

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

КАЗАХСКАЯ ГОЛОВНАЯ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ

Факультет строительных технологий,  
инфраструктуры и менеджмента

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ  
И СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРЕДПРИЯТИЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

Методические указания  
к курсовой работе и дипломному проекту по дисциплине  
«Процессы и аппараты П»  
для студентов специальности 050730 -  
«Производство строительных материалов, изделий и конструкций»

Алматы 2008

УДК 621.181.7

Составители: Сартаев Д.Т., Байсариева А.М.

Проектирование промышленных печей и сушильных установок предприятий строительных материалов и изделий. Методические указания к выполнению курсовой работы и теплотехнической части дипломного проекта по дисциплине «Процессы и аппараты 11» для студентов специальности 050730 - «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» – Алматы: КазГАСА, 2008. – 51 с.

Данное руководство является методическим указанием к выполнению курсового и дипломного проекта по тепловым установкам в производстве строительных материалов и изделий для студентов по специальности 050327 – «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» и содержит основные расчеты печей и сушил, применяемых в производстве строительных материалов и изделий.

Библиограф. 3 назв.

Рекомендовано к изданию Научно-методическим советом факультета строительных технологий, инфраструктуры и менеджмента, протокол № \_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_ г.

Печатается по плану издания Казахской головной архитектурно-строительной академии на 2007-2008 уч. год.

Рецензент: Садуакасов М.С., доктор технических наук, профессор КазНТУ им. К. Сатпаева

© Казахская головная  
архитектурно-строительная  
академия, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
1. Состав и объем курсового проекта .....	4
1.1 Порядок и последовательность выполнения курсового проекта .....	5
1.2 Вводная часть .....	5
2. Расчет процесса горения топлива .....	6
Расход воздуха на горение .....	6
Объем продуктов горения .....	8
Температура горения .....	10
3. Определение основных размеров и производительности печей и сушил (технологический расчет)	
3.1 Технологические расчеты печей .....	12
а. Туннельные печи. ....	12
б. Вращающиеся печи. ....	14
в. Шахтные печи.....	15
3.2 Технологические расчеты сушил.....	17
а. Туннельные сушила .....	18
б. Барабанные сушила. ....	19
4. Теплотехнический расчет.	
Основы теплотехнического расчета печей.....	21
Основы теплотехнического расчета сушил.....	29
5. Расчет аэродинамических сопротивлений	38
6. Выбор вентиляторов и дымососов.....	42
Литература.....	45
Приложения .....	46

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Тепловая обработка является одним из важнейших технологических переделов в производстве строительных материалов и изделий, в значительной степени определяет их качество и себестоимость.

Эффективность работы сушильных установок закладывается уже на стадии проектирования: при выборе типа установки, оптимального режима сушки. Промышленные печи предназначены для теплового воздействия при относительно высоких температурах. Расчеты проводятся для определения производительности, конструктивных и теплофизических характеристик установок, необходимых удельных расходов тепла и теплотворных продуктов.

В этой связи получение студентами знаний и навыков по определению основных параметров и характеристик промышленных печей и сушильных установок является необходимым условием подготовки будущего инженера-технолога и служит целью выполнения курсового проекта.

Данные методические указания включают в себя требования к содержанию, объему, оформлению проекта и предназначены для оказания консультативной помощи в самостоятельной работе студентов при выполнении курсового проекта и теплотехнической части дипломного проекта. В представленной работе подробно изложена методика расчета и проектирования печей и сушильных установок, применяющихся в технологии строительных материалов и изделий; дан список рекомендуемой литературы, из которой студент может получить дополнительную информацию. В приложениях приведены справочные данные по основным теплофизическим характеристикам теплоносителей, сырью, влажностным показателям материалов и номограммы для подбора вентиляторов.

## **I. СОСТАВ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА**

Курсовой проект состоит из расчетно-пояснительной записки и графической части, которые в комплексе отражают принятые студентом решения.

Для выполнения курсового проекта студенту выдается задание, в котором указывается наименование проектируемой сушильной установки, объем и характеристика перерабатываемого материала, вид теплоносителя и, при необходимости, дополнительные исходные данные для проектирования. Задание выдается руководителем проекта в виде бланка, который должен быть приложен к расчетно-пояснительной записке (помещается за титульным листом).

Расчетно-пояснительная записка выполняется на листах формата А4 и должна содержать следующие разделы:

- 1) введение;
- 2) технологический расчёт;
- 3) расчет процесса горения и действительной температуры горения топлива (при использовании в качестве теплоносителя смеси топочных газов с воздухом);
- 4) тепловой расчет;
- 5) аэродинамический расчет;
- 6) технико-экономические показатели;
- 7) охрана труда и техника безопасности;
- 8) библиографический список.

Графическая часть курсового проекта выполняется на 1-2 листах ватмана формата А1 и представляет собой вычерченную в принятом масштабе по рассчитанным габаритам конструкцию сушилки с указанием мест и устройств для загрузки высушиваемого материала, системы по подаче и отбору теплоносителя и вентиляционных устройств.

Графическая часть выполняется в AutoCAD с соблюдением требований оформления конструкторской документации (ГОСТ 2301-68, ГОСТ 2316-68).

### **1.1. Порядок и последовательность выполнения курсовой работы**

Студент, получив задание на курсовую работу, знакомится со всеми видами сушильных установок, применяемых в производстве заданного материала или изделия по специальной литературе, а затем, по возможности, - с работой действующих сушилок аналогичного типа на одном из предприятий. Анализ полученной информации должен найти отражение во вводной части проекта и при определении конструктивных параметров установки (расчете рабочих габаритов сушилки и выборе конструкционных материалов для ее изготовления).

После подтверждения руководителем проекта правильности выбора типа сушильной установки и определения ее конструктивных параметров студент приступает к дальнейшим расчетам по предложенным в настоящих указаниях

методикам.

Конкретные, рекомендации в процессе работы над проектом студент получает у руководителя во время консультаций в соответствии с графиком выполнения курсового проектирования.

При оформлении производственных расчетов в расчетно-пояснительной части проекта обязательно приводится запись используемой формулы с расшифровкой обозначений входящих в нее величин, и только затем подставляются их значения. Расчеты должны сопровождаться ссылкой на соответствующую литературу.

## **1.2 Вводная часть**

Вводная часть пояснительной записки должна содержать: краткие сведения об отрасли промышленности строительных материалов, в которой применяются сушилки, подлежащие расчету; анализ применяемых типов сушилок для данных материалов; обоснование выбора типа сушильной установки, которое производится с учетом минимального расхода топлива, степени механизации процессов, условий обслуживания, технико-экономических показателей и санитарно-гигиенических условий работы, описание выбранных размеров изделий, подвергаемых сушке, состава сырья для их получения, физико-механических свойств, физико-химических процессов, происходящих в материале при его сушке.

Раздел завершается выбором режима сушки изделий, который представляется в виде «таблицы основных ее параметров (температуры, влажности, давления, скорости, состава сушильного агента и т.д. в зависимости от времени сушки, длины установки и др.). Приводится графическое изображение процесса сушки.

## **2. Расчет процесса горения топлива**

При расчетах горения топлива определяют расход воздуха, необходимого для горения, количество образующихся продуктов горения, их состав и температуру горения.

В печах используют преимущественно природный газ и мазут. Из твердых видов топлива целесообразно использовать не требующие дальних перевозок. Состав топлива берется по справочным данным

### **Расход воздуха на горение**

Потребное количество воздуха для горения определяется по теоретическому количеству кислорода, вступающего в реакции окисления с учетом некоторого избытка, имеющейся в топливе, участвует в реакциях горения.

В расчетах принимается следующий состав воздуха:  
азот – 79,0%, кислород -21,0% (по объему).

Для твердых и жидких видов топлива, состав которых выражен в процентах по массе, расход кислорода, необходимого для горения топлива, рассчитывают по формуле:

$$V_{O_2} = 0,01/1,87 \cdot C^p + 0,7^p + 5,55 \cdot H^p - 0,7 \cdot O^p, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (1)$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $O^p$  - составляющие рабочего топлива, в %

$V_{O_2}$  – теоретически необходимый объем кислорода.

Для газообразного топлива, состав которого выражен в молекулярных объемах, расход кислорода определяют по формуле:

$$V_{O_2} = 0,5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2, \text{ нм}^3 / \text{нм}^3 \quad (2)$$

где  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $C_m H_n$  – составляющие рабочего топлива, в %.

Теоретически необходимый для горения топлива расход воздуха, обозначаемый  $L_0$ , равен:

$$L_0 = 4,76 \cdot V_{O_2}, \text{ нм}^3/\text{кг} \text{ или } \text{нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3)$$

для твердых и жидких топлив

$$L_0 = 0,0889C^p + 0,265H^p - 0,033(O^p - S^p), \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (4)$$

для газообразного топлива

$$L_0 = 0,0476 \cdot \left[ 0,5H_2 + 0,5 \cdot CO + 2CH_4 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \right], \text{ нм}^3 / \text{нм}^3 \quad (5)$$

Теоретическое количество воздуха является тем минимумом, который необходим для полного окисления горючих элементов топлива. В действительности всегда вводится большее количества воздуха, чем необходимо теоретически. Объяснить это можно условиями сжигания топлива, главным образом, недостаточным смешиванием топлива с воздухом в процессе горения.

Действительный расход воздуха с учетом коэффициента расхода воздуха равен:

$$L_K = \alpha \cdot L_0 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3 \quad (6)$$

где  $\alpha$  - коэффициент расход воздуха, показывающий отношение действительного количества воздуха, введенного для горения, к теоретически

необходимому 
$$\alpha = \frac{L_a}{L_0}$$

Таблица 1

Значения $\alpha$ для различных видов топлива	
Твердое топливо	1,3 - 2
Пылевидное	1,2 - 1,25
Жидкое	1,15 - 1,25
Газообразное	1,05 - 1,2

Расход атмосферного воздуха при влажосодержании (г/кг сух. воздуха) определяется по следующей зависимости:

$$L'_0 = (1 + 0,0016d)L_0 \quad \text{нм}^3/\text{нм}^3 \quad (7)$$

Величина  $\alpha$  легко определяется по климатологическим данным таблицы и I-диаграмме по относительной влажности воздуха и его температуре [9, глава 5]. В расчетах можно применить величину  $\alpha$ , равную 10 г/кг сухого воздуха.

С учетом коэффициента расхода воздуха  $\alpha$  действительный расход атмосферного воздуха составит:

$$L'_a = a \cdot (1 + 0.0016 \cdot a)L_0, \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (8)$$

## 2.2 Объем продуктов горения.

При полном сгорании любого типа топлива образуются следующие продукты горения:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{SO}_2$  если горение происходит с избытком воздуха, то и  $\text{O}_2$ .

Общий объем продуктов горения при сжигании топлива с избытком воздуха  $\alpha > 1$  рассчитывают по формуле:

$$V_a = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2}, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (9)$$

при  $\alpha = 1$  по формуле:

$$V_0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (10)$$

Объемы отдельных составляющих продуктов горения твердого и жидкого топлива подсчитывают по следующим формулам:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01855 \cdot C^p \quad \text{нм}^3/\text{кг} \quad (11)$$



$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^P \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (12)$$

$$V_{H_2O} = 0,122 \cdot H^P + 0,0124(W^P + 100 w_{нар}) + 0,0016 d \cdot L_a, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (13)$$

где  $w_{нар}$  - весовое количество пара, вводимого для распыления жидкого топлива, кг/кг топлива

$$V_{N_2} = 0,79L_a + 0,08N^P, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (14)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (a-1) \cdot L_0, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (15)$$

Объем продуктов газообразного топлива находят по формулам:

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (CO_2 + CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12}), \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (16)$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10} + 6 \cdot C_5H_{12} + H_2S + H_2O + 0,16 \cdot d \cdot L_a), \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (17)$$

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot H_2S, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (18)$$

$$V_{N_2} = 0,79 L_a + 0,01 N_2, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (19)$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (a-1) \cdot L_0, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (20)$$

Общее количество продуктов горения при сжигании топлива  $B$  ( кг/ч или  $\text{нм}^3/\text{ч}$  ) будет равно:

$$V_{дым} = B \cdot V_{\alpha}, \text{ нм}^3/\text{ч} \quad (21)$$

Количество дымовых газов, проходящих через тягодутьевые устройства, с учетом подсосов составит:

$$V_{ДЫМ} = B \cdot [V_0 + (a-1)L_0], \text{ нм}^3/\text{ч} \quad (22)$$

где  $\alpha_{общ}$  - общий коэффициент расхода воздуха на рассматриваемом участке.

