CO_2}, C_{H_2O}, C_{N_2}$ - удельные объемные теплоемкости составляющих дымового газа (согласно прил. 3 для условно принятой t_∂ = 1800°С;

C_{CO_2} = 2,40 кДж/(м$^{3\cdot}$°С); C_{H_2O} = 1,92 кДж/(м$^{3\cdot}$°С); C_{N_2} = 1,47 кДж/(м$^{3\cdot}$°С);

α - коэффициент избытка воздуха на горение топлива, в ф.(3) принимается равным 1.

Цифровые индексы здесь и далее означают: «о» - параметры исходного воздуха; «1» - параметры газов на входе в сушилку; «2» - то же, на выходе из сушилки.

Таким образом, для нашего примера

$$t_\partial = \frac{35740 \cdot 0{,}9 + 1{,}56 \cdot 10 + 9{,}58 \cdot 1{,}29 \cdot 10}{1{,}0 \cdot 2{,}4 + 2{,}06 \cdot 1{,}92 + 7{,}51 \cdot 1{,}47} = 1834\ ^oC.$$

Этот результат можно принять как окончательный (если бы он получился отличающимся от условно принятой ранее t_∂ = 1800°С более, чем на 100°С, то пришлось бы выполнить новый расчет, приняв значения $c_{CO_2}, c_{H_2O}, c_{N_2}$ соответственно полученному значению t_∂).

Таким образом, температура дымовых газов, получающихся при сгорании топлива, намного превышает заданную температуру (800°С) продуктов горения на входе в сушилку. Чтобы ее понизить, необходимо дымовые газы дополнительно разбавить атмосферным воздухом, то есть повысить значение коэффициента избытка воздуха сверх 1. Вообще минимально возможное значение коэффициента должно быть $\alpha \geq 1{,}1$. Это условие необходимо выполнять для обеспечения полного сгорания топлива, поэтому первичный избыток воздуха подается непосредственно в топку, а остальная часть – в камеру смешения (рис.2).

Общий коэффициент избытка воздуха (α) определяют как

$$\alpha = \alpha_г + \alpha_\partial, \qquad (4)$$

где $\alpha_г$ - коэффициент избытка воздуха на горение;

α_∂ - дополнительный коэффициент избытка воздуха (на понижение температуры дымовых газов).

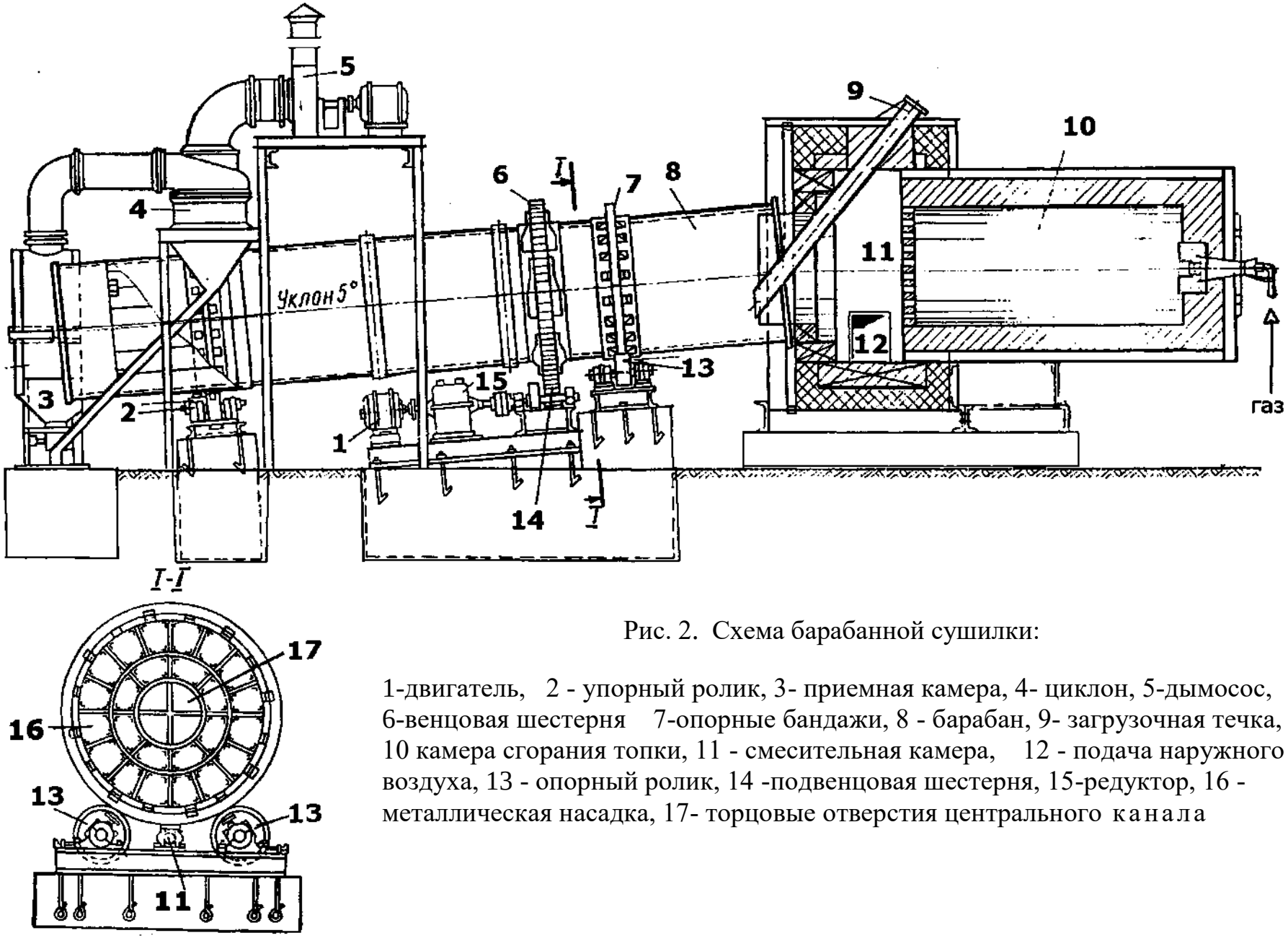


Рис. 2. Схема барабанной сушилки:

1-двигатель, 2 - упорный ролик, 3- приемная камера, 4- циклон, 5-дымосос, 6-венцовая шестерня 7-опорные бандажи, 8 - барабан, 9- загрузочная течка, 10 камера сгорания топки, 11 - смесительная камера, 12 - подача наружного воздуха, 13 - опорный ролик, 14 -подвенцовая шестерня, 15-редуктор, 16 - металлическая насадка, 17- торцовые отверстия центрального канала

Коэффициент α_∂ можно найти из следующего уравнения теплового баланса:

$$\left(V_{CO_2}\cdot c_{CO_2}+V_{H_2O}\cdot c_{H_2O}+V_{N_2}\cdot c_{N_2}\right)\cdot t_\partial+V_{H_2O}\cdot\rho_{H_2O}\cdot r_o+$$
$$\alpha_\partial\cdot V_{TB}\cdot c_{BO}\cdot t_{BO}+\alpha_\partial\cdot V_{TB}\cdot\rho_{BO}\cdot x_{BO}\cdot r_o+\alpha_\partial\cdot V_{TB}\cdot\rho_{BO}\cdot x_{BO}\cdot C_{ПВО}\cdot t_0/\rho_{H_2O}=$$
$$=\left(V_{CO_2}\cdot c_{CO_2}+V_{H_2O}\cdot c_{H_2O}+V_{N_2}\cdot c_{N_2}\right)\cdot t_1+$$
$$+V_{H_2O}\cdot\rho_{H_2O}\cdot r_o+\alpha_\partial\cdot V_{TB}\cdot\rho_{BO}\cdot x_{BO}\cdot r_0+\alpha_\partial\cdot V_{TB}\cdot c_{B1}\cdot t_1+\alpha_\partial\cdot V_{TB}\cdot\rho_{BO}\cdot$$
$$\cdot x_{BO}\cdot c_{ПВ1}\cdot t_1/\rho_{H_2O}\cdot$$

где с учетом обозначений к формуле(3)

t_1 – температура смеси дымовых газов и воздуха на входе в сушилку (в примере – 800°С);

ρ_{H_2O} - плотность водяного пара при стандартных условиях

$$\rho_{H_2O}=\frac{M}{22{,}4}=\frac{18}{22{,}4}=0{,}803\text{кг/м}^3;$$

$_O$ – теплота парообразования или конденсации (согласно прил. 4 для водяного пара при t=0°С, r_O=2481 кДж/кг);

$x_{во}$ – влагосодержание воздуха в исходном состоянии, кг/кг;

$C_{ПВО}$ *и* $C_{ПВ1}$ – удельная объемная теплоемкость паров воды в воздухе при исходной температуре t_0 и на входе в сушилку при t_1.

Для рассматриваемого примера

$C_{ПВО}=1{,}49$ *кДж/(м³·°С);* $C_{ПВ1}=1{,}67$ *кДж/(м³·°С);*

$V_{CO_2}=1{,}00$ м³/м³; $V_{H_2O}=2{,}07$ м³/м³; $V_{N_2}=7{,}51$ м³/м³;

$C_{CO_2}=2{,}14$ кДж/(м³·°С); $C_{H_2O}=1{,}67$ кДж/(м³·°С); $C_{N_2}=1{,}36$ кДж/(м³·°С);

$C_{B1}=1{,}38$ кДж/(м³·°С); $x_{BO}=0{,}005$ кг/кг – по *I-x*-диаграмме;

После сокращений и перестановок в уравнении теплового баланса рассчитанная формула для α_∂ принимает вид

$$\alpha_\partial=\frac{\left(V_{CO_2}\cdot c_{CO_2}+V_{H_2O}\cdot c_{H_2O}+V_{N_2}\cdot c_{N_2}\right)\cdot t_\partial-\left(V_{CO_2}\cdot c_{CO_2}+V_{H_2O}\cdot c_{H_2O}+V_{N_2}\cdot c_{N_2}\right)\cdot t_1}{V_{TB}\cdot(c_{B1}\cdot t_1-c_{BO}\cdot t_{BO})+\frac{V_{TB}\cdot\rho_{BO}\cdot\chi_{BO}}{\rho_{H_2O}}(C_{ПВ1}\cdot t_1-C_{ПВО}\cdot t_0)},\qquad(5)$$

Для рассматриваемого примера

$$\alpha_\partial=\frac{(1{,}00\cdot2{,}14+2{,}07\cdot1{,}93+7{,}57\cdot1{,}47)\cdot1834-(1{,}00\cdot2{,}14+2{,}07\cdot1{,}67+7{,}57\cdot1{,}36)\cdot800}{9{,}58(1{,}38\cdot800-1{,}29\cdot10)+\frac{9{,}58\cdot1{,}29\cdot0{,}005}{0{,}803}(1{,}67\cdot800-1{,}49\cdot10)}=1{,}83.$$

α = 1,00+1,83 = 2,83.

Продолжение расчетов в табл.2 выполнено для α = 2,81(эта цифра принята условно).

Итогом расчетов является состав продуктов горения (на 100 м^3 исходного газа) по объему и по массе.

В дальнейших расчетах полученные результаты следует делить на 100, то есть привести их к 1 м^3 природного газа.

Влагосодержание продуктов горения на входе в сушилку определяется как

$$x_1 = \frac{G_n}{G}, \qquad (6)$$

где G_n - масса паров воды в продуктах горения;

G - масса сухих газов по табл.2 для окончательного значения α.

Энтальпия газов на входе в сушилку (кДж/кг)

$$I_1 = \frac{Q_H{}^p \cdot \eta + C_T t_T + \alpha \cdot V_{TB} \cdot C_{BO} \cdot t_{BO}}{G}, \qquad (7)$$

где α - общий коэффициент избытка воздуха;

V_{TB}- теоретический расход воздуха на сжигание 1м^3 газа (при α=1), м^3/м^3;

G - масса сухих продуктов горения, кг/м^3

В примере

$$I_1 = \frac{35740 \cdot 0{,}9 + 1{,}56 \cdot 10 + 2{,}81 \cdot 9{,}58 \cdot 1{,}29 \cdot 10}{35{,}27} = 915\ кДж/кг,$$

$$x_1 = \frac{177{,}24}{3350{,}13} = 0{,}053\ кг/кг.$$

2.5. Представление процесса сушки на *I-x*-диаграмме, определение параметров продуктов горения на выходе из сушилки, определение расходов сушильного агента и топлива

Параметры сушильного агента (дымовых газов, нагретого воздуха и т.п.) в процессе сушки легко определяется с помощью *I-x*-диаграммы.

I-x-диаграмма применительно к влажному воздуху разработана Л.К. Рамзиным (1918 г.). На диаграмме (рис.1) представлены:

- линии постоянной энтальпии *I=const* (ориентированные под углом 135° к вертикальной оси);
- линии постоянной температуры *t=const* (несколько восходящие слева направо);
- линии постоянного влагосодержания *x = const* (вертикальные прямые);
- линии постоянной относительной влажности φ= *const* (кривые линии);
- линии парциальных давлений водяного пара в составе воздуха p_n(шкала давлений - справа внизу).

Замечательным свойством диаграммы является то, что, зная любые два

параметра влажного воздуха, с ее помощью можно легко определить остальные три. Например, на рис.1 положение т. *A* задано как t_o= 10°С; φ_0 = 60 %. Производными будут следующие значения остальных трех параметров:

x_o = 0,005 кг/кг; I_0= 15 кДж/кг; p_0 = 5 мм рт.ст.

Отмеченное замечательное свойство *I-x*-диаграммы позволяет использовать ее для графического изображения процесса сушки, так как практически всегда представляется возможным, исходя из технологических и других соображений, назначить два параметра для определяющих моментов времени сушильного процесса (пока речь не идет о таких параметрах, как скорость, продолжительность процесса).

Графическое изображение процесса сушки всегда начинают с теоретического варианта, предполагая, что процесс протекает адиабатически (без обмена энергией с внешней средой) и, следовательно, энтальпия воздуха остается постоянной ($I = const$), так как теплота, затрачиваемая на испарение воды из материала, тут же возвращается в виде энтальпии образовавшегося пара.

На рис.1 ломаной линией *ABC* представлен теоретический процесс сушки. При этом принято, что воздух с параметрами $t_o\varphi_o$ (т. *A*) нагревается в калорифере до температуры t_1. Так как этот процесс протекает без изменения влагосодержания x_o, то его можно представить линией, вертикально восходящей до пересечения с линией $t_1 = const$ (т. *B*). Следовательно, в сушильный аппарат воздух войдет с параметрами t_1, $x_1 = x_o$, I_1. Сушильный процесс изображают в виде прямой, параллельной линиям энтальпии ($I_1 = const$) до пересечения с задаваемой температурой t_2 (температура воздуха на выходе из сушилки). Параметры t_2, x_2, $I_2 = I_1$ и будут определять состояние влажного воздуха на выходе из сушилки.

В реальном процессе сушки имеют место потери теплоты в окружающую аппарат среду и на нагрев материала, поэтому процесс сушки идет с понижением энтальпии, что требует дополнительных расчетов.

При применении в качестве сушильного агента продуктов горения топлива необходимо использовать *I-x*-диаграмму для соответствующих продуктов. Вместе с тем, с определенными допущениями (приемлемыми для практических расчетов) можно воспользоваться высокотемпературной диаграммой для влажного воздуха (такую диаграмму студент получает на кафедре).

Рассмотрим методику построения реального (действительного) процесса сушки и определения расчетных характеристик на конкретном примере.

Процесс сушки осуществляется во вращающемся барабане прямоточного действия, укомплектованного топкой для сжигания газообразного топлива (рис.2).

Примем производительность сушилки по высушенному материалу (шлак доменный гранулированный) – $П_c$ = 10 т/ч. Начальная влажность материала $U_н$ – 24 %, конечная $U_к$ – 3 %; температура материала на входе в сушилку –

10°С, на выходе – 80°С. Топливо – природный газ. Температура продуктов горения на входе в сушилку – 800°С, на выходе – 110°С; состав продуктов горения тот же, что приведен в табл.2 для α = 2,81, энтальпия I_1 = 915 кДж/кг, x_1 = 0,053 кг/кг.

Прежде, чем приступить к построению действительного процесса сушки на J-x-диаграмме, необходимо приготовить копию высокотемпературной диаграммы, представленной в Прил. 23. Построение процесса сушки выполняют в следующей последовательности.

Вначале на поле *I-x*-диаграммы представим графическое изображение теоретического процесса сушки. Иллюстрация приведена на рис.3. При этом, чтобы выделить главное, на приведенном рисунке *I-x*-диаграмма представлена не полностью: показаны лишь характерные линии.

Точка А (t_o =10°С, x_o = 0,005 кг/кг, I_o= 15 кДж/кг) соответствует исходным данным по воздуху: t_o = 10°С, φ_o = 65 %.

Точка *B* (t_1 = 800°С, x_1 = 0,055 кг/кг, I_1 = 915 кДж/кг) соответствует расчетным значениям параметров продуктов горения I_1 и x_1 и заданной температуре t_1. При этом в силу того, что используется диаграмма для влажного воздуха, а не для продуктов горения, в т. *B* все три параметра могут не получить должного соответствия. Поэтому т. *B* следует выбирать на пересечении линий x_1=*const* и I_1 = *const*.

Точка С соответствует пересечению линий I_1 = *const* и t_2 = *const* (задаваемая характеристика). Точке *C* соответствует x_2^T = 0,32 кг/кг. Это значение будем использовать для определения расхода сушильного агента, но предварительно по (2) определим производительность сушильного барабана по влаге (*W*)

$$W = \Pi_c \frac{U_н - U_к}{100} = 10000\frac{24-3}{100} = 2100 \text{ кг/ч.}$$

Расход сушильного агента (сухих продуктов горения) – *L*, проходящего через сушильный аппарат, в теоретическом процессе сушки равен

$$L = \frac{W}{x_2^T - x_1} \tag{8}$$

или

$$L = \frac{2100}{0{,}296 - 0{,}053} = 8642 \text{ кг/ч.}$$

Теперь для построения на *J-x*-диаграмме действительного процесса сушки необходимо определить рабочую линию процесса сушки, учитывающую снижение энтальпии сушильного агента Δ (в кг на кг испаренной воды), связанное с дополнительным расходованием тепловой энергии Q на нагрев материала и остаточной влаги в нем, и с тепловыми потерями сушильной установки во внешнюю среду

$$\Delta = \frac{Q}{W} = q_{мат} + q_{вл} + q_{пот} - c \cdot t,_{м1} \tag{9}$$

где

$$q_{мат} = \frac{G_c}{W} \cdot c_м \cdot (t_{м2} - t_{м1}); \tag{10}$$

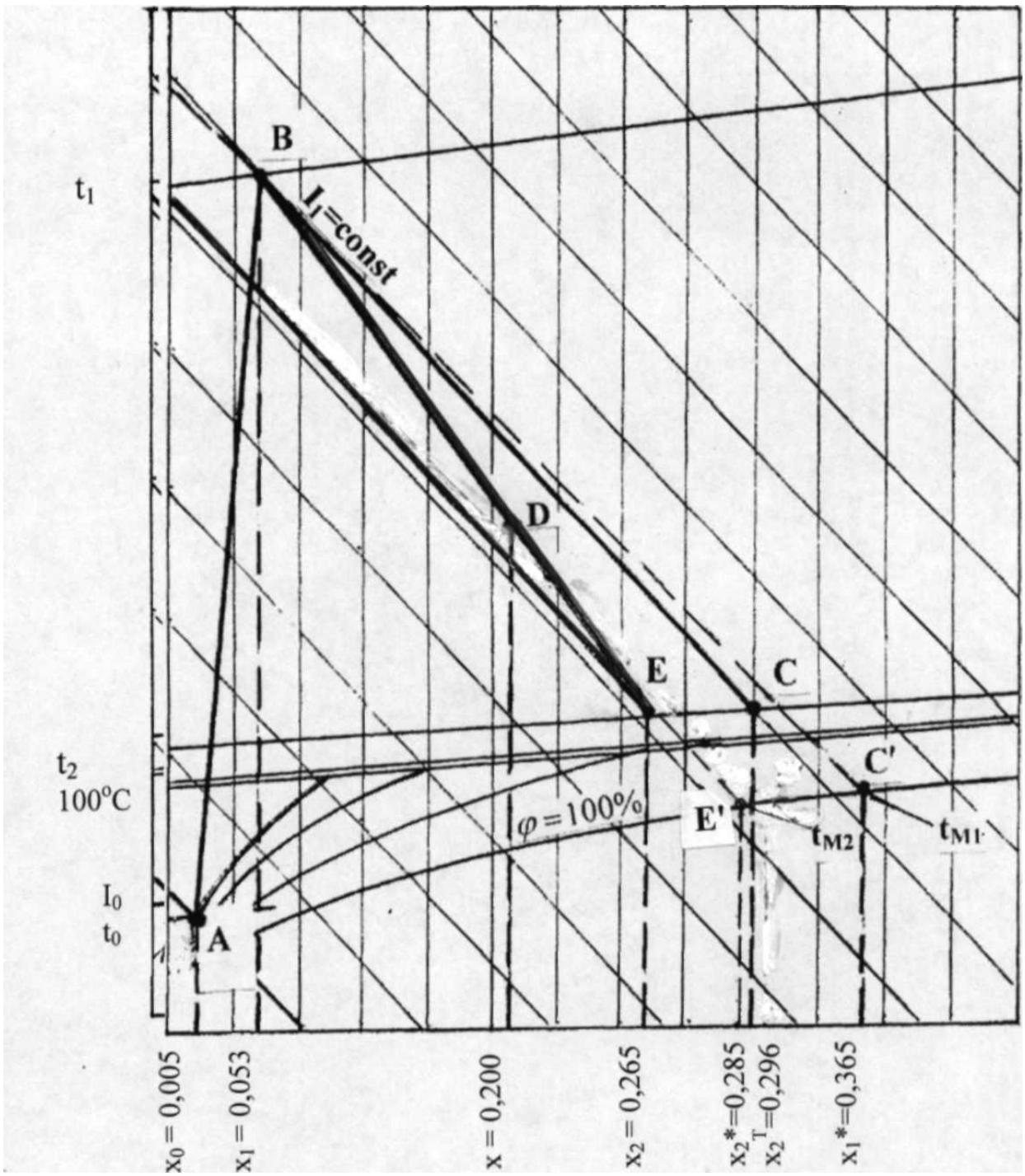


Рис. 3. Представление действительного процесса сушки
на ***1-x*** - диаграмме

$$q_{вл} = \frac{W_{ост}}{W} \cdot c_в \cdot (t_{м2} - t_{м1}); \qquad (11)$$

$c_м, c_в$ – удельные теплоемкости сухого материала и воды, кДж/(кг·°С);

$q_{пот}$ – можно принять как 10% от ($q_{мат}$+$q_{вл}$).

Фигурирующая в ф.(9) со знаком «минус» величина $c \cdot t_{м1}$ (где c – удельная теплоемкость воды) учитывает поправку на то, что энтальпия сушильного агента на выходе из сушилки J_2, содержащего в себе испаренную влагу, рассчитана относительно нулевой температуры, фактически же влага в количестве W кг/ч поступила в сушилку при $t_{м1}$>0, то есть внесла дополнительное, уже учтенное, количество теплоты.

Переход от значения Δ к значению J_2 в действительном процессе сушки выполняется, исходя из следующих соотношений:

$$\Delta = q_д - q_m,$$

где $q_д$ – удельные затраты теплоты в действительном процессе сушки

$$q_д = \frac{Q_д}{W} = \frac{J_1 - J_0}{x_2 - x_1};$$

q_m – удельные затраты теплоты в теоретическом процессе сушки

$$q = \frac{Q_m}{W} = \frac{J_2 - J_0}{x_2 - x_1}.$$

Таким образом,

$$\Delta = \frac{J_1 - J_0}{x_2 - x_0} - \frac{J_2 - J_0}{x_2 - x_1} = \frac{J_1 - J_2}{x_2 - x_1}.$$

Откуда

$$J_2 = J_1 - \Delta \cdot (x_2 - x_1).$$

(12)

В рассматриваемом примере

$$W_{ост} = 10000 \cdot \frac{3}{100} = 300 кг/ч;$$

$$\Delta = \left[\frac{10000 \cdot (80-10) \cdot 0{,}92}{2100} + \frac{300 \cdot (80-10) \cdot 4{,}19}{2100} \right] \cdot 1{,}1 - 4{,}19 \cdot 10 = 425{,}4 кДж/кг,$$

здесь коэффициент 1,1 учитывает потери во внешнюю среду.

Для определения направления линии действительного процесса сушки воспользуемся ф.(12) и для произвольного значения параметра x вычислим соответствующее ему (в точке D) значение J.

Пусть $x = 0{,}2 кг/кг$, тогда J= 915-425,4·(0,2-0,053) = 853,3кДж/кг.

Таким образом, для того, чтобы провести линию J действительного процесса сушки, наметим точку D с координатами $x = 0{,}2 кг/кг$, J=853,3кДж/кг. Через полученную точку от точки B проведем прямую до пересечения с линией t_2=const (точка E). Положение точки E и будет соответствовать параметрам су-

шильного агента на выходе из сушилки в действительном процессе сушки ($x_2 = 0{,}265 кг/кг, J_2 = 915 - 425{,}4 \cdot (0{,}265 - 0{,}053) = 828{,}6 кДж/кг$).

Действительный расход продуктов горения $L_д$ уходящих из сушильного аппарата в расчете на сухие газы будет равен

по массе - $$L_д = \frac{W}{x_2 - x_1}, \quad (13)$$

по объему - $$V_д = \frac{L_д}{\rho_{сух}},$$

где $\rho_{сух}$ – плотность сухих продуктов горения (табл.2).

Для рассматриваемого примера расход составит

$L_д$ = 2100/(0,265-0,053) = 9906 кг/ч.

$V_д$ = 9906/1,303 = 7602 м^3/ч.

Расход природного газа в топке составит

$$B = \frac{I_1 \cdot L_д}{Q_p^н \cdot \eta_T}, \quad (14)$$

где $\eta_т$ - к.п.д. топки, можно принять $\eta_т$ = 0,9.

Для рассматриваемого примера

B = 915 · 9906/(35772 · 0,9) = 282 м^3/ч.

Удельный расход топлива относительно высушенного материала

$$B_{уд}^м = \frac{B}{П}, \quad (15)$$

где $П$ - производительность при конечной влажности.

В примере

$П$ = 10000 + 10000 · 3/100 = 10300 кг/ч.

$B_{уд}^м$ = 282/10300 = 0,027 м^3/кг = 27 м^3/т.

Удельный расход топлива относительно удаленной из материала влаги

$$B_{уд}^в = \frac{B}{W} = \frac{282}{2100} = 0{,}134 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Количество воздуха, необходимого для горения топлива

$$V_в^г = V_{ТВ} \cdot B. \quad (16)$$

В примере $V_в^г = 9{,}5 \cdot 282 = 2679$ м^3/ч.

Количество воздуха, необходимого для разбавления дымовых газов

$$V_в^р = (\alpha - 1) \cdot V_{ТВ} \cdot B. \quad (17)$$

В примере

$$V_в^р = 1{,}81 \cdot 9{,}5 \cdot 282 = 4849 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Общее количество воздуха: $V_в = V_в^г + V_в^р$.

В примере $V_в$ = 2679+ 4849 = 7528 м^3/ч.

Количество паров воды в отходящих из сушилки газах:

$$V_{H_2O}^{общ} = V_{H_2O}^{пг} \cdot B + W / 0{,}803, \qquad (18)$$

где $V_{H_2O}^{пг}$ - объем паров воды в продуктах горения при расчетном (α=2,81) значении коэффициента избытка воздуха, м^3/м^3 – табл.2.

В примере $V_{H_2O}^{общ}$ = 2,2012 · 282 + 2100/0,803 = 3236 м^3/ч.

Объем выходящих из сушилки влажных продуктов горения

$$V_{вл} = V_д + V_{H_2O}^{общ}. \qquad (19)$$

В примере $V_{вл}$ = 7602 + 3236 = 10838 м^3/ч.

Объемное соотношение сухих газов (y_1) и паров воды (y_2):

$$y_1 = V_д / V_{вл}; \quad y_2 = V_{H_2O}^{общ} / V_{вл}. \qquad (20)$$

В примере: y_1 = 7602/10838 = 0,70;
y_2 = 3236/10838 = 0,30.

Плотность (при нормальных условиях) смеси влажных газов

$$\rho_{вл} = y_1 \cdot \rho_{сух} + y_2 \cdot \rho_{пв},$$

где $\rho_{сух}$ - плотность сухих продуктов горения, кг/м^3;
$\rho_{пв}$ - плотность паров воды, кг/м^3.

В примере $\rho_{вл}$ = 0,70·1,303 + 0,30·0,803 = 1,153 кг/м^3.

Плотность влажных продуктов горения при температуре t_1

$$\rho_{t1} = \rho_{вл} \cdot 273/(273+t_1). \qquad (21)$$

В примере ρ_{t1} = 1,153 · 273/(273+800) = 0,293 кг/м^3

Фактический объем входящих в сушилку при t_1 влажных газов ($V_{вл1}$)

$$V_{вл1} = \frac{L_д}{\rho_{t1}}. \qquad (22)$$

В примере $V_{вл1}$ = 7602/ 0,293 = 25945 м^3/ч.

На выходе из сушилки при t_2 = 110 ^{o}C,
ρ_{t2} = 1,153·273/(273+110)=0,82 кг/м^3.

$$V_{вл2} = V_в \cdot \frac{\rho_{вл}}{\rho_{вл2}} = V_{вл2} = 10838 \cdot 1{,}153/0{,}82 = 15240 \text{ м}^3/\text{ч} = 4{,}23 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Полученное значение $V_{вл2}$ используется в дальнейших расчетах, в том числе при подборе пылеосадительных устройств.

2.6. Расчет барабанной сушилки

2.6.1. Устройство барабанной сушилки

Для сушки мелкокусковых сыпучих материалов с размерами кусков до 50 мм применяют барабанные сушилки. В установку с сушильным барабаном (рис.2) влажный материал загружают через течку 9 в наклоненный под углом 4-5° к горизонту вращающийся барабан 8.

Высушенный материал поступает в приемную камеру 3, а затем в транспортное устройство. В топке 10 сжигается топливо, полученные дымовые газы поступают в смесительную камеру 11, в которую через окно 12 подсасывается воздух для разбавления теплоносителя.

Это может осуществляться также путем нагнетания воздуха специальными вентиляторами в подсводовое пространство смесительной камеры, что позволяет интенсивно перемешивать воздух с дымовыми газами и предохранять загрузочную течку от прогорания.

Для лучшего контакта высушиваемого материала с сушильным агентом внутри барабана монтируют пересыпные (перевалочные) устройства (рис.4).

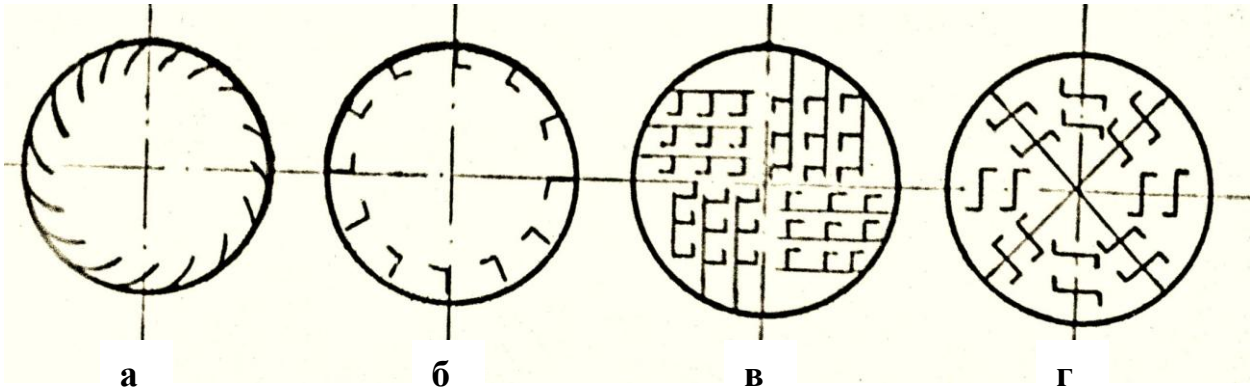


Рис.4. Типы перевалочных устройств для барабанных сушилок и степень заполнения барабана (β):

а - подъемно-лопастные, β = 12 %;
б - подъемно-лопастные, β = 14 %;
в - распределительные, β = 20,6 %;
г - распределительные с закрытыми ячейками, β = 27, 5 %

В прямоточном варианте сушилки смесь дымовых газов с воздухом направляется в барабан параллельно движению материала, непосредственно соприкасаясь с ним. Отработанные газы выходят из барабана со стороны разгрузочного конца, поступают в циклон 4, в котором обеспыливаются, а затем дымососом 5 выбрасываются в атмосферу.

Для более тщательной очистки отработанного сушильного агента и уменьшения загрязнения окружающей среды применяют двухстадийную очистку, при этом загрязненный воздух после циклона пропускают через рукавный фильтр или батарейный циклон.

Барабан сушила имеет длину 4-14 м и диаметр 1,0-2,8 м, установлен под углом 4-5° к горизонту и вращается со скоростью 0,5-8 мин$^{-1}$. Корпус барабана представляет собой сварной цилиндр, выполненный из листовой стали. На корпусе барабана укреплены стальные бандажи 7, которые катятся по опорным роликам 13. Для предотвращения осевого смещения барабана один из его бандажей упирается боковой поверхностью в упорный ролик 2. Для улучшения теплообмена внутри барабана устанавливают металлическую насадку 17.

Противоточное движение используется для глубокого высушивания материала. В противоточных сушилках температура выгружаемого материала выше, чем в прямоточных. Это объясняется тем, что материал в первом случае в конце сушки соприкасается с более нагретыми газами, тогда как во втором случае подсушенный материал омывается менее нагретыми газами. Прямоточные барабаны приемлемы для сушки материала, перегрев которого нежелателен, например, глины для керамического производства, теряющие при высоких температурах пластические свойства. Сушку гипсового камня во избежание нагрева выше 170°С следует осуществлять в прямоточных сушилках. Песок, щебень обычно сушат по противотоку.

2.6.2. Содержание расчета

Расчет выполняется по следующим позициям:

п.1. Исходные данные для расчета.

п.2. Материальный баланс процесса сушки.

п.3.Расчет процесса горения топлива, коэффициента избытка воздуха и параметров продуктов горения на входе в сушильный барабан.

п.4. Представление процесса сушки на *I-x*-диаграмме, определение параметров продуктов горения на выходе из сушильного барабана, определение расхода сушильного агента и топлива.

п.5. Определение интенсивности процесса сушки и объема сушильного барабана.

п.6. Определение геометрических размеров сушильного барабана, выбор серийной марки оборудования.

п.7. Выбор и расчет вспомогательных устройств (циклонов, фильтров, тягодутьевых устройств).

Методика выполнения п.п.1-4 представлена выше как общая для всех сушильных аппаратов. Методика выполнения п.п.5-7 достаточно подробно представлена далее.

2.6.3. Определение интенсивности процесса сушки и объема сушильного барабана

Объем сушильного барабана непосредственно зависит от заданной производительности и скорости сушильного процесса. Последняя же зависит от параметров процесса (температуры и скорости газов), свойств материала (исходной влажности, водоудерживающей способности, плотности, пористости, крупности кусков) и степени заполнения объема барабана материалом.

Объем сушильного пространства $V_б$ складывается из объема V_n, необходимого для прогрева влажного материала до температуры мокрого термометра, при которой начинается интенсивное испарение влаги, и объема V_c, требуемого для испарения влаги, то есть $V_б = V_n + V_c$.

Основная доля приходится на объем V_c.

Для вычисления объема сушильного пространства применима формула

$$V_c = \frac{W'}{\beta_v \cdot \Delta x'_{cp}}, \qquad (23)$$

где W' - производительность сушилки по влаге, кг/с;

$$W' = \frac{W}{3600};$$

произведение $(\beta_v \cdot \Delta x'_{cp})$ служит мерой интенсивности процесса испарения, кг/(м^3·с); в него вошли:

β_v - коэффициент объемной влагоотдачи, с$^{-1}$;

$\Delta x'_{cp}$ - средняя движущая сила процесса массоотдачи, кг/(м^3 сушильного агента).

Для барабанной сушилки коэффициент массоотдачи β_v может быть вычислен по эмпирическому уравнению

$$\beta_v = 1{,}6 \cdot 10^{-2} \frac{\left(w_{cp} \cdot \rho_{cp}\right)^{0,9} \cdot n^{0,7} \cdot \beta^{0,54} \cdot p_o}{C \cdot \rho_{cp} \cdot \left(p_o - p_{cp}\right)}, \qquad (24)$$

где w_{cp} - средняя скорость сушильного агента, м/с (ее принимают, как правило, не более 2-3 м/с [3], а в ряде случаев и выше);

ρ_{cp} - средняя плотность сушильного агента при средней рабочей температуре в барабане, кг/м^3;

n - частота вращения барабана, мин$^{-1}$, обычно не превышает 5-8 мин$^{-1}$;

β - степень заполнения объема барабана высушиваемым материалом, % (см.рис.4);

p_o - давление, при котором осуществляется сушка, Па;

C - удельная теплоемкость сушильного агента при средней рабочей температуре в барабане, кДж/(кг·^{o}С);

p_{cp} - среднее парциальное давление водяных паров в объеме барабана, Па.

Уравнение (24) справедливо при $w \cdot \rho_{cp}$ = 0,6-1,8 кг/(м^2·с), n = 1,5-5,0мин$^{-1}$, β = 10-25%.

Среднюю плотность сушильного агента $\rho_{ср}$ определяют при средней температуре газов

$$t_{ср} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \qquad (25)$$

соответственно

$$\rho_{ср} = \rho_o \frac{T_o}{T_o + t_{ср}}, \qquad (26)$$

где ρ_o - вычисляется по показателям табл.2 как

$$\rho_o = \frac{\textit{масса продуктов горения}}{\textit{объем продуктов горения}}.$$

Среднее парциальное давление водяных паров определяется как

$$p_{ср} = \frac{p_{n1} + p_{n2}}{2}, \qquad (27)$$

где p_{n1} - парциальное давление водяных паров в продуктах горения на входе в сушилку, Па;

p_{n2} - парциальное давление водяных паров в продуктах горения на выходе из сушилки, Па.

Значения p_{n1} и p_{n2} определяют расчетом по формулам

$$p_{n1} = \frac{x_1 \cdot П}{0{,}622 + x_1}, \qquad (28)$$

$$p_{n2} = \frac{x_2 \cdot П}{0{,}622 + x_2}, \qquad (29)$$

где $П$ – давление, при котором происходит процесс сушки.

По полученным данным вычисляется значение коэффициента β_V.

Движущую силу процесса влагоотдачи можно определить из уравнения

$$\Delta x'_{ср} = \frac{\Delta x'_н - \Delta x'_к}{2{,}3 \lg \frac{\Delta x'_н}{\Delta x'_к}}, \qquad (30)$$

где $\Delta x'_н = x^*_1 - x_1$ - движущая сила в начале процесса сушки, кг/кг;

$\Delta x'_к = x^*_2 - x_2$ – движущая сила в конце процесса сушки, кг/кг;

x^*_1, x^*_2 - равновесные содержания влаги для продуктов горения на входе в сушилку и на выходе из нее, кг/кг; их значения можно определить по I-x-диаграмме соответственно точкам пересечения линий t_{MT1} (температура мокрого термометра для начального состояния) и $\varphi = 100\%$, t_{MT2} (температура мокрого термометра для газов на выходе из сушильного барабана) и $\varphi = 100\%$.

В (23) $\Delta x'_{ср}$ должно быть представлено в кг/м^3, поэтому окончательно

$$\Delta x'_{ср} = \frac{\Delta x'_н - \Delta x'_к}{2{,}3\lg\frac{\Delta x'_н}{\Delta x'_к}} \cdot \rho_{ср}. \qquad (31)$$

Подстановкой значений β_V и $\Delta x'_{ср}$ в (23) определяется значение V_C.

Рассмотрим примеры вычисления значений W′, β_V, $\Delta x'_{ср}$ и V_C для сушильного процесса, представленного на рис.2 (I-x-диаграмма).

В качестве исходных условий примем следующие характеристики процесса: W = 2100 кг/ч; $w_{ср}$ = 3 м/с; n = 4 мин$^{-1}$; β = 10 %; $П$ = 101308 Па.

Для остальных характеристик выполним соответствующие расчеты.

$$W' = \frac{2100}{3600} = 0{,}583\, кг/с;$$

$$t_{ср} = \frac{800+110}{2} = 455^o C;$$

$$\rho_o = \frac{3527{,}37}{2791{,}35} = 1{,}264\ кг/м^3;$$

$$\rho_{ср} = 1{,}264 \cdot \frac{273}{273+455} = 0{,}47\ кг/м^3;$$

$$p_{n1} = \frac{0{,}053 \cdot 101308}{0{,}622+0{,}053} = 7955\, Па;$$

$$p_{n2} = \frac{0{,}265 \cdot 101308}{0{,}622+0{,}265} = 30267\ Па;$$

$$p_{ср} = \frac{7955+30267}{2} = 19111 Па.$$

Удельную теплоемкость продуктов горения при средней температуре 455°С можно определить как

$$C = \sum_i^n y_i C_i = y_{CO_2} \cdot C_{CO_2} + y_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + y_{O_2} \cdot C_{O_2} + y_{N_2} \cdot C_{N_2},$$

где y_i - объемная доля каждого компонента в смеси газов (см. табл.2);

C_i – удельные теплоемкости (при 455°С) каждого компонента, кДж/м^3 (прил. 3).

Таким образом,

$$C = 0{,}0358 \cdot 1{,}97 + 0{,}079 \cdot 1{,}57 + 0{,}1294 \cdot 1{,}39 + 0{,}7558 \cdot 1{,}33 = 1{,}38\, кДж/м^3.$$

$$\beta_V = 1{,}6 \cdot 10^{-2} \frac{(3 \cdot 0{,}47)^{0{,}9} \cdot 4^{0{,}7} \cdot 10^{0{,}54} \cdot 101308}{1{,}38 \cdot 0{,}47 \cdot (101308 - 19111)} = 37{,}8 \cdot 10^{-2}\ c^{-1}.$$

Значение $x*_1$ находим по I-x-диаграмме соответственно т. C' на пересечении линии температуры мокрого термометра (показана пунктиром), исходящей из т.B, и линии относительной влажности φ = 100%; точке С′ соответствует $x*_1$ = 0,365 кг/кг.

