

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

«Утверждаю»

Декан ХТФ

_____/В.М. Погребенков/

« ____ » _____ 2009 г.

Теплотехнические расчеты

Методические указания

к самостоятельной работе и курсовому проектированию
по дисциплинам «Теплотехника» и «Тепловые процессы и агрегаты в
технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»
для студентов очной и заочной формы обучения направления
240100 «Химическая технология и биотехнология» и
специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких
неметаллических и силикатных материалов»

Томск 2009

УДК 666.965.04(075.8)
Г13

Методические указания к самостоятельной работе и курсовому проектированию по дисциплинам «Теплотехника» и «Тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» для студентов очной и заочной формы обучения направления 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов».- Томск: Изд. ТПУ, 2009. – 44 с.

Составители: к.х.н., доцент Гурина В.Н.
к.т.н., асс. Ревва И.Б.

Рецензент: к.т.н., доцент Смирнская В.Н.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию
методическим семинаром кафедры технологии силикатов,
Протокол № ____ от _____ 2009 г.

Зав. кафедрой ТСН, проф., д.т.н.

В.И. Верещагин

Введение

Базовая теплотехническая подготовка студента осуществляется в процессе изучения общепрофессиональной и специальной дисциплин в курсах «Теплотехника» и «Тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов», а также смежных дисциплин, например, курса «Процессы и аппараты химической технологии».

В результате изучения дисциплины «Теплотехника» студенты получают представление о процессах горения топлива, теплопередаче и аэродинамике печных газов как о единой системе, характеризующей работу печных установок.

Тепловые установки силикатной промышленности эксплуатируются при высоких температурах. Физические свойства материалов и газов при воздействии высоких температур изменяются, а в сырьевых материалах протекают сложные физико-химические процессы. Это необходимо учитывать при выполнении теплотехнических расчетов высокотемпературных установок.

Изучая специальную дисциплину «Тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов», студент выполняет курсовой проект тепловой установки силикатной промышленности.

Чтобы выбрать оптимальный вариант конструкции и организации работы проектируемой установки, студент должен, используя теоретические знания, полученные при изучении дисциплин, показать владение методиками теплотехнических расчетов: расчета горения топлива, составления теплового баланса печной установки, аэродинамического расчета печей и сушил. Решаются сложные задачи расчета теплопередачи, происходящей в установках между газами, материалами и элементами конструкций.

Необходимо также уметь выполнять расчеты технико-экономических показателей тепловых установок и оценивать полученные результаты.

В методических указаниях приводятся краткие теоретические положения, которые используются при решении конкретных задач, справочные данные и варианты индивидуальных заданий.

1 Аэродинамика печей и сушил

Аэродинамические расчеты выполняются с целью рациональной организации движения газов и подбора тяго-дутьевых устройств, обеспечивающих движение газов в тепловых установках.

1.1 Основные понятия и зависимости

Нормальные условия: это температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление 760 мм.рт.ст. (1033 Па).

Действительные условия – это те параметры (температура, давление), которые имеют место при работе установки на рассматриваемом участке. Большинство установок силикатной промышленности работают под давлением, мало отличающимся от атмосферного, поэтому при выполнении расчетов учитывают, как правило, только влияние температуры на изменение параметров газа.

Расход газа – это объем газа, проходящий через площадь поперечного сечения на рассматриваемом участке в 1 секунду:

$$\begin{aligned} V_0, \text{ нм}^3/\text{с}, & \text{ (нормальные условия)} \\ V_t, \text{ м}^3/\text{с}, & \text{ (действительные условия)} \end{aligned}$$

Зависимость объема газа от температуры (закон Гей-Люссака):

$$V_t = V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \text{ м}^3 \quad (1.1)$$

где α - коэффициент объемного расширения, $\alpha = 1/273$.

Скорость движения газа – это отношение расхода газа к площади поперечного сечения канала, м/с:

$$\begin{aligned} \text{нормальные условия:} \quad W_0 &= \frac{V_0}{S}, \text{ нм/с}, \\ \text{действительные условия:} \quad W_t &= \frac{V_t}{S}, \text{ м/с}, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где S – площадь поперечного сечения, м^2 .

Плотность газа. Это масса газа в единице его объема.

$$\begin{aligned} \rho_0, \text{ кг/нм}^3, & \text{ (нормальные условия)} \\ \rho_t &= \frac{\rho_0}{1 + \alpha \cdot t}, \text{ кг/м}^3, \text{ (действительные условия)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Для определения плотности газовых смесей пользуются принципом аддитивности:

$$\rho_{см} = \sum \rho_i \cdot r_i, \text{ кг/м}^3 \quad (1.4)$$

где ρ_i - плотность компонента (одного газа) в смеси, кг/м³ или кг/нм³;

r_i – объемная доля компонента газа в смеси

$$r_i = \frac{K_i}{100} \quad (1.5)$$

где K_i - процентное содержание компонента в смеси, % объемные.