При расчете объема продуктов горения необходимо учитывать не только количество газов, образующихся от испарения влаги:

$$H_2O = \frac{W}{0,804}, \text{ нм}^3/\text{ч} \quad (23)$$

где  $W$ - количество влаги, испаряющейся в час, но и от разложения карбонатов при обжиге  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ , исходя из условия:

1 кг  $\text{CaCO}_3$  даёт  $0,224 \text{ нм}^3 \text{ CO}_2$

1 кг  $\text{MgCO}_3$  даёт  $0,264 \text{ нм}^3 \text{ CO}_2$

### 2.3 Температура горения

При расчете температуры горения топлива определяют теоретическую (калориметрическую) и действительную температуры.

При проектировании для определения температур горения пользуются  $J-t$  - диаграммой [8, 35-36]. Представленные диаграммы  $J-t$  относятся к продуктам горения природного газа и для других видов топлива дают незначительные погрешности, которыми можно пренебречь при работе над курсовым проектом.

При использовании  $J-t$  диаграммы для определения теоретической температуры горения предварительно определяют общее тепло продуктов полного сгорания топлива:

$$i_{\text{общ}} = \frac{Q_H^P}{V_a}, \text{ кДж/нм}^3 \quad (24)$$

где;  $Q_H^P$  - теплота сгорания топлива, -кДж/кг.

Для твердого и жидкого топлива определяют по формуле Д.И.Менделеева, зная элементарные состав рабочего топлива:

$$Q_H^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 108,9 \cdot (O^P - S^P) - 25 \cdot W^P, \text{ кДж/кг} \quad (25)$$

где составляющие элементы рабочего топлива  $C^P, H^P, O^P, S^P, W^P$  в %.

Для природного газа теплоту сгорания определяют как сумму произведений тепловых эффектов составляющих горючих газов на их количество:

$$Q_H^P = 358,2 \cdot C H_4 + 637,5 \cdot C_2 H_6 + 912,5 \cdot C_3 H_8 + 1186,5 \cdot C_4 H_{10} + 1265 \cdot C O_3 + 1076 \cdot H_2 + 587 \cdot C_2 H_4 + 231 \cdot H_2 S, \text{ кДж/нм}^3 \quad (26)$$

В этой формуле составляющие газообразного топлива выражены в % по объему.

Зная  $i_{\text{общ}}$  по  $J-d$ -диаграмме при заданном  $^{\circ}C$  находят теоретическую температуру горения.

Действительная температура горения рассчитывается в зависимости от

пирометрического коэффициента.

Определяют расчетное теплосодержание:

$$i'_{общ} = i_{общ} \cdot \eta, \text{ кДж/нм}^3 \quad (27)$$

где  $\eta$  - пирометрический коэффициент процесса горения, учитывающий потери тепла при горении топлива в процессе теплообмена от газов и факела на окружающие их поверхности (табл. 2)

Таблица 2 Приближенные значения пирометрического коэффициента процесса горения.

Тип печи	Вид топлива	$\eta$
Камерные	газообразное	0,73 - 0,78
	твердое	0,66 - 0,70
Туннельные	газ, мазут	0,78 - 0,82
Шахтные	газообразное	0,67 - 0,73
	твердое	0,52 - 0,62
Вращающиеся	все вида топлив	0,70-0,75

По J-d диаграмме для  $i_{общ}$  находят действительную температуру.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПЕЧЕЙ И СУШИЛ

#### Технологический расчет

Предлагаемые расчеты печей и сушил позволят определить основные размеры и конструкцию теплового агрегата и его элементов. Для облегчения расчетов и их упрощения следует применять графики, таблицы, разработки проектных организаций, справочники по конструированию печей и сушил и т. д. Конструктивные элементы установок выбирают по данным [14, глава VII и 2, глава 7].

#### 3.1 Технологические расчеты печей

##### а) Туннельные печи

Туннельные печи применяют для обжига формованных изделий. Характерной особенностью туннельных печей является стационарность расположения отдельных зон обжига и передвижение через них материала.

Размеры туннельных печей и показатели их работы при обжиге различных материалов приведены [14, табл. 37 и 36].

Часовую производительность печи определяют по формуле:

$$P = \frac{P_r}{Z_r \cdot m \cdot n}, \text{ т/ч} \quad (28)$$

где  $P_r$  - годовая производительность печи, т/год.,

$Z_r$  - число работы печи в год, час,  $Z_r = /345 \div 365/.24$ ,

$m$  - процент брака и потерь материала на пути от входа в печь до поступления на склад готовой продукции,

$$m = 0,9 \div 0,98$$

$n$  - коэффициент использования оборудования,  $n = 0,95 \div 0,98$ ,

Основными размерами рабочего пространства туннельных печей являются : высота печи  $H$ , ширина  $B$  и длина  $L$ . Высота рабочего канала печи считается от пола вагонетки до замка свода.

Высота садки изделий на вагонетках зависит от формы и вида изделия. Она составляет: при обжиге магнезитовых и доломитовых изделий -  $0,9 \div 1,1$  м, шамотных -  $1,6 \div 2,0$  м, красного строительного кирпича -  $1,5 \div 1,8$  м.

Типы садок изделий на вагонетки представлены в [8, рис.18]. При проектировании надо учитывать, что высота рабочего канала печи должна быть на 100 мм выше высоты садки. Обжиговые вагонетки, как правило, имеют ширину до 8,1 м, что регламентирует ширину рабочего пространства. длина вагонеток до 3 м.

Между стенами туннеля и садкой оставляется щель 50-100мм. Разрыв между

садками отдельных вагонеток предусматривает в пределах 300-900 мм.

Длину печи определяют по формуле:

$$L = \frac{P \cdot t}{G_1} \cdot l_1, \text{ м} \quad (29)$$

где  $t$  - продолжительность обжига, в час. (по технологическим данным, [8, приложение 21]).

$G_1$ , - емкость одной вагонетки,  $\text{м}^3$  (по расчету в зависимости от типа садки).

$l$  - длина вагонетки, м.

Количество вагонеток в печи будет равно:

$$n = \frac{L}{l_1}, \text{ шт.} \quad (30)$$

Ёмкость печи  $G$  равна:

$$G = n \cdot G_1, \text{ м} \quad (31)$$

Выбору окончательного размера печи предшествует вычерчивание эскиза сечения печи. Полученные размеры уточняются с размерами промышленных печей, представленных в [8, табл. 9 и табл. 37,38].

Среднюю скорость движения вагонеток в печи определяют по формуле:

$$v_{cp} = \frac{L}{t}, \text{ м/ч} \quad (32)$$

Величина средней скорости  $v_{cp}$  должна находиться в пределах  $0,5 \div 3,0$  м/час.

Длины зон нагрева и обжига, а также длину зоны охлаждения определяют в соответствии с графиком нагрева и охлаждения обжигаемых изделий.

Длина зоны нагрева и обжига составит:

$$L_H = \frac{t_H}{t} L, \text{ м} \quad (33)$$

длина зоны охлаждения:

$$L_{охл} = \frac{t_{охл}}{t} L, \text{ м} \quad (34)$$

где  $t_H$ ,  $t_{охл}$  - время нагрева и охлаждения, которые выбирают по экспериментальным данным или на основе практических данных действующих печей [8, с.89], [6, табл.6]. Некоторые практические параметры режима обжига изделий в туннельных печах могут быть заимствованы из приложений [1,21-26].

## б) Вращающиеся печи.

Для высокотемпературного обжига некоторых материалов, например цемента, керамзита, используют вращающиеся печи, Эти печи имеют высокую производительность и представляют собой полностью механизированный тепловой агрегат с автоматическим регулированием процесса обжига.

Основными размерами вращающихся печей является диаметр  $D$  и длина печи  $L$ . Современные вращающиеся печи имеют диаметр от 2,5 до 5 м, длина печи достигает 230 м.

Производительность вращающейся печи определяют по следующей формуле:

$$P = 15 \cdot \rho \cdot D_c^2 \cdot j \cdot J_{CP} \cdot r_M, \text{ т/м} \quad (35)$$

где  $D_c$ - средний диаметр печи в свету, м,

$\phi$  - коэффициент заполнения печи, 0,08 - 0,01,

$\rho$ - насыпная объемная масса материала, т/м<sup>3</sup>,

$v$  - средняя скорость движения материала в печи, связанная с режимом обжига, м/мин (по формуле 36)

$$u_{CP} = \frac{L_c}{60 \cdot t}, \text{ м/мин} \quad (36)$$

где  $t$  - время обжига, час [12, по данным таблицы 6].

При заданной часовой производительности печи для производства цемента, ее размеры можно определить по следующим зависимостям:

по Асельму внутренний диаметр печи для мокрого и сухого способов обжига цементного клинкера

$$D_C = 0,396 \cdot (24 \cdot P)^{0,34}, \text{ м} \quad (37)$$

диаметр печи по кожуху:

$$D = 1,4 \cdot P^{0,28}, \text{ м} \quad (38)$$

длина печи:

$$L = 7,63 \cdot (24 \cdot P)^{0,46}, \text{ м} \quad (39)$$

Зона горения для печей с мокрым способом обжига:

$$Lr = (4 \div 5) \cdot D_C, \text{ м} \quad (40)$$

Зона горения для печей с сухим способом обжига:

$$Lr = (3 \div 4) \cdot D_C, \text{ м} \quad (41)$$

Обжиг керамзита обычно производят в коротких печах длиной от 12 до 45 м и диаметром до 2,5 м (чаще всего диаметр печей 2,3 и 2,5 м, отношение  $D_c/L = 1/12 \div 1/22$ ).

Длина зоны спекания и охлаждения для всех вращающихся печей определяется по продолжительности процесса обжига из формулы (36):

$$L_c = v_{cp} \cdot \tau, \text{ м}$$

Удельная объемная производительность печи для керамзита и огнеупорных материалов может быть рассчитана по формуле:

$$P_{уд} = 5000 \cdot \frac{D_c}{L} j \cdot n \cdot \text{tg } i = 1400 \frac{j}{t}, \text{ м}^3/\text{сут} \quad (42)$$

где  $\varphi$  - коэффициент заполнения печи материалом,  $\varphi=0,1$

$n$  - число оборотов печи,  $0,5 \div 4$  об/мин,

$L$  - наклон печи,  $\text{tg } i = 0,05 - 0,1$ ,

$\tau$  - продолжительность обжига,  $\tau = 0,7 - 1,5$  часа.

Удельная весовая производительность вращающихся печей может быть определена по формуле:

$$P_p = \frac{P}{p \cdot D_c \cdot L}, \text{ кг/м}^2\text{ч} \quad (43)$$

Удельная весовая производительность вращающихся печей для обжига огнеупорных материалов можно принимать в следующих пределах: для обжига глины -  $22 \div 26$  кг/м<sup>2</sup>ч, доломита -  $12 \div 15$  кг/м<sup>2</sup>ч, магнезита -  $13 \div 15$  кг/м<sup>2</sup>ч

Получив в процессе расчета основные конструктивные данные печи:  $D, L, D_c, P_{уд}, P_F, n$ , необходимо сравнить их с показателями работы действующих вращающихся печей и при необходимости скорректировать их на основе данных таблиц 35 [14] или приложения 27 [8]. Некоторые ориентировочные данные о работе вращающихся печей приведены в [6, табл. 1-1].

Конструктивные особенности вращающихся печей и особенности обжига в них отдельных строительных материалов изложены в [11, гл. 4]

### в) Шахтные печи.

Шахтные печи применяют для обжига цемента, извести, глины на шамот и др. Печи имеют большую производительность благодаря полному использованию печного пространства, интенсивности теплообмена, применению высоких давлений дутья и механизации обслуживания, расходуют небольшое количество топлива, имеют высокий термический КПД.