Значение $x*_2$ находим по I-x-диаграмме соответственно т. E' на пересечении линии температуры мокрого термометра, исходящей из т. E, и линии относительной влажности φ = 100 %; точке E' соответствует $x*_1$ = 0,285 кг/кг. Согласно I-x-диаграмме, x_1 = 0,053 кг/кг, x_2 = 0,265 кг/кг.

$$\Delta x'_н = 0{,}365 - 0{,}053 = 0{,}312\ кг/кг,$$

$$\Delta x'_к = 0{,}285 - 0{,}265 = 0{,}02\ кг/кг.$$

$$\Delta x'_{ср} = \frac{0{,}312 - 0{,}02}{2{,}3\lg\frac{0{,}312}{0{,}02}} = \frac{0{,}292}{2{,}744} = 0{,}105\ кг/кг.$$

В новых единицах измерения (кг/м^3)

$$\Delta x'_{ср} = 0{,}105 \cdot 0{,}47 = 0{,}049\ кг/м^3.$$

Окончательно $$V_c = \frac{0{,}583}{37{,}8 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}049} = 31{,}5\ м^3.$$

Объем барабана V_n, необходимый для прогрева влажного материала, можно определить из следующего уравнения теплопередачи:

$$V_n = \frac{Q_м}{\kappa_v \cdot \Delta t_{ср}}, \qquad (32)$$

где $Q_м$ - количество теплоты, необходимое на нагрев влажного материала до температуры $t_{МТ1}$;

κ_V - объемный коэффициент теплопередачи, кВт/(м^3·°С);

$\Delta t_{ср}$ - средняя разность температур, °С.

Расход теплоты $Q_м$ можно определить из уравнения теплового баланса

$$Q_м = П_c \cdot C_м \left(t_{мТ} - t_{м1}\right) + W'' \cdot C_{вг}\left(t_{мТ} - t_{м1}\right), \qquad (33)$$

где $П_c$ - производительность по выходящему из сушилки материалу в пересчете на нулевую влажность, кг/с;

$C_М$ - удельная теплоемкость материала, кДж/(кг·°С);

$t_{М1}$ - температура материала на входе в сушилку, °С;

$t_{МТ}$ - средняя температура «мокрого» термометра:

$$t_{мТ} = \frac{t_{мТ1} + t_{мТ2}}{2},$$

$t_{МТ1}$ и $t_{МТ2}$ – температура «мокрого» термометра в начале и в конце сушки;

W''- производительность по общему количеству воды в материале, кг/с;

$C_{вг}$ - удельная теплоемкость воды, $C_{вг}$ = 4,19 кДж/(кг·°С).

Объемный коэффициент теплопередачи κ_V можно определить из уравнения

$$\kappa_v = \frac{16\left(w_{ср} \cdot \rho_{ср}\right)^{0{,}9} \cdot n^{0{,}7} \cdot \beta^{0{,}54}}{1000}. \qquad (34)$$

Среднюю разность температур можно определить как

$$\Delta t_{ср} = \frac{(t_1 - t_{м1}) + (t_2 - t_{м2})}{2}, \qquad (35)$$

где t_1 и t_2 - температура сушильного агента на входе и на выходе из сушилки;

t_{M1} и t_{M2} - температура материала на входе и на выходе из сушилки.

Окончательно по (32) определяют $V_п$, а затем и общий объем барабана $V_б$.

Рассмотрим примеры вычисления значений Q_M, κ_V, $\Delta t_{ср}$, $V_П$ с учетом результатов предыдущих примеров.

Производительность сушильного барабана по абсолютно сухому материалу

$$П_c = \frac{10000}{3600} = 2{,}78\, кг/с.$$

Удельная теплоемкость материала согласно прил. 1

C_M = 0,92 кДж/(кг·°С); t_{M1} = 10°С.

Температура мокрого термометра соответственно т.т. C' и E' на I-x-диаграмме (рис.3): t_{MT1} = 75°С; t_{MT2} = 70°С.

Средняя температура мокрого термометра

$$t_{MT} = \frac{75 + 70}{2} = 72{,}5^o C.$$

Количество воды в материале

$$W'' = П_c \cdot \frac{U_н}{100} = 2{,}78 \cdot \frac{24}{100} = 0{,}68\, кг/с.$$

Количество теплоты

$$Q_м = 2{,}78 \cdot 0{,}92(72{,}5 - 10) + 0{,}68 \cdot 4{,}19(72{,}5 - 10) = 338\, кДж/с.$$

Объемный коэффициент теплопередачи

$$\kappa_V = \frac{16(3 \cdot 0{,}47)^{0{,}9} \cdot 4^{0{,}7} \cdot 10^{0{,}54}}{1000} = 192 \cdot 10^{-3}\, кВт/(м^3 \cdot {}^o C).$$

Средняя разность температур

$$\Delta t_{ср} = \frac{(800 - 10) + (110 - 80)}{2} = 410^o C.$$

Объем барабана, необходимый для подогрева влажного материала

$$V_П = \frac{338}{192 \cdot 10^{-3} \cdot 410} = 4{,}3\, м^3.$$

Общий объем барабана $V_б$ = 31,5 + 4,3 = 35,8 м^3.

Необходимо заметить, что приведенные формулы для вычисления интенсивности сушки и объема барабана, выведены из предположения, что в процессе сушки испаряется только свободная (механически связанная) влага. В действительности же процесс может осуществляться более «глубоко», и тогда скорость сушки снижается. Поэтому расчет целесообразно сверить с опытными данными, представленными в прил.1 в виде напряжения объема сушильного барабана A_W.

Согласно полученным данным

$$A_W = \frac{W}{V_б} = \frac{2100}{35{,}8} = 58{,}7\ кг/(м^3 \cdot ч). \qquad (36)$$

Для сушильных барабанов показатель A_W может находиться в пределах 50-60 кг/(м^3·ч). Следовательно, расчет выполнен правильно.

2.6.4. Определение геометрических размеров барабана и выбор серийной марки оборудования

Для определения внутреннего диаметра барабанной сушилки ($D_б$) применима [3] следующая формула

$$D_б = 0{,}0188\sqrt{\frac{L_д \cdot V_{вг}}{(1-\beta)\cdot w}}, \qquad (37)$$

где $L_д$ - часовой расход сухого теплоносителя, кг/ч;

$V_{вг}$ – объем влажных газов в конце барабана на 1 кг содержащихся в них сухих газов, м^3/кг, его можно рассчитать как

$$V_{вг} = \frac{\left(\frac{L_д \cdot x_2}{\rho_{H_2O}} + \frac{L_д}{\rho_{ср}}\right)}{L_д}, = \frac{x_2}{\rho_{H_2O}} + \frac{1}{\rho_{ср}}, \qquad (38)$$

где ρ_{H_2O} и $\rho_{ср}$ - плотности паров воды и сухого теплоносителя при температуре газов в барабане t_2;

β - степень заполнения объема барабана материалом в долях;

w - скорость сушильного агента в конце барабана (2-3 м/с).

Длину барабана $L_б$, м, определяют через объем

$$V_б = \frac{\pi D_б^2}{4} \cdot L_б, \qquad (39)$$

откуда

$$L_б = \frac{4 \cdot V_б}{\pi D_б^2}. \qquad (40)$$

В заключение необходимо определить угол (α') наклона барабана к горизонту

$$\alpha' = \left(\frac{30 \cdot L_б}{D_б \cdot n \cdot \tau} + 0{,}007\, w\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \qquad (41)$$

где τ - время пребывания материала в барабане, с.

Время пребывания τ можно определить по следующей эмпирической зависимости

$$\tau = \frac{3600 \cdot M}{П + \left(\frac{W}{2}\right)}, \qquad (42)$$

где M - количество высушиваемого материала, находящегося в барабане, кг; его можно вычислить как $M = V_б \cdot \beta \rho_м$,

где $\rho_м$ - плотность материала насыпная, кг/м^3;

$П$ – производительность сушильного барабана по высушенному материалу, кг/ч;

W - производительность по испаряемой воде, кг/ч.

Необходимо также уточнить частоту вращения n (мин$^{-1}$) барабана, которая может быть вычислена по формуле [3]

$$n = \frac{к \cdot L_б \cdot 60}{\tau \cdot D_б \cdot tg\alpha'}, \qquad (43)$$

где $к$ - коэффициент; для песка и кусковых материалов $к \approx 0{,}4$-$0{,}5$.

Рассмотрим применимость формул (37-43) на конкретном примере.

В качестве исходных примем ранее полученные данные:

$L_д$ = 9906 кг/ч; w = 3 м/с; $V_б$ =35,8 м^3; W = 2100 кг/ч; $П_с$ = 10000 кг/ч;

$U_к$ = 3%; β = 0,1; x_2 = 0,265кг/кг; $\rho_м$ = 1500 кг/м^3(прил.1)

Согласно (26) *при* t_2*=110°C*, ρ_{H2O} =0,803·273/383=0,572 кг/м^3

$\rho_{ср}$=1,303·273/383=0,929 кг/м^3; М = 35,8·0,1·1500 = 5370 кг.

По (38) $$V_{вг} = \frac{0{,}265}{0{,}572} + \frac{1}{0{,}929} = 1{,}539\, м^3/кг.$$

По (37) $$D_б = 0{,}0188\sqrt{\frac{9906 \cdot 1{,}539}{(1-0{,}1)\cdot 3}} = 1{,}413 м.$$

По (40) $$L_б = \frac{4 \cdot 35{,}8}{3{,}14 \cdot 1{,}413^2} = 22{,}84\ м.$$

По (42) $$\tau = \frac{3600 \cdot 5370}{10300 + \left(\frac{2100}{2}\right)} = 1703\, с\ (0{,}467 ч),$$

где $П_с$ = 10000 + (10000 · 3)/100 = 10300 кг/с.

По (41) $$\alpha' = \left(\frac{30 \cdot 22{,}84}{1{,}413 \cdot 4 \cdot 1703} + 0{,}007 \cdot 3\right) \cdot \frac{180}{3{,}14} = 5{,}28^o.$$

По (43) $$n = \frac{0{,}45 \cdot 22{,}84 \cdot 60}{1703 \cdot 1{,}413 \cdot tg 5{,}28^o} \equiv 2{,}79\ мин^{-1}.$$

Расчеты выполнены правильно.

В заключение этого раздела в соответствии с полученными значениями $V_б$, $D_б$, $L_б$, n, α' и, пользуясь справочными данными (прил. 5), подбирают серийно изготавливаемую промышленностью барабанную сушилку и представляют в пояснительной записке ее характеристики.

2.7. Выбор и расчет вспомогательных устройств

В качестве вспомогательных устройств в настоящем проекте необходимо выбрать и рассчитать циклоны, фильтры и тяговые вентиляторы (дымососы), обеспечивающие транспортировку продуктов горения из объема сушильного барабана в атмосферное пространство с промежуточной их очисткой. Подробный расчет комплекса этих аппаратов составляет значительную сложность. Ниже предлагаются упрощенные методики расчетов.

2.7.1. Выбор и расчет циклонов и фильтров

Циклон – аппарат для выделения (осаждения) пыли из газового потока. Принцип действия циклонов (рис.5) основан на использовании центробежной силы, развивающейся при вращательно-поступательном движении газового потока, благодаря которому частицы пыли (или золы) отбрасываются к стенке циклона и вместе с частью газового потока попадают в бункер. Отделение частиц пыли от входящих в бункер газов происходит под действием сил инерции при перемене направления движения газа на 180°, перед тем, как он через центральную выхлопную трубу уходит из циклона.

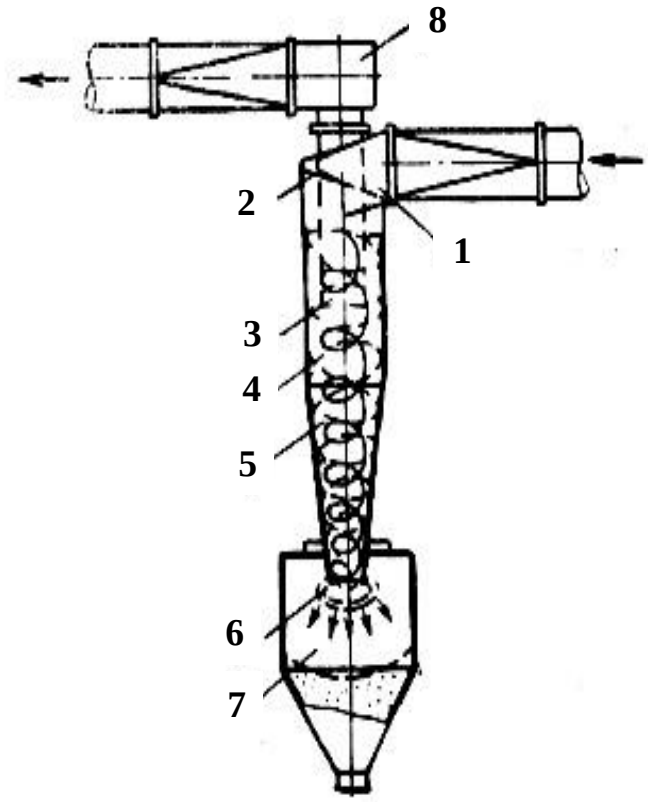


Рис.5. Схема движения газа в циклоне (на примере аппарата типа ЦН): 1 – входной патрубок; 2 – винтообразная крышка; 3 –выхлопная труба; 4 –корпус (цилиндрическая часть); 5 – корпус (конусная часть); 6 – пылевыпускное отверстие; 7 – бункер; 8 – улитка для вывода газа

Центробежную силу ($F_ц$), действующую на частицу пыли в движущемся по круговой спирали потоке, можно определить по известной формуле

$$F_ц = \frac{m \cdot w^2}{r}, \qquad (44)$$

где m – масса частицы;

w - линейная скорость частицы;

r - радиус цилиндрической части циклона.

Из формулы (44) следует, что чем выше скорость газов и чем меньше диаметр циклона, тем выше будет степень очистки. Однако скорость чрезмерно повышать нельзя, так как при этом значительно возрастает гидравлическое сопротивление циклона (обычно скорость выдерживают в пределах 3-6 м/с), а образующие-

ся вихревые потоки ухудшают очистку. Поэтому основной путь повышения степени очистки – это уменьшение диаметра циклона.

Главной эксплуатационной характеристикой циклона является его производительность по газу V, м^3/с. Именно по этой характеристике производят первоначальный выбор типа циклона. Затем определяют степень очистки запыленного газа. Если она получается неудовлетворительной, то необходимо принять циклон меньшего диаметра. Однако необходимо иметь в виду, что чем меньше диаметр циклона, тем меньше у него производительность (пропускная способность) по газу.

Наиболее употребительным циклоном является аппарат типа ЦН (центробежный, нормального исполнения, прил.22). На нем и будет сосредоточено наше внимание (рис.6).

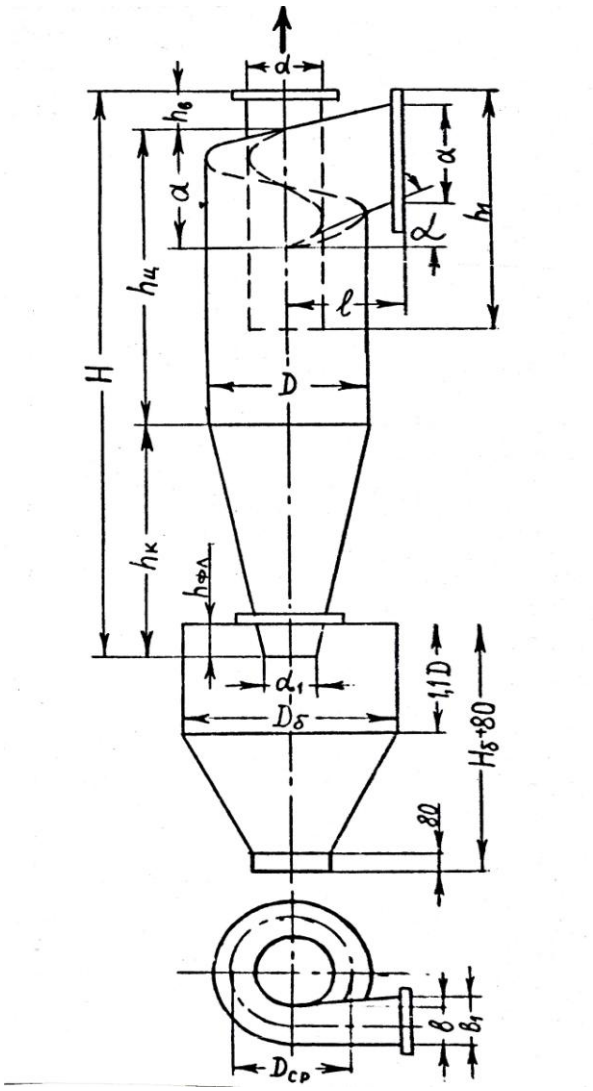


Рис.6. Геометрические параметры элементов циклона типа ЦН

Нередки ситуации, когда производительность любого одинарного циклона оказывается недостаточной. В такой ситуации приходится использовать групповые (батарейные) циклоны, в которых входящий пылегазовый поток разделяется на несколько (два, четыре, шесть, восемь) равноценных потоков, в каждом из которых параметры расхода и скорости не должны превышать допустимых (рис.7).

Выбор и расчет циклона должен осуществляться комплексно, с учетом входных характеристик (производительности, нагрузки по пыли) сопрягаемого с ним фильтра. Поэтому целесообразно вначале подобрать фильтр.

Фильтр – это аппарат тонкой очистки. Все многообразие фильтров можно свести к двум видам: фильтры матерчатые и электрофильтры. В небольших производствах, аналогичных проектируемым нами, используются в основном матерчатые рукавные фильтры, степень очистки в которых достигает 99 %, что соответствует действующим нормам очистки. Поэтому дальнейшее будет касаться только рукавных фильтров типа ФВ.

Устройство рукавного фильтра на примере фильтра марки ФВ показано на рис.8, а технические характеристики всех марок фильтров этого типа представлены в прил. 6.

Рукавный фильтр состоит из ряда тканевых рукавов, подвешенных внутри металлической камеры. Запыленный газ, поступая в нижнюю часть фильтра, проходит через ткань рукава, пыль оседает на ее поверхности и в порах. По мере увеличения слоя пыли увеличивается сопротивление фильтра прохождению газов. В связи с этим для удаления пыли с поверхности рукавов применяется их периодическое встряхивание в автоматическом режиме, а также обратная продувка сжатым воздухом. Пылевая нагрузка на фильтрующую ткань не должна превышать 1 кг/(м^2·ч).

Выбор рукавного фильтра осуществляют по его производительности, которая не должна быть ниже показателя объемного расхода газа, выходящего из сушильного барабана. Если производительность рукавного фильтра оказывается недостаточной, то проектируют параллельную установку двух или более фильтров из расчета, что их суммарная производительность будет выше требуемой.

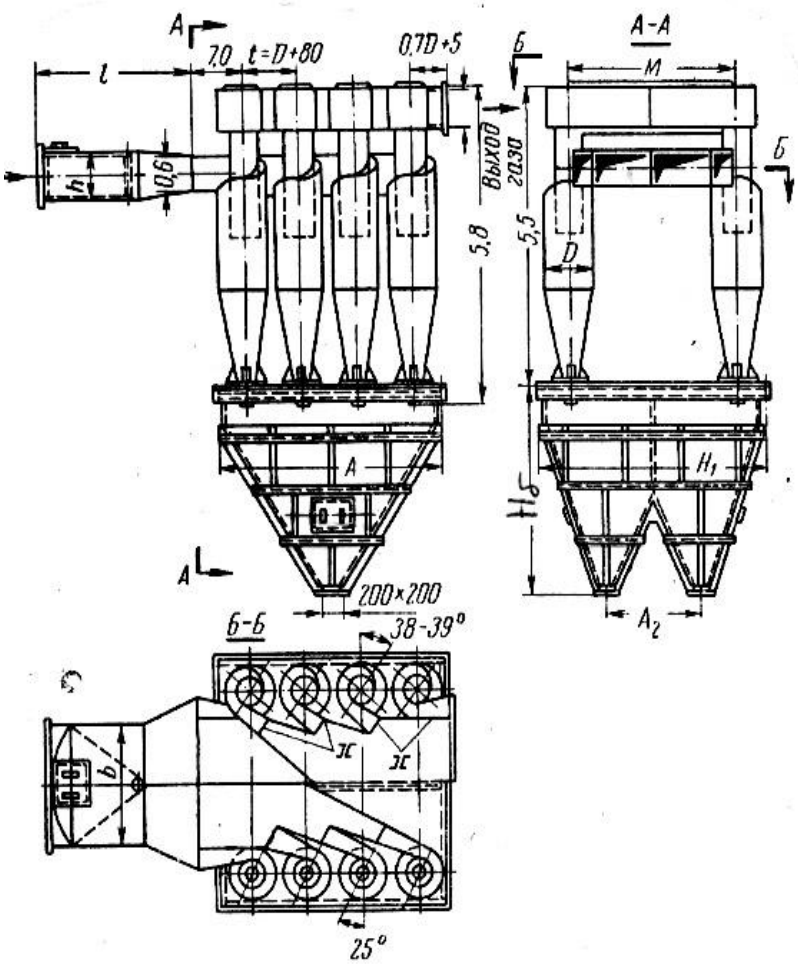


Рис.7. Схема блока циклонов типа ЦН

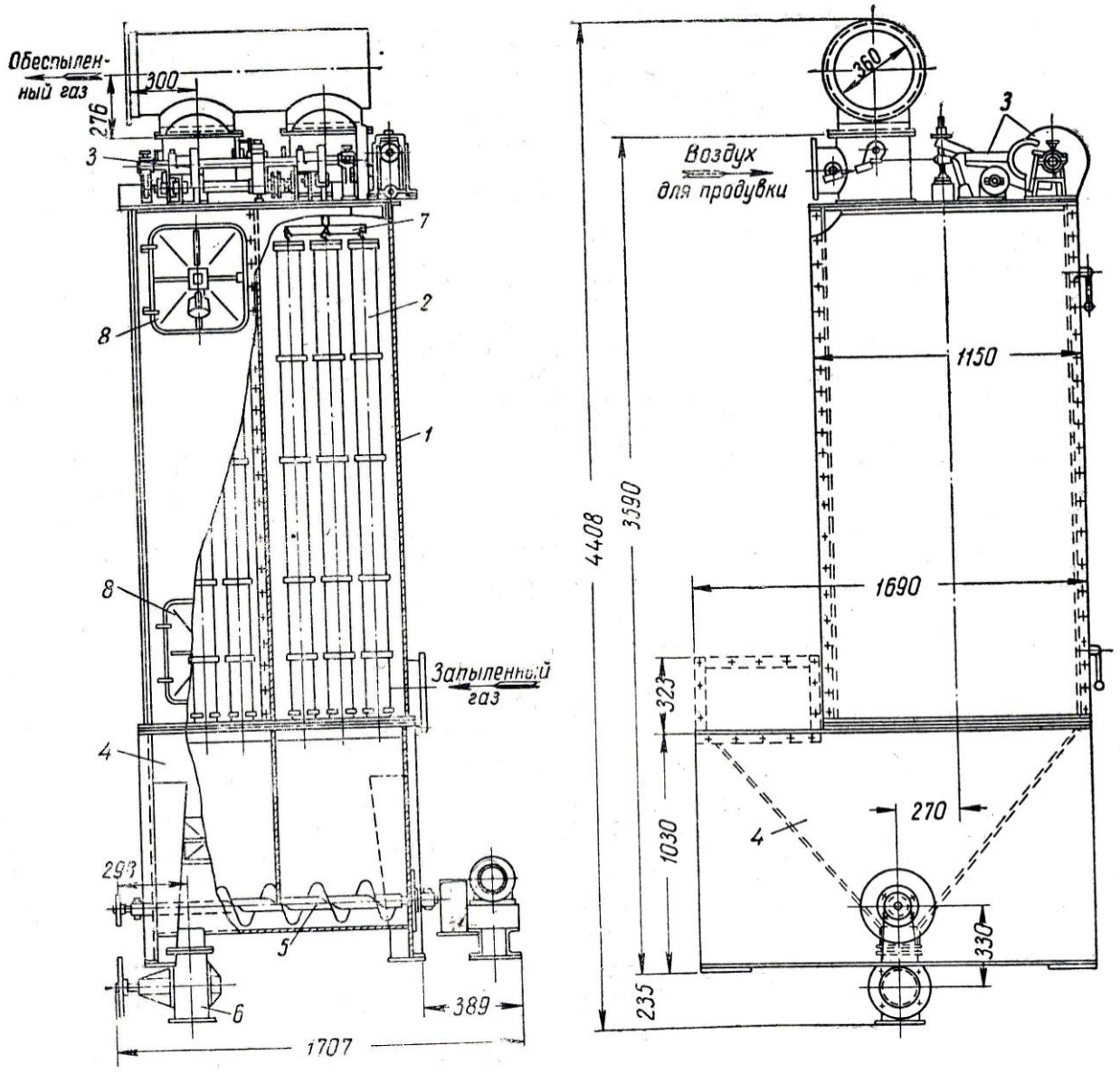


Рис.8. Схема матерчатого 24-рукавного фильтра марки ФВК-30:

1 – металлический корпус фильтра;
2 – матерчатые рукава;
3 – механизм встряхивания;
4 – бункер;
5 – шнек для выгрузки пыли;
6 – ячейковый затвор;
7 – коромысло для подвеса рукава;
8 - люки

Затем рассчитывают допустимую пылевую нагрузку на фильтр ($П_н$)

$$П_н = П_{уд} \cdot S_ф, \qquad (45)$$

где $П_{уд}$ – удельная пылевая нагрузка на фильтр (не должна превышать 1кг/(м^2·ч);

$S_ф$ - общая площадь фильтрующей поверхности.

Например, согласно ранее приведенному, объемный расход газов на выходе из сушильного барабана $V_{ВЛ2}$ = 15240 м^3/ч = 4,23 м^3/с.

По прил. 6 выбираем один фильтр типа ФВ-90 с производительностью 3,75-4,50 м^3/с, величиной фильтрующей поверхности 90 м^2. Таким образом, допустимая пылевая нагрузка на фильтр составит

$$П_н = 1 \cdot 90 = 90 \text{ кг/ч}.$$

Максимально допустимое содержание (по массе) пыли в газах, выходящих из циклона ($G^ц_{вых}$) и поступающих в фильтр ($G^ф_{вх}$), составляет

$$G^ф_{вх} = \frac{П_н}{V_{вл2}}. \qquad (46)$$

В примере $G^ц_{вых} = G^ф_{вх}$ = 90/15240 = 0,006 кг/м^3 = 6,0 г/м^3.

На эту величину и следует ориентироваться при выборе и расчете *циклонов.*

Первоначально марку *циклона* подбирают по производительности V, м^3/ч, которая должна быть не ниже объема влажных газов $V_{ВЛ2}$, выходящих из сушильного барабана.

В нашем примере при $V_{ВЛ2}$ = 4,23 м^3/с можно выбрать первоначально группу из 4-х циклонов типа ЦН (прил. 7) диаметром 600 мм.

Далее следует определить содержание пыли в продуктах горения, выходящих из сушильного барабана, и оценить степень очистки газов в циклоне выбранного диаметра. Если полученное значение $G^ц_{вых}$ окажется выше, чем определено по (46), то следует проверить на эту характеристику другой, меньшего диаметра, циклон и т.д.

Общее содержание (концентрацию) пыли в продуктах горения, выходящих из сушильного барабана и входящих в циклон ($G^ц_{вх}$), можно принять из Прил. 8. Принятое значение следует распределить по фракциям, выполняя все расчеты по форме табл.3. Далее, пользуясь графиком Прил. 9, определяют парциальные коэффициенты очистки по выделенным фракциям пыли $\eta_{фi}$,%, результат заносят в табл.3. Затем, исходя из определения парциального пофракционного коэффициента очистки как

$$\eta_{ф_i} = \frac{G^{ф_i}_{ул}}{G^{ф_i}_{вх}} \cdot 100, \qquad (47)$$

где $G_{вх}^{ф_i}$ - содержание пыли *i*-той фракции на входе в циклон, г/м^3;

$G_{ул}^{ф_i}$ - количество улавливаемой в циклоне пыли,

определяют пофракционное количество улавливаемой пыли как

$$G_{ул}^{ф_i} = \frac{\eta_{ф_i} \cdot G_{вх}^{ф_i}}{100}. \qquad (48)$$

Таким образом, окончательное значение $G_{вых}^{ф}$, будет равно

$$G_{вых}^{ф} = G_{вх}^{ф} - \sum_{i=1}^{n} G_{ул}^{ф_i}, \qquad (49)$$

где n - число выделенных фракций.

Пример расчета представлен в табл. .3.

Таблица 3

Материальный баланс процесса пылеочистки
в циклоне типа ЦН, D = 600 мм

Расчетные характеристики	Размеры фракции пыли, мкм								Всего
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-90	90-200	>200	
Гранулометрический состав (принят как для шлака по прил. 8), %	15	15	30	13	6,5	12	8	0,5	100
Концентрация пыли, г/м^3, ($G_{вх}^{фi}$)	12	12	24	10,4	5,2	9,6	6,4	0,4	80*
Парциальные коэффициенты очистки (прил. 9), $\eta_{фi}$,%	78	90	95	97	98	99	100	100	
Уловлено пыли, $G_{ул}^{ф_i}$, г/м^3	9,96	10,8	22,8	10,08	5,10	9,50	6,4	0,4	74,44
Выход пыли из циклона, $G_{вых}^{ц}$,, г/м^3									5,56

∗ - цифра 80 принята по Прил. 8, остальные значения получены как произведение этой цифры на долю каждой фракции (первая строка)

Коэффициент очистки для всего потока

$$\eta = \frac{G_{вх} - G_{вых}}{G_{вх}} \cdot 100. \qquad (50)$$

В примере $\eta = \frac{74,44}{80,00} \cdot 100\ \% = 93,1\%$.

Так как в прил. 9 парциальные коэффициенты очистки приведены для циклона с диаметром 600 мм, то для циклона другого диаметра полученный результат по η необходимо уточнить с помощью диаграммы в прил. 10.

Для этого на диаграмме отмечают точку *A* на пересечении вертикальной линии, соответствующей *D* = 600 мм, и горизонтальной линии, соответствующей полученному значению η. Из точки *A* параллельно ближайшей кривой необходимо двигаться до пересечения с вертикальной линией, соответствующей истинному значению диаметра циклона. Полученная точка *B* и соответствует уточненному значению коэффициента очистки η'.

Таким образом, концентрация пыли в продуктах горения, выходящих из циклона

$$G^{ц}_{вых} = G^{ц}_{вх} \frac{100 - \eta'}{100}. \qquad (51)$$

В примере: $G^{ц}_{вых} = 80 \cdot \frac{100 - 93,1}{100} = 5,52\ г/м^3$, то есть выполняется условие

$$G^{ц}_{вых} \le G^{ф}_{вх} \ (5,52 < 6,0),$$

и, следовательно, циклон и фильтр выбраны правильно.

2.7.2. Расчет и выбор тягового вентилятора (дымососа)

Расчетными характеристиками являются:

- производительность;
- создаваемое давление (или напор).

Производительность должна соответствовать значению $V_{ВЛ2}$.

Общий напор вентилятора ΔP должен превышать гидравлическое сопротивление всех вспомогательных устройств ($\Delta P_{ВУ}$). Последнее можно определить как

$$\Delta P_{ву} = \Delta P_{ц} + \Delta P_{ф} + \Delta P_{с},$$

где $\Delta P_{ц}$ - гидравлическое сопротивление циклона, Па;

$\Delta P_{ф}$ - гидравлическое сопротивление фильтра, Па;

$\Delta P_{с}$ - гидравлическое сопротивление в сети, Па.

В свою очередь

$$\Delta P_{ц} = \xi \frac{\rho_{вл2} \cdot w^2_{ц}}{2}, \qquad (52)$$

где ξ - коэффициент гидравлического сопротивления, для циклонов марки ЦН-15 можно принять ξ = 90;

$\rho_{вл2}$ - плотность продуктов горения на выходе из сушильного барабана в нашем примере $\rho_{вл2}$ = 0,82 кг/м^3;

$w_{ц}$ - условная (фиктивная) скорость газа в циклоне (отнесенная ко всему сечению), ее можно определить как

$$w_ц = \frac{V'_{вл2} \cdot 4}{\pi D^2}, \qquad (53)$$

где D - диаметр циклона, м;

$V'_{ВЛ2}$ –расход газа, приходящийся на один циклон.

В нашем примере $V'_{ВЛ2}$ = 4,23/4 = 1,058 м^3/с, следовательно

$$w_ц = \frac{0{,}82 \cdot 4}{3{,}14 \cdot 0{,}6^2} = 2{,}9\ м/с.$$

Таким образом, для одного циклона $\Delta P^1_ц = 90 \cdot \frac{0{,}82 \cdot 2{,}9^2}{2} = 310\ Па,$

для 4-х циклонов: $\Delta P^4_ц = 4 \cdot 310 = 1240\ Па.$

Для одного фильтра марки ФВ-90 согласно прил. 6.

$$\Delta P^1_ф = 900\ Па,$$

Гидравлическое сопротивление сети можно принять ориентировочно как 5 % от $(\Delta P^4_ц + \Delta P^2_ф)$.

В примере: ΔP_C = 0,05(1240+900) = 107 Па.

Окончательно: $\Delta P_{ВУ}$ = 1240+900+107 = 2247 Па.

С учетом характеристик $V_{ВЛ2}$ = 4,23 м^3/с и $\Delta P_{ВУ}$ = 2247 Па, согласно прил.11, приняты два дымососа серии Д-0,7-37 типоразмера Д-10 производительностью 20000 м^3/ч, обеспечивающих полный напор в 1700 Па каждый.

Предлагается дымососы установить последовательно: 1-й – на выходе из циклона, 2-й - после фильтра. Общий напор составит не менее 3400 Па.

2.8. Расчет аппарата барабанного типа для получения β-полуводного гипса

2.8.1. Общие указания к расчету

Для получения (обжига) полуводного гипса β - модификации можно использовать обычные сушильные барабаны, предназначенные для сушки сыпучих строительных материалов. Соответственно методика расчета в целом остается та же, что и методика, рассмотренная для процесса сушки в сушильном барабане.

В нее необходимо лишь внести два дополнения.

1 – при представлении процесса сушки в *I-x*-диаграмме учитывается дополнительная потеря теплоты на химическую реакцию дегидратации двуводного гипса.

2 – при определении длительности пребывания материала в барабане учитывается дополнительное время на химическую реакцию.

Расчет ведут по позициям 1-7, представленным в п.2.6.2 учебного пособия. Ниже приведены необходимые дополнения только к тем позициям, при выполнении которых следует внести какие-либо изменения.

2.8.2. Материальный баланс процессов сушки и дегидратации

Производительность сушильного барабана по β - полугидрату – $П$, кг/ч. Производительность сушильного барабана по гипсовому камню – $П_{г.к.}$, кг/ч

$$П_{г.к.} = \frac{П}{100 - B_{х.св}} \cdot 100\%, \qquad (54)$$

где $B_{х.св}$ – удаляемая химически связанная вода (1,5 H_2O) по реакции дегидратации относительно двуводного гипса, % (масс.).

Количество испаряемой химически связанной воды $W_{х.св.}$, кг/ч

$$W_{х.св.} = П_{г.к.} - П\,. \qquad (55)$$

Количество испаряемой химически несвязанной воды $W_{н.св}$, кг/ч

$$W_{н.св} = \frac{П_{г.к.} \cdot U_н}{100} \qquad (56)$$

где $U_н$ – влажность поступающего гипсового камня, %.

Общее количество испаряемой воды: $W = W_{х.св} + W_{н.св}$. (57)

2.8.3. Представление процессов сушки и дегидратации гипса на I-x-диаграмме. Определение параметров продуктов горения на выходе из сушильного барабана, определение расходов сушильного агента и топлива

Раздел с вышеприведенным названием выполняют в соответствии с методикой, изложенной в п.2.5.

Изменения состоят в следующем.

В исходных данных $U_к$ = 0 %, так как практически вся химически несвязанная вода должна испариться. Значение W следует определить по (57).

Определение потерь энтальпии (I_n) продуктов горения на выходе из сушилки следует определять (вместо формулы 9) по формуле

$$I_n = \frac{q_м + q_{х.р}}{L} + q_n, \qquad (58)$$

где $q_м$ – расход теплоты на нагрев материала, кДж/ч, определяется по формуле (10);

q_n - потери в окружающую среду;

$q_{х.р}$– расход теплоты на химическую реакцию дегидратации двуводного гипса

$$q_{х.р} = П_{г.к} \cdot Q_{х.р}, \qquad (59)$$

где $Q_{х.р}$ – эндоэффект химической реакции (согласно [10] $Q_{х.р}$= 138,6 ккал/кг = 580,7 кДж/кг).

Если $q_{х.р}/L$ превышает 50 % от I_1, то необходимо увеличить число барабанных сушилок и расчеты по п.п.2.6.3; 2.6.4 повторить на новую производительность, приходящуюся на 1 аппарат.

2.8.4. Определение интенсивности процесса сушки и объема сушильного барабана

При определении объема сушильного пространства как

$$V_б = V_п + V_с,$$

под V_c следует понимать объем, требуемый для испарения влаги и прохождения химической реакции дегидратации. В расчетах он будет несколько больше, чем для обычного процесса сушки, в связи с пониженным значением движущей силы процесса $\Delta x_{ср}$. С учетом этого все расчеты могут быть выполнены по методике, изложенной в п.2.6.3.

2.9. Расчет сушилок с кипящим слоем

2.9.1. Общие указания

Сушилки с кипящим слоем относятся к наиболее эффективным современным сушильным устройствам. Их эффективность обусловлена тем, что частица высушиваемого материала, переведенного в состояние псевдоожижения, омывается сушильным агентом одновременно со всех сторон при значительных скоростях последнего, что обеспечивает высокие значения коэффициента поверхностной (с поверхности частиц высушиваемого материала) влагоотдачи (β, кг/(м^2·с)). Объемное напряжение сушилки по влаге достигает 150…200 кг/(м^3·ч) и более. Благодаря этому сушилки с кипящим слоем отличаются компактностью, небольшими габаритами. Принципиальная схема сушильной установки с кипящим слоем приведена на рис.9.

Одной из важнейших расчетных характеристик является рабочая скорость сушильного агента (теплоносителя) в слое зернистого материала. Она определяется исходя из следующих соображений.

При прохождении потока сушильного агента через слой дисперсного материала возникает сила сопротивления перемещению данного потока. Сила динамического давления, создаваемого потоком, преодолевает это сопротивление, и сушильный агент фильтруется через слой дисперсного материала. С увеличением скорости газового потока, когда сила тяжести каждой частицы уравновешивается силой динамического давления, слой материала приобретает псевдоожиженное (взвешенное, псевдокипящее) состояние. Скорость, при которой слой переходит в псевдоожиженное состояние, называется скоростью псевдоожижения ($w_{пс}$) или первой критической скоростью $w'_{кр}$ (рис. 9).

Наступает режим псевдоожижения, обозначенный на рис.10 отрезком ВС. Сопротивление слоя остается постоянным с уменьшением числа контактов между частицами слоя. Затем появляется вторая критическая скорость $w''_к$ или скорость свободного витания, при превышении которой имеет место пневмотранспорт частиц.

Таким образом, рабочая скорость сушильного агента должна находиться в пределах между $w'_к$ и $w''_к$ (участок ВС на рис.10).

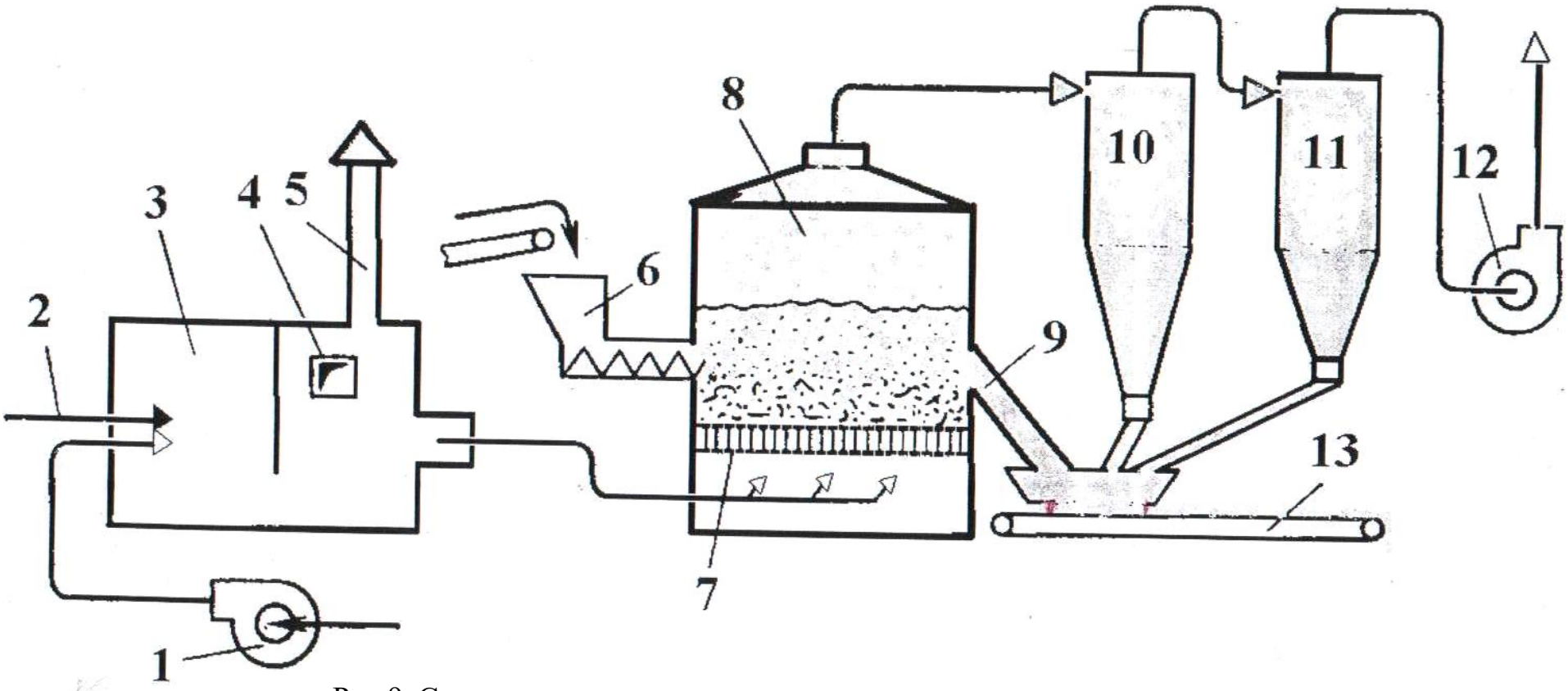


Рис.9. Схема установки для сушки сыпучих материалов в кипящем слое:

1 – вентилятор подачи воздуха на горение; 2 – подача топлива; 3 – топка; 4 – окно для подачи воздуха; 5 – аварийная труба; 6 – бункер с питателем подачи материала; 7 – решетка; 8 – сушильная камера; 9 – выгрузка продукции; 10 – циклон; 11 – батарейный циклон; 12 – отсасывающий вентилятор; 13 – конвейер готовой продукции

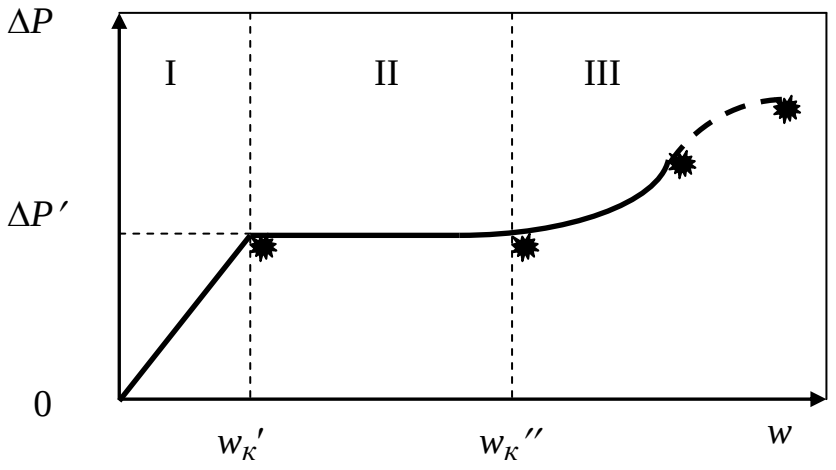


Рис109. График общей зависимости сопротивления слоя ($\Delta P_{пс}$) сыпучих материалов от изменения скорости (w) сушильного агента:
I – область фильтрации; II – область псевдоожижения;
III – область транспорта частиц;
$w'_к$ – первая критическая скорость; $w''_к$ - вторая критическая скорость, равная скорости свободного витания $w_{св}$

Существует ряд теоретически обоснованных и практически выявленных критериев для определения рабочей скорости сушильного агента, о которых речь будет идти непосредственно в методике расчетов.