Плотность любого газа при нормальных условиях рассчитывают из соотношения:

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4}, \text{ кг/нм}^3 \quad (1.6)$$

где M - молекулярная масса газа, кг/кмоль;

22,4 – удельный молярный объём любого газа, нм³/кмоль.

Скоростной (динамический) напор газа. Рассчитывается из соотношения

$$P_{ск} = \left(\frac{W_t^2}{2} \right) \cdot \rho_t = \left(\frac{W_0^2}{2} \right) \cdot \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \text{ Па} \quad (1.7)$$

Геометрический напор газа. Возникает в вертикальных каналах, в которых находятся нагретые (легкие) газы.

$$P_{геом} = H \cdot (\rho_t^{воз} - \rho_t^{газ}) \cdot 9,8, \text{ Па} \quad (1.8)$$

где H - высота столба газа от уровня, принятого за нулевой, м;

$\rho_t^{воз}$, $\rho_t^{газ}$ – соответственно, плотность окружающего воздуха и газа при их средней температуре, кг/м³;

9,8 – ускорение свободного падения, м/с².

Статический напор газа – это разность между абсолютным давлением газа и атмосферным давлением

$$P_{ст} = P_{абс.} - P_{атм}, \text{ Па} \quad (1.9)$$

где $P_{абс.}$ – абсолютное давление газа, Па;

$P_{атм}$ – барометрическое давление воздуха, Па.

1.2 Расчет сопротивлений движению газа

При движении реального газа по каналам возникают различные потери напора: от трения о стенки ограждений, от местных сопротивлений, от необходимости преодолевать геометрический напор (когда легкие газы движутся в вертикальном направлении вниз). Сопротивления трения и местные сопротивления пропорциональны скоростному напору:

- от трения:

$$P_{тр} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot P_{ск}, \text{ Па} \quad (1.10)$$

где λ - коэффициент трения;

L - длина канала, м;

D - диаметр канала, м. Для каналов некруглого сечения это приведенный диаметр:

$$D = \frac{4S}{\Pi}, \text{ м} \quad (1.11)$$

где S - площадь сечения канала, м²;

Π - смоченный периметр, м.

Значение коэффициента трения зависит от режима движения, шероховатости стенок газопровода. При ламинарном движении

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (1.12)$$

При турбулентном режиме движения используется большое количество эмпирических формул и графических зависимостей [1]. Здесь они не приводятся.

- от местных сопротивлений:

Местные сопротивления возникают при изменении сечения каналов, поворотах, слиянии и разделении потоков, наличии различного рода препятствий, задвижек, клапанов:

$$P_{мест} = \zeta_{м} \cdot P_{ск}, \text{ Па} \quad (1.13)$$

где $\zeta_{м}$ - коэффициент местного сопротивления.

В приложении 1 приводится таблица некоторых коэффициентов местных сопротивлений.

Подбор центробежных вентиляторов

Центробежные вентиляторы используются для нагнетания или отсасывания газов. Исходные данные для подбора вентилятора:

- часовой расход газа при действительных условиях, м³/час;

- требуемое давление (разрежение), которое должен создавать вентилятор, Па.

Номограммы для подбора вентиляторов составлены для воздуха при температуре 25 °С. Поэтому давление, которое должен создавать вентилятор при транспорте газов с другой температурой, пересчитывается по формуле:

$$P_{\text{вент}} = P \cdot \frac{1,2}{\rho_t}, \text{ Па} \quad (1.14)$$

где $P_{\text{вент}}$ - давление, ан которое ведут подбор вентилятора, Па;

P - заданное (расчетное) давление, Па;

1,2 - плотность воздуха при 25 °С, кг/м³.

Пример: Какое давление должен создавать вентилятор при транспорте газов с температурой 200 °С, если заданное (расчетное) давление составляет 600 Па, $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$.

Определяем плотность газов при заданной температуре:

$$\rho_t = \frac{1,3}{1 + \frac{200}{273}} = 0,75 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Тогда } P_{\text{вент}} = 600 \cdot \frac{1,2}{1,75} = 960 \text{ Па}.$$

Т.е. вентилятор подбирают на давление 960 Па.

На рисунках 1, 2, 3 приведены номограммы для подбора вентиляторов. Следует выбирать такой вентилятор, который работает при требуемых условиях подачи и создаваемого давления в режиме максимального КПД.