Высота печи зависит от вида обжигаемого материала, размеров кусков

шихты, температуры обжига и т.д. Высота существующих печей для обжига цементного клинкера составляет - 10 ÷ 12 м, малогабаритных печей - 4,5 ÷ 6,0 м, извести - 8,0 ÷ 20 м. Диаметр шахтных печей для обжига цементного клинкера составляет 2,5 ÷ 2,55 м, малогабаритных печей - 1,5 ÷ 2,0 м, а отношение высоты печи к её диаметру

$$H/D = 2,5-4.$$

Вначале расчета задаются отношением высоты печи к диаметру:  $a = \frac{H}{D_c}$

Затем находят высоту печи из формулы:

$$H = \sqrt[3]{\frac{P^2 \cdot a^2}{1600j^2 \cdot h}}, \text{ м} \quad (44)$$

где  $\varphi$  - коэффициент, зависящий от равномерности загрузки печи,  $\varphi = 0,7 - 1,0$ ,  $h$  - давление дутья, н/м<sup>2</sup> (по заданию),  $P$  - производительность печи, кг/ч.

Из заданного соотношения  $a = \frac{H}{D_c}$  определяют  $D$  - средний диаметр печи.

Время пребывания материала в печи определяют по формуле:

$$t = \frac{0,785 \cdot D_c^2 \cdot H \cdot r_m}{P}, \text{ ч} \quad (45)$$

где  $\rho_m$  - средняя плотность материала в насыпи, т/м<sup>3</sup>.

Удельная производительность, отнесенная к площади поперечного сечения (съём с 1 м<sup>2</sup> площади поперечного сечения), может быть определена по формуле:

$$P_F = \frac{r_m}{t} \cdot H, \text{ т/м}^3 \quad (46)$$

Удельная производительность, отнесенная к объёму печи (съём с 1 м<sup>3</sup> объёма), определяется по формуле:

$$P_{y\partial} = \frac{r_m}{t}, \text{ т/м}^3 \quad (47)$$

Средняя скорость продвижения материала определяется по формуле:

$$v_{CP} = \frac{H}{t}, \text{ м/ч} \quad (48)$$



где  $\tau$  - время обжига, ч (по технологическим данным).

Получённые в процессе расчета основные технологические данные печи сравнивают с показателями работы действующих шахтных печей . Размеры и показатели работы шахтных печей для различных материалов даны в табл. 34 [14] и приложениях 29,30 [8].

### 3.2 Технологические расчеты сушил

По технологическим требованиям сушила должны обеспечивать заданную производительность предприятия, гибкость регулирования процесса и соблюдение оптимального режима сушки.

Кроме производительности сушила по готовому продукту, вида высушиваемого материала, его физико-механических свойств, необходимо знать начальную и конечную ( $\omega_n$ ,  $\omega_k$ ) влажность материала (табл. 3).

Производительность сушил зависит от их конструкции, размеров, типа садки изделий на вагонетки и продолжительности сушки. Обычно при проектировании общая производительность сушил задана, и по ней определяют основные размеры сушильной камеры (туннели) и требуемое их количество.

Таблица 3. Начальная ( $\omega_n$ ) и конечная ( $\omega_k$ ) влажности материала при сушке.

№	Наименование материала	$\omega_n$	$\omega_k$
1	Красный строительный кирпич	18-20	5-6
2	Канализационные трубы	15-17	1-3
3	Шамотные изделия пластического формования	17-16	5-6
4	Шамотные изделия полусухого прессования	9-10	2-3
5	Плитки облицовочные	8-9	0,5-0,9
6	Керамические блоки	18-19	5-6
7	Глина	20-35	4-6
8	Известняк	3-8	0,2-0,4

### а) Туннельные сушила.

Для определения размеров и количества туннелей по заданной производительности необходимо установить продолжительность сушки данного вида изделия, выбрать (принять) тип вагонетки и способ садки изделий на вагонетку или емкости одной вагонетки. По размерам вагонетки и габаритам (высоте) садки определяют поперечное сечение туннеля.

Продолжительность сушки изделий выбирали по опытным данным, в зависимости от начальной и конечной влажности материала, температурного режима и т.д. В курсовом проектировании можно её принимать по данным табл. 30 [14] и 25 [8].

Характеристики сушильных вагонеток приведены в табл. 31 [14].

Если сушка предусматривается на печных вагонетках, то поперечный размер туннеля сушил принимается таким же, как и для туннельной печи (глава II, I, а)

При сушке изделий на полочных вагонетках ширину туннеля определяют по формуле:

$$B = b + 2 \cdot (50 \div 100), \text{ мм} \quad (49)$$

где  $b$  - ширина вагонетки, мм.

Высота туннеля:

$$H = h + 100, \text{ мм} \quad (50)$$

где  $h$  - высота от головки рельса до верха садки, мм.

Принимая длину каждого туннеля от 20 до 36 м (иногда до 50 м) и зная длину одной вагонетки  $l$ , находят количество вагонеток в одном туннеле:

$$n = \frac{20}{l} \div \frac{36}{l}, \text{ шт} \quad (51)$$

Тогда количество туннелей в сушиле составит:

$$T = \frac{P \cdot t}{G_b \cdot n}, \text{ шт} \quad (52)$$

где  $P$  - производительность сушила, т/ч,

$G_b$  - емкость одной вагонетки, т,

$t$  - продолжительность сушки, ч.

При выборе количества туннелей на каждые 8 - 10 принимают один туннель запасной.

После этого расчета устанавливают количество туннелей в блоке сушил и принимают количество блоков. В одном блоке может быть до 30 туннелей с

общим распределительным бором для подачи и отбора теплоносителя. Часовую производительность туннельных сушил определяют по формуле (28).

### б) Барабанные сушила.

Сушильные барабаны благодаря своей высокой производительности и экономичности имеют большое распространение.

Производительность барабанов зависит от их размеров - диаметра, длины, от скорости передвижения в них материала, которая обусловлена углом наклона и числом оборотов барабана.

Внутренний диаметр барабана рассчитывают по допустимой скорости отходящих из него газов:

$$D_{бар} = 0,0133 \cdot \sqrt{J_{газ}}, \text{ м} \quad (53)$$

где  $D_{бар}$  - внутренний диаметр барабана, м,  
 $v$  скорость отходящих газов, принимаемая в пределах 2-3 м/сек.

Длина барабана определяется по количеству испаряемой влаги  $W_H$  кг/час, напряженности  $m_0$  барабана по влаге в кг/м<sup>2</sup> и его диаметру  $D_{бар}$  в м:

$$L = \sqrt{\frac{W_H}{m_0 - 0,785 \cdot D_{бар}^2}}, \text{ м} \quad (54)$$

Количество испаряемой влаги  $W_H$  кг/ч, рассчитывают по формуле:

$$W_H = P_B \cdot \frac{W_H - W_K}{100 - W_H}, \text{ кг/ч} \quad (55)$$

где  $P_B$  - заданная производительность по высушенному материалу, кг/ч;

$\omega_H$  начальная влажность материала, %;

$\omega_K$  конечная влажность материала, в %.

Напряженность  $m_0$  барабана и основные параметры сушки применительно к сушильным барабанам приведены в табл. 24 [8].

Отношение длины барабана к его диаметру, т.е.  $L/D$  равно  $3,5 \div 9,0$ .

Барабаны выпускаются диаметром 1 - 3,5 м (через 0,2 м), длиной от 4 до 27 м, толщина стенок 8 - 16 мм.

Исходя из этих данных, выбирают размеры барабана.

Зная диаметр барабана и его длину, легко рассчитать его внутренний объем  $V_{бар}$  и число оборотов  $n$ :

$$V_{\text{бар}} = \frac{p \cdot D_{\text{бар}}^2}{4} \cdot L \text{ м}^3, \quad n = \frac{A \cdot K \cdot L}{t \cdot D_{\text{бар}} \cdot \text{tga}} \text{ об/мин} \quad (56)$$

где А, К - коэффициенты зависящие от характера движения материала и типа и насадки (при прямотоке К=0,2-0,7 при противотоке К=0,5 - 2,0 для лопастной насадки А=0,5, для секторной А=1).

$\alpha$  - угол наклона барабана, град, (4 - 6°).

$\tau$  - продолжительность сушки, час.

$$t = 120 \cdot \frac{b \cdot r_n}{m_0} \cdot \frac{w_H - w_K}{200 - (w_H - w_K)}, \text{ ч} \quad (57)$$

где  $\rho_n$ - насыпная плотность материала:

для песка  $\rho_n = 1200 - 1300 \text{ кг/м}^3$ ,

для глины  $\rho_n = 1300 - 1800 \text{ кг/м}^3$ .

$\beta$ - коэффициент заполнения барабана ( $\beta = 0,15 - 0,2$ )

## 4. Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет включает расчет материального баланса и количества действующих масс по зонам, расчет тепловых потерь с составлением теплового баланса и определением расхода топлива и тепла в час и на единицу продукции.

Несмотря на некоторые особенности в теплотехническом расчете отдельных тепловых агрегатов, основные закономерности его остаются неизменными и могут быть использованы для всех видов установок.

### 4.1. Основы теплотехнического расчета печей

Теплотехнический расчет печей производится в следующей последовательности: сначала ведут расчет горения топлива (глава 11), затем составляют тепловой баланс, отнесенный на заранее обусловленную единицу (кг топлива, 1 кг обожженного материала, на 1 час работы печи). При составлении теплового баланса проектируемой печи величина расхода топлива  $B_{\text{ч}}$  неизвестна, и ее определяют решением уравнения теплового баланса.

Для печей непрерывного действия - туннельных, вращающихся и шахтных, баланс тепла принято составлять по отдельным зонам.

Общая методика расчета теплового баланса непрерывно действующих печей на 1 час их работы для зоны обжига и подогрева представлена ниже.

#### Приход тепла

1. От сгорания топлива:

$$Q_2 = Q_n^p \cdot B_{\text{ч}}, \text{ кДж/ч} \quad (58)$$

где  $Q_n^p$  - теплота сгорания топлива, определяемая по формулам 25, 26, кДж/кг,  $B_{\text{ч}}$  - часовой расход топлива, принятый за неизвестную величину, определяемую из теплового баланса, кг/ч.

2. С воздухом, поступающим на горение:

$$Q_{\text{воз}} = L'_a \cdot C_v \cdot t_v \cdot B_{\text{ч}} \text{ кДж/ч} \quad (59)$$

где  $L_k$  - действительный объем воздуха, идущий на горение 1 кг топлива, принимается с принятым коэффициентом избытка воздуха по формулам 6,7,8,  $\text{нм}^3/\text{кг}$ ,  $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ .

$C_v$  - объемная теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ , по приложению IV[7], табл. 3 [11], прилож. VIII [14],

$t_v$  - температура воздуха при входе его в зону горения,  $^\circ\text{C}$ , принимается по технологическим данным в случае его подогрева  $t_v = 120 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Величина  $C_B \cdot t_B$  (энтальпия) в  $\text{кДж/нм}^3$  воздуха может быть найдена в зависимости от температуры воздуха по приложениям 8 и 10 [8].

3. С физическим теплом топлива:

$$Q_{\text{тон}} = B_{\text{ч}} \cdot C_m \cdot t_m, \text{кДж/ч} \quad (60)$$

$C_T$  - средняя теплоемкость топлива, равная для сухого твердого топлива примерно

$C_T^c = 1,05 \text{ кДж/кг.град}$ , для влажного топлива при влажности  $W$  (%)

$$C_T = 1,05 \frac{100 - W^p}{100} + \frac{W^p}{100}, \text{кДж/кг.град} \quad (61)$$

для мазута  $C_T = 2,05 \text{ кДж/кг.град}$ , для газообразного топлива берется в зависимости от его температуры и состава по приложению 9[8],  $t_m$ - температура топлива, поступающего на горение, град, принимается в следующих пределах: твердого топлива, которое сжигается неподогретым, в зимнее время ниже нуля, летом 15 - 20°; пылевидного топлива 40 - 50°; мазут 55 - 90°, природного газа не подогретого 0 - 30° физическое тепло можно не учитывать, для подогретого генераторного газа 800 - 1000°С.