К наиболее важным параметрам сушильного процесса относится также температура сушильного агента. Чем выше температура, тем интенсивнее идет процесс. Но имеются ограничения, связанные с характеристиками высушиваемого материала и с конструктивными особенностями самого аппарата. Поэтому задаваемые в расчетах значения температуры на входе в сушилку (температура под решеткой) и на выходе из сушилки (температура над слоем) целесообразно сверить с данными прил.1, относящимися к расчету сушильного барабана, а также с данными прил.12, относящимися непосредственно к расчету сушилки с кипящим слоем.

2.9.2. Содержание расчета

Приведенная методика распространяется на однокамерную сушилку. В курсовом проекте можно ограничиться этим типом сушилки.

Расчет выполняется по следующим разделам:

1. Исходные данные для расчета.
2. Материальный баланс процесса сушки.
3. Расчет процесса горения топлива, коэффициента избытка воздуха, параметров продуктов горения на входе в сушилку кипящего слоя.
4. Представление процесса сушки на *I-x*-диаграмме, определение параметров продуктов горения на выходе из сушилки, определение расхода сушильного агента и топлива.

5. Определение рабочей скорости сушильного агента в слое зернистого материала. Определение диаметра аппарата.

6. Определение коэффициента влагоотдачи и высоты кипящего слоя.

7. Определение диаметра и числа отверстий в распределительной решетке.

8. Определение высоты сепарационного пространства.

9. Определение гидравлического сопротивления установки.

10. Расчет и выбор вспомогательных устройств (циклона, фильтра, вентилятора).

Методики выполнения разделов 1-4, 10 уже представлены в п.2.4-2.5, 2.7 настоящих методических указаний. Методики выполнения разделов 5-9 будут представлены ниже.

2.9.3. Определение рабочей скорости сушильного агента в слое зернистого материала

Вначале определяют нижний и верхний пределы скорости псевдоожижения. При этом нижний предел (критическую скорость) определяют как скорость начала псевдоожижения (w_{nc}) для частиц материала среднего размера, а допустимый верхний предел – как скорость свободного витания ($w_{св}$) частиц среднего размера, остающихся на решетке. Принимается, что частицы более мелких размеров уносятся с газовым потоком и осаждаются в пылеосадительных устройствах. Считается, что они также высушиваются в газовом потоке.

Средний диаметр частиц высушиваемого материала вычисляется по формуле

$$d_{cp} = \frac{1}{\sum_{1}^{n} \frac{m_i}{d_i}}, \qquad (60)$$

где n - число выделенных фракций;

m_i – массовая доля i-той фракции;

d_i - средний ситовой размер i-той фракции, м, вычисляется как среднее арифметическое по наиболее крупному и наиболее мелкому зерну во фракции.

Рассмотрим **два варианта** расчета рабочей скорости псевдоожижения. Первый из них достаточно хорошо «работает» при относительно узком зерновом составе высушиваемого материала, второй вариант – более универсален.

По первому варианту фиктивная (отнесенная к полному сечению аппарата) скорость газов, соответствующая началу псевдоожижения (w_{nc}), определяется по формуле

$$w_{nc} = \frac{\mathrm{Re}_{nc} \cdot \mu_{cp}}{\rho_{cp} \cdot d_{cp}}, \qquad (61)$$

где Re_{nc} – критерий Рейнольдса, соответствующий w_{nc};

μ_{cp} - средняя динамическая вязкость газов, составляющих сушильный агент, при их средней температуре

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \qquad (62)$$

где t_1 – температура на входе в сушилку, °С;

t_2 - температура на выходе из сушилки, °С;

$\rho_{ср}$ – плотность сушильного агента при средней температуре, кг/м^3.

Значение $Re_{пс}$ ориентировочно можно вычислить, используя следующую эмпирическую зависимость

$$\mathrm{Re}_{пс} = \frac{Ar}{1400 + 5{,}22\sqrt{Ar}}, \qquad (63)$$

где Ar - критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_{ср}^3 \cdot \rho_{ср} \cdot g \cdot \rho_ч}{\mu_{ср}^2}, \qquad (64)$$

где $\rho_ч$ – плотность высушиваемого материала в зерне, кг/м^3.

Скорость свободного витания можно определить через критерий Рейнольдса $\mathrm{Re}_{св}$

$$w_{св} = \frac{\mathrm{Re}_{св} \cdot \mu_{ср}}{\rho_{ср} \cdot d_{\min}}. \qquad (65)$$

В свою очередь $\mathrm{Re}_{св}$ можно ориентировочно определить по следующей формуле

$$\mathrm{Re}_{св} = \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}}. \qquad (66)$$

Рабочая скорость псевдоожижения должна находиться в диапазоне значений между $w_{пс}$ и $w_{св}$.

Более точное значение рабочей скорости можно определить, вычислив значение так называемого предельного числа псевдоожижения ($K_{пр}$), как отношения скорости свободного витания к скорости псевдоожижения

$$K_{пр} = \frac{w_{св}}{w_{пс}}. \qquad (67)$$

Если $K_{пр}$ превышает 40-50, то рабочее число псевдоожижения $K_w = \frac{w}{w_{пс}}$ рекомендуется принимать в интервале 3…7, если $K_{пр}$ меньше 20-30, то значение рабочего числа псевдоожижения принимается в интервале 1,5…3.

Окончательно

$$w = K_w \cdot w_{пс}. \qquad (68)$$

По второму варианту критическая скорость псевдоожижения для частиц среднего размера определяется через критерий Лященко (Ly)

$$Ly = \frac{w_{пс}^3 \cdot \rho_{ср}^2}{\mu_{ср} \cdot g \cdot \rho_ч}. \qquad (69)$$

Критическое значение критерия Лященко ($Ly_{кр}$), соответствующее $w_{пс}$, определяется с помощью графической зависимости $Ly = f(Ar)$ для порозности ε = (0,4…0,45), характерной для неподвижного слоя зернистого материала (см. прил. 13).

Из (69) следует значение критической скорости псевдоожижения ($w_{пс}$)

$$w_{пс} = \sqrt[3]{\frac{Ly_{кр} \cdot \mu_{ср} \cdot g \cdot \rho_ч}{\rho_{ср}^2}}. \qquad (70)$$

Рабочее значение критерия Лященко определяется по той же зависимости $Ly = f(Ar)$ при порозности кипящего слоя $\varepsilon = 0{,}75$, обеспечивающей достаточно интенсивный процесс сушки.

Далее определяется число псевдоожижения по (67) и значение рабочей скорости псевдоожижения по (68).

На основании полученных по **первому** или **второму** варианту значения рабочей скорости псевдоожижения определяется скорость сушильного агента непосредственно у решетки при начальной температуре газов t_1 :

$$w_p = w \cdot \frac{273 + t_1}{273 + t_{ср}}. \qquad (71)$$

Пример вычисления рабочей скорости псевдоожижения

Общая часть расчетов

Условно примем, что в результате расчетов по п.п.1-4 общего задания получены следующие данные: высушиваемый материал – песок строительный, плотность в зерне $\rho_ч$ = 2650 кг/м^3, плотность насыпная $\rho_н$ = 1420 кг/м^3, влажность начальная $U_н$ = 7%, конечная $U_к$ = 0,5%,

фракционный состав: меньше 0,16 мм - 2,5 %,
0,16 – 0,315 мм - 37 %,
0,315 – 0,63 мм - 30 %,
0,63 - 1,25 мм - 17 %,
1,25 – 2,5 мм - 10 %,
2,5 – 5 мм - 3,5 %.

Производительность сушилки по сухому материалу – 10050 кг/ч, по влаге – 650 кг/ч = 0,18м^3/с. Сушильный агент – продукты горения природного газа. В этом примере примем условно температуру продуктов горения на входе в сушилку – 800 ^{o}С, коэффициент избытка воздуха, состав дымовых газов и продуктов горения – те же, что приведены в табл.2. В результате представления процесса сушки на *I-x*-диаграмме (см. п.2.5) найдено: x_1 = 0,053 кг/кг; x_2 = 0,32 кг/кг; x^*_2 = 0,28 кг/кг.

По (60) найдем средний диаметр частиц песка

$$d_{ср} = \frac{1}{\frac{0{,}025}{0{,}08} + \frac{0{,}37}{0{,}24} + \frac{0{,}30}{0{,}49} + \frac{0{,}17}{0{,}94} + \frac{0{,}10}{1{,}83} + \frac{0{,}035}{3{,}75}} = 0{,}37 мм = 0{,}37 \cdot 10^{-3} м.$$

Расход продуктов горения на процесс сушки

$$L = \frac{W}{x_2 - x_1} = \frac{650}{0{,}32 - 0{,}0053} = 2530 \quad кг/ч = 0{,}7 кг/с.$$

Примем температуру сушильного агента на выходе из сушилки t_2 = 125°С. Тогда средняя температура сушильного агента в сушилке составит

$$t_{ср} = \frac{800+125}{2} = 462{,}5^{o}C.$$

Плотность сушильного агента ρ и водяных паров $\rho_{вп}$ при $t_{ср}$ составит

$$\rho = \rho_{O} \cdot \frac{273}{462{,}5+273} = 1{,}209\,\frac{273}{462{,}5+273} = 0{,}449\,кг/м^3,$$

где ρ_o – плотность продуктов горения при нормальных условиях (см. табл.2);

$$\rho_{вп} = 0{,}803 \cdot \frac{273}{462{,}5+273} = 0{,}298\,кг/кг.$$

Объем газов проходящих через сушилку при средней температуре в сушилке с учетом испарения влаги

$$V = \frac{L}{\rho} + \frac{x_{ср} \cdot L}{\rho_{пв}}, \qquad (72)$$

где L – расход сушильного агента, кг/с;

$x_{ср} = \frac{x_1 + x_2}{2}$ - среднее влагосодержание сушильного агента;

В примере: $x_{ср} = \frac{0{,}053+0{,}32}{2} = 0{,}187$ кг/кг;

$$V = \frac{0{,}7}{0{,}449} + \frac{0{,}187 \cdot 0{,}7}{0{,}298} = 1{,}559 + 0{,}439 = 1{,}998\,м^3/с,$$

Объемные доли, составляющих смесь газов

$$y_1 = \frac{1{,}559}{1{,}998} = 0{,}78; \quad y_2 = \frac{0{,}439}{1{,}998} = 0{,}22.$$

Плотность парогазовой смеси

$\rho_{ср} = y_1\rho + y_1\rho_{пв}$ или $\rho_{ср} = 0.78 \cdot 0.449 + 0.22 \cdot 0.298 = 0.416$ кг/м^3

Динамический коэффициент вязкости продуктов горения при $t_{ср}$

$$\frac{M_{пг}}{\mu_{ср}} = \frac{y_1 \cdot M_1}{\mu_1} + \frac{y_2 \cdot M_2}{\mu_2} + \frac{y_3 \cdot M_3}{\mu_3} + \frac{y_4 \cdot M_4}{\mu_4}, \qquad (73)$$

где y_1, y_2, y_3, y_4 – объемные доли газов CO_2, H_2O, O_2, N_2 (см. табл.2);

M_1, M_2, M_3, M_4 – молярные массы тех же газов, кг/кмоль;

$M_{пг}$ - молярная масса продуктов горения (равна сумме числителей правой части (72);

$\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ – коэффициенты динамической вязкости тех же газов при $t_{ср}$, Па·с (прил.14).

То же, в численном выражении

$$\frac{28{,}3}{\mu_{ср}} = \frac{0{,}0358 \cdot 44}{0{,}037 \cdot 10^{-3}} + \frac{0{,}079 \cdot 18}{0{,}024 \cdot 10^{-3}} + \frac{0{,}1294 \cdot 32}{0{,}042 \cdot 10^{-3}} + \frac{0{,}7558 \cdot 28}{0{,}036 \cdot 10^{-3}},$$

откуда $\mu_{ср} = 0{,}036 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Согласно (64) находим значение критерия Архимеда

$$Ar = \frac{(0{,}37 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0{,}416 \cdot 9{,}81 \cdot 2650}{(0{,}036 \cdot 10^{-3})^2} = 423.$$

Расчет рабочей скорости псевдоожижения по первому варианту

Согласно (63) находим значение критерия Рейнольдса, соответствующее началу псевдоожижения $\mathrm{Re}_{nc} = \frac{423}{1400 + 5{,}22\sqrt{423}} = 0{,}281$.

Согласно (60) определяем критическую скорость начала псевдоожижения

$$w_{nc} = \frac{0{,}281 \cdot 0{,}036 \cdot 10^{-3}}{0{,}416 \cdot 0{,}37 \cdot 10^{-3}} = 0{,}066\, м/с.$$

Далее определим через критерии Архимеда и Рейнольдса скорость свободного витания для частиц песка, считая, что частицы менее 0,315 мм будут уноситься с сушильным агентом и осаждаться в пылеосадительных устройствах, высушиваясь в потоке газа. Тогда зерновой состав песка, подлежащего псевдоожижению, будет.

Размеры фракций песка	Остатки на ситах, %	Относительное содержание фракций в псевдоожиженном слое, %%
0,315-0,63	30,0	49,6
0,63-1,25	17,0	28,0
1,25-2,5	10,0	16,0
2,5-5,0	3,5	6,4

Средний диаметр частиц песка согласно (60) определяется как

$$d_{ср} = \frac{1}{\frac{0{,}496}{\frac{0{,}315+0{,}63}{2}} + \frac{0{,}28}{\frac{0{,}63+1{,}25}{2}} + \frac{0{,}16}{\frac{1{,}25+2{,}5}{2}} + \frac{0{,}064}{\frac{2{,}5+5{,}0}{2}}} = 0{,}44 мм = 0{,}44 \cdot 10^{-3} м.$$

Тогда, согласно (64)

$$Ar = \frac{(0{,}44 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0{,}416 \cdot 9{,}81 \cdot 2650}{(0{,}036 \cdot 10^{-3})^2} = 710.$$

Согласно (63)

$$\mathrm{Re}_{св} = \frac{710}{18 + 0{,}61\sqrt{710}} = 20{,}7.$$

Согласно (65)

$$w_{св} = \frac{20{,}7 \cdot 0{,}036 \cdot 10^{-3}}{0{,}416 \cdot 0{,}44 \cdot 10^{-3}} = 4{,}08\, м/с.$$

Согласно (67) $K_{пр} = \frac{4{,}08}{0{,}066} = 62.$

Принимаем $K_w = 7$.

Тогда $w = 0{,}066 \cdot 7 = 0{,}46$ м/с.

Расчет рабочей скорости псевдоожижения по второму варианту

Для принятых ранее условий: $t_{ср} = 462{,}5^{o}$С, $d_{ср} = 0{,}37 \cdot 10^{-3}$ м, $Ar = 423$ и $\varepsilon = 0{,}45$ по графику зависимости $Ly = f(Ar)$ (прил.13) находим

$$Ly_{кр} = 2 \cdot 10^{-3}.$$

Согласно (70)

$$w_{пс} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}036 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81 \cdot 2650}{0{,}416^2}} = 0{,}329\ м/с.$$

Значение критерия Ly относительно скорости витания при $\varepsilon = 0{,}75$, $t_{ср} = 462{,}5^{o}$С; $d_{ср} = 0{,}37 \cdot 10^{-3}$ м, $Ar = 423$; $Ly = 0{,}15$.

Скорость свободного витания

$$w_{св} = \sqrt[3]{\frac{0{,}15 \cdot \cdot 0{,}036 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}81 \cdot 2650}{0{,}416^2}} = 0{,}9\ м/с.$$

Коэффициент псевдоожижения $K_{пр} = 0{,}9/0{,}329 = 2{,}7$.

Принимаем $К_{пр} = 2{,}7$.

Значение рабочей скорости $w = 0{,}329 \cdot 2{,}7 = 0{,}89$ м/с.

Сравним расчетные значения скорости псевдоожижения с практическими данными (прил.12). Второй вариант дал более близкий результат. Его мы и примем для дальнейших расчетов.

Определим (71) значение скорости газов непосредственно над решеткой при $t_c = 800^{o}$С.

$$w_p = 0{,}89 \cdot \frac{273 + 800}{273 + 462{,}5} = 1{,}3\ м/с.$$

2.9.4. Определение диаметра решетки, параметров отверстий в решетке, высоты кипящего слоя, высоты сепарационного пространства, высоты сушилки

Полученное значение рабочей скорости дает возможность определить диаметр решетки (d) и, соответственно, сушилки, пользуясь формулой расхода

$$V = S_{ап} \cdot w = \frac{\pi d^2}{4} \cdot w, \qquad (74)$$

откуда

$$d = \sqrt{\frac{4V}{3{,}14 \cdot w}}, \qquad (75)$$

где $S_{ап}$ – площадь сечения, d – диаметр аппарата, м;

V – объем газов, проходящих через сушилку, при средней температуре в сушилке с учетом испаренной влаги:

Число отверстий в распределительной решетке (n) определяется по формуле

$$n = \frac{4S \cdot F_c}{\pi d_o^2} = \frac{d^{2 \cdot} F_c}{d_o^2}, \qquad (76)$$

где S – площадь (сечение) распределительной решетки, численно равная поперечному сечению корпуса сушилки S_{an}, то есть $\pi d^2/4$, м^2;

F_c – площадь «живого» сечения решетки, принимаем в интервале от 0,02 до 0,1;

d_o- диаметр отверстий в решетке, выбирается из ряда нормальных размеров, установленных ГОСТ 6636-69 (в мм): 2,0; 2,2; 2,5; 2,8; 3,2; 3,6; 4,0; 4,5; 5,0; 5,6.

Высоту кипящего слоя определяют исходя из выполнения 2-х условий: 1 – объем сепарационного пространства должен быть достаточен для высушивания материала; 2 – высота кипящего слоя должна правильно соотноситься с высотой действия струй сушильного агента или так называемой зоны гидродинамической стабилизации.

Методика определения объема сепарационного пространства относительно процесса сушки

Для того, чтобы определить требуемый объем сепарационного пространства с точки зрения сушильного процесса сначала определим интенсивность процесса сушки в слое, а затем – объем материала, который необходимо разместить на решетке при имеющей место интенсивности сушки и заданной производительности сушилки. Затем, задав величину порозности слоя, определяют высоту кипящего слоя.

Производительность сушилки по влаге (V, $м^3/с$) можно представить как

$$\frac{W}{\rho_{пв}} = \beta \cdot x'_{ср} \cdot F, \qquad (77)$$

где W – производительность сушилки по влаге, кг/с;

β - коэффициент поверхностной влагоотдачи, м/с;

$\Delta x'_{ср}$ – средняя движущая сила процесса влагоотдачи, как уже приводилось в п.2.6.3 $\Delta x'_{ср} = \dfrac{\Delta x'_н - \Delta x'_к}{\ln \dfrac{\Delta x'_н}{\Delta x'_к}}$;

F - суммарная площадь поверхности частиц высушиваемого материала в слое, м^2;

$\rho_{пв}$ – плотность водяного пара при $t_{ср}$, то есть

$$\rho_{пв} = 0{,}803 \cdot \frac{273}{273 + t_{ср}}; \qquad (78)$$

Коэффициент поверхностной влагоотдачи β, м/с, можно определить из следующего критериального уравнения

$$Nu' = 2 + 0{,}51 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}52} \cdot (\mathrm{Pr}')^{0{,}33}, \qquad (79)$$

где $Nu' = \dfrac{\beta \cdot l}{D}$ - массообменный критерий Нуссельта;

l – характерный линейный размер; в качестве такового целесообразно принять высоту зоны активного испарения воды в слое, которую отождествляют с высотой действия струи гидродинамического потока $h_{стр}$;

Согласно опытным данным $h_{стр} \approx 20 d_0 \approx l$,

где d_0 – диаметр отверстий в решетке.

$\mathrm{Pr}' = \dfrac{\mu}{\rho_{ср} \cdot D}$ - массообменный критерий Прандтля;

D - коэффициент диффузии водяных паров в сушильном агенте при средней температуре, м^2/с, в первом приближении его значение можно определить как

$$D = D_{20} \cdot \left(\frac{T_o + t_{ср}}{T_o} \right)^{1{,}5}, \qquad (80)$$

где D_{20} = 21,9·10^{-6} м^2/с – коэффициент диффузии водяных паров при t = 20°С.

Окончательно $$\beta = \frac{D}{d_{ср}} \left(2 + 0{,}51 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}52} \cdot (\mathrm{Pr}')^{0{,}33} \right). \qquad (81)$$

Вычислив значения $x'_{ср}$ и β из (77) находят необходимую суммарную площадь поверхности частицы песка – F.

После вычисления значения F определяют массу песка, которая должна находиться на решетке $$m = \frac{F}{S_{уд}}, \qquad (82)$$

где $S_{уд}$ – удельная (относительно 1 кг) поверхность зерен песка, ее можно определить как $$S_{уд} = \frac{6}{d_{ср} \cdot \rho_c}. \qquad (83)$$

Высоту псевдоожиженного слоя определяют как

$$h_1 = \frac{V_{пс}}{S_{ап}} = \frac{4V_{пс}}{3{,}14 \cdot d}, \qquad (84)$$

где $V_{пс}$ – объем псевдоожиженного слоя, его можно определить как

$$V_{пс} = \frac{m}{\rho(1 - \varepsilon)}, \qquad (85)$$

где ρ - плотность песка в зерне, кг/м^2;

ε - порозность псевдоожиженного слоя, в этом расчете можно принять ε = 0,75.

Пример определения высоты кипящего слоя исходя из условия высушивания материала

Исходные данные: L = 2530 кг/ч = 0,7 кг/с; W = 650 кг/ч = 0,18 кг/с; $t_{ср}$= 462,5°С; $\rho_{ср}$= 0,416 кг/м^3; $\mu_{ср}$ = 0,036·10^{-3} Па·с; x_1 = 0,053 кг/кг; x_2 = 0,32 кг/кг; x^*_2 = 0,28 кг/кг; w = 0,89 м/с; V=1,998 м^3/с.

Диаметр решетки согласно (74)

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}998}{3{,}14 \cdot 0{,}89}} = 1{,}7\ м.$$

Принимаем диаметр отверстия в решетке d_o = 2,5·10^{-3} м, F_c = 0,05.

Число отверстий в решетке согласно (76) $n = \dfrac{1{,}7^2 \cdot 0{,}05}{\left(2{,}5 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 23000.$

$l = h_{стр}$=20·2,5=50мм=0,05м

Определение площади испарения – (77)

$$\Delta x'_н = 0{,}28 - 0{,}053 = 0{,}227\ кг/кг;$$

$$\Delta x'_к = 0{,}32 - 0{,}28 = 0{,}04\ кг/кг;$$

$$\Delta x'_{ср} = \frac{0{,}227 - 0{,}04}{\ln\dfrac{0{,}227}{0{,}04}} = 0{,}108\ кг/кг.$$

$$D = 21{,}9 \cdot 10^{-6}\left(\frac{273 + 462{,}5}{273}\right)^{1{,}5} = 9{,}68 \cdot 10^{-5}\ м^2/с.$$

$$Pr' = \frac{0{,}036 \cdot 10^{-3}}{0{,}416 \cdot 9{,}68 \cdot 10^{-5}} = 0{,}9.$$

$$\mathrm{Re} = \frac{0{,}416 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}44 \cdot 10^{-3}}{0{,}036 \cdot 10^{-3}} = 4{,}52.$$

$$\beta = \frac{9{,}68 \cdot 10^{-5}}{0{,}05}\left(2 + 0{,}51 \cdot 4{,}52^{0{,}52} \cdot 0{,}9^{0{,}33}\right) = 0{,}006\ м/с.$$

$$F = \frac{W}{\rho_{пв} \cdot \beta \cdot \Delta x'_{ср}} = \frac{0{,}18}{0{,}298 \cdot 0{,}006 \cdot 0{,}108} = 932\ м^2.$$

Определение удельной поверхности песка – (83)

$$S_{уд} = \frac{6}{0{,}44 \cdot 10^{-3} \cdot 2650} = 5\ м^2/кг.$$

Масса песка на решетке

$$m = \frac{932}{5} = 186{,}4\ кг.$$

Объем псевдоожиженного слоя – (85)

$$V_{пс} = \frac{186{,}4}{2650(1-0{,}75)} = 0{,}281\,м^3.$$

Расчетная высота псевдоожиженного слоя по условию высушивания материала – (84)

$$h_1 = \frac{4 \cdot 0{,}281}{3{,}14 \cdot 1{,}7^2} = 0{,}124\,м.$$

Методика определения высоты кипящего слоя и объема сепарационного пространства относительно гидродинамических условий процесса псевдоожижения

Высоту кипящего слоя принимают, на основе опытных данных, в 4 раза большей высоты зоны действия струи ($h_{стр}$) – зоны гидродинамической стабилизации. Последняя определяется из соотношения

$$h_{стр} = 20d_o. \quad (86)$$

Соответственно высота кипящего слоя будет

$$h = 80d_o. \quad (87)$$

Тогда общая высота аппарата над решеткой (H) будет

$$H = h + h_{сеп}. \quad (88)$$

Внутренний диаметр аппарата в верхней части ($d_н$) принимают

$$d_н = 1{,}1d, \quad (89)$$

что обеспечивает понижение скорости, благодаря чему вынос мелких частиц из аппарата уменьшается.

Пример определения высоты кипящего слоя, остальных размеров сушилки, исходя из гидродинамики процесса

Принимаем диаметр отверстий в решетке d_o = 2,5 мм.

Тогда высота кипящего слоя составит h = 80 ·2,5= 200 мм = 0,2 м.

Высота сепарационного пространства:

$$h_{сеп} = 4 \cdot 0{,}2 = 0{,}8\,м.$$

Общая высота аппарата над решеткой:

$$H = 0{,}8 + 0{,}2 = 1{,}0\,м.$$

Диаметр аппарата в верхней части:

$$d_н = 1{,}1 \cdot 1{,}7 = 1{,}87\,м.$$

Полученная во втором варианте расчета высота кипящего слоя (0,2 м) превышает необходимое с точки зрения обеспечения процесса сушки значение (0,124 м) и, следовательно, полученные во втором варианте расчетные значения можно принять как окончательные.

Выводы по расчетам

Если высота псевдоожиженного слоя, полученная по второму варианту расчета, превышает тот же показатель, полученный по первому варианту расчета, то это означает, что процесс высушивания материала будет обеспечен и полученные по второму варианту результаты можно принять как окончательные.

В противном случае необходимо повторить расчеты по второму варианту, добившись увеличения высоты кипящего слоя.

2.9.5. Расчет гидравлического сопротивления сушилки с кипящим слоем

В величину гидравлического сопротивления сушилки (ΔP) входят две составляющие

$$\Delta P = \Delta P_{пс} + \Delta P_{р}, \qquad (90)$$

где $\Delta P_{пс}$ – гидравлическое сопротивление псевдоожиженного слоя, Па;

$\Delta P_{р}$ - гидравлическое сопротивление решетки, Па.

В свою очередь

$$\Delta P_{пс} = \rho_{ч} \cdot (1-\varepsilon) g \cdot h, \qquad (91)$$

$$\Delta P_{р} = \zeta \cdot \left(\frac{w_р}{F_c}\right)^2 \cdot \frac{\rho_{t1}}{2}. \qquad (92)$$

В (91) высоту слоя h принять при порозности $\varepsilon = 0{,}75$.

В (92) скорость над решеткой $w_р$ и $\rho_{ср}$ принять при t_1 , коэффициент сопротивления $\zeta = 1{,}5$.

Пример расчета гидравлического сопротивления сушилки

Примем $\rho_ч$ = 2650 кг/м^3; ρ_0 = 1,263 кг/м^3 (табл.2); ε = 0,75; h = 0,2 м; ζ = 1,5; t_1 = 800°С; $w_р$ = 1,3 м/с; F_c = 0,05.

Плотность сушильного агента при t_1 = 800°С

$$\rho_{t1} = 1{,}263 \cdot \frac{273}{273+800} = 0{,}321\, кг/м^3.$$

Сопротивление псевдоожиженного слоя (ф.91)

$$\Delta P_{пс} = 2650 \cdot (1-0{,}75) \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}2 = 1300\, Па.$$

Сопротивление решетки (92)

$$\Delta P_{р} = 1{,}5 \cdot \left(\frac{1{,}3}{0{,}05}\right)^2 \cdot \frac{0{,}321}{2} = 163\, Па.$$

Общее сопротивление сушилки $\Delta P = 1300 + 163 = 1463\, Па.$

3. РАСЧЕТ ОБЖИГОВЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

3.1. Общие указания

Предметом разработки в курсовом проекте обычно являются аппараты, используемые при получении так называемых местных вяжущих, в первую очередь – строительной извести и строительного гипса, производство которых нередко организуется в составе строительных комбинатов и объединений, и, таким образом, техника и технология их получения входят в компетенцию инженера-строителя-технолога. Не рекомендуются темы, касающиеся получения портландцемента и его разновидностей, так как производством цемента должны заниматься специалисты другого профиля.

Методика расчета обжиговых аппаратов во многом схожа с методикой расчета сушильных аппаратов, однако имеются дополнительные аспекты, связанные, в первую очередь, с теми химическими превращениями, которые происходят в обжиговых аппаратах при высоких температурах. Соответственно они требуют дополнительного времени и дополнительной энергии, что вызывает увеличение объема, длины или высоты аппарата, а также мощности энергетических источников.

3.2. Расчет вращающейся печи для обжига извести

Прежде чем приступить к расчетам, необходимо внимательно ознакомиться с устройством и работой вращающихся печей по литературным источникам, например, [3,10,13,16].

В первом приближении можно отметить следующее.

Печь представляет собой футерованный изнутри вращающийся стальной цилиндрический корпус, установленный наклонно на роликовых опорах. В зависимости от отношения длины корпуса L к его диаметру D_o в свету различают длинные (отношение L/D_o=35…45) и короткие, с запечными теплообменниками (L/D_o= 14…20), вращающиеся печи.

В зависимости от технологии подготовки сырья к обжигу различают мокрый и сухой способы производства извести во вращающихся печах.

Мокрый способ применяют при использовании мела с высокой карьерной влажностью, который тонко измельчают, добавляют воду и в виде шлама направляют в печь. В этой технологии применяют длинные вращающиеся печи преимущественно с внутренним теплообменником. Печь состоит (рис.11) из теплоизолированного цилиндрического корпуса 8 с внутренними (внутрипечными) теплообменниками 10,11,14, роликовых опор 1, установленных на фундаментные опоры 6, гидравлического упора от продольного сползания, привода, разгрузочной 7 и загрузочной 12 головок.

Подготовленный шлам из шламбассейна с помощью насоса подается в питатель шлама, который равномерно загружает его в печь. Пройдя стадии сушки, подогрева и обжига, мел превращается в известь, которая, пройдя через холодильник, пластинчатым конвейером направляется на склад.

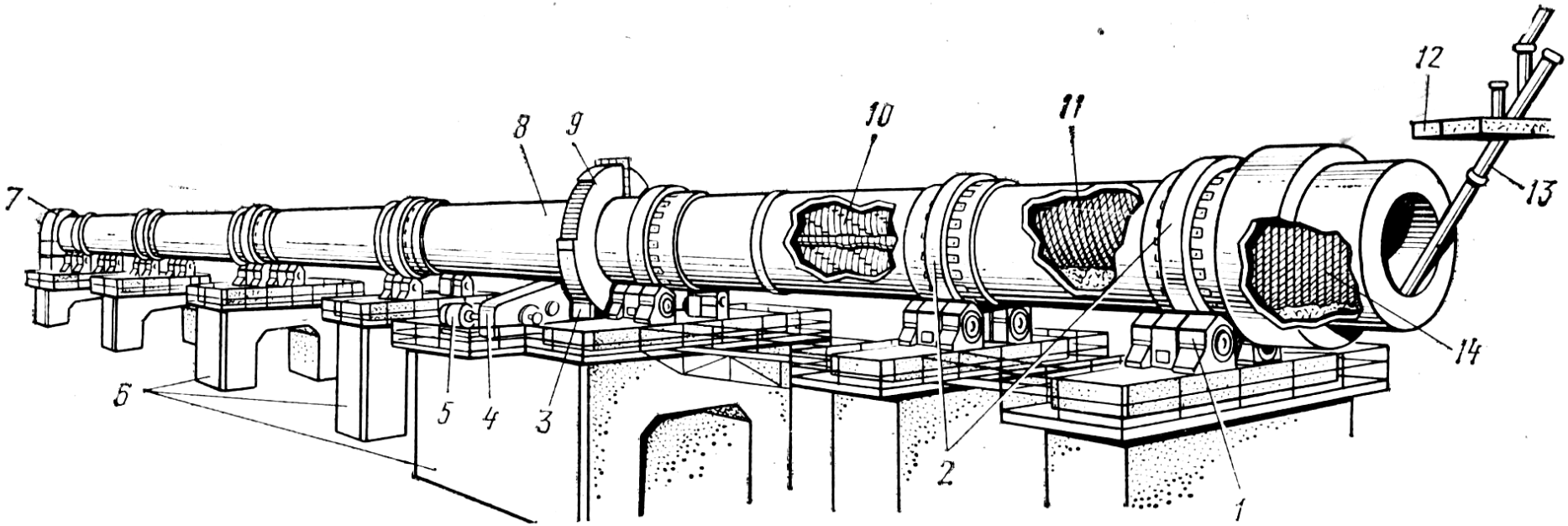


Рис.11. Схема длинной печи с внутренними теплообменниками:
1 – опора; 2 – бандажи; 3 – подвенцовая шестерня; 4 – редуктор привода; 5 – электродвигатель главного привода печи; 6 – фундаментные опоры; 7,12 – головки; 8 – корпус; 9 – венцовая шестерня; 10,11,14 – теплообменники; 13 – течка сырья

Топливо подается в печь со стороны разгрузочной головки через горелочное устройство.

Температура отходящих газов – 200…250°С. Сравнительно невысокая запыленность газов позволяет выполнять одноступенчатую их очистку от пыли в электрофильтре.

Длинные вращающиеся печи применяются также для обжига мела по сухому способу. В этом случае в печь подаются куски в виде фракций 40…20 мм или 20…5 мм. Перемещаясь в барабане печи, мел обжигается при температуре среды 1100…1400°С, образующаяся известь ссыпается из печи в холодильник, где ее температура снижается до 120…40°С.

Газообразные продукты обжига, выходящие из загрузочной головки печи при температуре 350…450°С, проходят двухступенчатую очистку от пыли в циклонах и электрофильтре, после чего дымососом выбрасываются через дымовую трубу в атмосферу.

В современном производстве преимущественное применение получил другой тип, более экономичной печи, а именно короткой вращающейся печи с запечным теплообменником.

Вращающаяся печь с запечным теплообменником (рис.12) состоит из теплообменника 7, загрузочной головки 20, разгрузочной головки 12, цилиндрического корпуса 10 с приводом 19, горелки 13 и обнобарабанного холодильника 14. Корпус 10 бандажами 11 опирается на роликовые опоры 15. Упорное устройство 17 ограничивает осевое смещение корпуса. Он установлен с уклоном 3,5 % к горизонту и вращается с частотой 0,5…1,5 мин$^{-1}$ от электродвигателя 19 главного привода. Топливо поступает в печь через горелочное устройство, расположенное в ее разгрузочной головке.

Температура выходящих из подогревателя газов – 400…450°С. Их дополнительно направляют в паровой котел-утилизатор, где они охлаждаются до температуры 230…190°С, затем - на очистку от пыли в циклоны и электрофильтр и далее дымососом через дымовую трубу в атмосферу.

По содержанию и последовательности выполнения расчет должен соответствовать следующим далее п.п.3.2.1-3.2.7.

3.2.1. Исходные данные для расчета

Для расчета необходимы следующие данные:

- часовая производительность печи, $П$, т/ч;
- характеристики исходного сырья:

вид;

влажность, $U_н$, %;

потери при прокаливании, $п.п.п^{с}$, %, в том числе за счет содержания $CO_2^{с}$, %, за счет содержания гидратной воды в глинистых примесях, $G^{г}_{H_2O}$, % (можно принять содержание гидратной воды как 10 % от массы глинистых примесей);

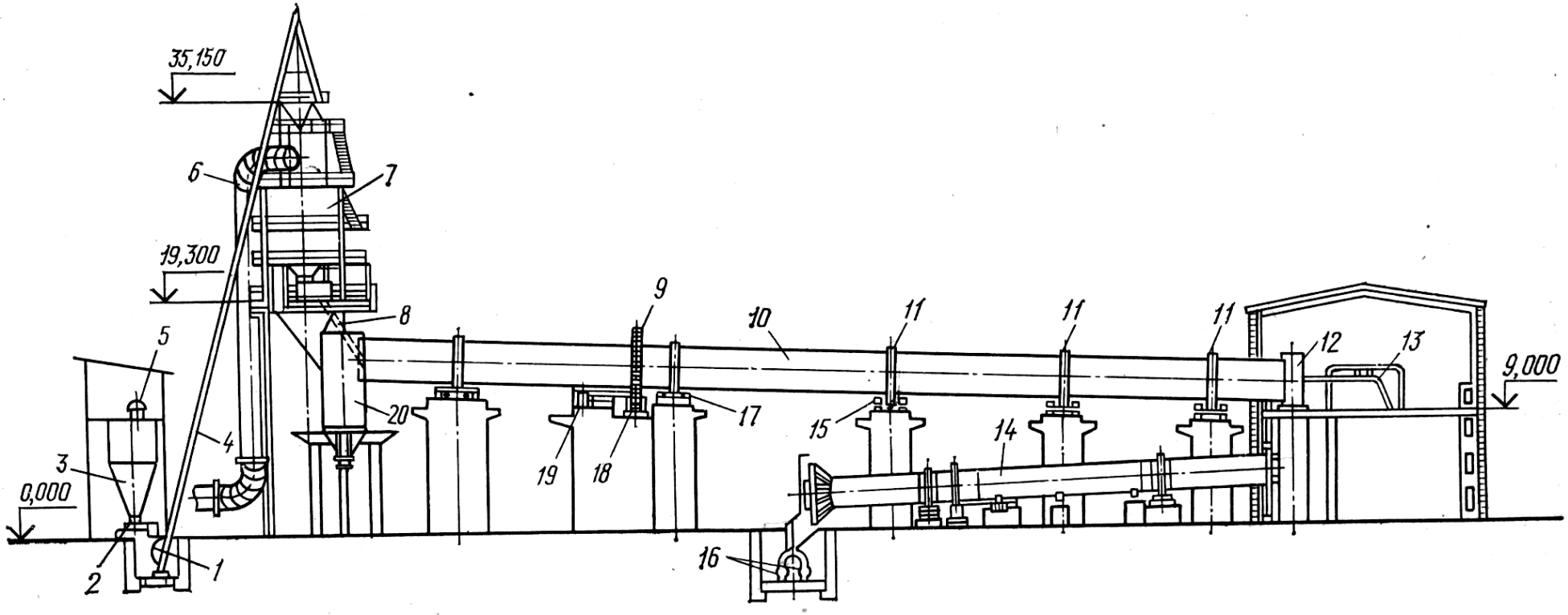


Рис.12. Схема короткой вращающейся печи с шахтным подогревателем известняка и однобарабанным холодильником извести:
1 – ковш; 2 – питатель; 3 – бункер; 4 – подъемник; 5,16 – конвейеры; 6 – трубопровод; 7 – теплообменник; 8 – течка; 9,18 – шестерни; 10 – корпус; 11 – бандажи; 12,20 – головки; 13 – горелка; 14 – холодильник; 15 – опора; 17 – упорное устройство; 19 - электродвигатель

- содержание карбонатов ($CaCO_3$+$MgCO_3$), %;
- содержание глинистых примесей, $П_р$, %;
- температура поступающего на обжиг сырья, °С;
- топливо – природный газ (указать месторождение);
- объемный состав сухого газа, %;
- теплота сгорания сухого газа, $Q_н^р$, кДж/м^3;
- температура газа, °С;
- температура окружающего воздуха, $t_{во}$, °С;
- степень превращения сырья (степень диссоциации), n.

3.2.2. Расчет процесса горения топлива

Выполняется в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.4. При этом температура в зоне обжига назначается соответственно рекомендациям [10,13] и с учетом данных, приведенных в прил. 15. Принятая температура учитывается при расчете коэффициента избытка воздуха в (5).

Пример расчета состава продуктов горения при α = 1,5 (принят условно) представлен в табл.4 как в продолжении расчетов, представленных в табл.2 при α= 1.

3.2.3. Материальный баланс печи

Расчет баланса выполняется на 1 кг обожженной извести.