4. С теплом экзотермических реакций:

$$Q_{\text{экз}} = \sum q_{\text{экз}} \cdot G_I, \text{кДж/ч} \quad (62)$$

$q_{\text{экз}}$  - количество тепла, выделяемого при обжиге материала, отнесенного на 1 кг готового продукта или составной части продукта /для цементного клинкера  $q_{\text{экз}}=419 \text{ кДж/кг}$ ,

$G_I$  - количество готового продукта или составной его части, к чему отнесена  $q_{\text{экз}}$ , кг/час.

## Расход тепла

### а) Полезный

Тепло, затраченное на нагрев материалов или изделий:

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{ч}}(C_K \cdot t_K - C_H \cdot t_H), \text{кДж/ч} \quad (63)$$

где  $G_{\text{ч}}$  - часовая производительность печи по сухому материалу, кг/час,  $C_K, C_H$  - соответственно начальная и конечная теплоемкости материала,  $\text{кДж/кг.град}$ , приложения 16,17,18 [8],  $t_K, t_H$  - начальная и конечная температуры материалов при обжиге, град,  $t_K$  принимается по технологическим данным или по данным

табл. 5 [8].

**Расход тепла на испарение физической влаги материала.**

$$Q_{исп} = G_{ч} \cdot \frac{W_a}{100} \cdot (2487 + 1,97 \cdot t_{ух}), \text{ кДж/ч} \quad (64)$$

где  $\omega_a$  - абсолютная влажность материала, %,   
 $G_{ч}$  - скрытая теплота парообразования, кДж/кг влаги,   
 $t_{ух}$  - температура отходящих газов, град, /по данным действующих агрегатов, литературным данным/,   
 1,97 - массовая теплоемкость водяного пара, кДж/кг·град.

**Тепло, затраченное на эндотермические реакции и расплавление материала (химические реакции)**

$$Q_{хим} = q_{хим} \cdot G_{хим}, \text{ кДж/ч} \quad (65)$$

где  $q$  - расход тепла на химические реакции 1 кг исходного химического вещества в необожженном продукте, кДж/кг, берется по данным таблицы 3;   
 $G_{хим}$  - количество исходного химического вещества в материале, загружаемом в печь,

$$G_{хим} = 0,01 \cdot n \cdot G_{ч}, \text{ кг/ч} \quad (66)$$

$n$  - процентное содержание исходного химического вещества в сухой массе материала, %.

Таблица 4. Расход тепла на химические реакции при обжиге

Процесс	Расход тепла кДж/кг	К какой единице отнесено
Дегидратация глины	290-557	1 кг глины
Обжиг керамики	2090	1 кг
Дегидратация гипсового камня	578	1 кг шихты
Вспучивание глины в производстве керамзита	400-600	1 кг керамзита
Клинкeroобразование при обжиге цемента (из известняка и глины)	1600-2000	1 кг клинкера

б) Потери.

### Потери тепла с отходящими газами.

$$Q_{\text{дым}} = B_{\text{ч}} \cdot V_{\text{дым}} \cdot C_{\text{дым}} \cdot t_{\text{дым}}, \text{ кДж/ч} \quad (67)$$

где  $C_{\text{дым}}$  средняя теплоемкость уходящих из печи газов, кДж/кг.град, берется по приложению 9 [8].

$C_{\text{дым}} \cdot t_{\text{дым}}$  - энтальпия продуктов горения при температура уходящих газов, кДж/м<sup>3</sup>, по приложению 8 [8]

При расчете  $V_{\text{дым}}$  необходимо учитывать, кроме объема дымовых газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива, и объем газов, образующихся при разложении 1 кг обожженного материала 1,2. Приблизительно можно найти потери тепла с уходящими дымовыми газами в зависимости от их температуры  $t_{\text{дым}}$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  по рис. 24 [8].

### Потери тепла от неполноты сгорания топлива

$$Q_{\text{неп}} = Q_{\text{хим.}} + Q_{\text{мех}}, \text{ кДж/ч} \quad (68)$$

где  $Q_{\text{хим.}}$  потери от химической неполноты сгорания:  
при газовом и мазутном топливе

$$Q_{\text{хим}} = (0.005 \div 0.015) \cdot B_{\text{ч}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}}, \text{ кДж/ч} \quad (69)$$

при твердом топливе

$$Q_{\text{хим}} = (0.015 \div 0.02) \cdot B_{\text{ч}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}}, \text{ кДж/ч} \quad (70)$$

При нормальной работе горелок и форсунок потери от химической неполноты сгорания равны нулю.

$Q_{\text{мех}}$  - потери от механической неполноты сгорания, кДж/час:

$$Q_{\text{мех}} = k \cdot B_{\text{ч}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}}, \text{ кДж/ч} \quad (71)$$

$k$  коэффициент потерь тепла с недожогом;

$k = 0,03 \div 0,05$  - для твердого топлива,

$k = 0,01$  - для жидкого топлива

$k = 0,02 \div 0,03$  - для газообразного топлива



## Потери тепла в окружающее пространство.

$Q_{окр}$ - потери тепла в окружающее пространство складываются из потерь тепла через кладку и закрытые заслонки теплопроводностью, потерь тепла излучением через открытые окна, потерь тепла с выбивающимися через окна газами и потерь тепла на охлаждаемые водой поверхности.

Подробный расчет  $Q_{окр}$  приведен в [8, 156 -162]. При курсовом проектировании можно пользоваться упрощенным расчетом:

$$Q_{окр} = a_{сум} \cdot (t_{с.см.} - t_d) \cdot F \cdot 3,6, \text{ кДж/ч} \quad (72)$$

где  $a_{сум}$  - суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>.град, принимаемый по таблице 4, в зависимости от температуры наружной поверхности печи,  $t_{с.см.}$ - средняя температура наружной поверхности печи град;

В туннельных печах при средней температуре обжига 1000 - 1500° температура наружной поверхности стенок печи находится в пределах 60 - 100°.

Рассчитывается по методике, приведенной в [4].

Таблица 5. Значения суммарного коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры наружной поверхности печи

Температура	Суммарный коэффициент теплоотдачи Вт/м <sup>2</sup> °С	
	для вертикальных и горизонтальных стен	для цилиндрических стенок вращающихся
10	8,6	9,78
25	10,0	10,45
40	11,16	10,69
60	11,63	11,63
80	12,67	12,32
100	14,41	13,26
130	16,00	15,12
160	18,50	16,63
200	20,23	19,42
240	22,44	22,10
280	24,88	25,00
320	28,00	28,26
350	30,35	-
400	34,65	-

$t_{\theta}$  - температура окружающего печь воздуха, град,

$F$  - поверхность кладки, принимается как средняя геометрическая величина:

$$F = \sqrt{F_{нар} \cdot F_{вн}}, \text{ м}^2 \quad (73)$$

где  $F_{нар}, F_{вн}$  - площадь наружной и внутренней поверхности кладки,  $\text{м}^2$ , для печей больших размеров  $F$  считается по наружной поверхности.

7. Расход тепла на нагрев транспортирующих устройств.

$$Q_{тр} = (0,65 \div 0,85) \sum G_{\phi} \cdot C_{\phi} \cdot t_{\phi.с.}, \text{ кДж/ч} \quad (74)$$

где  $G_{\phi}$  - масса футеровки вагонеток, кг/час,

$$G_{\phi} = C_{\phi 1} \cdot n, \text{ кг/ч} \quad (75)$$

$G_{\phi}$  - масса одной вагонетки, кг;

$n$  - количество вагонеток, поступающих в час,.

$C_{\phi}$  - теплоемкость материала вагонетки, кДж/кг.град;

$t_{\phi.с.}$  - средняя температура слоя футеровки, град,

$$t_{\phi.с.} = (t_{\phi.н.} + t_{\phi.к.}) \cdot 0,5, \text{ град}$$

$t_{\phi.н.}$  - начальная температура слоя футеровки  $t_{\phi.н.} = 40 - 50^{\circ}$ ,

$t_{\phi.к.}$  - конечная температура слоя футеровки, рассчитывается методами, приведенными в [4].

*в) Неучтенные потери тепла.*

$$Q_{неуч} = |0,03 - 0,05| \cdot Q_H^P \cdot B_{\phi}, \text{ кДж/ч} \quad (76)$$

При точном расчете теплового баланса неучтенные потери тепла исключаются.

Уравнение теплового баланса для зон подогрева и обжига имеет вид:

$$Q_2 = Q_{воз} + Q_{топ} + Q_{экз} = Q_M + Q_{исп} + Q_{хим} + Q_{облм} + Q_{мех} + Q_{окр} + Q_{тр} + Q_{неуч}, \quad (77)$$

Решая уравнение теплового баланса (77), получают часовой расход топлива, который затем переводят на расход условного топлива по формуле:

$$B_{усл} = B_{ч} Q_H^P / 29300 G_{ч}, \quad \text{кг у.т./кг мат.} \quad (78)$$

где 29300 - теплота, выделяющаяся при сгорании 1 кг условного топлива, кДж/кг.

Рассчитанная величина  $B_{усл}$  сравнивается с условным расходом топлива действующих печей, [8, с.167]

Результаты расчетов теплового баланса сводят в таблицу 6

Таблица 6. Таблица теплового баланса

Статьи прихода тепла			Статьи расхода тепла		
Наименование	Количества тепла		Наименование	Количества тепла	
	кДж/ч	%		кДж/ч	%
1. от сгорания топлива			1. на нагрев материала		
2. с воздухом, поступающим на горение			2. на испарения влаги		
и т.д.			и т.д.		
итого		100	итого		100

Расчет баланса зоны охлаждения составляется для определения количества воздуха, необходимого для охлаждения материала  $V_{к.в.}$ .

### Статьи прихода

1. С воздухом, поступающим на охлаждение материала.

$$Q_{в.х.} = V_{в.х.} \cdot C_v \cdot t_v, \quad \text{кДж/ч} \quad (78)$$

где  $V_{в.х.}$ - Объем воздуха, необходимый для охлаждения, м<sup>3</sup>/час,  $C_в$ - теплоемкость воздуха, кДж/м<sup>3</sup>.град,  $t_в$ - температура воздуха при входе в зону охлаждения град.

## Статьи расхода

### 1. На охлаждение материала

$$Q_M = G_q \cdot C_M \cdot (t_K - t_M), \text{ кДж/ч} \quad (79)$$

где  $G_q$  - часовая производительность печи, кг/час,  
 $C_M$ - теплоемкость обожженного материала, кДж/кг.град, приложение 16,[3];  
 $t_K$ - конечная температура обжига материала, град, табл. 5 [3];  
 $t_M$ - температура материала, покидающего печь, град.

### 2. На охлаждение воздуха.

$$Q_{в} = B_q \cdot V_{д.в.м} \cdot C_{д.в.м} \cdot (t_{д.в.м} - t_{н.в.}), \text{ кДж/ч} \quad (80)$$

где  $t_{к.в.}$  - конечная температура воздуха, выходящего из печи (град.)

### 3. Потери тепла зоной охлаждения печи во внешнюю среду.

$$Q_{охл} = a_{сум} \cdot (t_{с.о.} - t_в) \cdot F \cdot 3,6, \text{ кДж/ч} \quad (81)$$

где  $a$  - суммарный коэффициент теплоотдачи зоны охлаждения, Вт/м<sup>2</sup>.град, таблица 4;

$t_{с.о.}$  - средняя температура зоны охлаждения, град,

$F$  - наружная поверхность зоны охлаждения, м<sup>2</sup>.

### 4. На охлаждение транспорта.

$$Q_{тр} = (0,65 \div 0,85) \cdot \sum G_{ф} \cdot C_{ф} \cdot (t_{к.о.} - t_{с.о.}), \text{ кДж/ч} \quad (82)$$

где  $t_{к.о.}$  - температура выходящего из печи транспорта, град.

По аналогии с зонами обжига и подогрева составляют уравнение баланса зоны охлаждения, из которого определяют неизвестную величину  $V_{в.х.}$ - объем воздуха, необходимый для охлаждения материала.

## 4.2 Основы теплотехнического расчета сушил.

При теплотехническом расчете процесса сушки находят необходимое для подачи в сушило количество сушильного агента и требуемые часовые расходы тепла и сухого воздуха, а так же удельные расходы тепла и сухого воздуха, отнесенные к 1 кг испаряемой из материала в процессе сушки влаги.