Расходные статьи:

1) топливо (природный газ) с расходом B, м^3/кг;

2) сырье, кг, в том числе:

теоретический расход сухого сырья

$$G_{сух}^{ст} = \frac{100}{100 - п.п.п^{с}}; \qquad (93)$$

величина потерь при прокаливании должна составлять

$$п.п.п^{с} = G_{CO_2}^{с} + G_{H_2O}^{г},$$

или $$п.п.п.^{с} = 0{,}44\,(CaCO_3+MgCO_3)n + 0{,}1Пр, \%, \qquad (94)$$

(здесь и в дальнейшем индекс «*с*» означает, что рассматриваемая характеристика относится к сырью);

расход сухого сырья с учетом уноса пыли $\alpha'_{ун}$ (можно принять $\alpha'_{ун}$=1…3%)

$$G_{сух}^{с} = \frac{G_{сух}^{ст} \cdot 100}{100 - \alpha'_{ун}}; \qquad (95)$$

расход влажного сырья $$G_{вл}^{с} = \frac{G_{сух}^{с} \cdot 100}{100 - U_н}; \qquad (96)$$

Таблица 4

Состав продуктов горения при $\alpha = 1,5$ (пример, продолжение табл.2)

Расчетные показатели	Расход кислорода, м^3 на 100 м^3 газа	Состав и количество продуктов горения, м^3, для нормальных условий					Расход сухого воздуха, м^3
		CO_2	H_2O	O_2	N_2	Всего	
Содержание O_2: 199,56 · 1,5, в том числе свободного: 299,34 – 199,56	299,34			99,78		99,78	
Дополнительно вовлечено N_2: 750,7(1,5-1,0)					375,35	375,35	
Объем паров воды, вовлеченных с дополнительным воздухом: 7,63(1,5-1,0)			3,82			3,82	
Итого при $\alpha = 1,5$		100,06	210,13	99,78	1126,55	1536,52	1425,38
Объем сухих продуктов горения, м^3						1326,39	
Плотность продуктов горения, кг/м^3		1,964	0,803	1,29	1,25		
Масса продуктов горения, G, кг		196,52	168,73	128,72	1408,19	1902,16	
Масса сухих продуктов горения, кг						1733,43	1105,00
Плотность сухих продуктов горения, кг/м^3						1,307	

3) расход воздуха, кг $$G_в = V_в \cdot \rho_{во} \cdot B, \quad (97)$$

где $V_в$ – объемный расход воздуха, необходимый для сжигания 1 м^3 топлива (природного газа) при принятом коэффициенте избытка воздуха, м^3/м^3 (см. табл.4);

$\rho_{в0}$- плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3;

B - расход топлива – пока неизвестная величина (ее значение будет определено из теплового баланса процесса обжига).

Приходные статьи:

1) выход комовой извести – 1 кг;

2) выход углекислого газа, кг:

по массе: $$G^c_{CO_2} = \frac{G^c_{сух} \cdot CO^c_2}{100}, \quad (98)$$

по объему: $$V^c_{CO_2} = \frac{G^c_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}; \quad (99)$$

3) выход физической воды сырья, кг

по массе $$G^ф_{H_2O} = G^c_{вл} - G^c_{сух}, \quad (100)$$

по объему $$V^ф_{H_2O} = \frac{G^ф_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}, \quad (101)$$

где ρ_{H_2O} - плотность паров воды при нормальных условиях, кг/м^3;

4) выход гидратной воды сырья, кг

по массе: $$G^г_{H_2O} = \frac{G^c_{сух} \cdot 0{,}1Пр}{100}, \quad (102)$$

по объему: $$V^г_{H_2O} = \frac{G^г_{H_2O}}{\rho_{H_2O}}; \quad (103)$$

5) количество уносимой пыли, кг

$$G^c_{ун} = G^{ст}_{сух} - G^c_{сух}; \quad (104)$$

6) выход отходящих газов, кг

$$G_{пг} = G \cdot B + G^c_{CO_2} + G^ф_{H_2O} + G^г_{H_2O}, \quad (105)$$

где G – выход продуктов горения в кг от сгорания 1 м^3 топлива (см. табл.4 для расчетного значения α).

Пример расчета материального баланса печи

Пусть в качестве сырья используется известняк с содержанием ($CaCO_3$+$MgCO_3$) – 97 %, глинистых примесей *Пр* – 3 %; степень превращения сырья при обжиге n = 0,96 (в соответствии с технологическим регламентом).

Влажность известняка – 3 %.

Производительность печи – 60 т/ч.

Пылеунос $\alpha'_{ун}$ = 3 %.

Согласно (94) $n.n.n.^{c}$ = 0,44·97·0,96 + 0,1·3= 40,97 + 0,30 = 41,27 %.

Согласно (93) $G^{ст}_{сух} = \dfrac{100}{100-41,27} = 1,7$ кг/кг.

Согласно (95) $G^{c}_{сух} = \dfrac{1,7\cdot 100}{100-3} = 1,75$ кг/кг.

Согласно (96) $G^{c}_{вл} = \dfrac{1,75\cdot 100}{100-3} = 1,80$ кг/кг.

Согласно (97) $G_{в} = 14,25\cdot 1,29\cdot B = 18,38B$.

Согласно (98) $G^{c}_{CO_2} = \dfrac{1,75\cdot 40,97}{100} = 0,72$ кг/кг.

Согласно (99) $V^{c}_{CO_2} = \dfrac{0,72}{1,96} = 0,37$ м^3/кг

$$(\rho_{CO_2} = \frac{M}{22,4} = \frac{44}{22,4} = 1,96 \text{ кг/м}^3).$$

Согласно (100) $G^{ф}_{H_2O} = 1,80 - 1,75 = 0,05$ кг/кг.

Согласно (101) $V^{ф}_{H_2O} = \dfrac{0,05}{0,803} = 0,06$ м^3/кг.

Согласно (102) $G^{г}_{H_2O} = \dfrac{1,75\cdot 0,1\cdot 3}{100} = 0,005$ кг/кг.

Согласно (103) $V^{г}_{H_2O} = \dfrac{0,005}{0,803} = 0,006$ м^3/кг.

Согласно (104) $G^{c}_{ун} = 1,75 - 1,70 = 0,05$ кг/кг.

Согласно (105) $G_{пг} = 19,02B + 0,72 + 0,05 + 0,005 = 19,02B + 0,775.$

Итоги расчета целесообразно представить в форме табл.5

Таблица 5

Материальный баланс печи (выполнен на 1 кг извести)

Приходные статьи		Расходные статьи	
наименование	количество, кг	наименование	количество, кг
Известь	1,00	Топливо	$B \cdot \rho_m$=0,71B
Отходящие газы	19,02B+0,775	Сырье	1,80
Пылеунос	0,05	Воздух	18,38B
Итого:	19,02B+1,825	Итого:	19,09B+1,800
Расчет выполнен правильно.			

Примечание: плотность горючего природного газа можно принять как для CH_4, то есть $\rho_m = \frac{16}{22,4} = 0,71$ кг/м^3.

3.2.4. Тепловой баланс печи (на 1 кг извести) и расход топлива

Приходные статьи по количеству теплоты, кДж/кг:

1) от сгорания топлива $$Q_1^n = Q_н^p \cdot \eta \cdot B, \quad (106)$$

здесь B по-прежнему остается неизвестной величиной, а $Q_н^p$, кДж/м^3, принимается в соответствии с характеристиками топлива;

2) вносимая исходным сырьем

$$Q_2^n = (G_{сух}^c \cdot c_м + G_{H_2O}^ф \cdot c_в) \cdot t_{м1}, \quad (107)$$

где $c_м$ – удельная теплоемкость сырья (известняка, мела), кДж/(кг·°С) (прил. 1);

$c_в$ – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);

$t_{м1}$- исходная температура сырья, °С;

3) энтальпия воздуха, подогретого до t_2 в холодильнике, комплектующем печь, кДж/(м^3°С)

$$Q_3^n = V_в \cdot c_в \cdot t_{хв}^{вых} \cdot B, \quad (108)$$

где $V_в$ – расход воздуха при расчетном значении коэффициента α (табл.4);

$t_{хв}^{вых}$ – температура воздуха на выходе из холодильника;

$c_в$ – удельная теплоемкость воздуха при $t_{в2}$, кДж/(м^3°С) (прил. 3);

Общее количество теплоты, вносимой в печь Q^n

$$Q^n = Q_1^n + Q_2^n + Q_3^n. \quad (109)$$

Примечание: физическая теплота, вносимая топливом, ввиду малости не учтена.

Расходные статьи по количеству теплоты, кДж/кг:

1) на испарение влаги $$Q_1^p = 2500 \cdot G_{H_2O}^{ф}, \quad (110)$$

где 2500 – скрытая теплота парообразования, кДж на 1 кг влаги;

2) на диссоциацию ($CaCO_3$+$MgCO_3$)

$$Q_2^p = \frac{G_{сух}^c \cdot n \cdot (100 - Пр) \cdot Q_x}{100}, \quad (111)$$

где Q_x - количество теплоты на диссоциацию (его можно принять равным 1658 кДж/кг [4]);

n – степень разложения ($CaCO_3$+$MgCO_3$);

3) с отходящими газами

$$Q_3^p = \left[\left(V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{N_2} \cdot c_{N_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{O_2} \cdot c_{O_2}\right) \cdot B + \right. \quad (112)$$

$$\left. + V_{CO_2}^c \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O}^{ф} \cdot c_{H_2O} + V_{H_2O}^{г} \cdot c_{H_2O}\right] \cdot t_1^{вых},$$

где $V_{CO_2}, V_{N_2}, V_{H_2O}, V_{O_2}$ - объемы составляющих дымовых газов, образовавшихся при сжигании 1 м^3 топлива при расчетном значении α (табл.5);

$V_{CO_2}^c, V_{H_2O}^{ф}, V_{H_2O}^{г}$ - объемы углекислого газа, физической и гидратной воды, образовавшиеся при получении 1 кг извести;

$c_{CO_2}, c_{N_2}, c_{H_2O}, c_{O_2}$ - удельные объемные теплоемкости при температуре отходящих газов $t_{отх}$ (прил. 3);

4) с известью, выходящей из печи

$$Q_4^p = 1 \cdot c_и \cdot t_{IVм}^{вых}, \quad (113)$$

где $c_и$ – удельная теплоемкость извести, кДж/(кг·°С);

$t_{IVм}^{вых}$ - температура извести, выходящей из печи, °С;

5) с пылеуносом $$Q_5^p = G_{ун}^c \cdot c_м \cdot t_I^{вых}, \quad (114)$$

где $c_м$ – удельная теплоемкость уносимой пыли, кДж/кг (можно принять как для известняка);

6) потери в окружающую среду, можно принять составляющими 3-12% от общих расходов (прил. 17)

$$Q_6^p = (0{,}03...0{,}12)\left(Q_1^p + Q_2^p + Q_3^p + Q_4^p + Q_5^p\right). \quad (115)$$

Общее количество теплоты, расходуемой в печи Q^p

$$Q^p = \left(Q_1^p + Q_2^p + Q_3^p + Q_4^p + Q_5^p + Q_6^p\right). \quad (116)$$

Расход топлива B (м^3/кг) определяется из уравнения теплового баланса

$$Q^n = Q^p \quad \text{или}$$

$$Q_1^n + Q_2^n + Q_3^n = Q_1^p + Q_2^p + Q_3^p + Q_4^p + Q_5^p + Q_6^p. \qquad (117)$$

На основании выполненных расчетов составляется сводная таблица теплового баланса (табл.6), которая позволяет проверить правильность выполненных расчетов (невязка баланса не должна превышать 1 %).

Пример расчета теплового баланса вращающейся печи

В качестве исходных приняты результаты расчета материального баланса печи (табл.5), а также: температура воздуха, подогретого в холодильнике $t_{хв}^{вых}$ = 300°С (прил. 15,16); температура отходящих из печи газов $t_I^{вых}$ = 300°С; температура извести, выходящей из печи $t_{IVм}^{вых}$= =1000°С, выходящей из холодильника $t_{хм}^{вых}$ = 150°С; теплота сгорания топлива $Q_н^p$= 35700 кДж/кг; расход воздуха на горение 1 м^3 топлива $V_в$ = 14,25 м^3/м^3; выход продуктов горения: V_{CO_2}=1,00 м^3/м^3,V_{H_2O}=2,10 м^3/м^3,

V_{O_2} = 1,00м^3/м^3, V_{N_2} = 1,27 м^3/м^3. Приняты потери в окружающую среду – 12 %.

Согласно (106) $\quad Q_1^n = 35700 \cdot 0{,}9 \cdot B = 32130\,B.$

Согласно (107) $\quad Q_2^n = (1{,}75 \cdot 0{,}92 + 0{,}05 \cdot 4{,}19) \cdot 10 = 18{,}19$ кДж/кг.

Согласно (108) $\quad Q_3^n = 14{,}25 \cdot 1{,}33 \cdot 300 \cdot B = 5685B$.

Согласно (110) $\quad Q_1^p = 2500 \cdot 0{,}065 = 162{,}5$ кДж/кг.

Согласно (111) $\quad Q_2^p = \dfrac{1{,}75 \cdot 0{,}96 \cdot (100-3) \cdot 1658}{100} = 2702$ кДж/кг.

Согласно (112)

$$Q_3^p = \begin{bmatrix} (1{,}0 \cdot 1{,}87 + 11{,}27 \cdot 1{,}31 + 2{,}1 \cdot 1{,}54 + 1{,}0 \cdot 1{,}32) \cdot B + \\ + 0{,}37 \cdot 1{,}87 + 0{,}06 \cdot 1{,}54 + 0{,}006 \cdot 1{,}54 \end{bmatrix} \cdot 300 = 6360B + 237.$$

Согласно (113) $\quad Q_4^p = 1 \cdot 0{,}90 \cdot 1000 = 900$ кДж/кг.

Согласно (114) $\quad Q_5^p = 0{,}05 \cdot 0{,}92 \cdot 300 = 14$ кДж/кг.

Согласно (115)

$$Q_6^p = 0{,}12(125 + 2702 + 6360B + 237 + 900 + 14) = 447 + 763B.$$

Уравнение теплового баланса

$$32130B + 18 + 5685B = 162 + 2702 + 6360B + 273 + 900 + 14$$

$$B = 0{,}146 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таблица 6

Сводная таблица теплового баланса печи на 1 кг извести
(пример)

Приходные статьи			Расходные статьи		
наименования	количество		наименования	Количество	
	кДж	%		кДж	%
Q_2^n (106)	4691	84,69	Q_1^p (110)	162	2,93
Q_1^n (107)	18	0,33	Q_2^p (111)	2702	48,83
Q_3^n (108)	830	14,98	Q_3^p (112)	1166	21,07
			Q_4^p (113)	900	16,27
			Q_5^p (114)	14	0,27
			Q_6^p (115)	588	10,63
Итого:	5539	100	Итого:	5533	100

Невязка: $\frac{5539-5533}{5539}\cdot 100 = 0{,}01\%$ - расчет выполнен правильно.

3.2.5. Расчет температуры теплоносителя и построение графика распределения температуры по длине печи

Прежде, чем приступить к расчетам, необходимо еще раз вернуться к устройству вращающихся печей и ознакомиться с возможными значениями параметров в каждой зоне. Для этой цели рекомендуются источники [3,13], прил. 15, 17.

Позонный расчет температуры в печи можно ориентировать на схему, изображенную на рис.13. Для упрощения расчетов вне зависимости от принятой конструкции печи все четыре расчетные зоны на схеме можно представить в барабанной ее части, что практически не влияет на результаты расчетов.

Согласно рис.13 и на основании [3,13], необходимо составить сводку цифровых данных о температуре обжигаемого материала на входе в печь, на выходе из печи и на границах зон, только после этого можно приступать к расчету температуры газового потока. Температуру газового потока на границах зон рассчитывают на основании тепловых балансов, составленных для этих зон. Полученные значения целесообразно сверить с практическими данными [13].

Пример. Сводка цифровых данных о температуре обжигаемого материала в зонах вращающейся печи, перечень расчетных характеристик для газовых потоков:

температура материала в зонах печи с внутренним теплообменником (согласно прил. 16) на входе в зону I - $t_{Iм}^{вх} = 10^{o}C$;

на выходе из зоны I - $t_{Iм}^{вых} = 120^{o}C$;

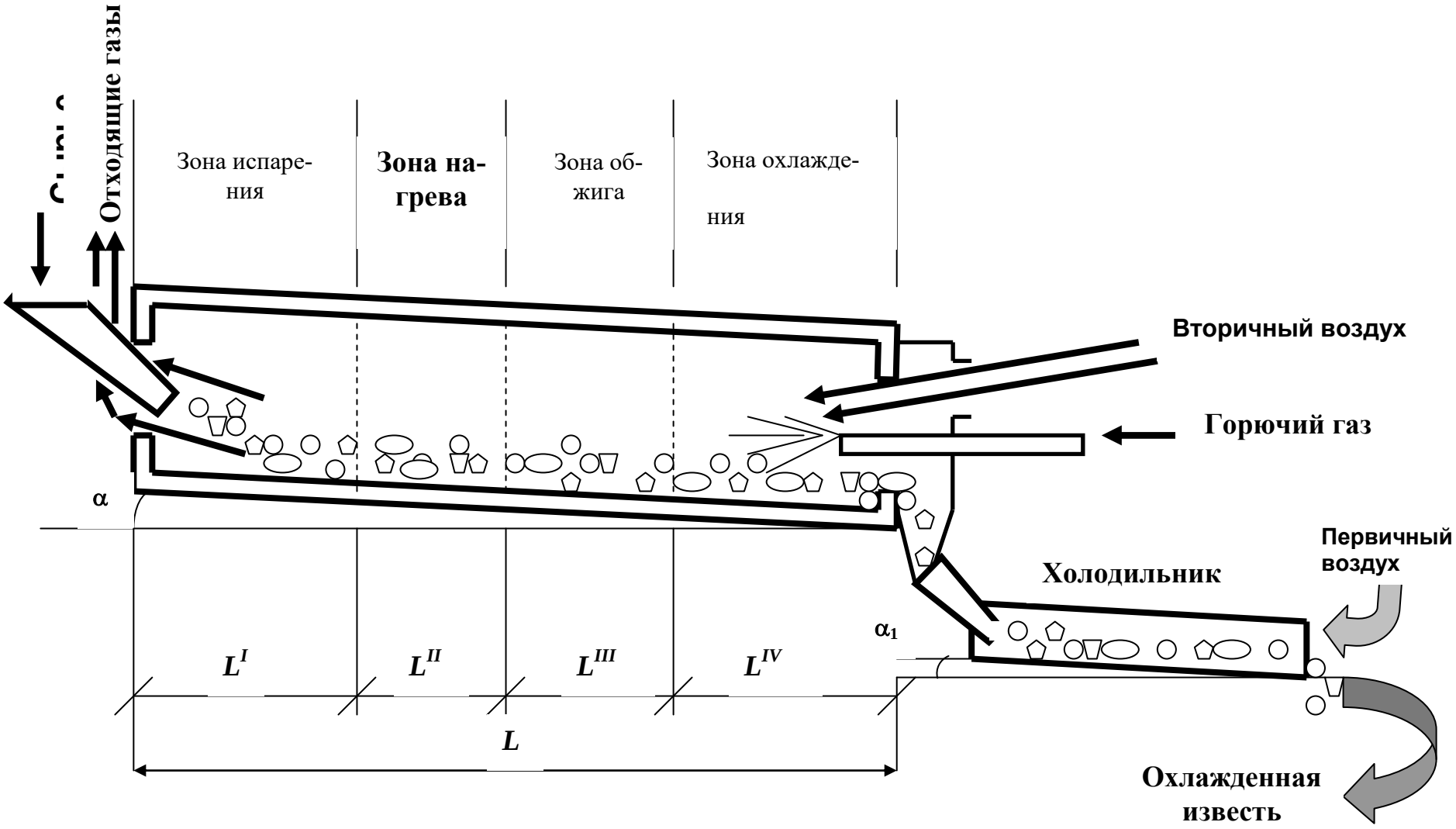


Рис.13. Схема распределения зон, материальных и тепловых потоков во вращающейся печи

на входе в зону II - $t^{вх}_{IIм}$ = 120°С;

на выходе из зоны II - $t^{вых}_{IIм}$ = 800°С;

на входе в зону III - $t^{вх}_{IIIм}$ = 800°С;

на выходе из зоны III - $t^{вых}_{IIIм}$ = 1050°С;

на входе в зону IV - $t^{вх}_{IVм}$ = 1050°С;

на выходе из зоны IV - $t^{вых}_{IVм}$ = 1000°С;

на входе в холодильник - $t^{вх}_{хм}$ = 1000°С;

на выходе из холодильника - $t^{вых}_{хм}$ = 150°С;

температура воздуха на входе в холодильник - $t^{вх}_{хв}$ = 10°С;

температура воздуха на входе в зону IV - $t^{вх}_{IVв}$ - по расчету;

температура дымовых газов на выходе из зоны IV - $t^{вых}_{IV}$ - по расчету;

температура дымовых газов на входе в зону III - $t^{вх}_{III}$ - по расчету;

температура дымовых газов на выходе из зоны III - $t^{вых}_{III}$ - по расчету;

температура дымовых газов на входе в зону II - $t^{вх}_{II}$ - по расчету;

температура дымовых газов на выходе из зоны II - $t^{вых}_{II}$ - по расчету;

температура дымовых газов на входе в зону I - $t^{вх}_{I}$ - по расчету;

температура дымовых газов на выходе из зоны I (из печи) - $t^{вых}_{I}$ - по расчету;

по топливу принято:

в зоне предварительного охлаждения извести (зона IV) сгорает 75 % от общего количества подаваемого в печь горючего (природного) газа; в зоне обжига (зона III) – остальные 25 %;

по материалу принято:

в зоне испарения (зона I) происходит полное удаление из сырья физически связанной воды; в зоне нагрева (зона II) происходит удаление химически связанной воды из глинистых примесей и частичная (на 25 %) декарбонизация углекислого кальция и углекислого магния; в зоне обжига (зона III) происходит основная (на 75 %) декарбонизация сырья.

Расчет температуры воздуха на выходе из холодильника или на входе в печь

Представлен в виде примера, табл.7.

Таблица 7

Тепловой баланс холодильника на 1 кг извести
(методика и пример расчета)

Приходные статьи		Расходные статьи	
наименования	коли-чество, кДж/кг	наименования	количество, кДж/кг
1.С известью после об-жига: $Q_1^n = c_и \cdot t_{IVм}^{вых}$,		1.С известью, выходящей из холодильника $Q_1^p = c_и \cdot t_м^{вых}$,	
где $t_{IVм}^{вых}$ - температура извести на выходе из печи, °С; $Q_1^n = 0{,}90 \cdot 1000 =$	900	$Q_1^p = 0{,}9 \cdot 150 =$	135
2.С холодным воздухом, поступающим в холо-дильник: $Q_2^n = V_в \cdot B \cdot c_в \cdot t_в$, $Q_2^n = 14{,}25 \cdot 0{,}146 \cdot 1{,}29 \cdot 10 =$	27	2.Потери в окружающую среду (35% от Q_1^p) $Q_2^p = 0{,}35 \cdot 135 =$	47
		3.С воздухом, направляемым из холодильника в печь: $Q_3^p = V_в \cdot B \cdot c_{в2} \cdot t_{хв}^{вых}$, где $c_{в2}$ – теплоемкость воздуха при $t_{хв}^{вых}$, (можно условно принять 300 - 350°С); $t_{хв}^{вых}$,–температура нагретого в холодильнике воздуха – искомая величина $Q_3^p = 14{,}25 \cdot 0{,}146 \cdot 1{,}31 \cdot t_{хв}^{вых} =$	$2{,}72 \cdot t_{хв}^{вых}$,
Итого:	927	Итого:	$182 + 2{,}72\, t_{хв}^{вых}$

Исходные данные: температура извести на входе в холодильник (на выходе из печи) $t_{IVм}^{вых}$ = 1000°С; температура извести на выходе из холодильника $t_{хм}^{вых}$ = 150°С. Уравнение теплового баланса $2{,}72\ t_{хв}^{вых} + 182 = 927$.

Температура воздуха на выходе из холодильника $t_{хв}^{вых}$ = 274°С.

Расчет температуры газового потока на границе зон предварительного охлаждения и обжига (табл.8)

Исходные данные: температура извести на выходе из печи $t_{IVм}^{вых}$ = 1000°С, температура извести на выходе из зоны обжига $t_{IIIм}^{вых}$ = 1050°С.

Таблица 8

Тепловой баланс зоны предварительного охлаждения на 1 кг извести (на границе IV и III зон)

Приходные статьи		Расходные статьи	
наименования	количество, кДж/кг	наименования	количество, кДж/кг
1. От сжигания топлива: $Q_1^n = Q_н^p \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}75 \cdot B$ (принято, что в зоне IV сгорает 75 % подаваемого топлива, остальные 25 % сгорают в зоне обжига); $Q_1^n = 35700 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}75 \cdot 0{,}146 =$	3518	1. Потери в окружающую среду (можно принять 25 % от общих потерь Q_6^p в табл.6) $Q_1^p = 0{,}25 \cdot Q_6^p$, $Q_1^p = 0{,}25 \cdot 588 =$	147
2.С воздухом, нагретым в холодильнике: $Q_2^n = V_в \cdot B \cdot c_{в2} \cdot t_{хв}^{вых}$, $Q_2^n = 14{,}25 \cdot 0{,}146 \cdot 1{,}33 \cdot 274 =$	758	2.С уходящими из зоны газами (вычисляется как невязка баланса) $Q_2^p =$	4174
3. С воздухом, отобравшим теплоту от извести в зоне охлаждения: $Q_3^n = c_и \cdot (t_{IIIм}^{вых} - t_{IVм}^{вых})$, где $t_{IIIм}^{вых}$ - температура извести на выходе из зоны обжига, °С (прил.16); $t_{IVм}^{вых}$ - температура извести на выходе из печи, °С, $Q_3^n = 0{,}90 \cdot (1050 - 1000) =$	45		
Итого:	4321	Итого:	4321

Значение Q_2^p и является основой для определения температуры дымовых газов на границе IV и III зон - $t_{IV}^{вых}$.

Для определения $t_{IV}^{вых}$ необходимо найти такое значение t_{IV}^{x}, которому бы соответствовал следующий тепловой баланс:

$$Q_2^p = I_{IV}^{вых},$$

где $I_{IV}^{вых}$ - энтальпия газов на границе IV и III зон печи, в кДж на 1 кг извести.

Температуру газов на выходе из зоны IV - $t_4^{вых}$ можно определить из уравнения (118), отражающего энтальпию газов $I_{IV}^{вых}$:

$$I_{IV}^{вых} = (V'_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V'_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V'_{O_2} \cdot c_{O_2} + V'_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot t_{IV}^{вых}, \qquad (118)$$

где $V'_{CO_2}, V'_{H_2O}, V'_{O_2}, V'_{N_2}$ - удельные объемы составляющих продуктов горения, приходящиеся на 1 кг извести, то есть

$$V'_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot B_{уд}; \qquad V'_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot B_{уд};$$

$$V'_{O_2} = V_{O_2} \cdot B_{уд}; \qquad V'_{N_2} = V_{N_2} \cdot B_{уд},$$

где $V_{CO_2}, V_{H_2O}, V_{O_2}, V_{N_2}$ - объемы составляющих продуктов горения при расчетном значении коэффициента избытка воздуха α (табл.4);

$c_{CO_2}, c_{H_2O}, c_{O_2}, c_{N_2}$ - удельные теплоемкости, кДж/(м^3·°С), составляющих продукты горения газов при расчетной температуре $t_{IV}^{вых}$; так как она пока неизвестна, то ее можно принять ориентировочно, превышающей примерно на 200°С температуру выходящей из печи извести; если расчетное значение $t_{IV}^{вых}$ более чем на 100 °С отличается от принятого, то расчет следует повторить, приняв новые значения удельных теплоемкостей.

Окончательно

$$t_{IV}^{вых} = \frac{I_{IV}^{вых}}{(V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot B}. \qquad (119)$$

Пример определения температуры продуктов горения на выходе из зоны предварительного охлаждения извести

Примем условно $t_{IV}^{вых}$ = 1300°С.

При этой температуре c_{CO_2} = 2,24кДж/м^3; c_{H_2O} = 1,75 кДж/м^3;

c_{O_2} = 1,49 кДж/м^3; c_{N_2} = 1,40 кДж/м^3.

Согласно (119)

$$t_{IV}^{вых} = \frac{4174}{(1{,}00 \cdot 2{,}24 + 2{,}1 \cdot 1{,}75 + 1{,}00 \cdot 1{,}49 + 11{,}27 \cdot 1{,}40) \cdot 0{,}146} = 1233\,^{o}C\ .$$

Полученный результат можно принять как окончательный, то есть:

$$t_{IV}^{вых} = 1233\,^{o}C.$$

Расчет температуры газового потока на границе зоны обжига и зоны нагрева (методика и пример расчета –табл.9)

Исходные данные: температура газов $t_{III}^{вх} = t_{IV}^{вых} = 1233^{O}C$. Температура материала на входе в зону III $t_{IIIм}^{вх}$ = 800°С, температура материала на выходе из зоны $t_{IIIм}^{вых}$ = 1050°С.

Значение энтальпии уходящих газов $I_{III}^{вых}$ является исходной базой для расчета температуры газов, уходящих из зоны обжига - $t_{III}^{вых}$. Методика расчета та же, что приведена выше для зоны предварительного охлаждения (зоны IV). Необходимо лишь учесть, что объемный расход газов увеличится за счет CO_2, выделившегося при декарбонизации известняка. Соответственно формула для расчета энтальпии газового потока примет вид

$$I_{III}^{вых} = (V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot B + \\ + 0{,}75 V_{CO_2}^{c} \cdot c_{CO_2}] \cdot t_{III}^{вых}. \quad (120)$$

Если в результате расчета $t_{III}^{вых}$ окажется ниже температуры материала на входе в зону обжига, то следует повторить расчет, уменьшив температуру материала.

Пример расчета $t_{III}^{вых}$

Температура материала на входе в зону – 800°С.

Примем условно $t_{III}^{вых}$ = 900°С.

При этой температуре c_{CO_2} = 2,18 кДж/(м^3°С); c_{H_2O} = 1,7 кДж/(м^3°С);

c_{N_2} = 1,38 кДж/(м^3°С); c_{O_2} = 1,46 кДж/(м^3°С).

Тогда

$$t_{III}^{вых} = \frac{3406}{(1{,}00 \cdot 2{,}18 + 2{,}1 \cdot 1{,}7 + 1{,}00 \cdot 1{,}46 + 11{,}26 \cdot 1{,}38) \cdot 0{,}146 + 0{,}75 \cdot 0{,}37 \cdot 2{,}18} = 869\,^{O}C.$$

Результат можно принять как окончательный.

Таблица 9

Тепловой баланс зоны обжига (декарбонизации)
на 1 кг извести

Приходные статьи		Расходные статьи	
наименования	коли-чество, кДж/кг	наименования	коли-чество, кДж/кг
1. От сжигания остаточного топлива: $Q_1^n = Q_н^p \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}25 \cdot B$		1. На нагрев материала: $Q_{IIIм} = G_{сух}^c \cdot c_м (t_{IIIм}^{вых} - t_{IIIм}^{вх})$,	
$Q_1^n = 35700 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}25 \cdot 0{,}146 =$	1173	где $G_{сух}^c$ - расход сырья - известняка (см.п.3.2.3); $c_м$ – удельная теплоемкость известняка, кДж/кг; $Q_{IIIм} = 1{,}75 \cdot 0{,}92(1050 - 800) =$	402
2. Энтальпия газов, поступивших из зоны IV: $I_{III}^{вх} = I_{IV}^{вых} = Q_2^p$, Q_2^p берется согласно табл.6, в примере $I_{III}^{вх} =$	4174	2. Q_{III}^x - на декарбонизацию ($CaCO_3$+$MgCO_3$) – (111) В примере $Q_{III}^x = 0{,}75 \cdot 2702 =$	2026
3. Энтальпия выделяющегося при разложении карбонатов CO_2: $I_{CO_2} = 0{,}75 \cdot V_{CO_2}^c \cdot c_{CO_2} \cdot t_{III}^{ср}$ где $V_{CO_2}^c$ - объем выделяющегося CO_2 при разложении известняка, расходуемого на 1 кг извести (см.п.3.2.3); $t_{III}^{ср}$ - средняя температура дымовых газов в зоне: $t_{III}^{ср} = \frac{t_{III}^{вх} + t_{III}^{вых}}{2}$. В примере: примем условно $t_{III}^{вых} = t_{IIIм}^{вх} + 100^o C = 800 + 100 = 900^o C$, тогда $t_{III}^{ср} = \frac{1233 + 900}{2} = 1066\ ^o C$. Окончательно $I_{CO_2} = 0{,}75 \cdot 0{,}37 \cdot 2{,}24 \cdot 1066 =$	663	3. Потери в окружающую среду - Q_{III}^n, можно принять 30 % от Q_6^p в табл.6. В примере $Q_{III}^n = 0{,}3 \cdot 588 =$	176
		4.Энтальпия уходящих из зоны III газов - $I_{III}^{вых}$ (определяется как невязка баланса). В примере $I_{III}^{вых} =$	3406
Итого:	6010	Итого:	6010

Расчет температуры газового потока на границе зоны нагрева и зоны испарения (методика и пример расчета – табл.10)

Исходные данные: температура материала на входе в зону III - $t_{IIIм}^{вх}$ = 120°С; на выходе из зоны - $t_{IIм}^{вых}$ = 800°С.

Значение $I_{II}^{вых}$ служит для расчета $t_{II}^{вых}$ в соответствии с соотношением

$$I_{II}^{вых} = [\,(V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot B + \\ + V_{CO_2}^{c} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O}^{г} \cdot c_{H_2O}\,]\cdot t_{II}^{вых}. \qquad (121)$$

Пример вычисления $t_{II}^{вых}$

При условно принятой $t_{II}^{вых}$ = 200°С; c_{CO_2} = 1,8 кДж/м^3;

c_{H_2O} = 1,52 кДж/м^3; c_{O_2} = 1,34 кДж/м^3; c_{N_2} = 1,3 кДж/м^3;

$$t_{II}^{вых} = \frac{1608}{(1{,}00 \cdot 1{,}8 + 2{,}1 \cdot 1{,}52 + 1{,}00 \cdot 1{,}34 + 11{,}26 \cdot 1{,}3) \cdot 0{,}146 + 0{,}37 \cdot 1{,}8 + 0{,}06 \cdot 1{,}52} = 421^{o}C.$$

Повторим расчет, задав новые значения удельных теплоемкостей газов при t = 400°С: c_{CO_2} = 1,94 кДж/м^3, c_{H_2O} = 1,56 кДж/м^3; c_{O_2} = 1,38 кДж/м^3; c_{N_2} = 1,32 кДж/м^3

$$t_{II}^{вых} = \frac{1608}{(1{,}00 \cdot 1{,}94 + 2{,}1 \cdot 1{,}56 + 1{,}00 \cdot 1{,}38 + 11{,}26 \cdot 1{,}32) \cdot 0{,}146 + 0{,}37 \cdot 1{,}94 + 0{,}06 \cdot 1{,}56} = 380\,^{o}C.$$

Полученное значение примем как окончательное.

Таблица 10

Тепловой баланс зоны нагрева на 1 кг извести

Приходные статьи		Расходные статьи	
наименования	количество, кДж/кг	наименования	количество, кДж/кг
1. Энтальпия поступивших дымовых газов: $I_{II}^{вх} = I_{III}^{вых}$. В примере: $I_{II}^{вх} =$	3406	1. На нагрев материала: $Q_{IIм} = G_{сух}^{с} \cdot c_{м}(t_{IIм}^{вых} - t_{IIм}^{вх})$. В примере: $Q_{IIм} = 1{,}75 \cdot 0{,}92(800 - 120) =$	1095
2. Энтальпия выделяющегося при разложении карбонатов CO_2: $I_{CO_2} = 0{,}25 \cdot V_{CO_2}^{с} \cdot c_{CO_2} \cdot t_{II}^{ср}$ г где $t_{II}^{ср} = \frac{t_{II}^{вх} + t_{II}^{вых}}{2}$. В примере: $t_{II}^{ср} = \frac{869 + 120}{2} = 495^{o}C$, $I_{CO_2} = 0{,}25 \cdot 0{,}37 \cdot 2{,}00 \cdot 495 =$	92	2. На декарбонизацию ($CaCO_3$+$MgCO_3$) - $Q_{II}^{х}$, см.(101) В примере: $Q_{II}^{х}$ =0,25·2702=	675
3. Энтальпия гидратной воды: $I_{H_2O}^{г} = V_{H_2O}^{г} \cdot c_{H_2O} \cdot t_{дг}$, где $t_{дг}$ - температура дегидратации глинистых минералов, можно принять $t_{дг}$ = 600°С. В примере: $I_{H_2O}^{г} = 0{,}005 \cdot 1{,}61 \cdot 600 =$	5	3. На дегидратацию глинистых минералов (каолинита) - $Q_{II}^{дг}$: $Q_{II}^{дг} = 2378 \cdot 0{,}3 \frac{Пр \cdot G_{сух}^{с}}{100}$, где 2378 кДж/кг – теплота дегидратации каолинита в пересчете на Al_2O_3; 0,3 $Пр$ – принято, что в составе примесей массовая доля Al_2O_3 составляет 0,3. В примере: $Q_{II}^{дг} = 2378 \cdot 0{,}3 \frac{3 \cdot 1{,}75}{100} =$	37
		4. Потери в окружающую среду - $Q_{II}^{п}$ (можно принять 15% от общих потерь). В примере: $Q_{II}^{п} = 0{,}15 \cdot 588 =$	88
		5.Энтальпия уходящих из зоны II газов - $I_{II}^{вых}$ (вычисляется как невязка баланса). В примере: $I_{II}^{вых} =$	1608
Итого:	3503	Итого:	3503

Расчет температуры газового потока на выходе из печи (методика и пример расчета – табл.11)

Исходные данные: температура материала на входе в зону $t_{Iм}^{вх}$ = 10°С, на выходе из зоны $t_{Iм}^{вых}$ = 120°С.

Таблица 11

Тепловой баланс зоны испарения на 1 кг извести

Приходные статьи		Расходные статьи	
наименования	количество, кДж/кг	наименования	количество, кДж/кг
1. Энтальпия поступивших газов: $I_I^{вх} = t_{II}^{вых}$. В примере: $I_I^{вх} =$ 2. Энтальпия паров воды, выделившихся из материала: $I_{H_2O} = V_{H_2O}^{ф} \cdot c_{H_2O} \cdot t_{исп}$, где $t_{исп}$ - температура испарения воды, °С.	1608	1. На нагрев сухого материала: $Q_{Iм} = G_{сух}^{c} \cdot c_{м}(t_{Iм}^{вых} - t_{Iм}^{вх})$. В примере: $Q_{Iм} = 1{,}75 \cdot 0{,}92(120 - 10) =$ 2. На нагрев влаги в материале: $Q_{IH_2O} = G_{H_2O}^{ф} \cdot c_{в}(100 - t_{Iм}^{вх})$,	177
В примере: $I_{H_2O} = 0{,}06 \cdot 2{,}05 \cdot 100 =$	12	где $c_{в}$ – удельная теплоемкость воды, $c_{в} = 4{,}19$кДж/кг. В примере: $Q_{IH_2O} = 0{,}05 \cdot 4{,}19(100 - 10) =$ 3. На испарение воды: $Q_{Iисп} = G_{H_2O}^{ф} \cdot 2500$. В примере: $Q_{Iисп} = 0{,}05 \cdot 2500 =$ 4. Потери в окружающую среду - $Q_I^{п}$ (можно принять 10 % от общих потерь). В примере: $Q_I^{п} = 0{,}1 \cdot 588 =$ 5. Энтальпия уходящих из печи газов - $I_I^{вых}$ (вычисляется как невязка баланса). В примере: $I_I^{вых} =$	266 125 59 993
Итого:	1620	Итого:	1620

Полученное значение $I_I^{вых}$ и служит для вычисления значения $t_I^{вых}$, исходя из уравнения

$$I_I^{вых} = \left[(V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{H_2O} + V_{O_2} \cdot c_{O_2} + V_{N_2} \cdot c_{N_2}) \cdot B + \right.$$
$$\left. + V_{CO_2}^{c} \cdot c_{CO_2} + (V_{H_2O}^{г} + V_{H_2O}^{ф}) \cdot c_{H_2O} \right] \cdot t_I^{вых}. \qquad (122)$$

Пример вычисления $t_I^{вых}$

Примем условно: $t_I^{вых}$ = 300°С; при этой температуре c_{CO_2} = 1,87 кДж/м^3, c_{H_2O} = 1,54 кДж/м^3; c_{O_2} = 1,35 кДж/м^3; c_{N_2} = 1,31 кДж/м^3;

$$t_I^{вых} = \frac{993}{(1{,}00 \cdot 1{,}87 + 2{,}1 \cdot 1{,}54 + 1{,}00 \cdot 1{,}35 + 11{,}26 \cdot 1{,}31) \cdot 0{,}146 + 0{,}37 \cdot 1{,}87 + (0{,}06 + 0{,}006) \cdot 1{,}54} =$$
$$= 255^{o}C.$$

Полученное значение можно принять как окончательное (оно несколько ниже нормируемого для вращающихся печей, что обусловлено намеренно завышенным коэффициентом избытка воздуха, принятым в начале расчета).

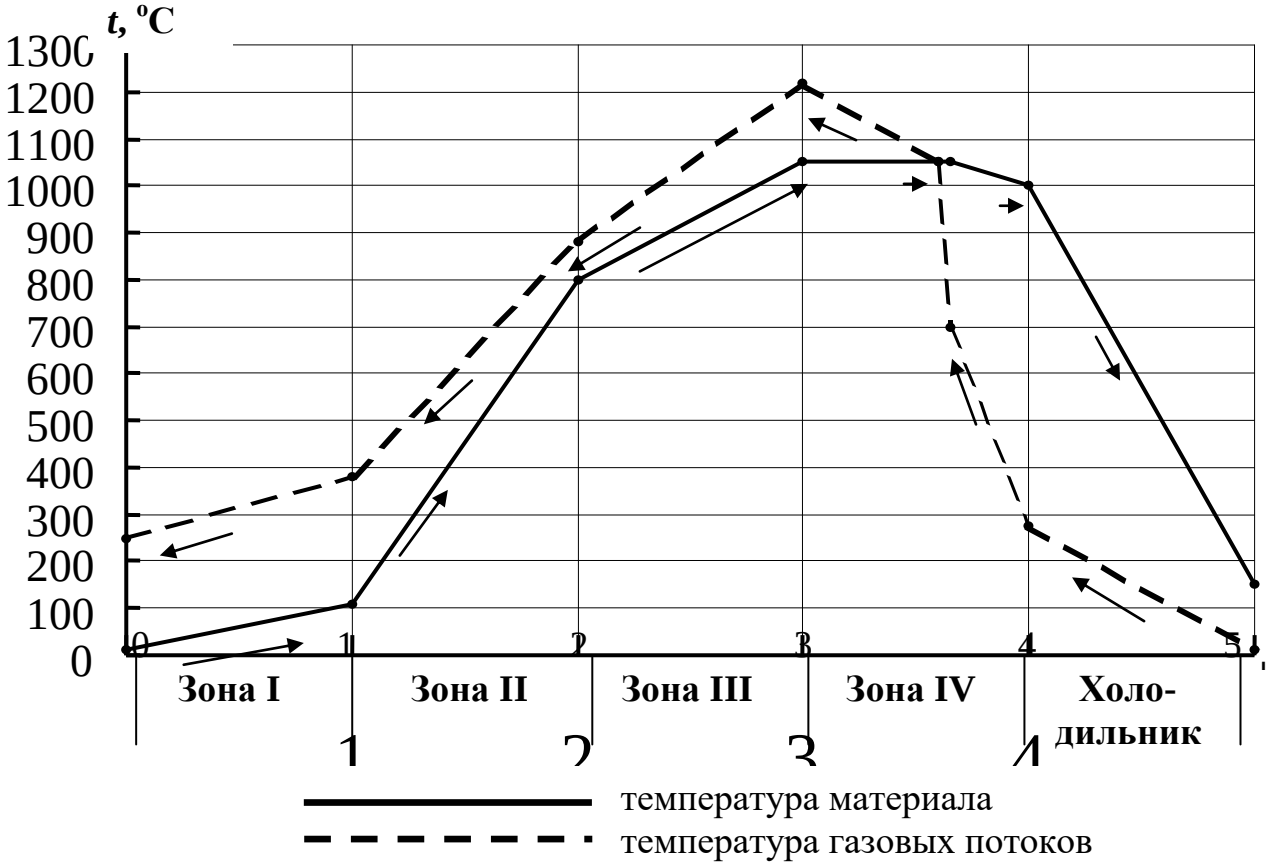


Рис.14. Пример построения графика распределения температуры по длине печи

3.2.6. Расчет основных размеров вращающейся печи

К основным размерам относят диаметр и длину печи. Диаметр печи обусловлен, в первую очередь, количеством теплоносителя и количеством обжигаемого материала, проходящих через печь. Длина печи по зонам должна быть пропорциональна времени пребывания материала в каждой зоне, последняя же зависит от интенсивности или скорости протекающих процессов (нагрева, охлаждения, испарения, химических реакций). Поэтому наиболее объективны расчеты, построенные на учете именно названных факторов. Однако расчет скоростей процессов очень сложен и не всегда доступен из-за отсутствия необходимой информации экспериментального характера. В связи с этим в курсовом проекте рекомендуется нижеприведенная упрощенная методика.

Общая методика определения внутреннего диаметра и длины барабана печи

Внутренний диаметр печи обычно рассчитывают в зависимости от тепловой мощности как

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{\Phi}{1{,}28}}, \qquad (123)$$

где Φ – тепловая мощность , МВт.

Тепловая мощность в среднем составляет

$$\Phi = \frac{0{,}278 \cdot \Pi_u \cdot Q}{1000}, \qquad (124)$$

где Π_u – производительность печи по извести, т/ч;

Q – удельное количество теплоты на получение извести, кДж/кг,

$$Q = Q_p^{н.} B;$$

0,278 – переходный от т/ч к кг/с коэффициент производительности печи;

1/1000 – переходный от кВт к МВт коэффициент мощности.

При определении длины печи большое значение имеет ее тип. Печи в промышленности разделяют [13] на две группы: 1 – длинные с внутренними теплообменниками, применяемые для обжига шламов и кусковых материалов; 2 – короткие с запечными теплообменниками, применяемые для обжига только кусковых материалов. Соответственно, для первого варианта длину печи ориентировочно можно определить из соотношения L/D_0 = 35…45, для второго L/D_0 = 14…20.

Дальнейшие указания будут относиться только к длинным печам как наиболее универсальным. Однако это не исключает возможности выбора других типов печей и применения других методик расчетов [3, 4, 11, 15].

Общая длина печи складывается из длин отдельных зон

$$L = L_I + L_{II} + L_{III} + L_{IV} \text{ (см. рис.13).}$$

В курсовом проекте длину каждой зоны рассчитывают соответственно времени пребывания материала в этой зоне.

Пример расчета диаметра печи

Исходные данные: $П_и$ = 60 т/ч; B = 0,146 м^3/кг; $Q_p^н$ = 35700 кДж/м^3.

Согласно (124) $\Phi = \dfrac{0{,}278 \cdot 60 \cdot 0{,}146 \cdot 35700}{1000} = 87$ МВт.

Согласно (123) $D_o = \sqrt[3]{\dfrac{87}{1{,}28}} = 4{,}08$ м.

Длина зоны предварительного охлаждения (L_{IV})

Для расчетов можно применить следующие приближенные формулы

$$L_{IV} = w_м \cdot \tau_{IVм}, \qquad (125)$$

где $w_м$ – скорость продвижения материала в печи, м/ч,

$$w_м = 1{,}88 \cdot D_o \frac{i \cdot n}{\sin \beta}, \qquad (126)$$

где i- наклон корпуса печи, % (прил. 17);

n – частота вращения печи от главного привода, мин$^{-1}$ (прил. 17);

β - угол естественного откоса материала в зоне охлаждения, град. (можно принять $\sin \beta$ = 0,707…0,766)

$\tau_{IVм}$ – время пребывания извести в зоне предварительного охлаждения, ч.

Время пребывания извести в зоне предварительного охлаждения можно ориентировочно определить из уравнения теплового баланса охлаждаемого куска извести среднего размера условно шарообразной формы, считая, что

$$Q_{конв}^{IV} = Q_{охл}^{IV}, \qquad (127)$$

где $Q_{охл}^{IV}$ - количество теплоты, потерянной куском извести при охлаждении в данной зоне, Дж;

$Q_{конв}^{IV}$ - количество теплоты, потерянное куском извести в окружающую среду конвекцией и частично излучением, Дж.

В свою очередь $$Q_{охл}^{IV} = c_и \cdot m_и (t_{IVм}^{вх} - t_{IVм}^{вых}), \qquad (128)$$

где $c_и$ - удельная теплоемкость извести, Дж/(г·°С);

$m_и$ - масса куска извести среднего размера, г:

$$m_и = \rho_и \frac{\pi d_{ср}^3}{6}, \qquad (129)$$

где $\rho_и$ - плотность извести в куске, г/см^3, ее можно определить как

$$\rho_и = \left[1 - n \cdot 0{,}44(CaCO_3 + MgCO_3)\right] \cdot \rho_c, \qquad (130)$$

где n - степень превращения;

($CaCO_3$+$MgCO_3$) – массовая доля минералов в сырье;

ρ_c - плотность исходной породы, г/см^3;

$d_{ср}$ – средний по фракции размер куска, см;

$t_{IVм}^{вх}$ – температура извести на входе в зону, °С;

$t_{IVм}^{вых}$ - температура извести на выходе из зоны, °С.

$$Q_{конв}^{IV} = k \cdot S \cdot \Delta t_{IV}^{ср} \cdot \tau_{IVм}, \qquad (131)$$

где k - коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·°С)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{IV}} + \frac{r_{ср}}{\lambda}}, \qquad (132)$$

где α_{IV} – обобщенный коэффициент теплоотдачи (согласно [4] можно принять α_{IV} = 10 Вт/(м^2·°С);

$r_{ср}$ - средний радиус куска извести, м;

λ - коэффициент теплопроводности извести, Вт/(м·°С), его значение можно найти в справочниках [3] или вычислить ориентировочно по формуле

$$\lambda = 1{,}16(\sqrt{0{,}0196 + 0{,}22\rho_u^2} - 0{,}14); \qquad (133)$$

S - поверхность охлаждения куска извести, м^2:

$$S = \pi d_{ср}^{\ 2}; \qquad (134)$$

$\Delta t_{IV}^{ср}$ - средний перепад температуры между поступающим в печь воздухом и выходящей из печи извести в зоне охлаждения

$$\Delta t_{IV}^{ср} = \frac{(t_{IVм}^{вх} - t_{IVв}^{вых}) - (t_{IVм}^{вых} - t_{IVв}^{вх})}{2{,}303\lg(\frac{t_{IVм}^{вх} - t_{IVв}^{вых}}{t_{IVм}^{вых} - t_{IVв}^{вх}})}, \qquad (135)$$

где $t_{IVв}^{вх}, t_{IVв}^{вых}$ - температура воздуха на входе в зону (в печь) и на выходе из зоны предварительного охлаждения, °С;

$t_{IVм}^{вх}, t_{IVм}^{вых}$ - температура извести на входе в зону и на выходе из зоны (из печи), °С.

Необходимо иметь в виду, что время пребывания, вычисленное по уравнению (127), будет соответствовать только части зоны предварительного охлаждения, а именно той, где происходит теплообмен извести с воздухом, подаваемым к факелу горения топлива (см. температурный график, рис.14). Поэтому общее время пребывания, как правило, превышает расчетное. По [4] оно должно составлять 0,2…0,25 ч. С ним и следует сверить полученный результат и при необходимости ввести поправки.

В качестве другого ориентира правильности выполненных расчетов непосредственно длины зоны предварительного охлаждения по формуле (126) могут

служить характеристики длинных печей [13], согласно которым протяженность зоны предварительного охлаждения составляет около 5 % от общей длины печи.

Пример расчета длины зоны предварительного охлаждения

Приняты следующие исходные данные: согласно прил. 17, i = 4 %; n = 0,8 мин$^{-1}$; $sin\beta$ = 0,72; $d_{ср}$ = (2+4)/2 = 3 см; $c_и$ = 0,9 Дж/г; $t^{вх}_{IVм}$ = 1050 °С; $t^{вых}_{IVм}$ = 1000 °С; согласно графику распределения температуры $t^{вх}_{IVв}$ = 274 °С; $t^{вых}_{IVв}$ = 700 °С.

Согласно (130) $\rho_и = [1 - 0{,}96 \cdot 0{,}44 \cdot 1] \cdot 1{,}75 = 1{,}04$ г/см^3.

Согласно (129) $m_и = 1{,}04 \dfrac{3{,}14 \cdot 3^3}{6} = 14{,}13$ г.

Согласно (128) $Q^{IV}_{охл} = 0{,}90 \cdot 14{,}13(1050 - 1000) = 636$ Дж.

Согласно (133) $\lambda = 1{,}16(\sqrt{0{,}0196 + 0{,}22 \cdot 1{,}04^2} - 0{,}14) = 0{,}43$ Вт/(м·°С).

Согласно (132) $k = \dfrac{1}{\dfrac{1}{10} + \dfrac{0{,}015}{0{,}43}} = 7{,}41$ Вт/(м^2·°С).

Согласно (134) S = 3,14·0,03^2 = 0,0028 м^2.

Согласно (135) $\Delta t^{ср}_{IV} = \dfrac{(1050 - 700) - (1000 - 274)}{2{,}303 \lg \dfrac{350}{726}} = 515$ °С.

Из (131) $\tau_{IVм} = \dfrac{636}{7{,}41 \cdot 0{,}0028 \cdot 515} = 60$ с = 0,016 ч.

Принимаем $\tau_{IVм}$ = 0,25 ч.

Согласно (126) $w_м = 1{,}88 \cdot 4{,}08 \dfrac{4 \cdot 0{,}8}{0{,}72} = 34{,}1$ м/ч.

Согласно (125) $L_{IV} = 34{,}1 \cdot 0{,}25 = 8{,}5$ м.

Если принять L/D_0 = 40, то для L = 150 м L_{IV} = (8,5/150)100 = 5,6 % .

Расчет выполнен правильно.

Длина зоны обжига (L_{III})

Время пребывания материала в зоне обжига определяют на основании следующего теплового баланса

$$Q^{III}_{конв} = Q^{III}_{нагр} + Q^{III}_{хр}, \qquad (136)$$

где $Q^{III}_{конв}$ - количество теплоты, передаваемой конвекцией от газового потока и излучением от футеровки печи куску обжигаемого материала, Дж; для расчета действительна формула (131); при расчете k можно принять α_{III} = 13,0 Вт/(м^2·°С); для расчета

Δt_{III}^{cp} можно применить формулу (135) с соответствующими для рассматриваемой зоны температурными параметрами;

$Q_{нагр}^{III}$ - количество теплоты, затрачиваемое на нагрев куска материала заданных размеров, Дж (см. 128);

$Q_{хр}^{III}$ - количество теплоты, затрачиваемое на химическую реакцию декарбонизации сырья, Дж.

Так как процесс декарбонизации сырья протекает в трех зонах (нагрева, обжига, предварительного охлаждения) и даже частично в холодильнике, то точное определение $Q_{хр}^{III}$ представляет большую трудность. Поэтому в расчетах можно принять практически установленное соотношение

$$Q_{хр}^{III} = 0{,}15\, Q_{хр},$$

где $Q_{хр}$ - полные затраты энергии на декарбонизацию в куске сырья заданных размеров, Дж;

$$Q_{хр} = \rho_{м} \frac{\pi d^3}{6} \cdot Q_x^p, \qquad (137)$$

где $\rho_{м}$ - плотность сырья в куске, г/см^3;

Q_x^p - определяется по (111), то есть

$$Q_x^p = \frac{G_{сух}^{c} \cdot n\left(100 - П_p\right) \cdot Q_x}{100}.$$

Значение L_{III} вычисляется по (128) с соответствующими заменами.

При окончательной оценке результатов расчета L_{III} следует учитывать, что длина зоны обжига в промышленных длинных печах составляет около 25 % от общей длины [13].

Пример расчета длины зоны обжига

Приняты следующие исходные данные: $t_{IIIм}^{вх}$ = 800°С; $t_{IIIм}^{вых}$ = 1050°С; $t_{III}^{вх}$ = =1233°С; $t_{III}^{вых}$ = 869°С; $\rho_{м}$ = 1,6 г/см^3; Q_x = 1658 Дж/г; d = 3 см.

Согласно (133) $\lambda = 1{,}16(\sqrt{0{,}0196 + 0{,}22 \cdot 1{,}6^2} - 0{,}14) = 0{,}72$ Вт/(м·°С).

Согласно (132) $k = \dfrac{1}{\dfrac{1}{13} + \dfrac{0{,}015}{0{,}72}} = 10$ Вт/(м^2·°С).

Согласно (135)
$$\Delta t_{III}^{ср} = \frac{(t_{III}^{вх} - t_{IIIм}^{вых}) - (t_{III}^{вых} - t_{IVм}^{вх})}{2{,}303\lg(\frac{t_{III}^{вх} - t_{IIIм}^{вых}}{t_{III}^{вых} - t_{IIIм}^{вх}})} =$$
$$= \frac{(1233-1050)-(869-800)}{2{,}303\lg\frac{183}{69}} = 118\ ^{o}C.$$

Согласно (129) $m_{м} = 1{,}6\frac{3{,}14\cdot 3^3}{6} = 22{,}6$ г.

Согласно (128) $Q_{нагр}^{III} = 0{,}9\cdot 22{,}6(1050-800) = 5085$ Дж.

Согласно (111) $Q_{x}^{p} = \frac{1{,}75\cdot 0{,}96(100-3)\cdot 1658}{100} = 2702$ Дж/г.

Для куска материала $Q_{хр}^{III}$ = 22,6 · 2702 = 61065 Дж.

Согласно (136) $Q_{конв}^{III} = 5085 + 0{,}15\cdot 61065 = 14245$ Дж.

Из (131) $\tau_{IIIм} = \frac{14245}{10\cdot 0{,}0028\cdot 118} = 4317$ с = 1,2 ч.

Согласно (125) L_{III} = 34,1·1,2= 41 м.

Проверка расчета $\frac{L_{III}}{L} = \frac{41}{150}\cdot 100 = 27\%$.

Расчет выполнен правильно.

Длина зоны нагрева (L_{II})

Здесь может быть принята та же методика, что и при определении L_{IV}.

Уравнение теплового баланса имеет вид
$$Q_{конв}^{II} = Q_{нагр}^{II} + Q_{хр}^{II} + Q_{дг}^{II}, \qquad (138)$$

где $Q_{дг}^{II}$ - теплота дегидратации глинистых минералов в сырье, Дж.

Для определения $Q_{конв}^{II}$ *и* $Q_{нагр}^{II}$ применимы (131 и 128). При этом в силу значительного ослабления лучистого теплообмена, коэффициент теплоотдачи можно принять в пределах α_{II} = (8…10) Вт/(м$^{2\cdot o}$С).

Расход теплоты на дегидратацию глинистых минералов, входящих в состав сырья, можно определить как
$$Q_{дг}^{II} = 2378\cdot 0{,}3\cdot\frac{П_{p}}{100}\cdot\rho_{м}\cdot\frac{\pi d^3}{6}. \qquad (139)$$

Расход теплоты на химическую реакцию декарбонизации сырья в зоне *II* можно принять $Q_{хр}^{II}$ = 0,55$Q_{хр}$.

Пример расчета длины зоны нагрева

Приняты следующие исходные данные: $t_{IIм}^{вх}$ = 120°С; $t_{IIм}^{вых}$ = 800°С; $t_{II}^{вх}$ = 869°С; $t_{II}^{вых}$ = 380°С; $\rho_м$ = 1,6 г/см^3; Q_x = 675 Дж/г (см.табл.10); α_{II} = 10 Вт/(м$^{2\cdot}$°С); λ = 0,72 Вт/(м·°С); d = 3 см.

Согласно (132) $$k = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0{,}015}{\lambda 0{,}72}} = 8{,}33 \text{ Вт/(м}^{2\cdot}\text{°С)}.$$

Согласно (135) $$\Delta t_{II}^{ср} = \frac{(380-120)-(869-800)}{2{,}303\lg\frac{260}{69}} = 145\ ^{o}C.$$

Согласно (128) $$Q_{нагр}^{II} = 0{,}9 \cdot 22{,}6(800-120) = 1383 \text{ Дж.}$$

Согласно (139) $$Q_{дг}^{II} = 2378 \cdot 0{,}3 \cdot \frac{3}{100} \cdot 1{,}6 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 3^3}{6} = 484 \text{ Дж.}$$

Для расчетного куска извести $Q_{хр}^{II} = Q_x \cdot m$ = 675·22,6 = 15255 Дж.

Согласно (138) $$Q_{конв}^{II} = 13831 + 484 + 0{,}55 \cdot 15255 = 22568 \text{ Дж.}$$

Из (132) $$\tau_{IIм} = \frac{22568}{8{,}33 \cdot 0{,}0028 \cdot 145} = 6677 \text{ с} = 1{,}85 \text{ ч.}$$

Согласно (125) L_{II} = 34,1·1,85 = 63 м.

Длина зоны испарения (L_I)

Расчет зоны испарения является наиболее приближенным, так как многие характеристики процесса, в особенности связанные с наличием дополнительных теплообменных устройств (цепных, ячейковых), остаются недостаточно изученными.

Так как сущность и механизм процессов, происходящих в зоне испарения, а также температурные и влажностные параметры примерно те же, что реализуются в барабанных сушилках, то для расчетов рекомендуется применять соответствующую методику, изложенную в разделе 2.6. При этом необходимо учесть некоторые особенности характерные для печей и произвести некоторые дополнительные расчеты.

В частности необходимо произвести все вычисления, связанные с определением скорости дымовых газов в зоне сушки при средней температуре газов

$$t_I^{ср} = \frac{t_I^{вх} + t_I^{вых}}{2}. \qquad (140)$$

Для этого необходимо, прежде всего, определить секундный суммарный расход газов, образовавшихся от сгорания топлива, испарения физически и химически

связанной воды из материала, выделения углекислого газа при декарбонизации сырья (V_I)

$$V_I = \left(V_{пг} \cdot B + V^{c}_{CO_2} + V^{ф}_{H_2O}/2 + V^{г}_{H_2O} \right) \cdot П_u, \qquad (141)$$

где $V_{пг}$ - объем продуктов горения 1 м^3 газа (см. табл.4);

$V^{ф}_{H_2O}/2$ - учтена только половина испаренной воды, что соответствует понятию средней скорости газов по длине зоны.

Объемный расход газов при рабочей температуре $t^{ср}_I$

$$V^{t}_{I\,t=t^{ср}_I} = V_{I\,t=0} \frac{273+t^{ср}_I}{273}. \qquad (142)$$

Средняя скорость газов ($w_{ср}$, м/с) в зоне испарения

$$w_{ср} = \frac{V^{t}_I}{0{,}875 \cdot D_o^{\,2}(1-\beta)}, \qquad (143)$$

где β - коэффициент заполнения объема печи материалом, в долях единицы.

Средняя плотность смеси газов ($\rho_{ср}$) при рабочей температуре

$$\rho_{ср} = \frac{G_{пг} \cdot П_u}{V^{t}_I}, \qquad (144)$$

где $G_{пг}$ - масса отходящих газов согласно (105).

Остальные расчеты выполняются по формулам (23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33). При этом в (33) вместо температуры мокрого термометра $t_м$ можно использовать температуру материала на выходе из зоны $t^{вых}_{Iм}$.

Результатом расчетов будет объем зоны испарения – V_u.
Длину зоны испарения (L_1) можно найти как

$$L_I = \frac{4V_u}{\pi D_o^2}. \qquad (145)$$

Учитывая чрезмерно большой объем вычислений по рассмотренному варианту, **в курсовом проекте допускается выполнить расчет по укрупненным показателям** $V_u = 3600\ W/A_w$, (146)

где W - количество испаряемой влаги, кг/с, $W = G^{ф}_{H_2O} \cdot П_u$;

A_w - напряжение объема печи, кг/(м^3.ч); его значение по аналогии с сушильными барабанами для разных видов сырья можно принять согласно прил. 1.

На основании выполненных промежуточных расчетов определяется общая длина печи $L = L_I + L_{II} + L_{III} + L_{IV}$.

Необходимо иметь в виду, что для слишком коротких печей характерна относительно высокая температура отходящих газов [13]. Поэтому, если это так, то целесообразно увеличить длину печи против расчетной в пределах рекомендуемых соотношений L/D_0. При этом необходимо исходить из того положения, что суммарная длина зон обжига и охлаждения должна составлять примерно 30 % от общей длины печи, а суммарная длина зон испарения и нагрева – 70 %.

Пример укрупненного расчета длины зоны испарения влаги

Условно принято: $П_и$ = 60 т/ч = 16,7 кг/с; влажность сырья $U_н$ = 20 %; расход сухого сырья – 1,75 кг/кг.

Интенсивность удаления влаги $W = 16{,}7 \cdot 1{,}75 \frac{20}{100} = 5{,}85$ кг/с.

Примем напряжение объема печи A_W = 50 кг/(м^3.ч). Внутренний диаметр печи – 4,08 м.

Тогда $V_и$ = 3600·5,85/50 = 421 м^3.

$$L_I = V_и/S = 4V_и/(\pi D_0^2) = 4 \cdot 421/(3{,}14 \cdot 4{,}08^2) = 32 \text{ м.}$$

Общая расчетная длина печи

$$L = 8{,}5 + 42{,}6 + 63 + 32 = 146{,}1 \text{ м.}$$

$$\frac{L_{II} + L_I}{L} = \frac{63 + 32}{146{,}1} \cdot 100 = 65\,\%.$$

Результаты расчета можно принять как окончательные.

3.2.7. Выбор и расчет вспомогательных устройств

К вспомогательным устройствам вращающейся печи относят тягодутьевое оборудование и обеспыливающие устройства. Тягодутьевое оборудование включает: дымосос для отсасывания дымовых газов из печи, вентилятор для отбора избыточного воздуха, вентилятор острого дутья. Обеспыливающие устройства включают: пылеосадительную камеру, электрофильтр для очистки от пыли отходящих из печи газов. В курсовом проекте расчеты рекомендуется ограничить дымососом и электрофильтром или пылеосадительной камерой, как в наибольшей степени отвечающими предыдущим технологическим расчетам и содержанию изучаемой дисциплины. Выбор соответствующего типового оборудования можно произвести с помощью [3, 4, 13, 14] и прил. 17,18.

Расчет и выбор дымососа

К расчетным характеристикам относятся объемный расход дымовых газов и аэродинамическое сопротивление печной установки.

Объемный расход выходящих из печи дымовых газов ($V_{дг}$) в расчете на нормальные условия, м^3/с, составляет

$$\underset{t=0}{V_{дг}} = \left(V_{пг} \cdot B + V^{c}_{CO_2} + V^{ф}_{H_2O} + V^{г}_{H_2O} \right) \cdot П_{и}, \qquad (147)$$

где $V_{пг}$ - принимают из табл. 4;

$V^{c}_{CO_2}, V^{ф}_{H_2O}, V^{г}_{H_2O}$ - вычисляют по формулам (99, 101, 103).

Расход дымовых газов с учетом их температуры составит

$$V^{t}_{дг} = V_{дг} \cdot \frac{273 + t_{дг}}{273}, \qquad (148)$$

где $t_{дг}$ - температура отходящих дымовых газов, ^{o}С.

С учетом подсоса холодного воздуха и соответствующего снижения температуры, а также с учетом снижения температуры в результате установки дополнительных теплообменных устройств (например, котла-утилизатора) фактический объемный расход газов, поступающих в дымосос ($V^{ф}_{дг}$) составит

$$\underset{t=0}{V^{ф}_{дг}} = \underset{t=0}{V_{дг}} + V_{в} \left(\alpha_{д} - \alpha \right) \cdot B, \qquad (149)$$

где $V_{в}$ - расход воздуха на 1 м^3 природного газа , м^3/м^3 (табл.4);

$\alpha_{д}$ - дополнительный коэффициент избытка (подсоса) воздуха (составляет около 1,8);

α - расчетный коэффициент избытка воздуха.

Фактический расход газов, поступающих в дымосос, с учетом их температуры ($V^{t}_{дг}$)

$$V^{t}_{дг} = V^{ф}_{дг} \cdot \frac{273 + t_{ф}}{273}, \qquad (150)$$

где $t_{ф}$ – фактическая температура дымовых газов, поступающих в дымосос (обычно стремятся обеспечить 180-200 ^{o}С).

Для расчета общего гидродинамического сопротивления печи ($\Delta P_{общ}$) с цепной завесой рекомендуют [13] формулу

$$\Delta P_{общ} = \left(\zeta_{п} + \chi \cdot \frac{S_{ц}}{D_{o}^{2}} \right) \cdot \frac{\rho_{ср} \cdot w^{2}_{ср}}{2}, \qquad (151)$$

где $\zeta_{п}$ = 10…30 - коэффициент трения, изменяющийся в зависимости от соотношения L/D_{o} и других конструктивных размеров (чем выше L/D_{o}, тем большее значение $\zeta_{п}$ следует принимать);

χ = 0,9 – критерий для навески цепей гирляндами и

χ = 0,6 - критерий для свободно висящих цепей (в проекте можно принимать второй вариант);

$S_ц$ - общая площадь поверхности цепей, м^2; для известеобжиговых печей $S_ц$ = 400…1000 м^2 [13];

$\rho_{ср}$, $w_{ср}$ - средняя плотность и средняя скорость газов в зоне испарения (определяются по формулам 143 и 144).

Дополнительно к аэродинамическому сопротивлению печи следует учесть гидравлические сопротивления:

пылевой камеры - 80-120 Па,
газоходов к дымососу - 70-90 Па,
газоходов к трубе - 60-120 Па,
электрофильтров - 200-250 Па

и ввести коэффициент запаса 1,1. Полученный результат и составит полное аэродинамическое сопротивление печной установки (ΔPny).

Расчетная мощность электродвигателя дымососа

$$N_{расч} = \frac{V^{пост} \cdot \Delta P_{ny}}{1000 \cdot \eta_д \cdot \eta_п}, \qquad (152)$$

где $V^{пост}$ – объемный расход газов на входе в дымосос при рабочей температуре, м^3/с (см. 150);

$\eta_д$ и $\eta_п$ – к.п.д. соответственно дымососа, равный 0,72, и передачи, равный 0,98.

Установочная мощность двигателя при коэффициенте запаса k =1,1.

$$N_{дв} = 1{,}1 \cdot N_{расч}. \qquad (153)$$

На основании полученных расчетных характеристик, а также с учетом температуры газов, по справочным данным, в том числе по прил.18, выбирается подходящий тип дымососа, и приводятся его технические характеристики.

Пример расчета дымососа

В качестве исходных приняты следующие характеристики: α = 1,5; $V_{пг}$ = 15,37 м^3/м^3; B = 0,146 м^3/кг; $V^c_{CO_2} = 0{,}37$ м^3/кг; $V^ф_{H_2O} = 0{,}06$ м^3/кг; $V^г_{H_2O} = 0{,}006$ м^3/кг; $П_ц$ = 60 т/ч = 16,7 кг/с; $t_{дг}$ = 255 °С; $V_в$ = 14,25 м^3/м^3; $t_ф$ = 200 °С; β = 0,17; $D_о$ = 4,08 м; $\zeta_п$ = 20; $S_ц$ = 600 м^2.

Согласно (147) $V_{дг}\big|_{t=0}$ = (15,37·0,146+0,37+0,06+0,006)·16,7=44,76 м^3/с.

Согласно (148) $V_{дг}\big|_{t=t_{дг}}$ = 44,76· (273 + 255)/273 = 86,57 м^3/с.

Согласно (149) $V^ф_{дг} = 44{,}76 + 14{,}25(1{,}8 - 1{,}5) \cdot 0{,}146 = 45{,}38$ м^3/с.

Согласно (150) $V_{дг}^{t} = 45{,}38 \cdot \dfrac{273+200}{273} = 78{,}63$ м^3/с.

Согласно (143) $w_{ср} = \dfrac{86{,}57}{0{,}875 \cdot 4{,}08^2 (1-0{,}17)} = 7{,}98$ м/с.

Согласно (105) $G_{пг}$= 19,02·0,146+0,775 = 3,55 кг/с.

Согласно (144) $\rho_{ср} = \dfrac{3{,}55 \cdot 16{,}7}{86{,}57} = 0{,}68$ кг/м^3.

Согласно (151) $\Delta P_{общ} = \left(20 + 0{,}5 \cdot \dfrac{600}{4{,}08^2}\right) \cdot \dfrac{0{,}68 \cdot 7{,}98^2}{2} = 823$ Па.

Окончательно $\Delta P_{пу}$ = 823+100+80+100+225 = 1328 Па.

Согласно (152) $N_{расч} = \dfrac{78{,}63 \cdot 1328}{1000 \cdot 0{,}72 \cdot 0{,}98} = 148$ кВт.

Согласно (153) $N_{дв}$ = 1,1·148 = 162,8 кВт.

Выбор электрофильтра для очистки отходящих из печи газов

Вначале, согласно методике, изложенной в разделе 2.7.1, представляются характеристики пыли, выходящей из печи, ее концентрация (прил.17), затем (прил.17,18) выбирается необходимый тип электрофильтра и приводятся его технические характеристики.

Определяющими параметрами при выборе являются:

производительность по газу, м^3/ч;
допускаемая максимальная температура газов, ^{o}С;
допускаемая запыленность газов, г/м^3;
степень очистки газа, %.

Расчет пылеосадительных камер

Пылеосадительная камера применяется для грубой очистки больших объемов дымовых газов. Степень очистки в них достигает 50…60 %. Скорость движения газов в камере назначается из условия обеспечения ламинарного режима течения и невозможности уноса частиц.

Расчеты пылеосадительной камеры сводятся к тому, что при известных расходе газа, концентрации и составе пыли рассчитывают скорость осаждения частиц, транспортную скорость и, соответственно, время пребывания частиц в потоке до осаждения их на дно камеры или на специальные горизонтальные полки. Время пребывания является основой для расчета геометрических размеров камеры. Рассчитывается также потерянное давление газового потока в камере.

Скорость осаждения частиц в газовой среде при ламинарном режиме осаждения можно определить из формулы Стокса

$$w_{oc} = \frac{\rho_м \cdot d^2_{\min} \cdot g}{18 \cdot \mu_{cp}}, \qquad (154)$$

где w_{oc} - скорость осаждения, м/с;

d_{min} – минимальный диаметр частиц в смеси фракций, подлежащих осаждению, м;

$\rho_м$ - плотность частиц пыли, кг/м^3;

μ_{cp} - динамический коэффициент вязкости газов на выходе из печи, Па·с (прил.14).

Формула (154) применима, если Ar< 3,6; Re< 0,2,

где Ar - критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_э^3 \cdot \left(\rho_м - \rho_{cp}\right) \cdot \rho_{cp} \cdot g}{\mu^2_{cp}}, \qquad (155)$$

Re – критерий Рейнольдса $\quad \mathrm{Re} = \dfrac{\rho_{cp} \cdot w_{oc} \cdot d_э}{\mu_{cp}}$, (156)

где $d_э$ - средний эквивалентный диаметр частиц в смеси фракций

$$d_э = \sum_1^n d_i \cdot x_i, \qquad (157)$$

где d_i - средний диаметр частиц в выделенной фракции, м;

x_i - содержание фракций в долях единиц.

Для стесненных условий осаждения рабочая скорость осаждения

$$w^p_{oc} = 0{,}5 \cdot w_{oc}. \qquad (158)$$

Транспортная скорость частиц в камере ($w_к^T$) находится из условия

$$w_к^T < w_{св},$$

где $w_{св}$ - скорость свободного витания наименьших частиц в смеси фракций, предназначенных к осаждению в камере.

Скорость свободного витания определяют расчетами по следующим формулам

$$\mathrm{Re}_{св} = \frac{Ar}{18 + 0{,}61\sqrt{Ar}}; \qquad (159)$$

$$w_{св} = \frac{\mathrm{Re}_{св} \cdot \mu_{cp}}{\rho_{cp} \cdot d_{\min}}. \qquad (160)$$

Площадь поперечного сечения камеры $\quad S_к = B \cdot H = \dfrac{V^t_{дг}}{w^T_к}$, (161)

где B - ширина камеры, м;

H - высота камеры, м;

$V_{дг}^{t}$ - объемный расход газов, выходящих из печи при рабочей температуре, м^3/с.

В первоначальном расчете можно принять $B = H$ и легко определить эти величины.

Время пребывания частиц в потоке

$$\tau = \frac{H}{w_{oc}^{p}}. \qquad (162)$$

Длина камеры $$L = w_{к}^{T.}\tau. \qquad (163)$$

Должно также выполняться условие:

$$S_{oc} = \frac{V_{дг}^{t}}{w_{oc}^{p}}, \qquad (164)$$

где S_{oc} - площадь осаждения частиц: $S_{oc} = B \cdot L$.

Исходя из последнего условия, необходимо откорректировать величины B, L и H. Это нетрудно сделать, если учесть, что на основании (161) и (164)

$$\frac{H}{L} = \frac{w_{oc}^{p}}{w_{к}^{T}}. \qquad (165)$$

Потерянное давление на преодоление сопротивления движению газового потока в камере можно рассчитать по формуле

$$\Delta P = (\zeta_{вх} + \zeta_{вых}) \cdot \frac{\rho_{ср} \cdot w_{T}^{2}}{2} + \zeta_{отр} \frac{\rho_{ср} \cdot \left(w_{к}^{T}\right)^{2}}{2}, \qquad (166)$$

где $\zeta_{вх}$, $\zeta_{вых}$, $\zeta_{отр}$ - коэффициенты местных сопротивлений на входе и выходе из камеры и при огибании потоком газов отражательной перегородки в камере, их значения согласно [2] можно принять

$$\zeta_{вх}=0{,}5;\ \zeta_{вы}=1;\quad \zeta_{отр} = 0{,}5;$$

w_T - транспортная скорость газов в подводящем и отводящем газоходах (трубах)

$$w_T = \frac{V_{дг}^{t}}{S_{Тр}}, \qquad (167)$$

где $S_{ТР}$ - площадь трубы ($S_{ТР} = \frac{\pi d_{ТР}^{2}}{4}$); при назначении $d_{ТР}$ следует исходить из условия $w_{св} << w_T <$ 25 м/с.

Пример расчета пылеосадительной камеры

Приняты следующие исходные данные.

Фракционный состав пыли в отходящих газах: 0-10 мкм – 50%; 10-20 мкм – 30 %; 20-60 мкм – 15 %; 60-100 мкм – 5 %; d_{min} = 10 мкм = $1 \cdot 10^{-6}$ м; $\rho_м$ = 1500 кг/м^3 (частично дегидратированное сырье); $\mu_{ср}$ = $2{,}48 \cdot 10^{-5}$ Па·с; t = 200°С.

Согласно (154) $w_{oc} = \dfrac{1500 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9{,}81}{18 \cdot 2{,}48 \cdot 10^{-5}} = 0{,}003$ м/с.

Согласно (157) $d_э$ = 5·0,5+ 15·0,3+40·0,15+80·0,05 = 17 мкм = 17·10^{-6} м.

Согласно (155) $Ar = \dfrac{(17 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (1500 - 0{,}68) \cdot 0{,}68 \cdot 9{,}81}{\left(2{,}48 \cdot 10^{-5}\right)^2} = 0{,}08$.

Согласно (156) $\mathrm{Re} = \dfrac{0{,}68 \cdot 0{,}003 \cdot 17 \cdot 10^{-6}}{2{,}48 \cdot 10^{-5}} = 0{,}0014$.

Таким образом $Ar < 3{,}6$; $Re < 0{,}2$ и, следовательно, w_{oc} = 0,003 м/с можно принять для дальнейших расчетов.

Согласно (158) $w_{oc}^{p} = 0{,}5 \cdot 0{,}003 = 0{,}0015$ м/с.

Согласно (155) для d_{min}= 10·10^{-6}м:

$$Ar = \frac{(10 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (1500 - 0{,}68) \cdot 0{,}68 \cdot 9{,}81}{(2{,}48 \cdot 10^{-5})^2} = 0{,}016.$$

Согласно (159) $\mathrm{Re}_{св} = \dfrac{0{,}016}{18 + 0{,}61\sqrt{0{,}016}} = 0{,}0009.$

Согласно (160) $w_{св} = \dfrac{0{,}0009 \cdot 2{,}48 \cdot 10^{-5}}{0{,}68 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 0{,}0035.$ м/с.

Принимаем $w_к^{T}$ = 0,003 м/с.

Согласно (161) $S_к = \dfrac{78{,}63}{0{,}003} = 26210$ м^2.

Таким образом B=H = $\sqrt{26210}$ = 161 м.

Столь большие размеры сечения камеры указывают на практическую невозможность осаждения частиц с минимальным размером в 10 мкм.

Повторим расчет для d_{min} = 50 мкм.

$$Ar = \frac{(50 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (1500 - 0{,}68) \cdot 0{,}68 \cdot 9{,}81}{(2{,}48 \cdot 10^{-5})^2} = 5{,}04.$$

$$\mathrm{Re}_{св} = \frac{5{,}04}{18 + 0{,}61\sqrt{5{,}04}} = 0{,}24.$$

$$w_{св} = \frac{0{,}24 \cdot 2{,}48 \cdot 10^{-5}}{0{,}68 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 0{,}175 \text{ м/с.}$$

Принимаем $w_к^{T}$ = 0,17 м/с.

$$S_к = \frac{78{,}63}{0{,}17} = 462 \text{ м}^2.$$

$$B = H = \sqrt{462} = 21 \text{ м.}$$

Эти размеры приемлемы для промышленной пылеосадительной камеры. Продолжим расчет для d_{min} = 50 мкм.

$$w_{oc} = \frac{1500 \cdot (50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9{,}81}{18 \cdot 2{,}48 \cdot 10^{-5}} = 0{,}824 \quad \text{м/с.}$$

$$w_{oc}^{p} = 0{,}5 \cdot 0{,}824 = 0{,}412 \text{ м/с.}$$

Согласно (162) $\tau = \frac{21}{0{,}412} = 51$ с.

Согласно (163) $L = 0{,}17 \cdot 51 = 8{,}3$ м.

Согласно (146) $S_{oc} = \frac{78{,}63}{0{,}412} = 191$ м^2.

Согласно (165) $\frac{H}{L} = \frac{0{,}412}{0{,}17} = 2{,}42$,

откуда $L = \frac{21}{2{,}42} = 8{,}7$ м.

Принимаем L = 9 м.

Согласно (167) $w_T = \frac{78{,}63}{0{,}785 \cdot 2{,}5^2} = 16$ м/с (принято d_{TP} = 2,5 м).

Согласно (166) $\Delta P = (1 + 0{,}5) \cdot \frac{0{,}68 \cdot 16^2}{2} + 0{,}5 \frac{0{,}68 \cdot (0{,}17)^2}{2} = 80$ Па·с.

Вывод: применение камеры с рассчитанными параметрами технически нецелесообразно из-за ее громоздкости и низкой эффективности улавливания: при d_{min} = 50 мкм эффективность улавливания составит *Эф* = (12/100) · 100 = =12 %, что явно недостаточно (в расчете принято, что количество частиц в пыли, крупнее 50 мм составляет 12 %).

3.3. Примерная методика расчета шахтных печей для получения извести и магнезиального (магнезиально-доломитового) вяжущего

Прежде, чем приступить к расчетам, необходимо тщательно изучить устройство и работу шахтных печей по литературным источникам, например, [10,13] и др.

Для первого знакомства отметим следующее.

Шахтные печи применяют для обжига относительно прочных пород типа известняков. Работать печи могут на твердом, жидком или газообразном топливе, что определенным образом сказывается на их конструкции.

Конструктивно шахтная печь состоит из вертикальной, офутерованной изнутри огнеупорным материалом шахты и скипового загрузочного устройства (рис.15).