Необходимыми исходными данными для расчета сушил являются: вид и физико-химические свойства материала, начальная и конечная влажности материала (табл. 3) максимально допустимая температура материала табл. 7. при его нагреве.

Таблица 7. Температура и относительная влажность теплоносителя при сушке материала.

Наименование материала	Температура, град.		Конечная относительная влажность. %
	начальная	конечная	
Красный строительный кирпич	60 - 120	25-30	85 - 90
Канализационные трубы	110 – 120	35-55	40 - 75
Шамотные изделия пластического формования	100 – 140	30-40	75 - 95
Шамотные изделия полусухого прессования	120 – 200	35 - 40	не более 90
Плитки облицовочные	100 – 120	40 - 50	60
Керамические блоки	70 – 120	21 - 32	88-95
Гипсовые блоки	120	40 - 50	85-90
Глина	600 – 800	80 -100	
Известняк	800 -1000	100-120	
Песок	800 -1000	80 -100	

### Материальный баланс сушила.

При сушке материала изменяются его вес, влажность и температура. Зная часовую производительность сушила по высушенному материалу  $P_c$  кг/час и относительную влажность до и после сушки по формуле 55, определяют количество испаренной влаги.

Расход воздуха, необходимого для сушки  $L_{ca}$ , определяют из уравнения материального баланса по воздуху:  
откуда

$$W_{\text{ч}} = L_{\text{к}} - L_{\text{н}} = \frac{d_{\text{к}} \cdot L_{\text{с.в.}}}{1000} - \frac{d_{\text{н}} \cdot L_{\text{с.в.}}}{1000} = \frac{d_{\text{к}} - d_{\text{н}}}{1000} \cdot L_{\text{с.в.}}, \text{ кг/ч} \quad (83)$$

$$L_{\text{с.в.}} = W \frac{1000}{d_{\text{к}} - d_{\text{н}}}, \text{ кг.сух.воз./ч} \quad (84)$$

где  $L_{\text{к}}, L_{\text{н}}$  - количество (масса) поступающего и выходящего из сушила газа, кг/час,  $L_{\text{с.в.}}$  - расход сухого воздуха, кг/час;  $d_{\text{н}}, d_{\text{к}}$  - влагосодержание поступающего и выходящего из сушила газа, кг пара/кг сух. воз.

Удельный расход сухого воздуха на 1 кг испаренной влаги будет равен:

$$l_{\text{с.в.}} = \frac{L_{\text{с.в.}}}{W_{\text{ч}}} = \frac{1000}{d_{\text{к}} - d_{\text{н}}}, \frac{\text{кг.сух.воз}}{\text{кг исп. влаги}} \quad (85)$$

### Определенке расхода тепла и топлива на сушку методом составления теплового баланса

#### Расход тепла на 1 кг испаренной влаги.

#### 1. На подогрев высушиваемого материала

$$q_m = \frac{P_c}{W_{\text{ч}}} \cdot C_m \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \text{ кДж/кг} \quad (86)$$

где  $P_c$  - часовая производительность сушила по высушенному материалу, кг/час;

$C_m$  - теплоемкость высушенного материала при конечной влажности  $w_{\text{к}}$

$$C_m = C_c \frac{100 - w_{\text{к}}}{100} + \frac{4,2 \cdot w_{\text{к}}}{100}, \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$$

Таблица 8.

Материал	$C_c$ кДж/кг.град
Глина сухая	0,921
Глинозем	0,766
Керамика	0,837
Кирпич строительный	0,921
Песок кварцевый	0,796
Цемент	1,130
Шамот	0,837
Гипс безводный	
Диатомит	

$t_{в.}$ ,  $t_{к.}$  – температура материала на входе и выходе из сушила, град, зависящая от принятого технологического процесса, типа сушильной установки и режима сушки.

## 2. На подогрев транспортных устройств

$$q_{тр} = \frac{\sum G_{тр} \cdot C_{тр}}{W} (t_{тр.к.} - t_{тр.м.}), \text{ кДж/ч} \quad (88)$$

где  $\sum G_{тр}$  – суммарный вес транспортных устройств, проходящих через сушило за час, кг/час;

$C_{тр}$  – средняя теплоемкость материала транспортных устройств, кДж/кг.град, приложение 18 [8],

$t_{тр.к.}$ ,  $t_{тр.м.}$  – температура транспортных устройств до и после сушки, град.

## 3. Потери тепла через стенки сушила в окружающую среду

$$q_{окр} = \frac{3,6 \cdot K_{сум} (t_{вн.} - t_{окр.})}{W_{ч}} \cdot F, \text{ кДж/ч} \quad (89)$$

где  $K_{сум}$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ,  $K_{сум} = 1,0 - 2,3$ ;

$t_{вн.}$ ,  $t_{окр.}$  – соответственно температуры внутри сушила и окружающего сушило

воздуха, град,

$F$  поверхность стен сушила, м, при небольшой толщине стенок,  $F$  считают по наружным размерам.

#### 4. Потери тепла через не плотности стен сушила.

$q_{неп}$  - потери тепла через не плотности примерно составляют в 5 - 10 % от общего расхода тепла на сушку.

Суммарный расход тепла на 1кг испаренной влаги составит:

$$q_{сум} = (q_v + q_{тр} + q_{окр} + q_{неп}), \text{ кДж/ч} \quad (90)$$

$q_{сум}$  увеличивают на величину потерь в подводящих каналах

$$q'_{сум} = /1,10-1,12/ q_{сух}, \text{ кДж/ч} \quad (91)$$

Далее для упрощения расчетов используется J-d диаграмма рис. 1,2. J-d - диаграмма, разработанная в 1918 г. проф. Л.К. Рамзиным, расчеты полей разработал М.Ю. Лурье, построена для влажного воздуха, однако с достаточной точностью ею можно пользоваться и при расчетах сушки дымовыми газами, разбавленными воздухом. На рис. 1 представлена диаграмма для низкотемпературных режимов сушки, а на рис. 2 - для высокотемпературных режимов. Основными параметрами диаграммы являются теплосодержание  $J$  (кДж/кг.сух.воз.) и влагосодержание  $d$  (г/кг сух.воз.). Кроме того, на ней нанесены и другие параметры воздуха, а именно, относительная влажность  $\phi$  (%), температура воздуха, парциальное давление давления водяных паров во влажном воздухе. Линии постоянных влагосодержаний  $d=\text{const}$  располагаются по вертикали, а линии постоянных теплосодержаний (адиабаты) - наклонно под углом  $135^\circ$ .

Линия насыщенного состояния воздуха  $\phi=100\%$  разделяет диаграмму на две части. Верхняя часть, которая выше линии  $\phi=100\%$ , дает характеристику влажного воздуха, не насыщенного водяными парами. По этой верхней части диаграммы определяют необходимые параметры сушильного агента и их изменение в процессе сушки. Нижняя область от линии  $\phi=100\%$  представляет собой насыщенное состояние влажного воздуха в присутствии конденсата влаги. Температура всех точек, лежащих на линии  $\phi=100\%$ , относится к точке росы. Линия парциальных давлений водяного пара  $p_n$  (н/м<sup>2</sup>) дана наклонно в нижней части диаграммы, числовые значения их приведены справа по



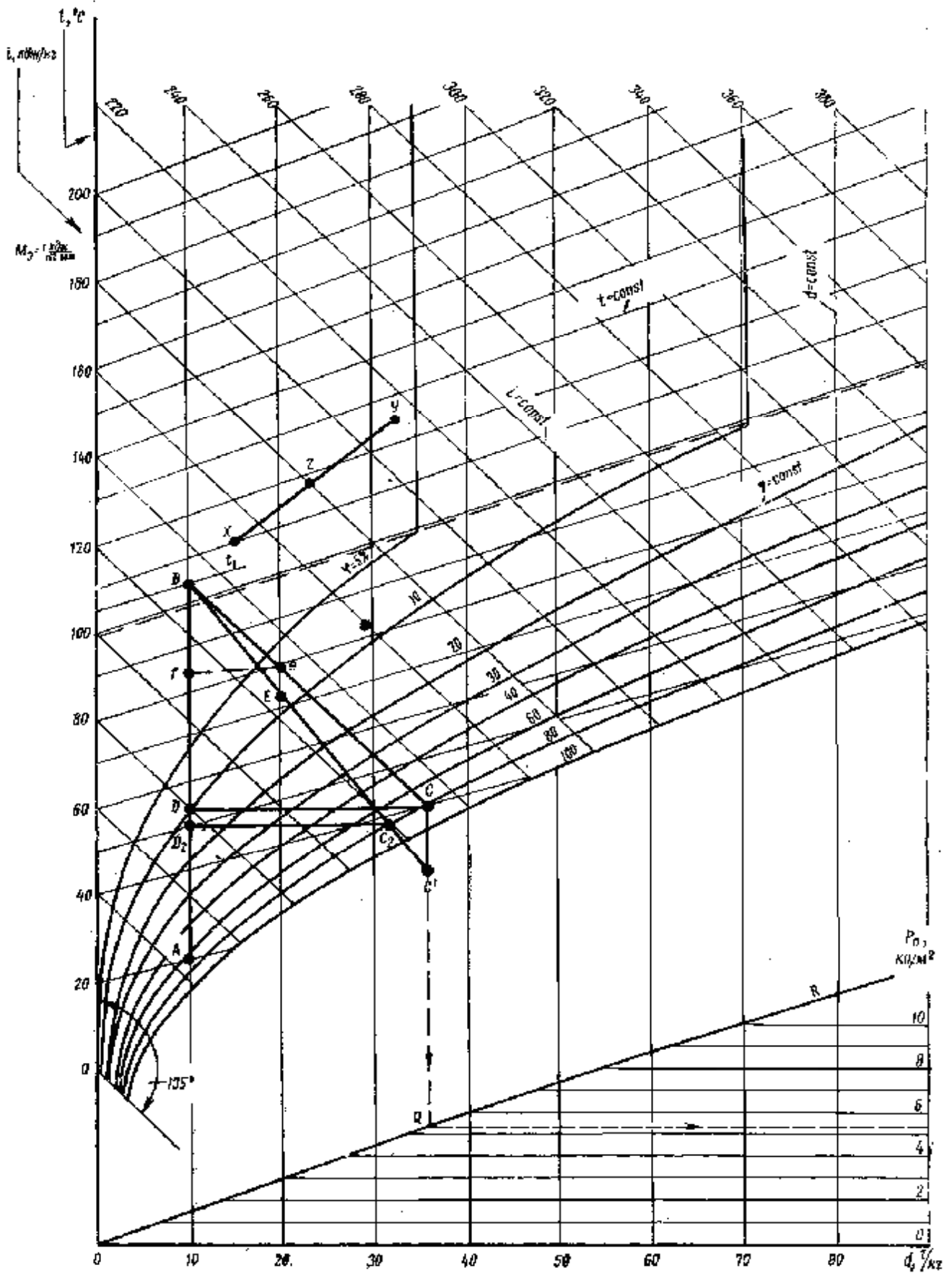


Рис.1. - I-d – диаграмма влажного воздуха (до 200°)  
при барометрическом давлении 99,4 кН/м<sup>2</sup>

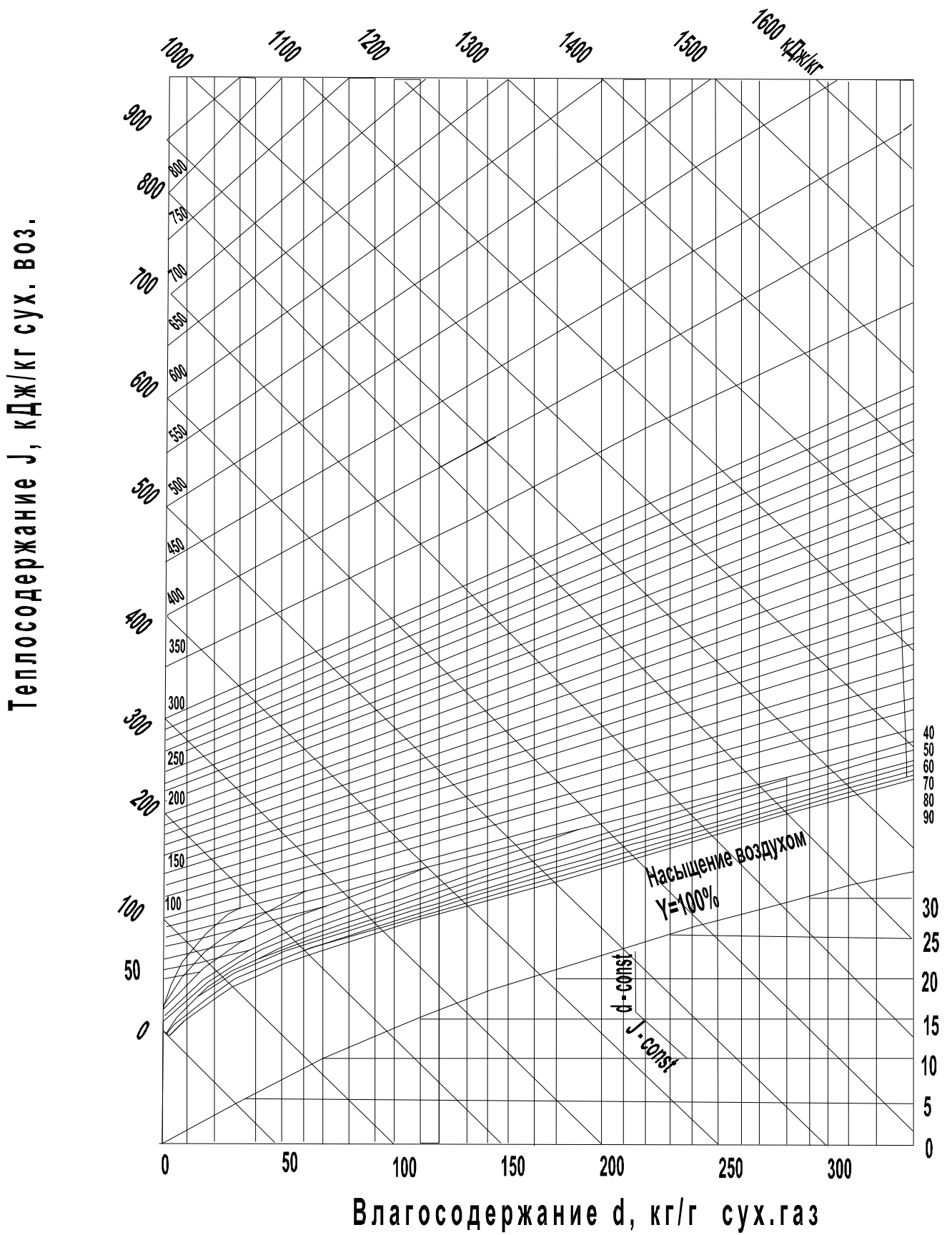


Рис.2. - I-d диаграмма влажного воздуха (до 800<sup>0</sup>С)  
при барометрическом давлении 99,4 кН/м<sup>2</sup>

вертикальной оси.

Диаграммы построены для барометрического давления  $B = 99,4 \text{ кН/м}^2$  (745 мм рт.ст.), которому соответствует температура кипения воды  $99,4^\circ$ . При этой температуре парциальное давление водяного пара в насыщенном состоянии равно атмосферному.

По J-d - диаграмме можно проанализировать различные процессы, связанные с изменением параметров сушильного агента, а именно, подогрев сушильного агента, смешение дымовых газов с воздухом, изменение параметров сушильного агента при рециркуляции отработанных газов, испарение влаги их материала, сушки с учетом потерь во внешнюю среду, определить расход сухого воздуха на процесс сушки, расход тепла и ряд других задач сушильного процесса.

Разберем пример пользования J-d - диаграммой. при сушке подогретым воздухом.

Начальными параметрами атмосферного воздуха обычно служат температура  $t_{\text{в03}}$  и относительная влажность  $\Phi_{\text{в03}}$ , которые зависят от времени года и местности (табл. 32, [14]). По данным  $t_{\text{в03}}$  и  $\Phi_{\text{в03}}$  атмосферного воздуха находят на диаграмме исходную точку А (рис. 1) и определяют для неё влагосодержание  $d_{\text{в03}}$  и теплосодержание  $J_{\text{в03}}$ .

Подогрев воздуха (в калорифере, в зоне охлаждения печи и т.д.) происходит без изменения влагосодержания воздуха  $d_{\text{в03}}$ , поэтому J-d - диаграмме процесс повышения температуры воздуха от  $t_{\text{в03}}$  до  $t_n$  температуры воздуха поступающего в сушильную установку /изображается вертикальной линией АВ при  $d = \text{const}$ . В точке В получим начальные параметры воздуха, поступающего в сушило:  $t_n, d_n, \Phi_n, J_n (d = d)$ .

Если считать, что в процессе сушки тепло расходуется только на испарение влаги из материала, получим теоретический процесс сушки, характерный для идеальных сушил (без потерь тепла в окружающую среду, на нагрев материала и т.д.), протекавший с постоянным теплосодержанием.

На J-d-диаграмме теоретический процесс сушки изображается линией ВС постоянного теплосодержания воздуха. Для теоретического процесса сушки расход сухого воздуха будет равен:

$$L_{\text{теор}} = \frac{1000 \cdot W_q}{d_2 - d_n}, \text{ кг сух. воз.} \quad (92)$$

Точка С находится на пересечении линии постоянного теплосодержания  $J_n$  с линией постоянного конечного параметра для выбранного режима сушки температуры  $t_k$  или относительной влажности  $\Phi_k$  воздуха, выходящего из сушила.

Действительный процесс сушки идет с уменьшением теплосодержания воздуха

по линии ВЕ. Для того чтобы найти на диаграмме точку Е, как конечную точку действительного процесса сушки, надо знать величину изменения теплосодержания воздуха в конце процесса сушки, т.е. найти направление луча ВД. Точка Е при этом находится пересечением луча ВД с линией  $t_k$  или  $\varphi_k$  (точка Д является вспомогательной при построении действительного процесса сушки).

Для нахождения точки Д, необходимо знать общие потери тепла в сушиле  $q'_{сум}$  кДж/час, формула 91.

Определив  $q'_{сум}$ , находим величину уменьшения теплосодержания воздуха в конце теоретического процесса сушки (т.е. относительно точки С) за счет потерь тепла

$$J_{ном} = \frac{q_{сум}}{L_{нпjh}}, \text{ кДж/кг сух. воз.} \quad (93)$$

Величина  $J_{ном}$  выражена в тех же единицах теплосодержания, как и на диаграмме  $J-d$ , поэтому откладываем величину  $J_{ном}$  вниз от точки С и получим вспомогательную точку Д.

Линия ВД показывает направление линии действительного процесса сушки с учетом тепловых потерь. Затем находим точку Е и получаем линию действительного процесса сушки ВЕ.

Для точки Е по диаграмме определяем конечные характеристики выходящего из сушила воздуха: влагосодержание  $d_k$ , теплосодержание  $J_k$ , неизвестные температуру  $t_k$  или  $\varphi_k$ , относительную влажность.

Расход воздуха на сушку, выраженный в весовых единицах, определяют по формуле (84), удельный расход сухого воздуха по формуле (85).

Для того чтобы действительный расход воздуха выразить в объемных единицах /м<sup>3</sup>/час/, следует воспользоваться значениями удельного объема  $V_{уд.}$ , тогда:

$$V_{воз} = V_{уд} \cdot L_{с.в.}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (94)$$

Расход тепла на сушку материала зависит от начального теплосодержания и расхода воздуха, подаваемого на сушку, и определяется по формуле:

$$Q = L_{с.в.} (J_n - J_{воз}) - 4,2 \cdot W \cdot t_m, \text{ кДж/ч} \quad (95)$$

где  $J_n$  теплосодержание воздуха, подаваемого на сушку (начальное), кДж/кг, сух.воз.;

$J_{воз}$  - теплосодержание не подогрего атмосферного воздуха, кДж/кг. сух. воз.;

$4,2 \cdot W \cdot t_m$  - количество тепла /кДж/ч/, внесенного в сушило с влагой материала /кг/ч/ при температуре материала  $t_m$  и теплоемкости 4,2 кДж/кг.

Разность  $J_n - J_{воз}$  представляет собой количество тепла (кДж/кг, сух.воз.),

израсходованного на нагрев воздуха.

Для оценки тепловых затрат на сушку и для сравнения тепловой работы данного сушила с другими сушилами определяют удельный расход тепла на сушку

$$q_{уд} = \frac{Q}{W_{\text{ч}}}, \text{ кДж/кг исп.влаг.} \quad (96)$$

Для определения расхода топлива на подогрев воздуха необходимо знать теплотворность топлива  $Q_n^p$  и к.п.д.  $\eta$  установки для подогрева воздуха. Тогда расход топлива составит:

$$B = \frac{Q}{Q_n^p \cdot \eta}, \text{ кг/ч (нм}^3\text{/ч)} \quad (97)$$

$\eta=0,9$  для топочных устройств

$\eta =0,97$  для паровых калориферов.

Способы построения основных процессов для других типов сушильных установок аналогичны приведенным и. могут быть заимствованы из литературных источников [1,2,3,4,6].

## 5. РАСЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Аэродинамическая характеристика печей и сушил во многом определяет их работу: количество, скорость движения газов и величину действующего напора, необходимого для перемещения газов.

Аэродинамические расчеты при проектировании печей и сушил выполняются с целью определения сопротивлений на пути движения газов, воздуха или продуктов горения, что необходимо для выбора тягодутьевых устройств или расчета дымовой трубы.

Для аэродинамического расчета предварительно вычерчивается схема тепловой установки, например [11, с.52, рис.8] с указанием всех местных сопротивлений (переход из одного сечения канала в другое, шиберы, повороты, разветвления и др.)

При движении газов в печах и трубопроводах возникают сопротивления, которые рассчитываются как различные виды потерь давления:

$$h_{\text{общ}} = \sum h_{\text{тр}} + \sum h_{\text{м}} \pm \sum h_{\text{геом}}, \text{ н/м}^2 \quad (97)$$

где  $h_{\text{тр}}$  потери на трение о стенки, н/м<sup>2</sup>,

$h$  потери на местные сопротивления, н/м<sup>2</sup>,

$h$  потери на геометрические сопротивления, н/м<sup>2</sup>.

Если геометрические напоры способствуют движению газов, то ставится знак минус.

### I. Потери давления на трение о стенки

Этот вид потерь зависит от длины  $l$  прямого участка канала теплового агрегата, диаметра канала  $d$ , динамического давления, коэффициента трения  $\beta$ , зависящего от шероховатости канала и числа Рейнольдса:

$$h_{\text{тр}} = b \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot r_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right) \cdot \left(\frac{t + 273}{t_{\text{см}} + 273}\right)^{0,583}, \text{ н/м}^2 \quad (98)$$

Для каналов прямоугольного сечения вместо диаметра  $d$  в формулу 98 подставляется эквивалентный диаметр:

$$d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b}, \text{ м} \quad (99)$$

где  $a$  ширина канала, м,

$\delta$  высота канала, м.

Длина канала и его диаметр принимается по данным расчета основных конструктивных параметров тепловой установки (глава 2),  $t_{cm}$  температура на внутренней поверхности стенки.

При отсутствии теплообмена на участке последний множитель в формуле (99) опускается.

Величина плотности  $\rho_0$  составляет:

для сухого воздуха	1,293 кг/м <sup>3</sup>
при влагосодержании = 10 г/кг воздуха	1,285 кг/м <sup>3</sup>
в зимних условиях атмосферный воздух	1,292 кг/м <sup>3</sup>
продукты горения	1,3-1,32 кг/м <sup>3</sup>
инертный газ	1,0-1,1 кг/м <sup>3</sup>

В курсовом проектировании величину коэффициента трения можно принимать:

	$\beta$
для металлических труб (чистых)	0,025
для металлических с малой коррозией	0,035
для металлических с сильной коррозией	0,045
кирпичных каналов	0,05

Скорость движения газов по каналу при нормальных условиях определяют по формуле:

$$v_0 = \frac{V_0}{3600 \cdot \frac{n \cdot d^2}{4}}, \text{ м/с} \quad (100)$$

где  $V_0$  количество энергоносителя, проходящего через канал, м<sup>3</sup>/час,  $d$  диаметр канала или его приведенное значение (для прямоугольных каналов), м.