Сырьевые материалы загружаются в верхнюю часть шахты, а готовый продукт непрерывно выгружается из нижней части. При этом порция сырьевого

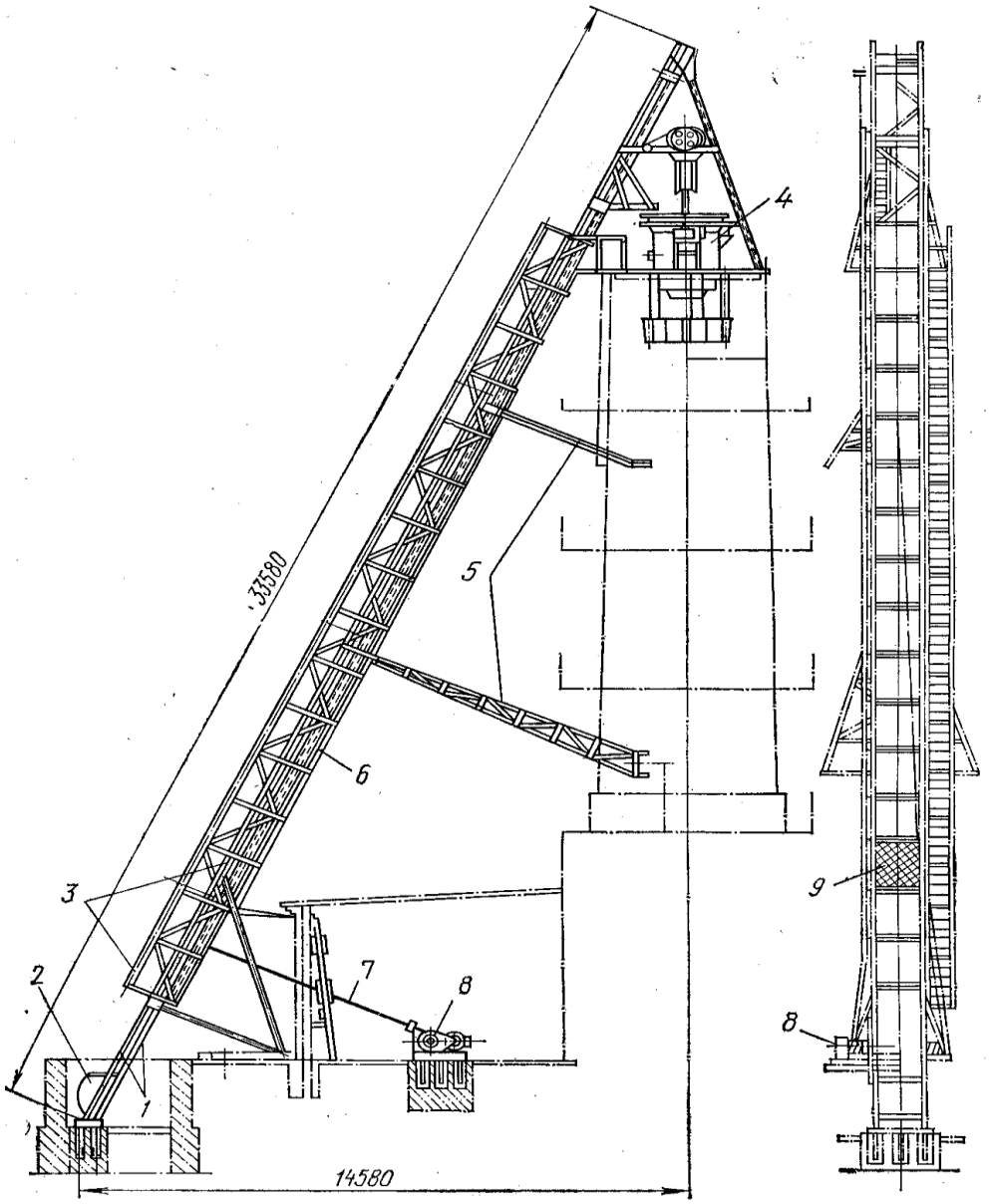


Рис.15.Схема скипового загрузочного устройства шахтных печей:
1 – балки; 2 - ковш; 3 – фермы;
4 – механизм загрузки печи; 5 –опоры;
6 – скиповой подъемник; 7 – канат;
8 – лебедка; 9 - сетка

материала (далее – известняк) массой 1-3 тонны фракции 120 …80 или 80…40 мм из бункера весовым дозатором сырья загружается в ковш скипового подъемника. В печах на твердом топливе туда же загружается уголь. Скиповый подъемник поднимает ковш на верх печи и ссыпает куски известняка (и угля) в приемную воронку механизма загрузки, который равномерно распределяет материал по площади шахты.

Постепенно опускаясь в шахте, известняк сушится и подогревается встречными дымовыми газами из зоны обжига, которые при этом понижают свою температуру до 110…400°С (в зависимости от конструкции печи).

Известняк же постепенно подогревается до температуры обжига – 1000…1100°С.

Горючий природный газ газораспределительным устройством подводится к нижней части печи и сжигается с помощью горелок, устанавливаемых непосредственно в шахте. Снизу к горелкам через слой выгружаемой извести подается воздух, в результате чего он нагревается до высоких (400…500°С) температур, что обеспечивает в дальнейшем качественный процесс горения топлива и общую экономию тепловой энергии.

В соответствии с происходящими физико-химическими процессами в шахте печи по высоте выделяют три технологические зоны: 1 – подогрева сырьевого материала; 2 – обжига; 3 – охлаждения продукта обжига. Технологические зоны шахтной печи, работающей на природном газе, характеризуются примерно следующими показателями.

Зона подогрева составляет 30-40 % полезной высоты шахты, что позволяет снижать температуру отходящих газов до 300…350°С (без учета подсосов холодного воздуха) и подогревать известняк в конце зоны до температуры 800…900°С.

Зона обжига занимает 35…40 % полезной высоты шахты. В этой зоне происходит сгорание природного газа и диссоциация известняка. Среднюю температуру газов в зоне обжига поддерживают на уровне 1100…1250°С. Коэффициент избытка воздуха поддерживают на уровне 1,2…1,3.

Зона охлаждения занимает 25…30 % полезной высоты шахты. В этой зоне известь охлаждается до температуры 80…120°С перед ее поступлением в механизм выгрузки.

На рис.16,17,18 и 19 приведены конструктивные особенности современных шахтных печей на газообразном топливе, используемых в отечественном промышленном производстве. На них и следует ориентироваться при окончательном (по результатам расчета) выборе конструкции печи.

Представленная на рис.16 *шахтная печь конструкции ВНИИСтрома производительностью 100 т/сут* в зоне подогрева и обжига имеет круглое поперечное сечение диаметром в свету 3,2 м, которое в зоне охлаждения постепенно переходит в квадратное с размерами 2,2х2,2 м. Газообразные продукты обжига через патрубок 6 отсасываются из печи дымососом ДН-12,5. Перед выбросом в атмосферу газы очищаются от пыли в 6 циклонах типа ЦН-15 диаметром 600 мм. Известняк загружается в ковш скипового подъемника лотковым питателем и через двухклапанный механизм загрузки 4 поступает в шахту. Поворотный лоток механизма загрузки и отбойная обечайка распределяют крупную фракцию материала в приосевую часть печи. Известь из печи непрерывно выгружается решеткой механизма выгрузки 10 в бункер и далее лотковым питателем 12 через течку 13 на пластинчатый конвей-

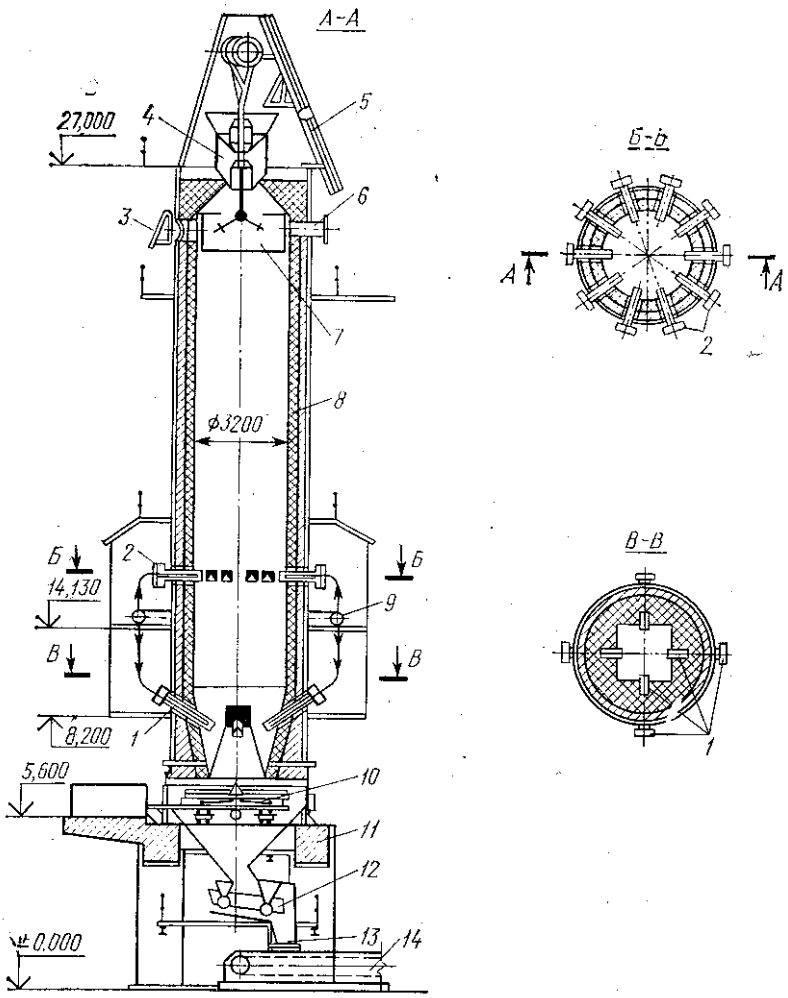


Рис.16. Схема шахтной печи конструкции ВНИИСтром, работающей на газообразном топливе, производительностью 100 т/сут:
1,2 – горелки; 3 – клапан; 4 – механизм загрузки; 5 – подъемник; 6 – патрубок; 7 – обечайка; 8 – кладка; 9 – трубопровод; 10 – механизм выгрузки; 11 – плита; 12 – питатель; 13 – течка; 14 - конвейер

ер 14. Расход условного топлива составляет 0,141 кг/кг, в пересчете на природный газ с $Q_p^н$ = 35000 кДж/м^3 – 0,117 м^3/кг.

Шахтная печь конструкции Союзгипрострома производительностью 100 т/сут имеет (рис.17) шахту круглого поперечного сечения диаметром в зоне подогрева 3,96 м, в зоне обжига – 3,2 м, в зоне охлаждения она переходит в квадратное сечение 2,2х2,2 м. Рабочая высота шахты – 17,5 м. Воздух для сжигания топлива поступает в зону охлаждения печи через механизм выгрузки 1 под действием разрежения в печи. Газообразные продукты обжига отсасываются из печи через пустотелый короб 14. Газы
очищаются от пыли в 6 циклонах ЦН-15 диаметром 600 мм, а затем дымососом ДН-12,5 выбрасываются через трубу в атмосферу. Загрузка известняка и выгрузка готовой извести аналогичны выше описанным для печи конструкции ВНИИСтрома. Расход условного топлива – 0,165 кг/кг, температура отходящих газов – 200°С, выгружаемой извести – 100°С.

Шахтная печь конструкции НИИСтромпроекта произво-дительностью 200 т/сут имеет (рис.18, 19) диаметр шахты в зоне обжига 4,3 м в свету, в зоне подогрева – 4,99 м, в зоне охлаждения – сечение квадратное с размерами 2,6х2,6 м. Печь оборудована системой рециркуляции отходящих печных газов, что повышает равномерность обжига. Окончательно газы отсасываются из печи через короб 7 дымососом Д-15,5 и проходят очистку от пыли в 8 циклонах ЦН-15 диаметром 750 мм. Расход условного топлива – 0,182 кг/кг.

Другие данные по конструкциям приведенных печей можно найти в [13].

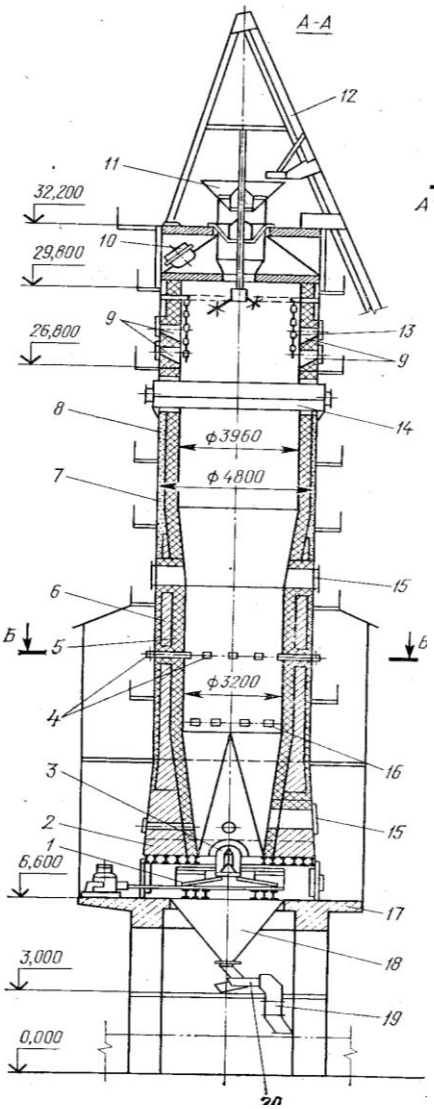


Рис.17. Схема шахтной печи конструкции Союзгипрострома, работающей на газообразном топливе, производительностью 100 т/сут:
1 – механизм выгрузки; 2,5-7 - слои кладки; 3,4,16 – горелки; 8 – кожух; 9 – отверстия; 10 – клапан; 11 – механизм загрузки; 12 – подъемник; 13 – цепная завеса; 14 – короб; 15 – люки; 17 – фундаментная плита; 18 – бункер; 19 – течка; 20 - питатель

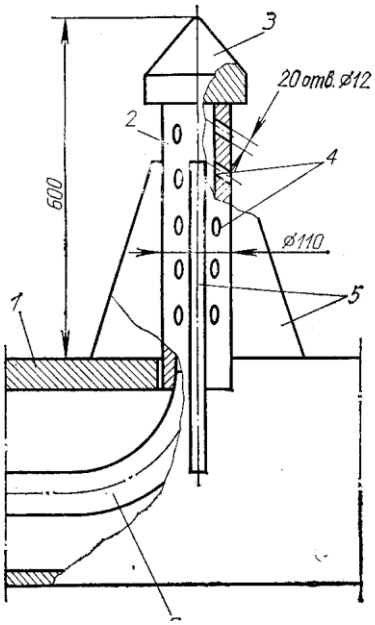


Рис.18. Схема осевой горелки конструкции Угловского известкового комбината:

1 - балка-рассекатель;
2 - труба;
3 - защитный конус;
4 - сопла;
5 - ребра жесткости;
6 - трубопровод

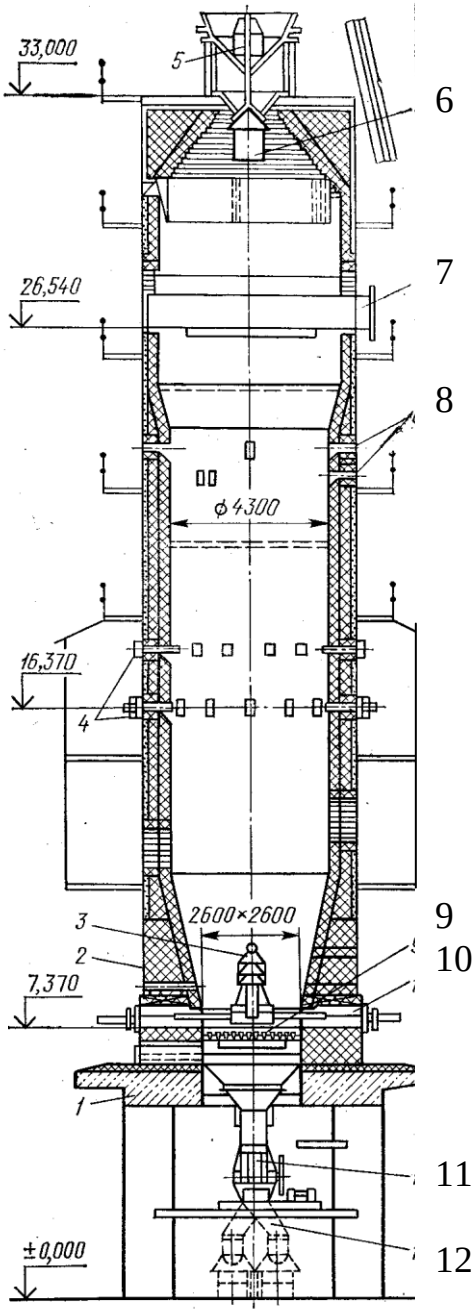


Рис.19. Схема шахтной печи конструкции НИИстромпроекта, работающей на газообразном топливе, производительностью 200 т/сут:
1– фундаментная плита; 2 – кожух; 3,4 – горелки; 5 – механизм загрузки; 6 – клапан; 7 – короб;
8 – отверстие для установки преобразователей КИП;
9 – механизм выгрузки; 10 – балка-рассекатель;
11 – затвор; 12 – течка

3.3.1. Исходные данные для расчета

Для расчетов рекомендуются шахтные печи на газовом топливе. Перечень этапов для разработки полностью соответствует указаниям раздела 3.2.1. Рекомендуется также привести схему материальных потоков и выделенных зон в рабочей части печи, обозначения параметров (рис.20).

3.3.2. Расчет процесса горения топлива

Расчет процесса горения топлива можно представить по методике раздела 2.4., закончив его составлением таблицы по аналогии с табл.2. Коэффициент избытка воздуха сначала рассчитывается, а затем сверяется с рекомендуемыми значениями (прил. 17).

3.3.3. Материальный баланс печи

Этот раздел выполняется по методике раздела 3.2.3. В расходной статье 2 следует принять свое значение уноса пыли $\alpha'_{ун}$ (прил. 17).

3.3.4. Тепловой баланс печи (на 1 кг извести) и расход топлива

Этот раздел может быть выполнен по методике раздела 3.2.4 при внесении следующих поправок: в приходной статье 3 энтальпия должна соответствовать воздуху в его исходном состоянии; в расходной статье 6 потери в окружающую среду должны соответствовать этому показателю для шахтных печей на газовом топливе (можно принять – 2,5 %).

3.3.5. Расчет времени пребывания материала в печи

Общее время пребывания материала в печи (τ):

$$\tau = \tau_н + \tau_{обж} + \tau_{охл}, \qquad (168)$$

где $\tau_н$ – продолжительность нагрева кусков сырья до температуры обжига, ч;

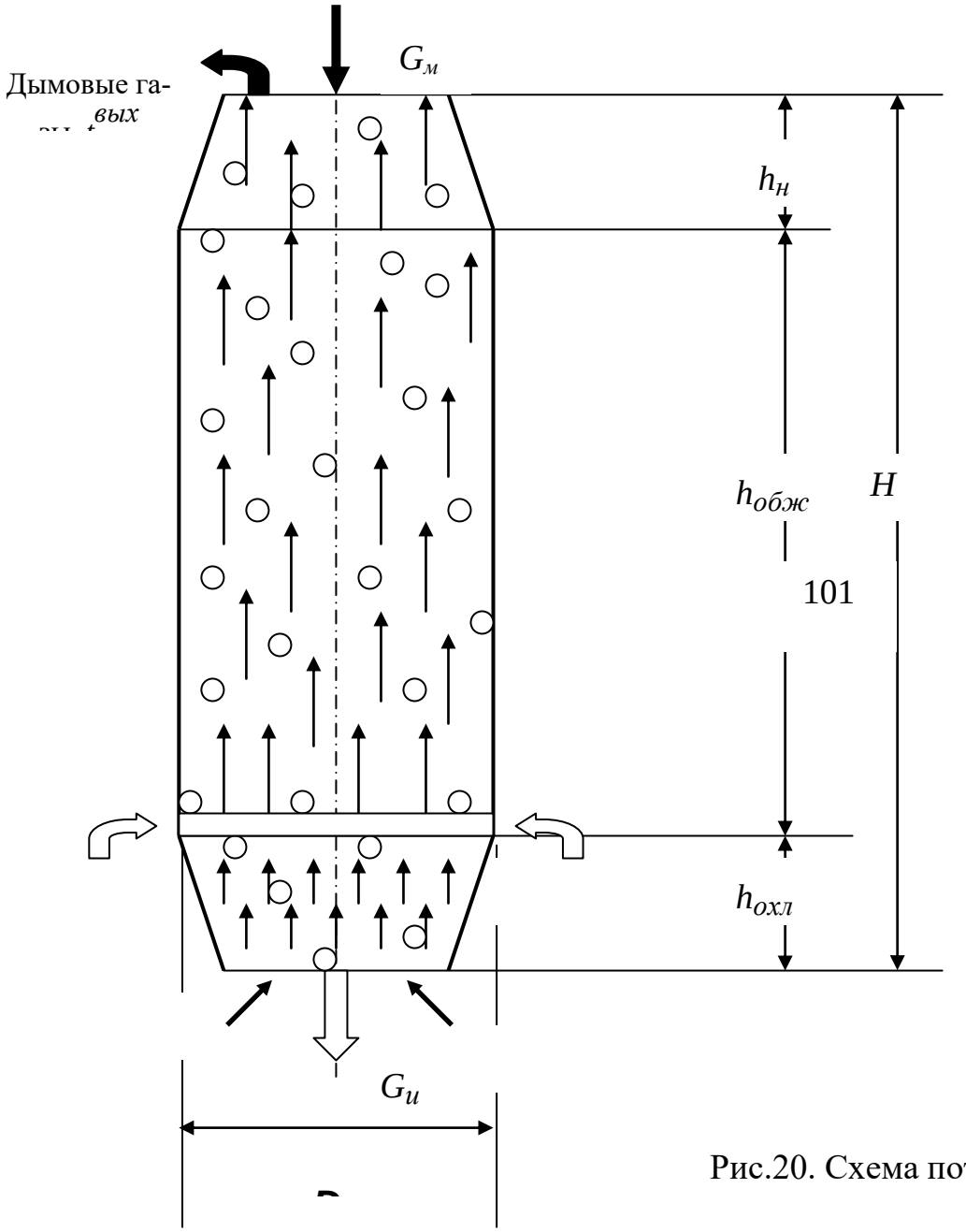
$\tau_{обж}$- продолжительность обжига, ч;

$\tau_{охл}$ – продолжительность охлаждения кусков извести до температуры выгрузки, ч.

Время пребывания в зоне нагрева - $\tau_н$

В этой зоне происходят процессы нагрева влажного сырья до температуры испарения воды, собственно испарения воды, дальнейшего нагрева материала до температуры обжига.

Рассмотрим тепловой баланс процесса нагрева куска исходного сырья определяющего размера $d = 0{,}9d_{max}$ для принятой фракции (условно принимаем форму кусков шарообразной)



Обозначения параметров:

H - общая высота рабочей части печи, м;

$D_{ср}$ - диаметр печи, м;

$h_н$ – высота зоны нагрева, м;

$h_{обж}$- высота зоны обжига, м;

$h_{охл}$- высота зоны охлаждения, м;

$G_м$ - масса поступающего известняка, кг/ч;

$G_и$ - масса выходящей извести, кг/ч;

$t_{в0}$ - температура атмосферного воздуха, ^{o}C;

t_m - температура газообразного топлива, ^{o}C;

$t^{вых}$ -температура выходящих из печи дымовых газов, ^{o}C;

Материальные потоки:

исходное сырье;

обожженный продукт;

газообразное топливо;

воздух;

дымовые газы

куски обжигаемого материала

Рис.20. Схема потоков и зон в рабочей части шахтной печи

$$Q_н = Q_{н1} + Q_{н2} + Q_{н3} + Q_{н4}, \quad (169)$$

где $Q_н$ - общее количество теплоты, подводимое к куску сырья от отходящих из печи газов, Дж;

$Q_{н1}$ – количество теплоты, затрачиваемое на нагрев сухого материала, Дж;

$Q_{н2}$ - количество теплоты, затрачиваемое на нагрев влаги в материале, Дж;

$Q_{н3}$ - количество теплоты, затрачиваемое на испарение влаги, Дж;

$Q_{н4}$ – количество теплоты, затрачиваемое на дегидратацию глинистых примесей, Дж.

Рассмотрим каждую из статей нагрева в отдельности.

Расход теплоты на нагрев куска сухого материала, Дж

$$Q_{н1} = c \cdot m(t^н_{м2} - t^н_{м1}) \cdot 1000, \quad (170)$$

где m - масса куска материала

$$m = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho_м, \quad (171)$$

где d - определяющий размер куска известняка, м;

$\rho_м$ - плотность материала в куске, кг/м^3;

c - удельная теплоемкость обжигаемого материала, кДж/(кг·°С).

$t^н_{м1}$ - температура поступающего в печь материала, °С;

$t^у_{м2}$ - температура материала в зоне нагрева, °С.

Расход теплоты на нагрев влаги в материале, Дж

$$Q_{н2} = \frac{U}{100} \cdot m(100 - t^н_{м1}) \cdot c_{вд} \cdot 1000, \quad (172)$$

где U - влажность поступающего материала, %;

$c_{вд}$ -удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·°С).

Расход теплоты на испарение воды из материала, Дж

$$Q_{н3} = \frac{U}{100} \cdot m \cdot r \cdot 1000, \quad (173)$$

где r - теплота испарения воды при (100-105)°С, кДж/кг (Приложение 4).

Расход теплоты на дегидратацию глинистых примесей, Дж

$$Q_{н4} = 2378 \cdot 0{,}3 \cdot \frac{Пр}{100} \cdot \rho_м \cdot \frac{\pi d^3}{6} \cdot 1000, \quad (174)$$

где $Пр$ - содержание глинистых примесей в сырье, %.

2378- теплота, затрачиваемая на дегидратацию глинистых материалов, *Дж/кг;*

Получив значение $Q_н$, *вычисляют время пребывания материала в зоне нагрева ($\tau_н$)*, исходя из следующего уравнения внешнего теплообмена

$$Q_{н1} = k \cdot S \cdot \Delta t_{ср} \cdot \tau_н, \qquad (175)$$

где S - площадь теплообмена (поверхность куска известняка,), м^2

$$S = \pi d^2;$$

$\tau_н$ – продолжительность нагрева, с;

$\Delta t_{ср}$- средняя разность температуры дымовых газов в зоне и температуры куска обжигаемого материала

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_н - \Delta t_к}{2{,}303 \cdot \lg \frac{\Delta t_н}{\Delta t_к}}, \qquad (176)$$

где $\Delta t_н = t^н{}_2 - t^н{}_{м1}$ (разность температуры отходящих из печи газов и поступающего материала), ^{o}С;

$\Delta t_к = t_2^{обж} - t_{м2}^{обж}$ (разность температур дымовых газов и материала в конце зоны нагрева), ^{o}С;

k - коэффициент теплопередачи (Вт/(м$^{2 \cdot o}$С)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + \frac{r}{\lambda}}, \qquad (177)$$

где α' - коэффициент конвективной теплоотдачи от дымовых газов к поверхности куска материала, для зоны нагрева можно принять α' = 14 Вт/(м$^{2 \cdot o}$С) [4];

λ - коэффициент теплопроводности материала, для известняка согласно[4] λ = 2,3 Вт/(м$\cdot^o$С).

Окончательно

$$\tau_н = \frac{Q_н}{k \cdot S \cdot \Delta t_{ср}}. \qquad (178)$$

Пример расчета $\tau_н$

Пусть в шахтной печи обжигается известняк в кусках с размерами от 80 до 120 мм, с плотностью в куске $\rho_м$ = 2400 кг/м^3, с содержанием глинистых примесей $Пр$ = 3 %, с влажностью U = 3 %; исходная температура воздуха $t_{во}$ = 10°С, температура обжига $t_м^{обж}$ = 1100 ^{o}С, температура отводимых из печи газов – 250°С.

Расчетный (определяющий) диаметр кусков известняка

$$d = 0{,}9 d_{max} = 0{,}9 \cdot 120 = 108 мм = 0{,}108 м.$$

Согласно (171) $m = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}108^3}{6} \cdot 2400 = 1{,}582\ кг.$

Согласно (170) $Q_{н1}$ = 0,9$\cdot$1,582$\cdot$(900-10)$\cdot$1000 = 1267182 Дж.

Согласно (172) $Q_{н2}$ = (3/100)$\cdot$1,582$\cdot$(100-10)$\cdot$1000 = 4271 Дж.

Согласно (173) $Q_{н3}$ = (3/100)·1,582·2260·1000 = 107260 Дж.

Согласно (174) $Q_{н4}$ = 2378·0,3·(3/100)·1,582·1000 = 33858 Дж.

Согласно (169) $Q_н$ = 1267182 + 4271 + 107260 + 33858 = 1412571Дж,

$S = 3{,}14 \cdot 0{,}108^2 = 0{,}0366$ м^2.

Согласно (176) $$\Delta t_{ср} = \frac{(250-10)-(1250-900)}{2{,}303\lg\frac{240}{350}} = 298^{o}C.$$

Согласно (177) $$k = \frac{1}{\frac{1}{14}+\frac{0{,}054}{2{,}3}} = 10{,}54\ Вт/(м^2\,^{o}C).$$

Окончательно $$\tau_н = \frac{1412571}{10{,}54 \cdot 0{,}0366 \cdot 298} = 122886\ с = 3{,}41\ ч.$$

Время пребывания в зоне обжига - $\tau_{обж}$

Принимается, что скорость процесса декарбонизации сырья лимитируется не химической реакцией, а скоростью подвода теплоты. Время пребывания определяется на основании следующего уравнения теплового баланса

$$Q^{обж} = Q_1^{обж} + Q_2^{обж}, \qquad (179)$$

где $Q^{обж}$ - количество теплоты, подводимое к куску известняка от дымовых газов в зоне обжига, согласно уравнению (175), для которого α=21 Вт/(м$^{2.o}$С) – с учетом лучистой теплоты [4];

$Q_1^{обж}$ - количество теплоты, затраченное на нагрев материала в зоне обжига, Дж

$$Q_1^{обж} = c \cdot m \cdot (t_{м2}^{обж} - t_{м1}^{обж}) \cdot 1000; \qquad (180)$$

$t_{м1}^{обж}$ и $t_{м2}^{обж}$ - температуры материала в начале и в конце зоны обжига;

$Q_2^{обж}$ - общее количество теплоты, расходуемое на химическую реакцию декарбонизации сырья, Дж

$$Q_2^{обж} = \rho_м \frac{\pi d^3}{6} n \cdot (CaCO_3 + MgCO_3) \cdot Q_x \cdot 1000, \qquad (181)$$

где n - степень разложения сырья;

$(CaCO_3 + MgCO_3)$ – содержание карбонатов в сырье, в долях от 1;

Q_x - теплота химической реакции разложения карбонатной породы, кДж/кг [10].

Пример расчета $\tau_{обж}$

В продолжение расчета $\tau_н$ примем условно $t_{м2}^{обж}$ = 1100 ^{o}С;

$t_{м1}^{обж}$ = $t_{м2}^{н}$ = 900°С; $t_2^{обж}$ = 1100°С; $t_1^{обж}$ = 1250°С.

Согласно (180) $Q_1^{обж}$ = 0,9·1,582·(1100-900)·1000 = 284760 Дж.

Согласно (181) $Q_2^{обж}$ = 1,582·0,96·0,97·1900·1000 = 2799000 Дж.

Согласно (179) $Q^{обж}$ = 284760 + 2799000 = 3083761 Дж.

Согласно (176) $\Delta t_{ср} = \dfrac{(1100+900)-(1250-1100)}{2{,}303\lg\dfrac{200}{150}} = 175\ ^{o}C.$

Согласно (177) $k = \dfrac{1}{\dfrac{1}{21}+\dfrac{0{,}054}{2{,}3}} = 14{,}08\ Вт/(м^{2o}C.$

Согласно (178) $\tau_{обж} = \dfrac{3083761}{14{,}08\cdot 0{,}0366\cdot 175} = 34195\ с = 9{,}5\ ч.$

Время пребывания в зоне охлаждения определяется из следующего уравнения теплового баланса

$$Q_в^{нагр} = Q_и^{охл}, \qquad (182)$$

где $Q_в^{нагр}$ - количество теплоты, приобретаемое поступающим в печь воздухом;

$Q_и^{охл}$ - количество теплоты, отданное куском охлаждаемой извести

$$Q_и^{охл} = c_и \cdot m_и \cdot (t_{м2}^{обж} - t_и^{вых})\cdot 1000, \qquad (183)$$

где $c_и$ - удельная теплоемкость извести, кДж/кг (прил. 1);

$m_и$ - масса куска извести $m_и = \rho_и \cdot \dfrac{\pi d^3}{6}$, (184)

где $\rho_и$ - плотность извести в куске, кг/м^3, можно принять $\rho_и$ = 0,6·$\rho_м$;

$t_{м2}^{обж}$ – температура извести на выходе из зоны обжига, ^{o}C;

$t_и^{вых}$ - температура извести на выходе из печи.

Время пребывания материала в зоне определяется по (178) с учетом следующего: в (177) α'=11,6 Вт/(м^2·^{o}C) – согласно [4] для зоны охлаждения; λ = 0,62 Вт/(м·^{o}C) – согласно [4] для извести; в (175) $\Delta t_{ср}$ следует определять по (176), принимая $\Delta t_н = \left(t_{и2}^{обж} - t_{в2}^{охл}\right)$; $\Delta t_к = \left(t_{и2}^{охл} - t_{в0}\right)$,

где $t_{и2}^{обж}$ - температура извести на выходе из зоны обжига, ^{o}C;

$t_{и2}^{охл}$ - температура извести на выходе из зоны охлаждения, ^{o}C;

$t_{в0}, t_{в2}^{охл}$- температура воздуха на входе в печь (зону охлаждения) и на выходе из зоны охлаждения перед зоной обжига, ^{o}C.

Значение $t_{в2}^{охл}$ можно определить из теплового баланса для одного кг выходящей из печи извести $c_и \cdot (t_{и2}^{обж} - t_{и2}^{охл}) = B\cdot V_в \cdot c_в (t_{в2}^{охл} - t_{во})$,

откуда $$t_{в2}^{охл} = \frac{c_и \cdot (t_{и2}^{обж} - t_{и2}^{охл})}{B \cdot V_в \cdot c_в} + t_{во}, \qquad (185)$$

где $c_и$ - удельная теплоемкость извести, кДж/(кг°С) (прил. 1);

$t_{и2}^{обж}$ - температура извести на выходе из зоны обжига, °С;

$t_{и2}^{охл}$ - температура извести на выходе из печи, °С;

$t_{во}$ - температура воздуха на входе в печь, °С;

B - удельный расход топлива, м^3/кг;

$V_в$ - расход воздуха при расчетном значении коэффициента избытка α (табл.2);

$c_в$ - удельная теплоемкость воздуха, кДж/(м^3°С), при $t_в^{вых}$; так как она пока неизвестна, можно принять значение $c_в$ для t = 400°С.

Пример расчета $\tau_{охл}$ и τ

Принимаем $t_{и2}^{обж}$ = 1100°С; $t_и^{вых}$ = 100°С; $t_{в1}^{охл} = t_{в0}$ = 10°С;
$V_в$ = 11,05 м^3/м^3; B = 0,12 м^3/кг.

Согласно (185) $$t_в^{вых} = \frac{0{,}8 \cdot (1100 - 100)}{0{,}12 \cdot 11{,}05 \cdot 1{,}33} + 10 = 464\ ^oC.$$

Согласно (184) $$m_и = 0{,}6 \cdot 2400 \cdot \frac{3{,}14 \cdot 0{,}108^3}{6} = 0{,}949\ кг.$$

Согласно (183) $$Q_и^{охл} = 0{,}8 \cdot 0{,}949 \cdot (1100 - 100) \cdot 1000 = 759200\ Дж$$

Согласно (177) $$k = \frac{1}{\frac{1}{11{,}6} + \frac{0{,}054}{0{,}62}} = 5{,}78\ Вт/(м^{2o}C).$$

Согласно (176) $$\Delta t_{ср} = \frac{(1100 - 464) - (100 - 10)}{2{,}303 \cdot \lg\frac{614}{90}} = 284\ ^oC.$$

Согласно (178) $$\tau_{охл} = \frac{759200}{5{,}78 \cdot 0{,}0366 \cdot 284} = 12637\ с = 3{,}5\ ч.$$

Общая продолжительность пребывания материала в печи

$$\tau = 3{,}4 + 9{,}5 + 3{,}5 = 16{,}4 \text{ ч.}$$

3.3.6. Расчет конструктивных размеров печи

Объем шахты печи находят в зависимости от производительности и времени пребывания материала в печи

$$V_ш = \frac{П \cdot \tau}{\rho_и^н}, \qquad (186)$$

где $V_ш$ - объем шахты печи, м^3;

$П$ - производительность печи, кг/ч;

$\rho_и^н$ - плотность извести в насыпном состоянии, кг/м^3, ее можно определить как

$$\rho_и^н = \rho_и \cdot (1-\gamma), \qquad (187)$$

где $\rho_и$ - плотность извести в куске, кг/м^3;

γ - порозность (межзерновая пустотность) извести, в долях от 1.

Диаметр и высоту печи определяют через ее объем, при этом можно принять [3], что отношение высоты печи к ее диаметру $H/D_{ср}$ = 4 или $H = 4D_{ср}$.

Таким образом,

$$V_ш = \frac{\pi D_{ср}^2}{4} \cdot H = \frac{\pi D_{ср}^2}{4} \cdot 4D_{ср} = \pi D_{ср}^3, \qquad (188)$$

откуда

$$D_{ср} = \sqrt[3]{V_ш / \pi}, \qquad (189)$$

$$H = 4D_{ср}. \qquad (190)$$

Вначале рассчитывают всю высоту печи, а затем отдельно по каждой зоне.

Пример расчета конструктивных размеров шахтной печи

Условно принято $П$ = 11900 кг/ч, γ = 0,35.

Согласно (187) $\rho_и^н$ = 0,6·2400·(1-0,35) = 936 кг/м^3.

Согласно (186) $V_ш = \frac{11900 \cdot 16{,}4}{936} = 211\,м^3$.

Согласно (189) $D_{ср} = \sqrt[3]{\frac{211}{3{,}14}} = 4{,}1\,м.$

Согласно (190) H = 4·4,1 = 16,4 м, в том числе:

высота зоны нагрева $h_н = 16{,}4 \cdot \frac{3{,}4}{16{,}4} = 3{,}4\,м$;

высота зоны обжига $h_{обж} = 16{,}4 \cdot \frac{9{,}5}{16{,}4} = 9{,}5\,м$;

высота зоны охлаждения $h_{охл} = 16{,}4 \cdot \frac{3{,}5}{16{,}4} = 3{,}5\,м$.

3.3.7. Аэродинамический расчет печи, расчет и выбор дымососа, циклона

Потеря гидродинамического давления газового потока в зернистом слое по зонам печи составит

$$\Delta P = \Delta P_{охл} + \Delta P_{обж} + \Delta P_н. \qquad (191)$$

Для определения потерянного давления в каждой зоне можно использовать формулы

$$\Delta P = \lambda' \cdot \frac{h}{\gamma^2 \cdot d_э} \cdot \frac{\rho_{ср} \cdot w_o^2}{2}, \qquad (192)$$

или $$\Delta P = \lambda' \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(1-\gamma)}{\gamma^3 \cdot \Phi} \cdot \frac{h}{d_{cp}} \cdot \frac{\rho_{cp} \cdot w_o^2}{2}, \qquad (193)$$

где λ' - коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda' = \frac{133}{\mathrm{Re}} + 2{,}34; \qquad (194)$$

γ - порозность слоя;

Φ - коэффициент формы зерен (согласно [2], можно принять Φ=0,806);

h - высота слоя обжигаемого материала в зоне печи, м;

d_{cp} – средний диаметр зерен обжигаемого материала, м

$$d_{cp} = \frac{d_{\min} + d_{\max}}{2}, \qquad (195)$$

где d_{min} и d_{max} – граничные размеры зерен материала, м;

ρ_{cp} - плотность дымовых газов с учетом средней температуры в зоне, кг/м^3;

w_o - фиктивная скорость дымовых газов, м/с

$$w_o = \frac{V'}{3600 \cdot S}, \qquad (196)$$

где V' - объемный расход продуктов горения при среднем значении температуры в зоне, м^3/ч;

S - площадь поперечного сечения шахты печи, м^2: $S = \pi D_{cp}^2$;

$d_э$ - эквивалентный диаметр каналов в межзерновом пространстве, м

$$d_э = \frac{2\gamma \cdot d_{cp} \cdot \Phi}{3(1-\gamma)}. \qquad (197)$$

С учетом принятых обозначений значение критерия Рейнольдса можно вычислить как $$\mathrm{Re} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Phi}{(1-\gamma)} \cdot \mathrm{Re}_o, \qquad (198)$$

где $$\mathrm{Re}_o = \frac{\rho_{cp} \cdot w_o \cdot d_{cp}}{\mu_{cp}}, \qquad (199)$$

где μ_{cp} - коэффициент динамической вязкости продуктов горения при средней температуре в зоне, можно принять как для N_2 (прил. 14).

Расчет потерянного давления в зоне охлаждения - $\Delta P_{охл}$

Количество воздуха ($V_в^{охл}$, м^3/с), проходящего через слой извести в зоне охлаждения $$V_в^{охл} = V_в \cdot П \cdot B, \qquad (200)$$

где $V_в$ - количество воздуха, необходимое для сжигания 1 м^3 горючего газа при расчетном значении коэффициента избытка воздуха α, м^3/м^3 (табл.2);

B - удельный расход топлива, м^3/кг.

Расход воздуха с учетом температуры

$$V_{вт}^{охл} = V_{в}^{охл} \cdot \frac{273 + t_{ср}}{273}, \qquad (201)$$

где $t_{ср}$ - средняя температура воздуха в зоне

$$t_{ср} = \frac{t_{в}^{вх} + t_{в}^{вых}}{2}, \qquad (202)$$

где $t_{в}^{вх}$ – температура воздуха на входе в печь, ^{o}С;

$t_{в}^{вых}$ – температура воздуха на границе зоны охлаждения и обжига, ^{o}С.

Фиктивная скорость воздуха, средний и эквивалентный диаметры кусков обжигаемого материала определяются по (196, 195 и 197); плотность воздуха определяется по формуле

$$\rho_{вт} = \frac{M}{22{,}4} \cdot \frac{273}{273 + t_{ср}}. \qquad (203)$$

Пример расчета величины потерянного давления в зоне охлаждения извести - $\Delta P_{охл}$

Примем условно B = 0,12 м^3/кг. Остальные данные будем заимствовать из предыдущих примеров.

Согласно (200) $V_{в}^{охл} = 11{,}05 \cdot 1900 \cdot 0{,}12 = 15800\, м^3/ч.$

Согласно (202) $t_{ср} = \frac{10 + 486}{2} = 248\, ^{o}C.$

Согласно (201) $V_{вт}^{охл} = 15800 \cdot \frac{273 + 248}{273} = 30153\ м^3/ч.$

Согласно (203) $\rho_{вт} = \frac{29}{22{,}4} \cdot \frac{273}{273 + 248} = 0{,}66\, кг/м^3.$

Согласно (196) $w_{о} = \frac{30153 \cdot 4}{3600 \cdot 3{,}14 \cdot 4{,}1^2} = 0{,}63\, м/с.$

Согласно (195) $d_{ср} = \frac{80 + 120}{2} = 100\, мм = 0{,}1\, м.$

Согласно (197) $d_{э} = \frac{2 \cdot 0{,}35 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}806}{3(1 - 0{,}35)} = 0{,}029\, м.$

Согласно прил. 14 $\mu_{ср}$=3,03·10^{-5} Па·с,

при $t_{ср}$=248°С.

Согласно (199) $\mathrm{Re}_{о} = \frac{0{,}66 \cdot 0{,}63 \cdot 0{,}1}{3{,}03 \cdot 10^{-5}} = 1372.$

Согласно (198) $\mathrm{Re} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0{,}806}{(1 - 0{,}35)} \cdot 1372 = 1135.$

Согласно (194) $\lambda' = \frac{133}{1135} + 2{,}34 = 2{,}46.$

Согласно (193)

$$\Delta P_{охл} = 2{,}46 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(1-0{,}35)}{0{,}35^3 \cdot 0{,}806} \cdot \frac{3{,}6}{0{,}1} \cdot \frac{0{,}66 \cdot 0{,}63^2}{2} = 115\ Па.$$

Расчет потерянного давления в зоне обжига - $\Delta P_{обж}$

Расход продуктов горения с учетом диссоциации ($CaCO_3$+$MgCO_3$) и дегидратации глинистых примесей можно вычислить по формуле

$$V_{пг}^{обж} = \left[V_{пг} \cdot B + \left(V_{co_2}^{c} + V_{н_2o}^{г} \right) \cdot G_{сух}^{c} \right] \cdot П, \qquad (204)$$

где $V_{пг}$ - объем дымовых газов (продуктов горения) от сжигания 1 м^3 природного газа при расчетном значении α (табл.2);

$V_{co_2}^{c}$ - объем CO_2, получаемый при разложении 1 кг сухого сырья, м^3/кг (см. п.3.2.3);

$V_{н_2o}^{г}$ - объем паров воды от дегидратации глинистых примесей, м^3/кг (см. п.3.2.3);

$G_{сух}^{c}$ - количество сырья, необходимое для получения 1 кг извести, кг/кг.

Масса продуктов горения

$$M_{пг}^{обж} = \left[V_{пг} \cdot \rho_{пг} \cdot B + \left(V_{co_2}^{c} \cdot \rho_{co_2} + V_{н_2o}^{г} \cdot \rho_{н_2o} \right) \cdot G_{сух}^{c} \right] \cdot П, \qquad (205)$$

где $\rho_{пг}$ - плотность продуктов горения, кг/м^3 (табл.2);

$\rho_{co_2}, \rho_{н_2o}$ - плотности углекислого газа, паров воды в стандартных условиях (0°С), кг/м^3.

Плотность продуктов горения в стандартных условиях

$$\rho_{пг0} = \frac{M_{пг}^{обж}}{V_{пг}^{обж}}. \qquad (206)$$

Пример расчета потерянного давления в зоне обжига - $\Delta P_{обж}$

В соответствии с табл.2 принято (условно) $V_{пг}$ = 13,26 м^3/м^3.

Согласно (204)

$$V_{пг}^{обж} = [13{,}26 \cdot 0{,}12 + (0{,}37 + 0{,}006) \cdot 1{,}75] \cdot 11900 = 26763\ м^3/ч.$$

$t = 0^o C$

Согласно (205)

$$M_{пг}^{обж} = [13{,}26 \cdot 1{,}307 \cdot 0{,}12 + (0{,}37 \cdot 1{,}96 + 0{,}006 \cdot 0{,}803) \cdot 1{,}75] \cdot 11900 = 40000\, кг/ч.$$

Согласно (206) $$\rho_{пг0} = \frac{40000}{26763} = 1{,}49\ кг/м^3.$$

Согласно (202) $$t_{ср} = \frac{1250 + 486}{2} = 868\ ^oC.$$

Согласно (203) $$\rho_{пг} = 1{,}49 \cdot \frac{273}{273 + 868} = 0{,}36\ кг/м^3.$$
$t = t_{ср}$

Согласно (201) $$V_{пг}^{обж} = 26763 \cdot \frac{273 + 868}{273} = 111856\, м^3/ч.$$
$t = t_{ср}$

Согласно (196) $$w_o = \frac{111856 \cdot 4}{3600 \cdot 3{,}14 \cdot 4{,}1^2} = 2{,}35\, м/с.$$

Как и ранее $d_{ср}$ = 0,1 м; $d_э$ = 0,029 м.

Согласно прил. 14 при t = 868°С $\mu_{ср}$ = 4,39·10^{-5} Па·с.

Согласно (199) $$\mathrm{Re}_o = \frac{0{,}36 \cdot 2{,}35 \cdot 0{,}1}{4{,}39 \cdot 10^{-5}} = 1927.$$

Согласно (198) $$\mathrm{Re} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0{,}806}{(1 - 0{,}35)} \cdot 1927 = 1593.$$

Согласно (194) $$\lambda' = \frac{133}{1593} + 2{,}34 = 2{,}42.$$

Согласно (193)

$$\Delta P_{обж} = 2{,}42 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - 0{,}35)}{0{,}35^3 \cdot 0{,}806} \cdot \frac{9{,}4}{0{,}1} \cdot \frac{0{,}36 \cdot 2{,}35^2}{2} = 2233\ Па.$$

Расчет потерянного давления в зоне нагрева - $\Delta P_н$

Расход дымовых газов с учетом диссоциации ($CaCO_3$+$MgCO_3$) - объема $V_{co_2}^c$, дегидратации глинистых примесей $V_{н_2o}^г$ и испарения физически связанной воды - $V_{н_2o}^ф$ можно вычислить по формуле

$$V_{пг}^н = \left[V_{пг} \cdot B + \left(V_{co_2}^c + V_{н_2o}^г + V_{н_2o}^ф \right) \cdot G_{сцх}^c \right] П. \qquad (207)$$

Масса продуктов горения

$$M_{пг}^н = \left[V_{пг} \cdot \rho_{пг} \cdot B + \left(V_{co_2}^c \cdot \rho_{co_2} + V_{н_2o}^г \cdot \rho_{н_2o} + V_{н_2o}^ф \cdot \rho_{н_2o} \right) \cdot G_{сцх}^c \right] П, \qquad (208)$$

(обозначения см. в ф.205).

Дальнейший расчет выполняется так же, как и для зоны охлаждения с учетом замечаний относительно зоны обжига. В результате расчетов находится $\Delta P_н$.

Пример расчета потерянного давления в зоне нагрева - $\Delta P_н$

Согласно (207)

$$V_{пг}^{н} = [13{,}26 \cdot 0{,}12 + (0{,}37 + 0{,}006 + 0{,}06) \cdot 1{,}75]11900 = 28013 м^3/ч.$$

Согласно (208)

$$M_{пг}^{н} = [13{,}26 \cdot 1{,}307 \cdot 0{,}12 + (0{,}37 \cdot 1{,}96 + 0{,}006 \cdot 0{,}803 + 0{,}06 \cdot 0{,}803) \cdot 1{,}75]11900 =$$

$$41062 \quad кг/ч.$$

Согласно (206) $$\rho_{пг0} = \frac{41062}{28013} = 1{,}47 кг/м^3.$$

Согласно (202) $$t_{ср} = \frac{1250 + 250}{2} = 750\ ^oC.$$

Согласно (203) $$\rho_{пг} = 1{,}47 \cdot \frac{273}{273 + 750} = 0{,}39\ кг/м^3.$$
$t = t_{ср}$

Согласно (201) $$V_{пг}^{н} = 28013 \cdot \frac{273 + 750}{273} = 104970\ м^3/ч.$$
$t = t_{ср}$

Согласно (196) $$w_o = \frac{104970 \cdot 4}{3600 \cdot 3{,}14 \cdot 4{,}1^2} = 2{,}21\ м/с.$$

Как и прежде $d_{ср}$ = 0,1 м; $d_э$ = 0,029 м.

Согласно прил. 14 при t = 750°С ; $\mu_{ср}$ = 4,05·10^{-5} Па·с.

Согласно (199) $$\mathrm{Re}_o = \frac{0{,}39 \cdot 2{,}21 \cdot 0{,}1}{4{,}05 \cdot 10^{-5}} = 2128.$$

Согласно (198) $$\mathrm{Re} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0{,}806}{(1 - 0{,}35)} \cdot 2128 = 1759.$$

Согласно (194) $$\lambda' = \frac{133}{1759} + 2{,}34 = 2{,}42.$$

Согласно (193)

$$\Delta P_н = 2{,}42 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{(1 - 0{,}35)}{0{,}35^3 \cdot 0{,}806} \cdot \frac{3{,}4}{0{,}1} \cdot \frac{0{,}39 \cdot 2{,}21^2}{2} = 624\ Па.$$

Общая потеря давления в печи $\Delta P = \Delta P_н + \Delta P_{обж} + \Delta P_{охл}$

Для нашего примера $\Delta P = 624 + 2233 + 115 = 2972\ Па.$

Определение расчетных характеристик и выбор дымососа

К расчетным характеристикам относятся: объемный расход газа, давление или разрежение, создаваемое дымососом, мощность электродвигателя.

Объемный расход газов соответствует (207), окончательно его необходимо привести к рабочей температуре отходящих газов.

Мощность электродвигателя рассчитывается по (152, 153). В соответствии с расчетными характеристиками по справочникам [8,14] или прил. 18 выбирается подходящий тип дымососа, в пояснительную записку заносятся его характеристики.

Пример определения расчетных характеристик дымососа

Примем условно температуру отходящих газов t_2=200°С.

Объем отходящих газов ($V_{отх}$), соответствующий производительности дымососа

$$V_{отх} = V_{пг}^{н} = 28013 \cdot \frac{273+200}{273} = 48535\, м^3/ч = 13{,}5\, м^3/с.$$

$$t = 200^{o}C$$

Согласно предыдущим расчетам ΔP = 2972 Па.

Расчетная мощность электродвигателя к дымососу согласно (152)

$$N_{расч} = \frac{13{,}5 \cdot 2972}{1000 \cdot 0{,}72 \cdot 0{,}80} = 70\, кВт.$$

Расчет и выбор циклона (циклонов)

Расчет может быть выполнен по методике, изложенной в разделе 2.7.1. При этом возможные концентрацию и дисперсность пыли можно принять по [13, 14] или прил. 8, 18. Характеристики циклона (прил. 7, 22) заносятся в пояснительную записку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб./А.Г.Касаткин.- М.:Химия, 1973.- 752 с.

2. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие/К.Ф.Павлов, П.Г.Романков, А.Л. Носков.- 10-е изд., перер.и доп.- Л.:Химия, 1987.- 576 с.

3. Баренбойм, А.М. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности: учеб. пособие /А.М.Баренбойм, Т.М.Галиева, Д.Б.Гинзбург. - 2-е изд., перер. и доп.- М.:Стройиздат, 1964.- 496 с.

4. Роговой, М.И. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов: учеб. пособие/М.И.Роговой, М.Н.Кондакова, М.Н.Сагановский.- М.:Стройиздат, 1973.- 320 с.

5. Дытнерский, Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проект./Ю.И.Дытнерский.- М.:Химия, 1983.- 240 с.

6. Русанов, А.А. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике:/А.А.Русанов, И.И.Урбах А.П.Анастасиади.- М.:Энергия, 1969.- 456 с.

7. Рекомендации по проектированию очистки воздуха от пыли в системах вытяжной вентиляции. – М.:ЦНИИПромзданий, 185.- 36 с.

8. Роттадис, К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности: справочник/К.Ф.Роттадис, Я.Б.Соколовский.- 4-е изда., перераб. и доп.- М:Энергия, 1988.- 368 с.

9. Сиденко, П.М. Измельчение в химической промышленности: монография/П.М.Сиденко; М.:Химия, 1977.- 368 с.

10. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества: учеб./А.В.Волженский.- 4-е изд.,перераб. и доп.- М.:Стройиздат, 1986.- 464 с.

11. Ахундов, А.А. Обжиг в кипящем слое в производстве строительных материалов: монография/А.А.Ахундов, Г.А.Петрихина, А.И. Полинковская; М.:Стройиздат, 1975.- 248 с.

12. Лебедев, П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий (курсовое проектирование): учеб. пособие/П.Д.Лебедев, А.А. Щукин.- М.:Энергия, 1970.- 408 с.

13. Монастырев, А.В. Производство извести: монография/ А.В. Монастырев; М.:Высшая школа, 1986.- 192 с.

14. Справочник по производству цемента: справочник/Под ред И.И.Холина.- М.:Стройиздат, 1963.- 852 с.

15. Справочник молодого рабочего цементного производства: справочник.- М.:Высшая школа, 1990.- 175 с.

16. ОНТП 10-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий по производству извести. – Введ.1986-01-01.- М.:Минстройматериалы СССР, 1986.- 47 с.

17. Шмитько, Е.И. Процессы и аппараты технологии строительных изделий (вопросы теории): учеб. пособие/Е.И.Шмитько.- Воронеж:ВГАСУ, 2009, том 1.- - с.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1

Опытные данные по сушке некоторых материалов в барабанных сушилках

Материал	Размеры кусков, зерен, мм	Плотность в куске (зерне), кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг°С)	Влажность, %		Температура газов, °С		Напряжение сушильного барабана(А), кг/(м^3·ч)	Пересыпные устройства
					$w_н$	$w_к$	t_1	t_2		
Глина	до 50	1400-1800	0,32-0,50	0,92	20-25	4-6	600-800	80-100	50-60	Подъемно-лопастное
Песок	0,16-5,0	2650	0,349-0,814	0,80	4-6	0,5-1,0	840	100	80-88	Ячейковое, лопастное
Известняк	0-20,0	1700-2600	0,80	0,92	8-12	0,5-1,5	800-1000	80-100	45-65	Ячейковое, лопастное
Мел	0-20,0	1500-1700	0,65	0,92	10-20	0,5-1,5	800-1000	80-100	50-65	Ячейковое, лопастное
Диатомит	0-20,0	800-1000	0,72	0,80	20-25	0,5-1,5	600-800	80-100	50-60	Ячейковое, лопастное
Трепел	до 50	700-1200	0,72	0,85	30-35	2,0-3,0	600-800	80-100	50-60	Подъемно-лопастное
Шлак гранулированный	0,10	600-900	0,30	0,75	10-25	0,5-3	500-600	80-100	25-50	Ячейковое
Опока	до 50	1500-1700	0,70	0,85	10-25	0,5-2	700-800	80-100	50-60	Ячейковое
Гипсовый камень	0-30	2000-2200	-	0,9	8-12	0*	300-500	85-105	-	Ячейковое, лопастное

*при получении строительного гипса – с потерей химически связанной воды

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П.2.1

Состав природных горючих газов

Район	Месторождение	Содержание газа в % (по объему)							$Q_н^р$, КДж/м^3
		CO_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5+b	N_2	
Ставропольский край	Северо-Ставропольское	0,12 1,71	98,3 96,8	0,36 0,13	0,17 0,07	0,04 0,07	0,01 0,02	1.0 1.2	35740 34924
Западная Украина	Угерское Косовское Рудковское	1,42 0,04 0,51	98,1 97,7 98,1	0,14 0,37 0,3	0,03 0,36 0,06	- 0,24 0,02	0,01 0,13 0,01	1.3 1.16 1.00	35133 35648 35540
Волгоградская область	Саушинское Верховское Абрамовское	0,02 0,1 0,1	97,2 96,1 97,0	0,26 0,21 0,3	0,08 0,05 0,05	0,03 0,02 0,01	0,01 0,02 0,01	2.22 3.5 2.53	35167 34730 35075
Астраханская область	Промысловское	0, 9	89,5	5,6	2,0	0,37	0,11	1.52	38100
Краснодарский край	Старо-Минское Кущевское	0,6 0,1	90,9 91,5	5,0 4,0	1,5 1,6	0,37 0,28	0,03 0,13	1.6 2.39	37658 37385
Восточная Украина	Щебелинка	0,6	84,2	5,1	2,8	0,67	0,5	6.13	37557
Башкирия	Канчуринское Мусинское	0,1 0,3	79,9 88,1	5,5 2,63,	2,9 1,4	0,65 0,37	0,4 0,16	10.55 7.04	36192 35204
Саратовская область	Урицкое	1,0	92,4	2,3	1,3	0,2	0,2	2.6	36380
Самарская область	Зольненское	4,2	58,5	17,0	13,0	0,1	2,7	4.5	53120

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П.3.1

Удельные теплоемкости газов при различных температурах С, кДж/(м$^{3.o}$С)

t °С	CO_2	N_2	O_2	H_2O	Сухой воздух	CO	CH_4
0	1,59	1,29	1,30	1,49	1,29	1,30	1,56
100	1,71	1,30	1,32	1,51	1,30	1,30	1,65
200	1,80	1,30	1,34	1,52	1,31	1,31	1,77
300	1,87	1,31	1,36	1,54	1,32	1,32	-
400	1,94	1,32	1,38	1,56	1,33	1,33	-
500	2,00	1,33	1,40	1,59	1,34	1,34	-
600	2,05	1,34	1,42	1,61	1,36,	1,36	-
700	2,10	1,35	1,43	1,64	1,37	1,37	-
800	2,14	1,36	1,45	1,67	1,38	1,39	-
900	2,18	1,38	1,46	1,70	1,40	1,40	-
1000	2,21	1,39	1,48	1,72	1,41	1,41	-
1100	2,24	1,40	1,49	1,75	1,42	1,43	-
1200	2,27	1,41	1,50	1,78	1,43	1,44	-
1300	2,30	1,43	1,51	1,80	1,44	1,45	-
1400	2,32	1,44	1,52	1,83	1,45	1,47	-
1500	2,35	1,45	1,53	1,85	1,46	1,47	-
1600	2,37	1,45	1,54	1,88	1,47	1,48	-
1700	2,38	1,46	1,55	1,90	1,48	1,49	-
1800	2,40	1,47	1,55	1,92	1,49	1,	-
1900	2,42	1,48	1,56	1,94	1,49	49	-
2000	2,44	1,48	1,57	1,95	1,50	1,50	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П.4.1

Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от температуры

Пересчет в СИ: 1 кгс/см^2 = 9,81 · 10^4 Па

Температура, °С	Давление (абсолютное), кгс/см^2	Удельная энтальпия пара, $I_П$, кДж/кг	Удельная теплота парообразования, ч, кДж/кг	Температура, °С	Давление (абсолютное), кгс/см^2	Удельная энтальпия пара, $I_П$, кДж/кг	Удель-ная теп-лота па-рообразования, ч, кДж/кг
0	0,0062	2493,1	2493,1	85	0,590	2653	2297
5	0,0089	2502,7	2481,7	90	0,715	2662	2285
10	0,0125	2512,3	2470,4	95	0,862	2671	2273
15	0,0174	2522,4	2459,5	100	1,033	2679	2260
20	0,0238	2532,0	2448,2	105	1,232	2687	2248
25	0,0323	2541,7	2436,9	110	1,461	2696	2234
30	0,0433	2551,3	2425,6	115	1,724	2704	2221
35	0,0573	2561,0	2414,3	120	2,025	2711	2207
40	0,0752	2570,6	2403,0	125	2,367	2718	2194
45	0,0977	2579,8	2391,3	130	2,755	2726	2179
50	0,1258	2589,5	2380,0	135	3,192	2733	2165
55	0,1605	2598,7	2368,2	140	3,685	2740	2150
60	0,2031	2608,3	2356,9	145	4,238	2747	2125
65	0,255	2617,5	2345,2	150	4,855	2753	2120
70	0,3177	2626,3	2333,0	160	6,303	2765	2089
75	0,393	2636	2321	170	8,080	2776	2056
80	0,483	2644	2310	180	10,23	2785	2021

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П.5.1

Технические характеристики сушильных барабанов

Модель	СМЦ-428.2	СМЦ-429.2	СМ-147А	СМЦ-440.2	СМ-1013	СМ-45Б
Производительность, т/ч	25-30	20-25	15	11	3,5	2,7
Размеры барабана, мм: диаметр длина	 2800 20000	 2800 14000	 2200 14000	 2200 14000	 1600 8000	 1600 8000
Частота вращения барабана, $с^{-1}$	0,07	0,078	0,093	0,05-0,15	0,07-0,1	0,07
Угол наклона барабана, град.	1-4	1-4	2-3	1-4	3	3
Установленная мощность, кВт	75	55	28	36-50	7-10	7
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	 20000 4930 4520	 14040 4800 4520	 14032 3910 3750	 14000 3860 3930	 9850 2800 3550	 10000 3000 3550
Масса, кг	61300	55650-62400	36120	35000	13900	15000

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица П.6.1

Технические характеристики фильтров типа ФВ

Показатели	ФВ-30	ФВ-45	ФВ-60	ФВ-90
Количество секций	2	3	4	6
Количество рукавов в фильтре	36	54	72	108
Длина, мм	1435	1970	2490	3525
Ширина, мм	1580	1580	1580	1580
Высота, мм	4100	4100	4100	4100
Фильтрующая поверхность, $м^2$	30	45	60	90
Размеры рукавов, мм	диаметр 135, длина 2090			
Производительность, $м^3/с$ (по данным завода-изготовителя)	1,25-1,50	1,85-2,25	2,50-3,00	3,75-4,50
Гидравлическое сопротивление, $Н/м^2$	800-900			
Вес, кг	900	1200	1460	2000

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица П.7.1

Производительность циклонов типа ЦН, м^3/с

Количество циклонов	Диаметр циклона, мм								
	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Одиночный циклон	0,4-0,7	0,51-0,6	0,63-0,73	0,76-0,89	0,9-1,06	1,03-1,24	1,22-1,43	1,41-1,65	1,6-1,85
Группа из двух циклонов	-	-	1,26-1,46	1,52-1,78	1,8-2,1	2,1-2,5	2,45-2,83	2,85-3,3	3,23-3,75
Группа из трех циклонов	-	-	-	-	-	3,2-3,7	3,67-4,32	4,25-4,96	4,85-5,6
Группа из четырех циклонов	1,6-1,88	2,04-2,38	2,52-2,93	3,03-3,56	3,65-4,25	4,26-4,95	4,9-5,75	5,66-6,6	6,45-7,52
Группа из шести циклонов	-	-	3,8-4,4	4,65-5,35	5,41-6,33	6,37-7,43	7,32-8,82	8,5-9,95	9,7-11,3
Группа из восьми циклонов	-	-	-	-	-	-	-	11,3-13,2	12,9-15,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Таблица П.8.1

Концентрация, гранулометрический состав пыли отходящих газов из печей, сушильных барабанов, мельниц

Наименование агрегата	Концентрация пыли, г/м^3	Количество фракций в % (масс.) при размере частиц, мкм							
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-90	90-200	>200
Вращающиеся печи, работающие по мокрому способу производства	40-50	18-50	18-33	5-22	3-12	12-17	2-12	2-6	0,1-1,8
Вращающиеся печи, работающие по сухому способу производства, шахтные печи	45-80	45-50	20-30	8-10	5-7	5-7	0,5-1,0	0,2-0,5	0,2-0,5
Цементные мельницы	80-100	28-45	23-25	12-14	9-11	11-12	1,5-2,0	0,1-4,0	0,1-0,4
Сушильные барабаны при сушке: шлака, песка, трепела, диатомита, золы ТЭС,	60-80	10-18	11-16	19-30	11-14	5-7	11-12	7-8	0,2-0,5
глинистого сырья	40-50	75	12	10	свыше 30 мкм – до 3%				

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

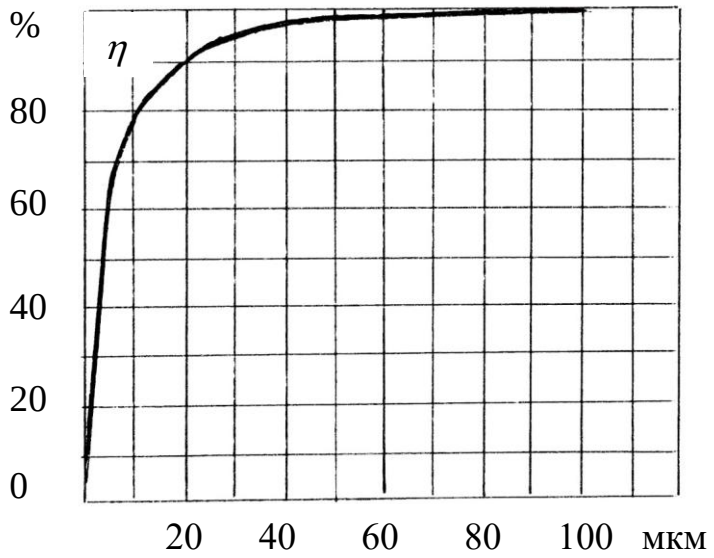


Рис.П.9.1. График парциальных коэффициентов очистки газа для циклона ЦН-15 диаметром 600 мм при $\Delta\rho/\rho_г$= 750 м^2/с^2 и $\rho_ч$=1930 кг/м^3

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

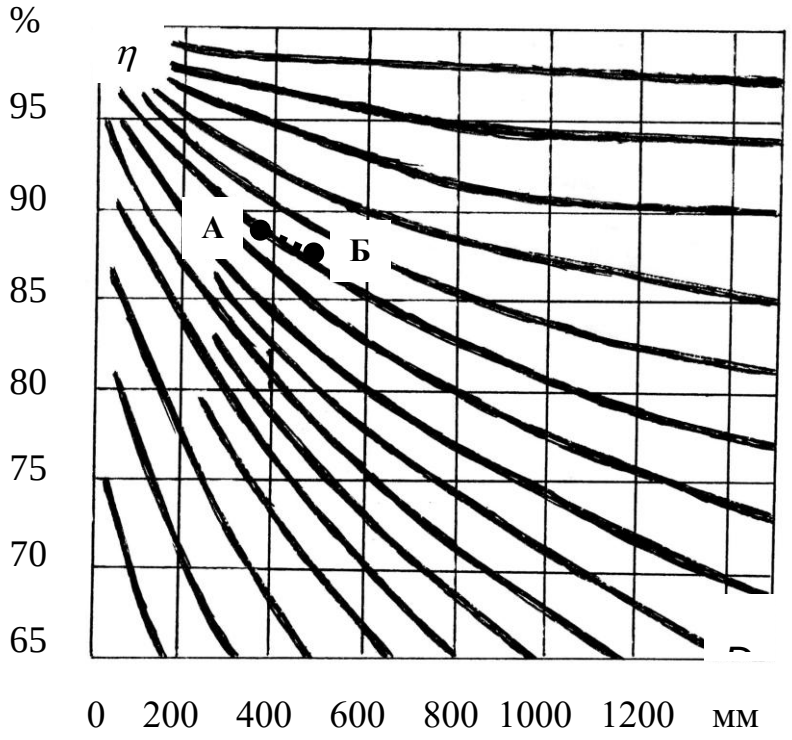


Рис.П.10.1. График для пересчета коэффициента очистки газов, найденного с помощью (рис.П.9.1), на другой диаметр циклона

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Таблица П.11.1

Дымососы одностороннего всасывания серии Д-0,7-37

Характеристики	Типоразмеры						
	Д-8	Д-10	Д-12	Д-131/2	Д-151/2	Д-18	Д-20
Производительность, тыс.м^3/ч	8 10	15 20	28 35	45 60	65 85	85 105	115 150
Полный напор при t=200°С,Па	600 1080	950 1700	1370 2450	1780 3150	2520 4120	2030 3140	2540 3950
Максимальный к.п.д.	0,61			0,63		0,70	
Диаметр рабочего колеса, мм	800	1000	1200	1350	1550	1800	2000
Потребляемая мощность, кВт	1,9 4,4	6,6 13,8	15,6 34	31 73	59 135	66 138	112 230
Габаритные размеры, мм							
длина	1286	1647	1773	2309	2380	2601	2997
ширина	1300	1620	1940	2260	2550	2954	3230
высота	1210	1560	1810	2145	2395	2940	3950

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Таблица П.12.1

Характеристики установки с кипящим слоем для сушки формовочного песка по типовому проекту института Теплопроект [11]

Характеристика	Показатель
Производительность	10 т/ч
Температура газов, ^{o}C :	
под решеткой	510
над слоем	125
Влажность песка, %:	
начальная	10
конечная	0,5
Скорость газов, м/с	1,27
Площадь решетки, м^2	1,5
Живое сечение решетки (площадь под отверстиями), %	3,5
Расход тепловой энергии на испарение влаги, кДж/кг	4600…7000
Напряжение объема по влаге, A_v , кг/(м^3·ч)	375

ПРИЛОЖЕНИЕ 13

К расчету сушилки с кипящим слоем

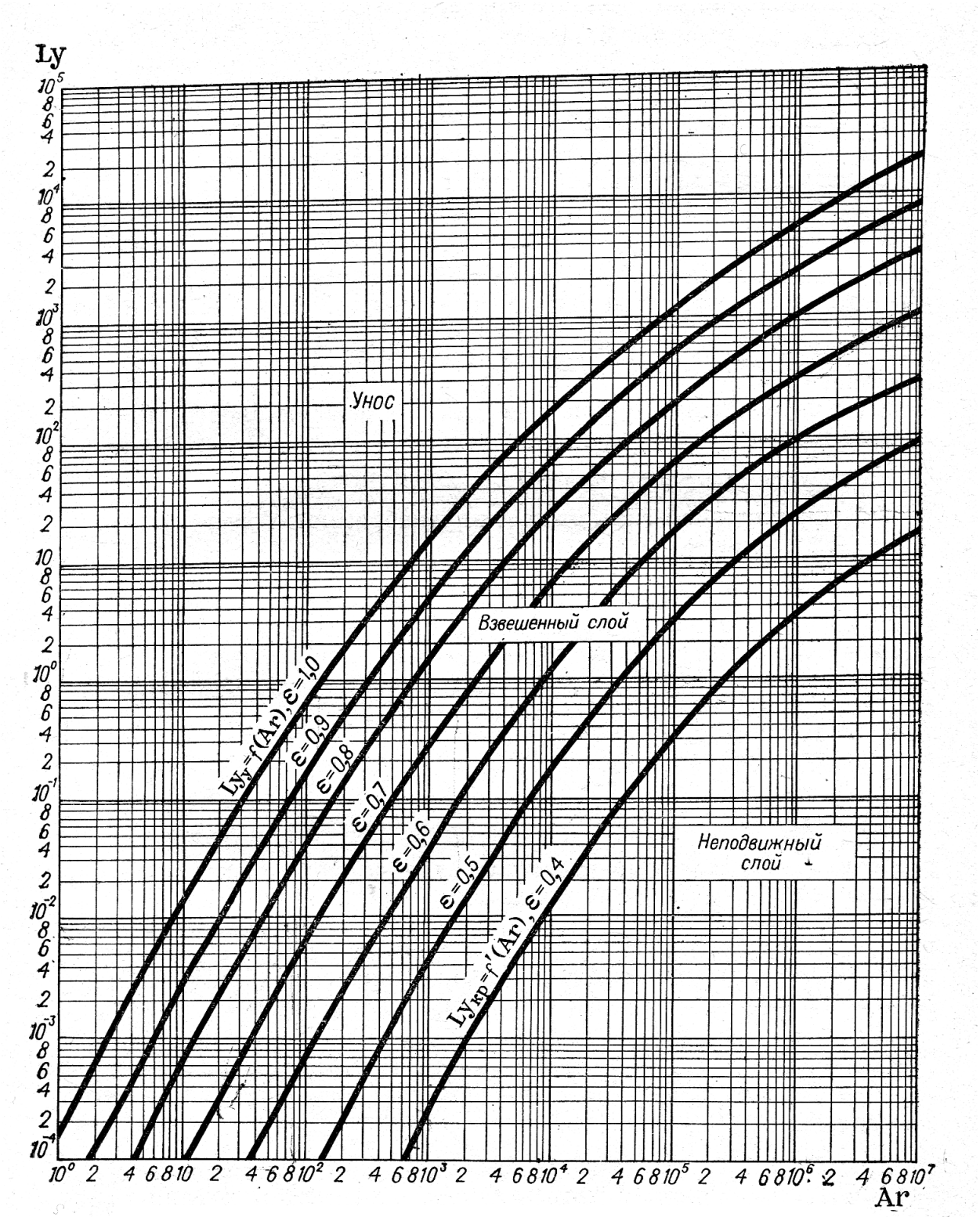
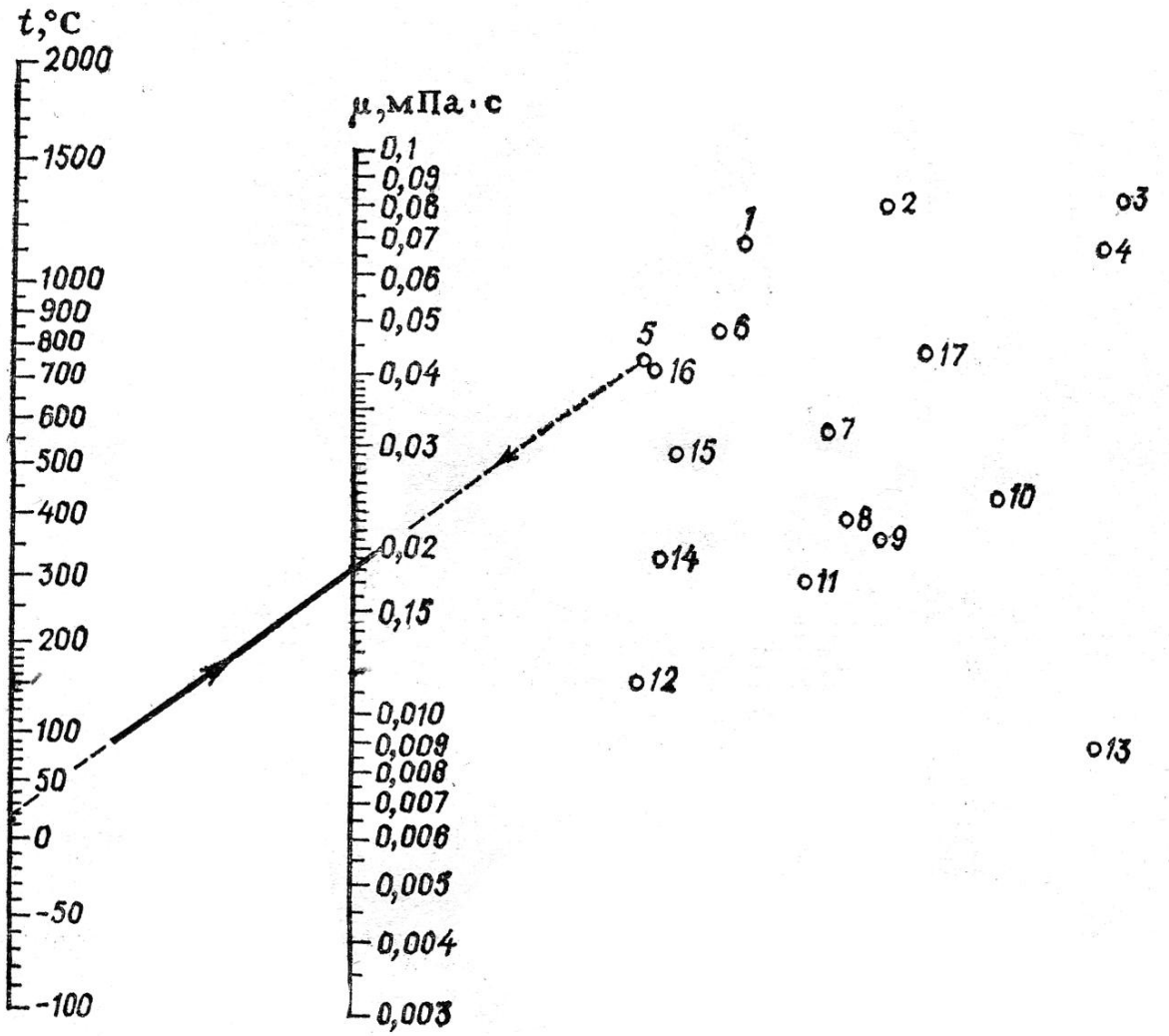


Рис.П.13.1. График зависимости критерия *Ly* от критерия *Ar* и порозности в слое

ПРИЛОЖЕНИЕ 14



Обозначения: 1 – O_2; 2 – NO; 3 – CO_2; 4 – HCl; 5 – воздух; 6 – N_2; 7 – SO_2; 8 – CH_4; 9 – H_2O; 10 – NH_3; 11 – C_2H_6; 12 – H_2; 13 – C_6H_6; 14 – $9H_2+N_2$; 15 – $3H_2+N_2$; 16 – CO; 17 – Cl_2

Рис.П.14.1. Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости газов при P = 101325 Па (1 атм)

Примечание: с допустимым приближением данными номограммы можно пользоваться и при давлении порядка нескольких атмосфер (нескольких десятков мегапаскалей).

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Таблица П.15.1

Ориентировочные данные о работе печей промышленности вяжущих веществ [3]

Тип печи, способ производства, обжигаемые материалы	Унос пыли относительно сухого сырья	Коэффициент избытка воздуха запечной установкой	Температура, °С		Потери теплоты, %		
			газов, выходящих из печной установки	материала, выходящего из холодильника	в окружающую среду	от химического недожога	от механического недожога топлива
Вращающиеся печи с внутренними теплообменными устройствами	5-15	1,05-1,2	200-250	-	15-17	до 2	до 1
Полые вращающиеся печи для сухого способа производства:							
извести	5-10	1,2	350-400	-	10-12	до 2	до 1
доломита	20-25	1,05	600-700	-	7-13	15-20	до 1
Вращающиеся печи с циклонными теплообменниками для сухого способа производства	20-30	1,3-1,5	300-350	-	20-22	до 2	до 1

Окончание прил.15

Окончание табл.П.15.1

Тип печи, способ производства, обжигаемые материалы	Унос пыли относительно сухого сырья	Коэффициент избытка воздуха запечной установкой	Температура, °С		Потери теплоты, %		
			газов, выходящих из печной установки	материала, выходящего из холодильника	в окружающую среду	от химического недожога	от механического недожога топлива
Вращающиеся печи с холодильниками:							
колосниковыми	-	-	-	60-100	-	-	-
рекуператорными	-	-	-	200-300	-	-	-
барабанными	-	-	-	100-200	-	-	-
Шахтные печи для производства:							
извести	3-6	-	250-300	100	2-2,5	-	-
магнезита	3-6	-	150	400-700	2-2,5	-	-
доломита	3-6	-	150	-	2-2,5	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

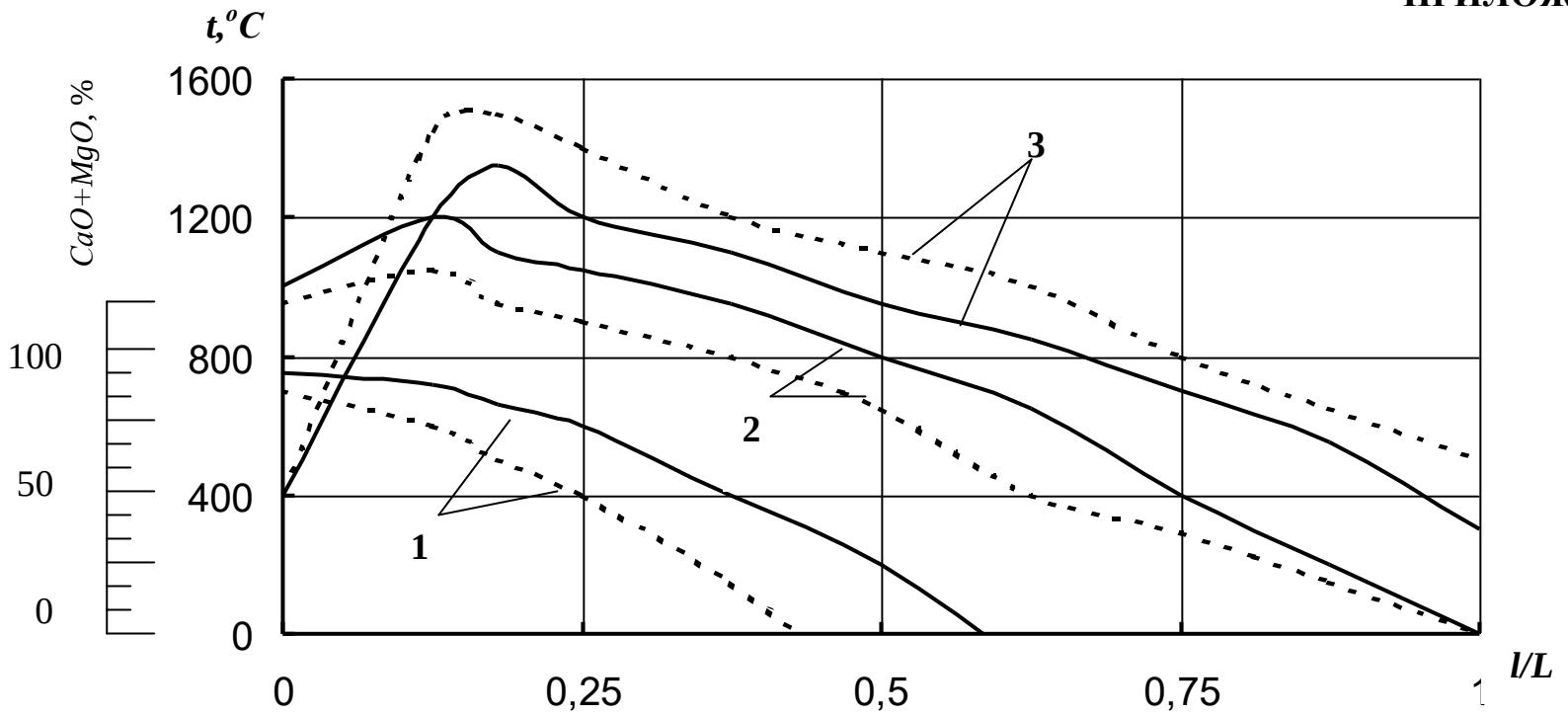


Рис.П.16.1. График распределения по длине барабана печи температуры и содержания активных *CaO+MgO* в извести при обжиге мелового сырья

Обозначения: 1 – содержание в извести активных *CaO* и *MgO*;
2 - температура поверхности материала;
3 – температура газов;
l - переменная длина печи;
L - общая длина барабана печи

в печи с внутренними теплообменниками
без теплообменников

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

Извлечения из общесоюзных норм технологического проектирования предприятий по производству извести – ОНТП-10-85

1. Общие требования

1.1.Настоящие общесоюзные нормы распространяются на технологическое проектирование заводов и цехов по производству извести для строительства и производства строительных материалов.

1.4.Проектирование предприятий по производству извести может быть начато при наличии отчета о геологоразведочных работах по месторождению сырья, составленного в соответствии с действующими инструкциями, и протокола ГКЗ (ТКЗ) об утверждении запасов сырья, пригодного для производства извести, в объеме, достаточном для эксплуатации предприятия в течение амортизационного периода не менее 25 лет.

1.6.Все проектируемые предприятия, предназначенные для производства извести для строительства и изготовления строительных материалов, должны быть рассчитаны на выпуск извести строительной, соответствующей ГОСТ 9179-77.

2. Мощности и режимы работы предприятий, фонды времени и уровень использования основного оборудования

2.2. Предприятия по производству извести должны размещаться вблизи месторождения сырья с учетом возможности кооперации использования сырья для производства известняковой муки, строительного щебня, цемента, заполнителя асфальтобетона и т.п.

2.3. Режим работы предприятий и цехов по производству извести определяется режимом работы основного печного оборудования и принимается непрерывным круглогодовым, то есть с числом рабочих дней в году – 365.

При наличии промежуточных емкостей, обеспечивающих необходимый запас материалов, допускается устанавливать режим работы сырьевых цехов или отделений, цехов или отделений помола и дробления извести 260 или 305 дней в год.