При проектировании печей и сушил рекомендуется принимать следующие скорости газов и воздуха  $v_0$ , м/сек;

для воздухопроводов	8 - 12 .
для надземных дымовых каналов	1,5 - 3,0
для дымовых боронов (подземных)	1-2,5
для газопровода холодного газа	10 - 12
для газопровода горячего газа	2-3

## 2. Потери от местных сопротивлений

При изменении геометрической формы канала происходит изменение скорости потока, его нормы или направления движения, в результате чего на коротком участке канала расходуется значительное количество кинетической энергии.

Местные сопротивления рассчитывают по формуле:

$$h_{\text{сад}} = \zeta \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot r_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right), \text{ н/м}^2 \quad (101)$$

где  $\zeta$  коэффициент местного сопротивления, который можно принимать по приложению 45 [8].

К местным сопротивлениям относятся и сопротивление садки изделий и потери при прохождении через слой сыпучих и кусковых материалов.

Сопротивление садки рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{сад}} = (0,4 \div 0,5) \cdot L_{\text{сад}} \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot r_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right), \text{ н/м}^3 \quad (102)$$

где  $L$  длина садки, м.

Сопротивление слоя сыпучих или кусковых материалов определяют по формуле:

$$h_{\text{сл}} = \beta_{\text{сл}} \cdot \frac{H}{d_{\text{эkv}}} \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot r_0 \cdot \left(1 + \frac{t}{273}\right), \text{ н/м}^3 \quad (103)$$

где  $\beta_{\text{сл}}$  коэффициент сопротивления, зависящий от вида материала и числа  $Re$  рис. 69,[2];

$H$  высота слоя материала, м;

$d_{\text{эkv}}$  средний размер куска, м;

$\rho_0$  плотность газов, кг/м<sup>3</sup>;

$v_0$  скорость газов (при 0<sup>0</sup>) отнесенная к полному сечению, м/сек;

$t$  средняя температура газов, проходящих через слой.



## 2. Потери на геометрическое сопротивление

Геометрическое сопротивление не зависит от скорости движения газов, но зависит от температур газов к окружающей среде. Геометрический напор (самотяга) рассчитывается по формуле:

$$h_{геом} = H_g \cdot \left( \frac{\rho_{в.о.}}{1 + \frac{t_в}{273}} - \frac{\rho_{г.в.}}{1 + \frac{t_г}{273}} \right), \text{ Н/м}^2 \quad (102)$$

где  $H$  высота участка или расстояние по вертикали между входом и выходом теплоносителя,

$\rho_{в.о.}, \rho_{г.в.}$  соответственно плотности наружного воздуха и газа,  $\text{кг/м}^3$ ;

$t_в$  температура наружного воздуха град, принимаемая для местностей с умеренным климатом: летом  $+20^\circ\text{C}$ , зимой  $-10^\circ\text{C}$ ,

$t_г$  - температура газов. (по технологическим данным).

Общее аэродинамическое сопротивление определяется суммой всех сопротивлений, а при выборе вентилятора следует учитывать запас давления примерно до 40% к общей сумме давлений.

$$\sum \Delta h = h_m + h_{сад} + h_{сл} + h_{геом}, \text{ Н/м}^2, \quad (105)$$

## 6. ВЫБОР ВЕНТИЛЯТОРОВ И ДЫМОСОСОВ

Широкое применение в печах и сушилах для подачи теплоносителя и создания циркуляции его в зонах подогрева и охлаждения получили центробежные вентиляторы, часто используемые в качестве дымососов прямого действия. Дымососы используют для подачи теплоносителя температурой выше 300°. Отсос горячих газов (более 300°C) выполняется дымовой трубой без дымососа, если общие потери не превышают 500 - 600 н/м<sup>2</sup>.

В зависимости от создаваемого максимального давления центробежные вентиляторы разделяют на три серии: низкого давления (ВРН) до 1000 н/м<sup>2</sup>, среднего (ВРС) до 3000 н/м<sup>2</sup> и высокого (ВВД) до 1500 н/м<sup>2</sup> (1 н/м<sup>2</sup> = 0,1 кгс/м<sup>2</sup>). Для получения большего давления применяют воздуходувки и экскаустеры.

При выборе вентилятора необходимо назначать максимальный КПД режима его работы, для чего пользуются номограммами характеристик вентиляторов различных давлений рис. 72, 73, 74 [8] и рис 7, 8, 9 [14]. Номограммы устанавливают зависимость между производительностью вентилятора  $V$  м<sup>3</sup>/час, полным давлением  $h_{общ}$ , н/м<sup>2</sup> и КПД при определенном числе оборотов рабочего колеса, температуре воздуха 20°C и плотности воздуха  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. Число оборотов вентилятора при заданных величинах  $V$  м<sup>3</sup>/час и  $h_{общ}$  н/м<sup>2</sup> составляет:

$$n = \frac{A}{N^2}, \text{ об/мин} \quad (106)$$

где  $A$  - условное число оборотов колеса, берется из номограммы,  
 $N^2$  - номер вентилятора.

Порядок выбора номера вентилятора и его к.п.д. следующий. Для заданной производительности  $V$  м<sup>3</sup>/час проводят горизонтальную линию, которая будет пересекать линии разных номеров вентиляторов в нижней части номограммы; далее из точек пересечения от каждого номера по вертикали проводят линии до пересечения с горизонтальной линией заданного давления  $h_{общ}$  н/м<sup>2</sup> в верхней части номограммы; полученные точки в верхней часть номограммы показывают КПД и условное число  $A$ .

Мощность на валу электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$N_{дв} = \frac{V_t \cdot h_{общ}^t}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_g \cdot \eta_n}, \text{ кВт} \quad (107)$$

где  $V_t$  производительность вентилятора при определенной температуре, м<sup>3</sup>/ч;

$h_{общ}^t$  полное давление, создаваемое вентилятором при данной температуре, н/м<sup>2</sup>;

$\eta_n$  - КПД передачи ( $\eta_n = 0,98$  для вентилятора, соединенного с двигателем при помощи эластичной муфты, 0,95 - клиноременной передачи, 0,9 -

плоскоременной).

Вращение колеса вентилятора осуществляется от электродвигателя, соединенного с ним чаще всего с помощью эластичной муфты или через шкив клиноременной передачей.

$\eta_v$  КПД вентилятора (по номограмме).

Установочная мощность электродвигателя с учетом коэффициента запаса определяется по формуле:

$$N_{уст} = k \cdot N_{дв}, \text{ кВт} \quad (108)$$

где  $N$  коэффициент запаса мощности электродвигателя на пусковой момент, который принимается в зависимости от мощности на валу  $N_{дв}$  кВт в следующих пределах.

Таблица 9.

Мощность двигателя на валу, кВт	k
до 0,5	1,5
0,5 - 1,0	1,3
1,0,-2,0	1,2
2,0 - 5,0	1,15
свыше 5	1,1

Характеристики найденного типа вентилятора или дымососа уточняются в соответствии с приложениями 46,47 [8], где представлены характеристики промышленных типов вентиляторов.

Электродвигатели выбираются по каталогу преимущественно короткозамкнутые, асинхронные с запасом мощности не менее 15 %.

При выборе вентиляторов следует учитывать, что номограммы составлены для определенного числа оборотов рабочего колеса, при температуре воздуха +20°C и его плотности  $\rho_{20} = 1,2 \text{ кг/м}^3$ . Изменение производительности  $V_t$ , создаваемого давления  $h_t$  и мощности вентилятора  $N_t$  связано с изменением числа оборотов вентилятора  $n$ , диаметра рабочего колеса  $D$  и плотности  $\rho$  газовой смеси и выражается следующими зависимостями:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^3, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (109)$$

$$h_2 = h_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \cdot \frac{r_2}{r_1}, \text{ н/м}^2 \quad (110)$$

$$N_2 = N_1 \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \cdot \frac{r_2}{r_1}, \text{ кВт} \quad (111)$$

С изменением температуры воздуха ( $20^\circ > t > 20^\circ\text{C}$ ) давление, создаваемое вентилятором, будет изменяться следующим образом:

$$h_t = h_{20} \cdot \frac{r_t}{1,2}, \text{ н/м}^2 \quad (112)$$

где  $h_t$  - действительное давление при данной плотности воздуха,  $\text{н/м}^2$ ,

$\rho_t$  - плотность газов при данной температуре,  $\text{кг/м}^3$ ,

$h_{20}$  - давление, создаваемое вентилятором при плотности воздуха  $\rho_{\text{воз}} = 1,2$   $\text{кг/м}^3$ .

При подаче горячего воздуха или газа необходимо производительность вентилятора брать при действительной температуре газа, а создаваемое давление пересчитывать по формуле:

$$h_p = h_t \cdot \frac{1,2}{r_t}, \text{ н/м}^3 \quad (113)$$

Величина  $h_p$  служит для подбора вентилятора по номограммам. Зависимость плотности воздуха от его температуры можно выразить формулой:

$$r_t = \frac{r_{20}}{1 + \frac{t}{273}}, \text{ кг/м}^3 \quad (114)$$

По формулам (109), (110), (111) легко рассчитать необходимые параметры работы вентилятора при изменении характеристик сети. При этом коэффициент запаса по производительности принимается равным 1,1, а по напору  $h = 1,2$ .

Мощность на валу вентилятора можно рассчитать также по формуле:

$$N_B = \frac{V_{\text{сек}} \cdot h_{\text{общ}}}{1000 \cdot \eta_e}, \text{ кВт} \quad (115)$$

где  $V_{\text{сек}}$  - секундный расход газа,  $\text{м}^3/\text{сек}$ ,

$h_{\text{общ}}$  - полное давление,  $\text{н/м}$ ,

$\eta_e$  - КПД вентилятора (по номограмме). Установленная мощность электродвигателя может быть проверена с помощью формулы:

$$N_{\text{уст}} = h_n \cdot h_p \cdot N_B, \text{ кВт} \quad (116)$$

где  $\eta_n$  - КПД, подшипника  $\eta_n=0,97-0,98$ ,  $\eta_p$  - ход редуктора,  $\eta_p= 0,95$ .

Если потребный для теплового агрегата воздух или газ превышает производительность одного вентилятора, то устанавливают параллельно два или несколько вентиляторов. При необходимости увеличения давления в сети при неизменной производительности применяют последовательное соединение двух или нескольких вентиляторов.

Если два вентилятора имеют разные характеристики, то их совместная работа или параллельная, или последовательная может привести к ухудшению показателей одиночно работающего вентилятора.

Если по условиям работы тепловой установки для отвода теплоносителя необходимо выбрать дымовую трубу, то её расчет можно произвести, пользуясь литературой 1,4.

### Литература

1. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. – М.; «Стройиздат» 1983.
2. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии. – Л.; «Химия» 1991.
3. Павлов К.Р., Романков П.Г. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.; «Химия» 1987.
4. Садуакасов М.С., Колесникова И.В. Проектирование сушильных установок предприятий строительных материалов и изделий. – Алматы КазГАСА 1997.
5. Ицкович С.М., Чумаков Л.Л., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона. – М.; «Высшая школа» 1991.
6. Баренбойм А.М. и др. Тепловой расчеты печей и сушил силикатной промышленности. - М.; «Стройиздат», 1964
7. Бельский В.И., Сергеев Б.В. Промышленные печи и трубы. - М.; «Стройиздат», 1974
8. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. - М.; "Высшая школа", 1968
9. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередачи. – М.; «Высшая школа» 1988.
10. Скобло А.И., Трегубова И.А. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей промышленности. – М.; «Химия» 1982.
11. Вознесенский А.А. Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий. - М.; «Стройиздат», 1964.
12. Аппараты с вращающимися барабанами общего назначения. Основные узлы и детали. Типы и размеры. - М.; «Восстройиздат», 1964
13. Бахталовский И.В., Барыбин В.П., Гаврилова Н.С. Механическое оборудование керамических заводов. – М.; «Машиностроение» 1982.
14. Никифорова Н.М. Основы проектирования тепловых установок при производстве строительных материалов. - М.; «Высшая школа» 1974.