2.4. Сменность работы подразделений предприятий по производству извести приведена в табл.П.17.1.

2.5. Годовой фонд чистого времени работы определяется по формуле:

$$T_г = 8760 \cdot k_n \cdot k_m, \quad ч,$$

где k_n – коэффициент использования;

k_m –коэффициент готовности.

2.6. Величина коэффициент использования зависит от максимального времени простоев в ремонте основного технологического оборудования и составляет для предприятий и цехов по производству извести не менее 0,92 независимо от типа печного оборудования.

Коэффициент использования дробильного и помольного оборудования при выпуске мелкодробленой или молотой извести при работе в три смены принимается равным 0,87.

2.7. Коэффициент готовности, учитывающий устранение случайных отказов (сбоев) работы оборудования, принимается равным – 0,98.

Таблица П.17.1

Наименование цехов и отделений предприятия	Число рабочих смен в сутки
1. Цех обжига извести (отделение обжига)	3
2. Помольный цех (помольное отделение) или отделение дробления извести	2 – 3
3. Отделение приема известняка и топлива (сырьевой цех), - в случаях, когда предусматриваются емкости перед печами, обеспечивающие не менее 10-ти часового запаса	3 2
4. Склад известняка и топлива	2 – 3
5. Склад комовой извести: а) по загрузке б) по отгрузке на автомобильный транспорт в) по отгрузке на железнодорожный транспорт	 3 2 3*
6. Склад молотой и мелкодробленой извести: а) по загрузке б) по отгрузке на автомобильный транспорт в) по отгрузке на железнодорожный транспорт	 2 – 3 2 3*

* - отгрузка готовой продукции на железнодорожный транспорт производится круглосуточно по мере подачи железнодорожных вагонов. Бригада по отгрузке работает в 1 смену: время начала работ бригады определяется временем подачи вагонов.

2.9. Годовая мощность заводов по производству извести должна составлять не менее 200 тыс. тонн.

Рекомендуемые мощности цехов по производству извести в составе заводов или комбинатов строительных материалов:

- 66 тыс. тонн в год;
- 100 тыс. тонн в год;
- 130 тыс. тонн в год.

3. Требования к параметрам и качеству сырья, топлива, электроэнергии, воды и воздуха и нормы их расхода

3.1. Выбор способа производства извести должен осуществляться на основании технико-экономической оценки всех факторов, влияющих на себестоимость и качество извести, с учетом характеристик применяемого сырья, вида технологического топлива и эффективности их использования, а также с учетом факторов, влияющих на чистоту окружающей среды.

3.3. Выбор типа известеобжигового агрегата в зависимости от физико-химических свойств и фракционного состава карбонатных пород должен осуществляться в соответствии с приведенными данными в табл.П.17.2.

Таблица П.17.2

Физико-механические свойства карбонатных пород. Фракционный состав, мм	Не разрушающийся при нагревании известняка с пределом прочности при сжатии не менее 10 МПа	Известняк с пределом прочности при сжатии ниже 10 МПа и мел с влажностью менее 20 %	Мел с влажностью более 20 %
От 40 до 150	Шахтные печи	-	Длинные вращающиеся печи, работающие по мокрому способу
От 15 до 50	Короткие вращающиеся печи с подогревателями сырья	-	
Ниже 25	Печи «кипящего слоя» (КС)	Длинные вращающиеся печи, работающие по сухому способу	Длинные вращающиеся печи, работающие по мокрому способу

Примечание: соотношение минимального и максимального размеров кусков известняка, применяемого для обжига в шахтных печах и во вращающихся печах с запечными подогревателями, не должно превышать 1:2,5.

3.5. Величину пылеуноса от общего количества загружаемого в печь известняка следует принимать:

- для шахтных печей 0,5…1,0 %;
- для вращающихся печей со слоевыми подогревателями сырья 4…6 %;

- для длинных вращающихся печей 8…10 %.

3.7. В качестве газообразного топлива может применяться природный газ любого месторождения.

3.11. Удельный расход теплоты и условного топлива на получение извести с содержанием активных CaO+MgO, равным 80 %, должен приниматься по табл.П.17.3.

Таблица П.17.3

Тип печей	Расход условного топлива, кг/кг	Расход теплоты, кДж/кг (ккал/кг)
1. Шахтные пересыпные печи	0,148	4330 (1040)
2. Шахтные печи, работающие на природном газе	0,158	4625 (1100)
3. Короткие вращающиеся печи со слоевыми теплообменниками	0,210	6175 (1470)
4. Длинные вращающиеся печи, работающие по сухому способу	0,245	7200 (1715)
5. Длинные вращающиеся печи, работающие по мокрому способу	0,280	8200 (1960)

3.17. Нормы расхода электроэнергии на производство комовой извести для цехов или заводов в зависимости от типа известеобжигательных печей приведены в табл.П.17.4.

Таблица П.17.4

Тип печей	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т
1. Шахтные пересыпные печи	15…20
2. Шахтные печи, работающие на природном газе	18...26
3. Вращающиеся печи	40…60

Примечание: большие значения указанных величин относятся к производствам, выпускающим известь 1 сорта, меньшие – 3 сорта.

3.18. Удельный расход электроэнергии на помол извести не должен превышать 40 кВт·ч/т, а на дробление до фракции 0…3 мм – 15 кВт·ч/т.

4. Технологическое оборудование предприятий по производству извести

Известеобжигательные печи

4.5. Выгружаемая из шахтных печей известь должна иметь температуру не более 100 °С.

4.6. В зависимости от свойств обжигаемых карбонатных пород могут использоваться короткие вращающиеся печи с запечными теплообменниками или длинные печи с внутренними теплообменными устройствами.

Отношение длины печи к ее внутреннему диаметру (L/D) должно составлять:

- для коротких печей (∅ 4х60 м, ∅ 2,5х40 м и т.п.) - 15…18
- для длинных печей (∅ 3,6х110 м, ∅ 4х150 м и т.п.) - 30…38.

4.9. Все вращающиеся известеобжигательные печи должны быть снабжены эффективными устройствами для охлаждения обожженной извести: слоевыми, барабанными, многобарабанными (рекуператорными) холодильниками, холодильниками кипящего слоя и т.п.

Температура извести на выходе из холодильника не должна превышать 120-130 ^{o}C, а тепло охлаждающего воздуха должно максимально использоваться в процессе сжигания топлива.

4.10. Коэффициент избытка воздуха, требуемого для полного сжигания топлива во вращающихся и шахтных известеобжигательных печах, работающих на газообразном топливе, принимается равным 1,15…1,25, в шахтных пересыпных печах – 1,05…1,15.

4.12. Печи «кипящего слоя» (КС) могут применяться в тех случаях, когда невозможно применение шахтных или вращающихся печей (для использования высокомагнезиального сырья, при наличии узких фракций известняка размером до 10 мм). Исходные данные для проектирования печи КС должны приниматься по согласованию с научно-исследовательской организацией – автором конструкции печи.

4.15. Для контрольной сортировки карбонатного сырья и твердого топлива перед подачей в печи, а также для сортировки обожженной извести должны применяться инерционные грохоты среднего или легкого типа. Выбор типоразмера грохота осуществляется в зависимости от необходимой производительности и требуемого размера фракций.

4.16. Для транспортировки извести из-под шахтных печей и вращающихся печей, оснащенных холодильниками, следует применять пластинчатые конвейеры с укрытиями. При транспортировании выгружаемой из-под печей извести с температурой до 80 ^{o}C допускается применение ленточных конвейеров с укрытиями.

Производительность пластинчатых конвейеров должна выбираться на 25 % больше суммарной производительности печей.

4.19. Предельная скорость ленты и максимальные углы наклона ленточных конвейеров в зависимости от транспортируемого материала принимаются по данным табл.П.17.5.

Таблица П.17.5

Транспортируемый материал	Скорость ленты, м/с	Угол наклона, град
Известняк фракционированный	1,6	16
Твердое топливо фракционированное	1,2	16
Известь комовая	0,8	18
Песок влажность 5…8 % и другие добавки	1,0	18

Примечание: при наличии плужкового или барабанного сбрасывателя скорость ленты должна быть снижена на 20 %

4.23. При невозможности использования конвейерного транспорта для перемещения на высоту малоабразивных и мягких материалов крупностью до 40 мм допускается применение ленточных или цепных элеваторов. В случае транспортировки зернистых материалов (песка, шлака и т.п.) применяются быстроходные ленточные элеваторы: с глубокими ковшами для сухого материала и с мелкими – для влажного, а в случае транспортировки щебня крупностью до 40 мм – тихоходные цепные с остроугольными ковшами.

4.24. Для транспортировки молотой или мелкодробленой извести следует применять герметичный механический транспорт или пневмотранспорт. Выбор способа транспортирования зависит от свойств материалов, дальности и высоты транспортирования и определяется сравнительными расчетами.

4.25. Для транспортирования мелкодробленой или молотой извести следует применять пневматические камерные насосы.

4.31. При производстве извести во вращающихся печах, работающих по мокрому способу, для приготовления шлама из рыхлых влажных мелов должны применяться глиноболтушки. Количество устанавливаемых глиноболтушек должно обеспечивать максимальную суточную потребность в шламе всех печей с коэффициентом 1,2 и возможность остановки одной глиноболтушки на чистку.

4.32. Для усреднения состава и хранения готового шлама следует предусматривать горизонтальные резервуары-шламбассейны, оборудованные крановыми мешалками. Количество шламбассейнов должно быть не менее 2, а их общая емкость должна обеспечивать не менее, чем 5-суточную потребность печей в шламе.

При требуемой общей емкости шламбассейнов меньше 5 тыс.м^3 допускается применение вертикальных бассейнов с перемешивающими устройствами и с коническими днищами.

4.33. Для усреднения состава шлама в шламбассейнах должно применяться пневмоперемешивание. Для ориентировочных расчетов расхода сжатого воздуха давлением 0,1…0,2 МПа (1…2 кгс/см^2) при пневмоперемешивании могут быть приняты:

- в горизонтальных шламбассейнах 0,004…0,005 нм^3/мин на м^3 шлама;
- в вертикальных шламбассейнах 0,03…0,04 нм^3/мин на 1м^3 шлама.

4.34. Транспортирование шлама к вращающимся печам, работающим по мокрому способу, должно осуществляться по трубопроводам при помощи фекально-шламовых, камерных, грунтовых или песковых насосов, тип которых определяется в зависимости от количества шлама, его вязкости и характеристик взвешенных твердых частиц. При этом скорость шлама в трубопроводах не должна превышать 1 м/с.

4.37. Для питания вращающихся печей шламом могут применяться ковшовые питатели или насосы-дозаторы с плавным регулированием количества подаваемого шлама. Расход шлама, подаваемого в питатели шлама, должен на 15…20 % превышать максимальную потребность печей в шламе.

5. Нормы размещения и нормы рабочей площади на оборудование

5.5. Рекомендуемые углы наклона к горизонту точек прямоугольного сечения в зависимости от транспортируемого материала должны быть не менее :

- для известняка дробленого крупностью 0…100 мм - 55 ^{o};
- для извести комовой - 45 ^{o};
- для извести молотой - 50 ^{o}.

6. Нормы запасов и складирования сырья, топлива, готовой продукции и материалов

6.1. Промежуточное складирование фракционированного сырья должно осуществляться на открытых или закрытых складах штабельного, полубункерного или бункерного типа в зависимости от свойств материалов, требуемой емкости и климатических условий района строительства.

6.2. Для складирования комовой, мелкодробленой или молотой извести должны предусматриваться склады силосного типа, если их емкость составляет более 300 м^3. При меньшей емкости допускается применение складов бункерного типа. При выпуске извести разных видов и сортности следует предусматривать емкости для их раздельного складирования.

6.3. Нормы запасов сырья, топлива и готовой продукции для расчетов складских емкостей следует принимать в соответствии с данными, приведенными в табл.П.17.6.

Таблица П.17.6

Наименование	Норма запаса, расчетных суток
1. Склад известняка при работе предприятий на привозном сырье, доставленном: автотранспортом железнодорожным транспортом водным транспортом	 7 15 90-120
2. Склад известняка при работе предприятий на собственном сырье	3
3. Склад топлива	15
4.Склад готовой продукции: для цехов для заводов	 5 8-10

Примечания: 1) при доставке сырья водным транспортом указанные величины должны уточняться в зависимости от продолжительности навигации; 2) промежуточное складирование мелового сырья не допускается. Меловое сырье должно использоваться, как правило, на месте добычи.

6.4. Нормы запасов материалов в бункерах и емкостях должны приниматься по данным табл.П.17.7.

Таблица П.17.7

Наименование	Нормы запаса, ч
1. Бункера карбонатного сырья перед известеобжигательными печами: - для известняка, подаваемого в бункера в течение 2-х смен - для известняка, подаваемого в 3 смены - для мела	 10 4 0,5-1,0
2. Бункера твердого топлива перед известеобжигательными печами	не менее 10
3. Емкости для шлама перед вращающимися печами, работающими по мокрому способу	не менее 48
4. Бункера перед мельницами	2
5. Бункера перед пневматическими насосами: винтовыми камерными	 0,2 не менее емкости камеры

6.7. Конструкция бункеров и складских емкостей с плоскими стенками должна быть такой, чтобы угол наклона к горизонту ребра, образованного двумя соседними плоскостями, был не менее:

- для известняка - 50 ^{o};
- для твердого топлива и извести - 45 ^{o};
- для мела - 60 ^{o}.

6.9. Минимальные размеры выходных отверстий бункеров и течек для кусковых материалов должны быть не менее 3-х размеров максимального куска проходящего через них материала.

6.10. При загрузке бункеров с помощью пневмотранспорта необходимо предусматривать циклоны–разгрузители с последующим подключением их к обеспыливающим установкам. Циклоны-разгрузители необходимо снабжать затворами, исключающими выбивание воздуха в полость бункера.

7. Специальные требования к зданиям, сооружениям и помещениям

7.2. Здания и сооружения производственного назначения должны обеспечивать нормативные условия труда для работающих при различных климатических условиях в течение всего года. В помещениях с низкой температурой воздуха и выделением производственных вредностей (пыль, газ) для пребывания обслуживающего персонала и размещения пультов управления и контрольно-измерительной аппаратуры должны предусматриваться герметизированные отапливаемые кабины, а для рабочих, обслуживающих оборудование, установленное на открытых площадках, следует предусматривать помещения для обогрева.

7.3. Размещение технологического оборудования в зданиях и сооружениях в зависимости от климатических условий следует принимать в соответствии с данными табл. П.17.8.

Таблица П.17.8

Наименование установок, агрегатов и оборудования	Расчетная температура		
	ниже минус 40°С	от –20 до –40°С	выше минус 20°С
1.Подогреватели сырья	на открытых площадках с укрытием узла загрузки		
2.Горизонтальные и вертикальные шламбассейны	в неотапливаемых зданиях с размещением насосной в отапливаемом помещении	на открытых площадках с размещением насосной в отапливаемом помещении	

Окончание табл.П.17.8

Наименование установок, агрегатов и оборудования	Расчетная температура		
	ниже минус 40°С	от –20 до –40°С	выше минус 20°С
3.Системы сухой очистки и запыленного воздуха	в не отапливаемых зданиях	на открытых площадках	
	пылеуборка в отапливаемых помещениях		
4.Приемные устройства для кусковых и сыпучих материалов	в не отапливаемых зданиях		
5.Конвейеры ленточные, проходящие вне зданий	в отапливаемых галереях при расчетной температуре ниже минус 30°С; в не отапливаемых галереях при расчетной температуре 30…20°С		на открытых площадках с укрытием ленты
6.Мельницы	в отапливаемых помещениях		
7.Дробилки (кроме случаев, когда заводами-изготовителями предусматривается работа дробилок только при положительных температурах)	в не отапливаемых помещениях		
8.Склады известняка, топлива и др. кусковых материалов	на открытых площадках		
9.Дозировочные отделения сырья и топлива	в отапливаемых помещениях		
10.Силосные и бурные склады	на открытых площадках, с укрытием верхних и нижних галерей;. пульты управления - в отапливаемых помещениях		

7.4. Вращающиеся и шахтные печи, циклоны и электрофильтры должны располагаться на открытых площадках с местными укрытиями приводов, тягодутьевых машин, лебедок и грузоподъемных механизмов. Зоны обслуживания устройств для ввода и сжигания топлива в шахтные и вращающиеся печи, дозировки шихты и загрузочных устройств должны располагаться в неотапливаемых помещениях легкого типа, кроме случаев, оговариваемых особыми требованиями к технологическому оборудованию.

7.5. Оборудование, являющееся источником различных производственных вредностей (шум, тепло, газо-пылевыделение и т.п.) должно быть изолировано от других производственных помещений.

8. Уровень механизации и автоматизации технологических процессов

8.6. С целью получения высококачественной продукции и поддержания заданных оптимальных значений основных технологических параметров должна предусматриваться система регулирования, контроля и сигнализации, включающая следующие контуры автоматического регулирования:

- процессом дозирования известняка и твердого топлива в пересыпные шахтные печи;
- процессом загрузки мелового шлама в обжиговые агтегаты;
- процессом загрузки известняка в шахтные печи по уровню;
- процессом заполнения ковша скипового подъемника;
- температуры уходящих газов за счет изменения производительности дымососа;
- температуры в зоне центральной горелки за счет изменения расхода рециркуляционных уходящих газов;
- температуры в зоне обжига с поддержанием заданного соотношения расхода топливо-воздух;
- заданного уровня в бункере выгрузки шахтных печей;
- температуры уходящих газов в слоевых запечных теплообменниках;
- разрежения в загрузочной части печи без запечных теплообменников;
- процессом дозирования комовой извести и добавок в помольные агрегаты.

9. Нормы использования и хранения отходов

9.1. Для более полного использования добываемого в карьерах карбонатного сырья известковые заводы рекомендуется оснащать печными агрегатами, предназначенными для обжига разных фракций; шахтными и вращающимися, или предусматривать кооперацию с цементными заводами, дробильно-сортировочными заводами, выпускающими строительный щебень и т.п.

9.2. Карбонатное сырье крупностью до 20 мм должно использоваться для производства известняковой муки, заполнителя асфальтобетона и других целей, или для производства извести в длинных вращающихся печах, работающих по сухому способу, или в печах «кипящего слоя». При соответствующих обоснованиях целесообразно использовать углекислый газ, содержащийся в уходящих газах известеобжигательных печей (например, для производства «сухого льда»).

9.4. Уносимая из печей пыль после улавливания должна использоваться (например, для известковая почв или в производстве вяжущего) или возвращаться в производство (путем вдувания во вращающиеся печи или за счет добавления к готовой продукции).

10. Нормативы численности основных и вспомогательных рабочих, ИТР и служащих

10.1. Определение явочной численности производственных рабочих следует производить в зависимости от количества работающего технологического оборудования, нуждающегося в обслуживании, и уровня автоматизации производства с учетом следующих факторов:

- для обслуживания одной известеобжигательной печи следует предусматривать одного обжигальщика (машиниста вращающейся печи). При установке в одном блоке более одной печи на каждую последующую печь должен быть предусмотрен помощник обжигальщика (помощник машиниста вращающейся печи);
- при установке четырех и более печей в одном блоке количество обжигальщиков и их помощников должно приниматься в соотношении 1:3;
- количество человеко-смен на единицу оборудования (без учета резервного) следует принимать с учетом данных, приведенных в табл.П.17.9.

При наличии блокировки или дистанционного управления механизмами или при установке однотипного оборудования численность обслуживающего персонала должна быть уменьшена в 1,5 раза.

Таблица П.17.9

Наименование обслуживаемого оборудования	Профессия	Количество человеко-смен на единицу оборудования
1. Питатель качающийся или электро вибрационный	загрузчик	0,2
2. Дробилка крупного дробления	дробильщик	0,5
3. Дробилка мелкого дробления	дробильщик	0,3
4. Грохот инерционный	грохотовщик	0,2
5. Мельница шаровая	мельниц	0,8
6. Конвейер ленточный горизонтальный и наклонный суммарной длиной 150 м	транспортерщик	1,0

Окончание табл.П.17.9

Наименование обслуживаемого оборудования	Профессия	Количество человеко-смен на единицу оборудования
7. Конвейер пластинчатый, винтовой суммарной длиной 150 м	транспортерщик	1,0
8. Пневматический насос	рабочий по обслуживанию пневмотранспорта	0,5
9. Электрофильтр	аспираторщик	0,8
10. Рукавный фильтр	аспираторщик	0,4
11. Циклон или группа циклонов	аспираторщик	0,1…0,2
12.Вентиляторы, дымососы	аспираторщик	0,04

10.2. Явочная численность вспомогательного (дежурного) персонала определяется в зависимости от ремонтосложности работающего оборудования.

10.3. Списочная численность производственного персонала в зависимости от режима работы определяется умножением явочной численности работающих на коэффициент пересчета, значения которого приведены в табл.П.17.10.

Таблица П.17.10

Режим работы, дней в году	Коэффициент пересчета
365	1,59
305	1,33
260	1,13

11. Мероприятия по защите окружающей среды и обеспечению санитарно-гигиенических условий труда

11.2. Для создания нормальных санитарно-гигиенических условий труда на предприятиях по производству извести необходимо предусматривать:

- аспирацию пылящего оборудования с максимальной его герметизацией и последующей очисткой аспирационного воздуха и уходящих газов перед выбросом в атмосферу;
- блокировку технологического оборудования с системами аспирации и газоочистки;

- приточно-вытяжную вентиляцию;
- механизированную уборку помещений и оборудования от вторичной пыли;
- шумоглушение.

11.3. С учетом физико-химических свойств пыли, образующейся при производстве извести, и возможности ее утилизации следует применять сухой способ очистки аспирационного воздуха и уходящих газов.

11.4. Количество ступеней очистки определяется начальной концентрацией пыли в аспирационном воздухе или уходящих газах, ее дисперсностью и эффективностью очистного оборудования. При исходной концентрации пыли до 10-15 г/м^3 применяется одноступенчатая очистка, при более высоких концентрациях требуется двухступенчатая очистка.

11.5. Исходные данные для выбора систем обеспыливания аспирационного воздуха и уходящих газов основного технологического оборудования приведены в табл.19.

11.6. Исходные данные для выбора систем аспирации вспомогательного оборудования и узлов пылевыделения приведены в табл.П.17.11.

11.9. Технологическое и транспортное оборудование, работа которого сопровождается пылевыделением печи, должно оснащаться герметичными укрытиями, имеющими воронки для подключения к аспирационным и обеспыливающим установкам.

11.23. Для снижения производственных шумов и вредных вибраций в цехах и на территории завода по производству извести должны предусматриваться следующие мероприятия:

- укрытия загрузочных устройств дробильных установок шумоснижающими кожухами, прокладка резинового материала в качестве вибродемпфирующего слоя между корпусом дробилки и бронефутеровочными плитами; шумоснижение приемных бункеров и разгрузочных течек слоями вибродемпфирующего материала;
- применение резиновых сит и эффективных пружин или комбинированных виброизоляторов для виброгрохотов;
- шумоизоляция корпуса шаровых мельниц, торцевых и лотковых крышек путем прокладки слоя шумоизолирующих пластин из листовой резины между корпусом барабана и бронефутеровкой;
- устройство на всасывающей стороне высоконапорных вентиляторов и дымососов специальных аэродинамических глушителей, установка вентиляторов на виброизолирующие опоры и облицовка корпусов вентиялторов и дымососос шумоснижающей мастикой.

Продолжение прил.17

Таблица П.17.11

Наименование оборудования	Характеристика						Рекомендуемые системы аспирации и обеспыливания	Примечание
	аэрозолей			пыли				
	концентрация, г/м³	температура воздуха газов, °С	точка росы, °С	основная фракция	слипаемость 10^2Па (Н/м²)	удельное электросопротивление, Ом·м		
1. Шахтные печи:								
а) топливо – газ	0,8	250-280	30-40	более 20мкм до 90 %	0,3 (несли-пающаяся)	$1{,}7\cdot10^{10}$- - $4{,}1\cdot10^{11}$	циклоны типа ЦН-15	
б) топливо – уголь	3,0	200-250	30-40	более 20мкм до 95 %	0,27(несли-пающаяся)		циклоны типа ЦН-15	
2. Вращающаяся печь мокрого способа	8,0	200-250	62-66	менее 5мкм 52 %	0,9 (слабо-слипающа-яся)	$1{,}2\cdot10^{7}$ – - $1{,}6\cdot10^{8}$	горизонт, электро-фильтр типа ЭГА	

Продолжение прил.17

Продолжение табл.П.17.11

Наименование оборудования	Характеристика						Рекомендуемые системы аспирации и обеспы-ливания	Примечание
	аэрозолей			пыли				
	концентрация, г/м³	температура воздуха газов, °С	точка росы, °С	основная фракция	слипаемость 10^2Па (Н/м²)	удельное электросопротивление, Ом·м		
3. Вращающаяся печь сухого способа:								
а) с запечным теплообменником	до 0,8	250-300	42-46	меньше 20мкм 67%	2,4 (слабослипающаяся)	$3,7\text{-}6,7\cdot10^8$	горизонт, электрофильтр типа ЭГА	
б) без запечного теплообменника	до 12	400-500	50	меньше 20мкм 50%	2,2 (слабослипающаяся)	$7\cdot10^8$ – - $8\cdot10^9$		
4. Дробилка молотковая	25	60	20	меньше 20мкм 70%	(среднеслипающаяся)	-	1 ступ. циклоны типа ЦН-15, 2 ступ. рукавный фильтр	материал – известь

Продолжение прил.17

Окончание табл.П.17.11

Наименование оборудования	Характеристика						Рекомендуемые системы аспирации и обеспыливания	Примечание
	аэрозолей			пыли				
	концентрация, г/м^3	Температура воздуха газов, °С	точка росы, °С	основная фракция	слипаемость 10^2Па (Н/м^2)	удельное электросопротивление, Ом·м		
5. Мельница трубная	20 (после шахтной коробки)	90	22	меньше 20мкм 85%	9,8 (сильнослипающаяся)	-	1 ступенчатые циклоны типа ЦН-15, 2 ступенчатый рукавный фильтр	материал – известь

Продолжение прил.17

Таблица П.17.12

Наименование оборудования и узлов пылевыделения	Объем аспирационного воздуха, $м^3/ч$	Концентрация пыли, $г/м^3$	Температура аспирационного воздуха, ^oC	Примечание
1. Питатель электровибрационный или качающийся (узел разгрузки)	1300	0,3	температура окружающей среды	материал – известняк
2.Узел перегрузки от грохота на ленточный конвейер	1320	0,4	температура окружающей среды	материал – известняк
3. Бункер просыпи от грохота	1800	3,0	температура окружающей среды	материал – известняк, уголь
4. Бункер известняка (перед шахтной печью	3900	0,3	температура окружающей среды	материал – известь
5. Узел выгрузки из шахтной печи	2600	0,3	температура окружающей среды	
6. Узел перегрузки извести с пластинчатого транспортера	2000	7,0	50	
7. Дробилка молотковая	4500	25	60	материал – известь
8. Грохот инерционный	3800	4,0	температура окружающей среды	
9. Силос комовой извести (загрузка ленточного конвейера)	1600	10	температура окружающей среды	
10. Силос дробленой и молотой извести (загрузка пневмотранспортом)		20	50	

Окончание табл.П.17.12

Наименование оборудования и узлов пылевыделения	Объем аспирационного воздуха, $м^3/ч$	Концентрация пыли, $г/м^3$	Температура аспирационного воздуха, ^oC	Примечание
11. Погрузка дробленой молотой извести в автотранспорт	600	20	температура окружающей среды	
12. Погрузка дробленой молотой извести в железнодорожный транспорт	1000	20	температура окружающей среды	
13. Конвейер для комовой извести	700	5,0	температура окружающей среды	
14. Узлы перегрузки с ленточного конвейера на конвейер при ширине ленты в мм: - B = 650 - B = 800 - B = 1000	 2000…3000 2500…3500 4000…5000	10	температура окружающей среды	

ПРИЛОЖЕНИЕ 18

Таблица П.18.1

Технические характеристики дымососов для вращающихся печей [14]

Тип дымососа	Характеристики дымососа				Характеристики электродвигателя		Завод изготовитель
	V, м^3/ч	ΔP, Па	n, об/мин	t, ^{o}C			
ДН18х2	270000	1500	735	200	А104-8	160	Барнаульский
ДУ-14	576000	2200	750	200	ДНО-148/10	800	им. Э.Тельмана (ГДР)
ДН21х2	360000	1900	735	200	ФАМСО 157-8	320	Барнаульский
*L*500*d*	120000	1050	750	250	-	100	«Цементанлагенбац» (ГДР)
ДН18х2	180000	2000	730	220	-	245	Подольский
ДН21х2	400000	2200	735	200	ФАМСО 157-80	320	Барнаульский

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

Таблица П.19.1

Характеристика аэрозолей печей и мельниц

Источники аэрозоля	Характеристика газа				Содержание частиц мельче 5 мкм, %	Удельное электросопротивление пыли, Ом·см
	объем нм^3 на 1 кг продукта	температура, ^oC	точка росы, ^oC	запыленность, г/нм^3		
Печи вращающиеся:						
1) с цепной завесой, длиной 118-185 м	3,5 – 5,3	170 - 250	62 - 77	8,5 - 42	5 - 24	$10^8 – 5 \cdot 10^{11}$
2) то же, длиной 70-95 м	3,7 – 7,6	-	-	5 - 65	8 - 23	$6 \cdot 10^9 – 5 \cdot 10^{11}$
3) с концентраторами	4,3 – 7,7	140 - 210	65 - 70	10 - 70,3	3 - 26	$10^9 – 2 \cdot 10^{11}$
4) с конвейерными кальцинаторами	3,4 – 7,2	100 - 235	33 - 60	11,3 - 25	2 - 5	$10^9 – 2,5 \cdot 10^{11}$
5) шахтные автоматические	2,5 – 3,7	100 - 300	35 - 55	2 - 10	2 - 5	$10^{10} – 3 \cdot 10^{10}$
6) с циклонными теплообменниками	2,5 – 5,0	300 - 350	30 - 38	15 - 50	55 - 85	$2 \cdot 10^{11} – 4 \cdot 10^{11}$
Колосниковые холодильники	1,25 – 2,05	140 - 350	20	15,6 - 16,2	-	$10^{11} - 10^{12}$
Мельницы цементные:						
а) открытого цикла	0,2 – 0,47	70 - 170	30 - 50	100 - 900	10 - 28	$2,6 \cdot 10^{10} – 6 \cdot 10^{12}$
б) сепараторные	0,5 – 0,92	65 - 85	28 - 30	620 - 945	15 - 20	$3,7 \cdot 10^{10} - 10^{11}$

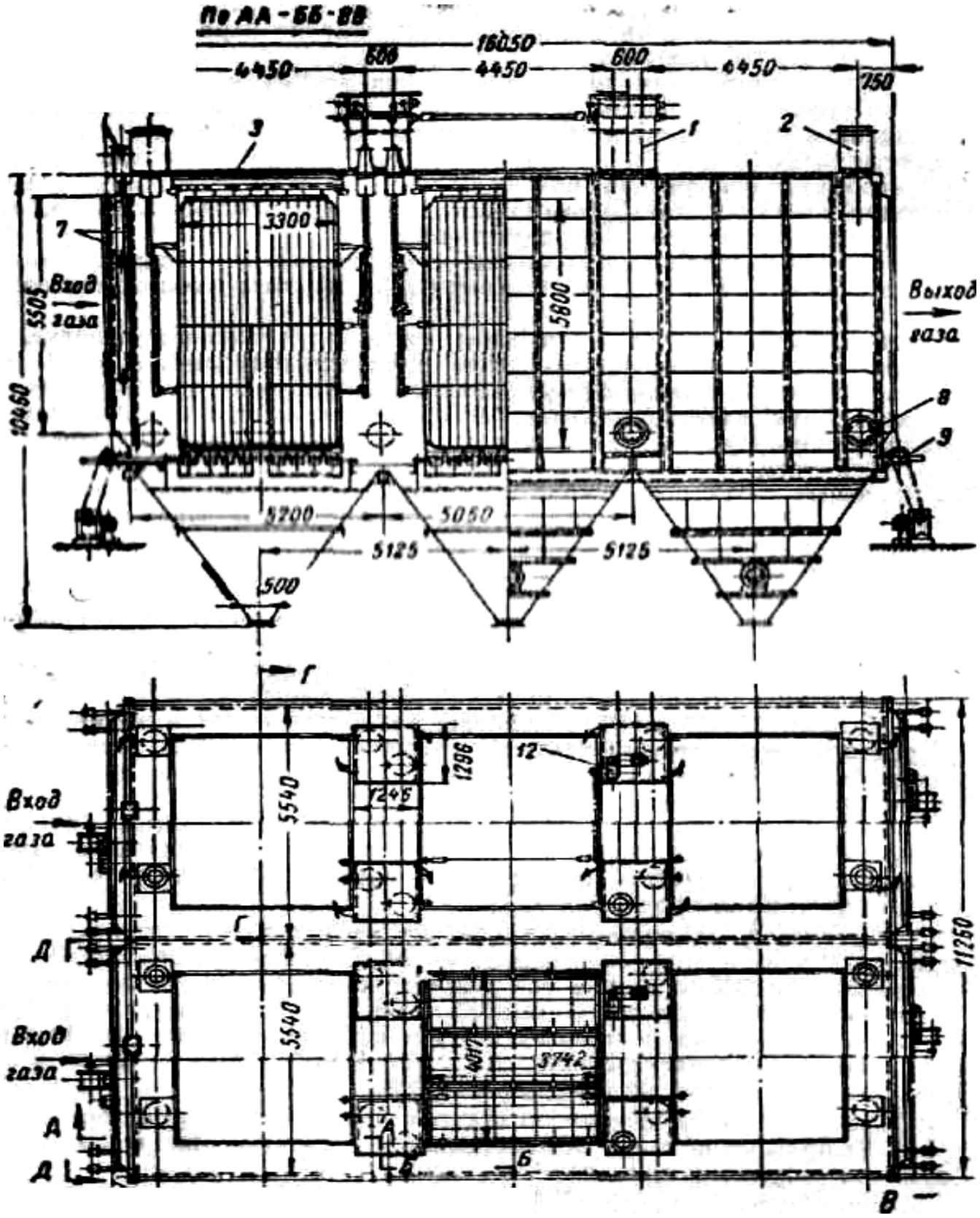
Окончание прил.19

Окончание таюл.П.19.1

Источники аэрозоля	Характеристика газа				Содержание частиц мельче 5 мкм, %	Удельное электросопротивление пыли, Ом·см
	объем нм^3 на 1 кг продукта	температура, ^oC	точка росы, ^oC	запыленность, г/нм^3		
Мельницы сырьевые:						
а) открытого цикла	0,25 – 0,4	60 - 90	28 - 32	300 - 770	25 - 65	$5 \cdot 10^{12}$ - 10^{13}
б) сепараторные	0,6 – 1,0	50 - 140	35 -50	300 - 500	20 - 30	10^9 - 10^{10}
Сушильные барабаны:						
а) для шлака, опоки	0,6 – 1,6	120 - 150	55 - 65	15 - 35	15 - 34	10^{10} – $4 \cdot 10^{11}$
б) для мергеля, известняка	0,6 – 0,8	65 - 100	40 - 55	10 - 50	10 - 36	$4 \cdot 10^{10}$ – $4 \cdot 10^{12}$
в) для глины	2 – 2,5	70 - 100	70	5 - 10	7	10^6 - 10^8

Примечание: плотность аэрозольных частиц 2,52 – 2,73 г/см^3, плотность отходящих газов печей в зависимости от температуры - 0,6 – 0,78 г/см^3

ПРИЛОЖЕНИЕ 20



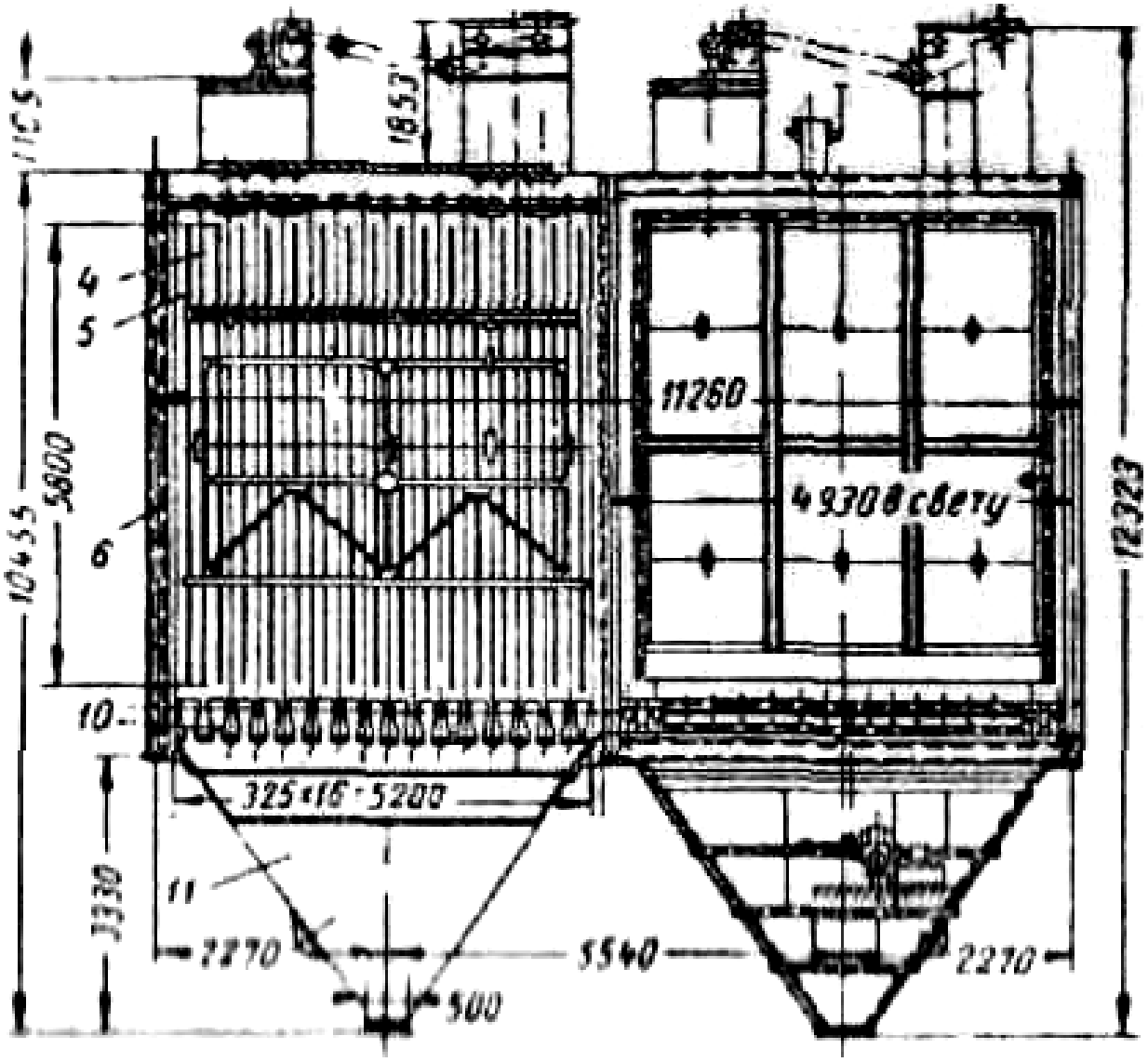


Рис.П.20.1. Схема электрофильтра горизонтального двухсекционного трехпольного ДГП-55-3

Обозначения: 1 – средние изоляторные коробки; 2 – крайние изоляторные коробки; 3 – монтажный люк; 4 – осадительные электроды; 5 – коронирующие электроды; 6 – корпус электрофильтра; 7 – двойная газораспределительная решетка; 8 – люки; 9 – приводы встряхивания осадительных электродов; 10 – промежуточные бункера; 11 – основные бункера; 12 – привода встряхивания коронирующих электродов

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

Таблица П.21.1

Характеристики электрофильтров, применяемых для очистки газов клинкерообжигательных печей

Показатели	Тип электрофильтра									
	ДГПН-32-3	ДГП-35-2	ДГП-35-3	ДГП-42-2	ДПП-42-3	ДГП-55-2	ДГП-55-3	ДГП-91-2	ДГП-91-5	ДВП-2х25
Производительность по газу, $м^3/ч$	173000	190000	190000	230000	230000	3000000	300000	500000	500000	180000
Допустимая максимальная температура, ^oC					250					
Гидравлическое сопротивление, Па					150					
Расход электроэнергии на $1000м^3$ газа, кВт·ч	0,2	0,135	0,2	0,135	0,2	0,14	0,2	0,135	0,2	-
Степень очистки газа, %	96-98	92-94	95-98	92-94	95-98	92-94	95-98	92-94	95-98	90-92
Количество секций	1	2	2	2	2	2	2	4	4	2
Число полей	3	2	3	2	3	2	3	2	3	1
Длина корпуса, мм	16050	11000	16050	11000	16050	11000	16050	11000	16050	8505
Ширина корпуса, мм	6470	7360	7360	8660	8600	11250	11250	184409	18440	7460

ПРИЛОЖЕНИЕ 22

Таблица П.22.1

Размеры циклонов типа ЦН, мм

Элементы циклона	Обозначения согласно рис.6	Тип циклона			
		ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-24	ЦН-11
Угол наклона крышки и входного патрубка	α	15°	15°	24°	11°
Внутренний диаметр циклона	D	400-800	200-800	400-1000	400=800
Высота входного патрубка (внутренний размер)	a	0,66D	0,66D	1,11D	1,11D
Высота выхлопной трубы с фланцем	h_T	1,74D	1,5D	2,11D	1,56D
Ширина входного патрубка в циклоне (внутренний диаметр)	b	0,2D	0,2D	0,2D	0,2D
Ширина патрубка у фланца	b_1	0,26D	0,26D	0,26D	0,26D
Высота цилиндрической части корпуса циклона	$h_ц$	2D	1,5D	1,75D	2D
Наружный диаметр выхлопной трубы	d	0,6D	0,6D	0,6D	0,6D
Высота внешней части выхлопной трубы	$h_в$	0,3D	0,3D	0,4D	0,3D
Длина входного патрубка	l	0,6D	0,6D	0,6D	0,6D
Внутренний диаметр пылеспускного отверстия	d_1	(0,3-0,4)D	(0,3-0,4)D	(0,3-0,4)D	(0,3-0,4)D
Высота установки фланца	$h_{фл}$	0,24-0,32)D	0,24-0,32)D	0,24-0,32)D	0,24-0,32)D
Общая высота циклона	H	4,56D	3,31D	4,26D	4,33D
Диаметр бункера	$D_б$	1,5D	1,5D	1,5D	1,5D
Высота бункера	$H_б$	2,4D	2,4D	2,4D	2,4D