## Приложение 1

### Начальная ( $\omega_H$ ) и конечная ( $\omega_K$ ) влажности материала при сушке

Наименование материала	$\omega_H$ %	$\omega_K$ %
Керамический кирпич	18-20	5-6
Канализационные трубы	15-17	1-3
Шамотные изделия пластического формования	17-18	5-6
Шамотные изделия полусухого прессования	9-10	2-3
Плитки облицовочные	8-9	0,5-0,9
Керамические блоки	18-19	5-6
Глина	20-35	4-6
Известняк	3-8	0,2-0,4

## Приложение 2

### Значения суммарного коэффициента теплообмена от температуры поверхности установки

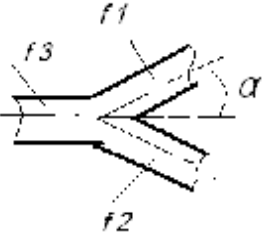
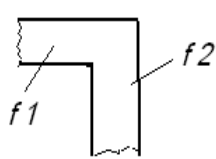
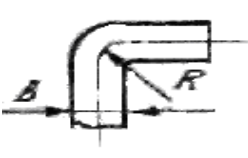



Температура внешней поверхности стенки, °С	Суммарный коэффициент теплообмена, Вт/м <sup>2</sup> °С	
	для вертикальных и горизонтальных стенок керамических печей	для цилиндрических стенок вращающихся печей
10	8,6	9,78
25	10,0	10,45
40	11,16	10,69
60	11,63	11,63
50	12,57	32
100	14,41	13,26
130	16,0	15,12
160	18,5	16,63
200	20,23	19,42
240	22,44	22,1
280	24,88	25,0
320	28,0	28,26
350	30,35	-
400	34,65	-

### Приложение 3

#### Техническая характеристика вагонеток для туннельных печей

Показатель	Типы вагонеток				
	Полочная для туннеля	Полочная для туннеля	Однополочная сушка	Полочная	Монорельсовая
	Н-1,7, В-1,1	Н-1,4, В-1,18	штабелем Н-1,4,В-1,18	Н-1,75, В-1,2	4-1,9, В-1,3
Высушиваемое изделие	Кирпич	Кирпич	Кирпич	Девятищелевые камни	Канализационные трубы
Емкость	252 шт.	240 шт.	283 шт.	168 шт.	450-500 кг
Колея, мм	750	750	750	750	-
Размеры, мм;					
длина	1300	1250	1250	1950	1600
ширина	1010	1100	1112	1000	1100
высота	1525	1240	880	1500	1100
Количество полок	7	6	2 штабеля	5	Однорядная садка
Расстояние между полками, мм	200	187	5 8 0		
Масса, кг	210	195,5	244		

Коэффициенты местных сопротивлений

Наименование сопротивления	Эскиз	Для каких условий	Коэффициент местного сопротивления		
1	2	3	4		
Разветвление на два рукава		$\left. \begin{matrix} 1,0 \\ 1,2 \\ 1,6 \\ 2,0 \end{matrix} \right\} f_1 + \frac{f_3}{f_2}$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$	$\alpha=90^\circ$
Резкий поворот канала при 90° с изменением сечения		$\left. \begin{matrix} 0,1 \\ 0,6 \\ 0,8 \\ 2,0 \end{matrix} \right\} \frac{f_2}{f_1}$			2,30 2,0 0,5 1,0
Плавный поворот под, 90°		$\left. \begin{matrix} 0,5 \\ 1,0 \\ 2,0 \\ 5,0 \end{matrix} \right\} \frac{R}{B}$			1,2 0,19 0,11 0,08
Поворот канала под разными углами без изменения сечения		$\left. \begin{matrix} 30^\circ \\ 60^\circ \\ 90^\circ \\ 120^\circ \\ 180^\circ \end{matrix} \right\} \alpha$			0,75 1,25 1,50 1,75 2,15
Вход из узкого сечения в широкое		$\left. \begin{matrix} 0,1 \\ 0,5 \\ 0,75 \\ 1,0 \end{matrix} \right\} \frac{f_1}{f_2}$			0,8 0,25 0,01 0,0
Вход из широкого сечения в узкое		$\left. \begin{matrix} 0,1 \\ 0,5 \\ 0,75 \\ 1,0 \end{matrix} \right\} \frac{f_1}{f_2}$			0,47 0,28 0,15 0,0



## Приложение 5

### Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении

t, °C	$\rho_1$ кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг°C)	$\lambda \cdot 10^2$ , кДж/(мчс)	$\mu \cdot 10^6$ , кг с м <sup>2</sup>	$10^6$ , м <sup>2</sup> /с
0	4,293	1,00	8,78	1,75	13,28
10	1,247	1,00	9,03	1,80	14,16
20	1,205	1,00	9,32	1,85	15,06
30	1,165	1,00	9,61	1,90	16,00
40	1,128	1,00	9,91	1,95	16,96
50	1,093	1,00	10,15	2,00	17,95
60	1,060	1,00	10,41	2,05	18,97
70	1,029	1,01	10,66	2,10	20,02
80	1,000	1,01	10,95	2,15	21,09
90	0,972	1,01	11,24	2,19	22,10
100	0,946	1,01	11,54	2,23	23,13
130	0,898	1,01	12,20	2,33	25,45
140	0,854	1,01	12,54	2,42	27,80
160	0,815	1,02	13,08	2,50	30,09
180	0,754	1,02	13,17	2,52	33,49
200	0,722	1,03	идр	2,60	36,03
250	0,653	1,04	14,21	2,79	42,75

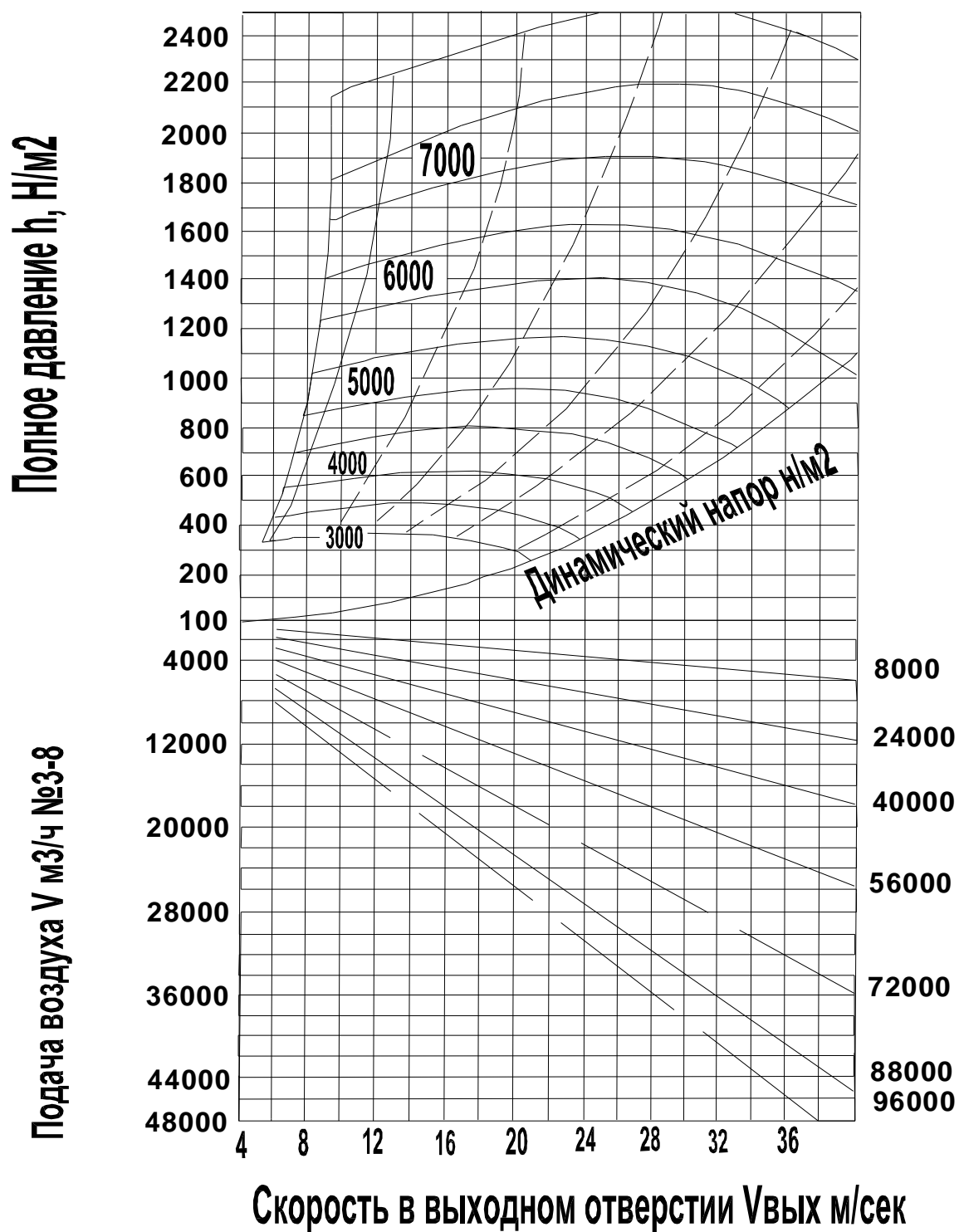
## Приложение 6

### Параметры насыщенного водяного пара

t	P <sub>н</sub>	v'	v'',	P <sub>п.</sub>	j <sub>в</sub>	j <sub>н</sub>	r
°C	МПа	м/кг	м <sup>3</sup> /кг	кг/м <sup>3</sup>	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг
0	0,0006	0,001000	206,3	0,0048	0,04	2501	2501
10	0,0012	0,001000	106,42	0,0093	41,99	2519	2477
20	0,0023	0,001001	57,84.	0,0172	83,86	2538	2454
30	0,0043	0,001004	32,93	0,0303	125,66	2556	2430
40	0,0075	0,001007	19,55	0,0511	167,45	2574	2407
50	0,0125	0,001012	12,05	0,0830	209,26	2592	2383
60	0,0203	0,001017	7,678	0,1302	251,09	2610	2358
70	0,0317	0,001022	5,045	0,1982	292,97	2627	2334
80	0,0482	0,001029	3,409	0,2933	334,92	2644	2309
90	0,0714	0,001035	2,361	0,4235	376,94	2660	2283
100	0,1033	0,001043	1,673	0,5977	419,06	2676	2257
110	0,1416	0,001051	0,210	0,8263	461,32	2692	2231
120	0,2024	0,001060	0,8917	1,112	461,7	2708,4	2246,7
130	0,2754	0,001060	0,6683	1,496	546,8	2722,7	2175,9
140	0,3685	0,001079	0,5087	1,966	589,5	2736,1	2146,6
150	0,4854	0,001090	0,3926	2,547	632,7	2748,6	2115,9
160	0,6302	0,001102	0,3068	3,259	675,8	2759,9	2084,1
170	0,8076	0,001114	0,2426	4,122	719,8	2770,8	2051,0
180	1,0225	0,001127	0,1939	5,157	763,8	2780,0	2016,2
190	1.2800	0,001141	0,1564	6,395	808,2	2788,4	1980,2
200	1,5857	0,001156	0;1272	7,863	853,1	2795,1	1942,0

## Приложение 7

Номограмма для подбора центробежных вентиляторов:  
 среднего давления серии ВРС (а); высокого давления ВВД (б);  
 низкого давления серии ВРН (с)



Даулет Турысович Сартаев  
Анара Мырзакуловна Байсариева

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ  
И СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРЕДПРИЯТИЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Редактор Есимханова А.Е.

Сводный план 2007-2008 уч. года, поз. № 48  
Формат 60×84 1/16. Бумага типография. Ризограф.  
Усл.печ.л 3,3. Уч.- изд.л. 3,5 Тираж 50 экз.  
Заказ №  
Цена договорная

Издание Казахской головной архитектурно-строительной академии  
Издательский дом «Строительство и архитектура»  
050043, г.Алматы, ул. Рыскулова, 28