В нижней части номограммы по вертикальной оси отложена величина действительного расхода (м³/час) – это производительность вентилятора. Наклонные линии на номограмме соответствуют номерам вентиляторов – это диаметр рабочего колеса в дециметрах. Правая шкала – для номеров, изображенных штриховыми линиями.

В верхней части номограммы находится шкала давлений и расположены линии КПД и условного числа оборотов (А).

Последовательность работы:

1) проводят горизонтальную линию, отвечающую требуемому расходу, и на ней отмечают все точки пересечения с линиями номеров вентиляторов.

2) в верхней части проводится горизонталь, соответствующая требуемому действительному давлению (разрежению).

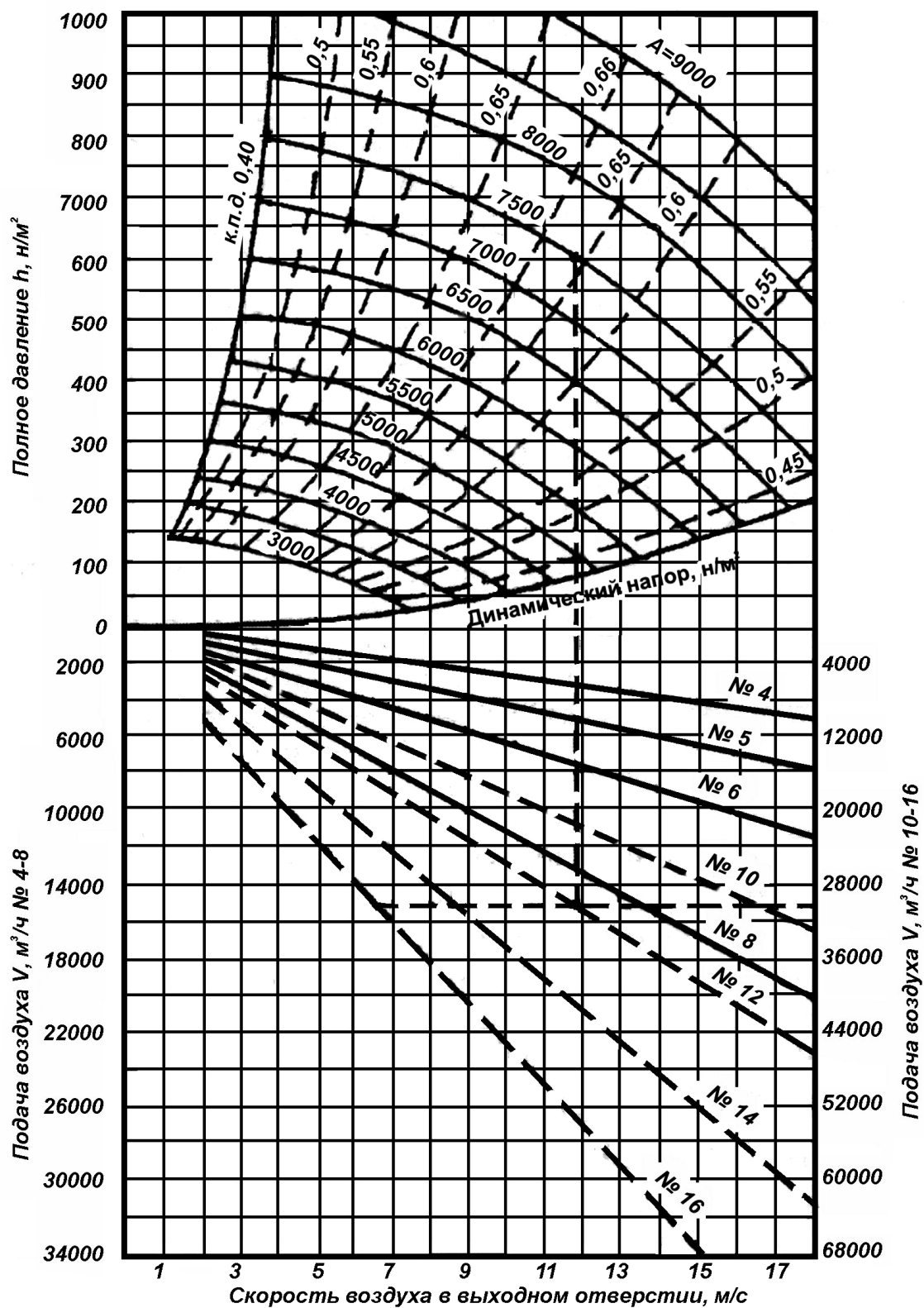


Рисунок 1 – Номограмма для подбора вентиляторов низкого давления серии ВРН

$N_{\text{в}}$ – номер вентилятора

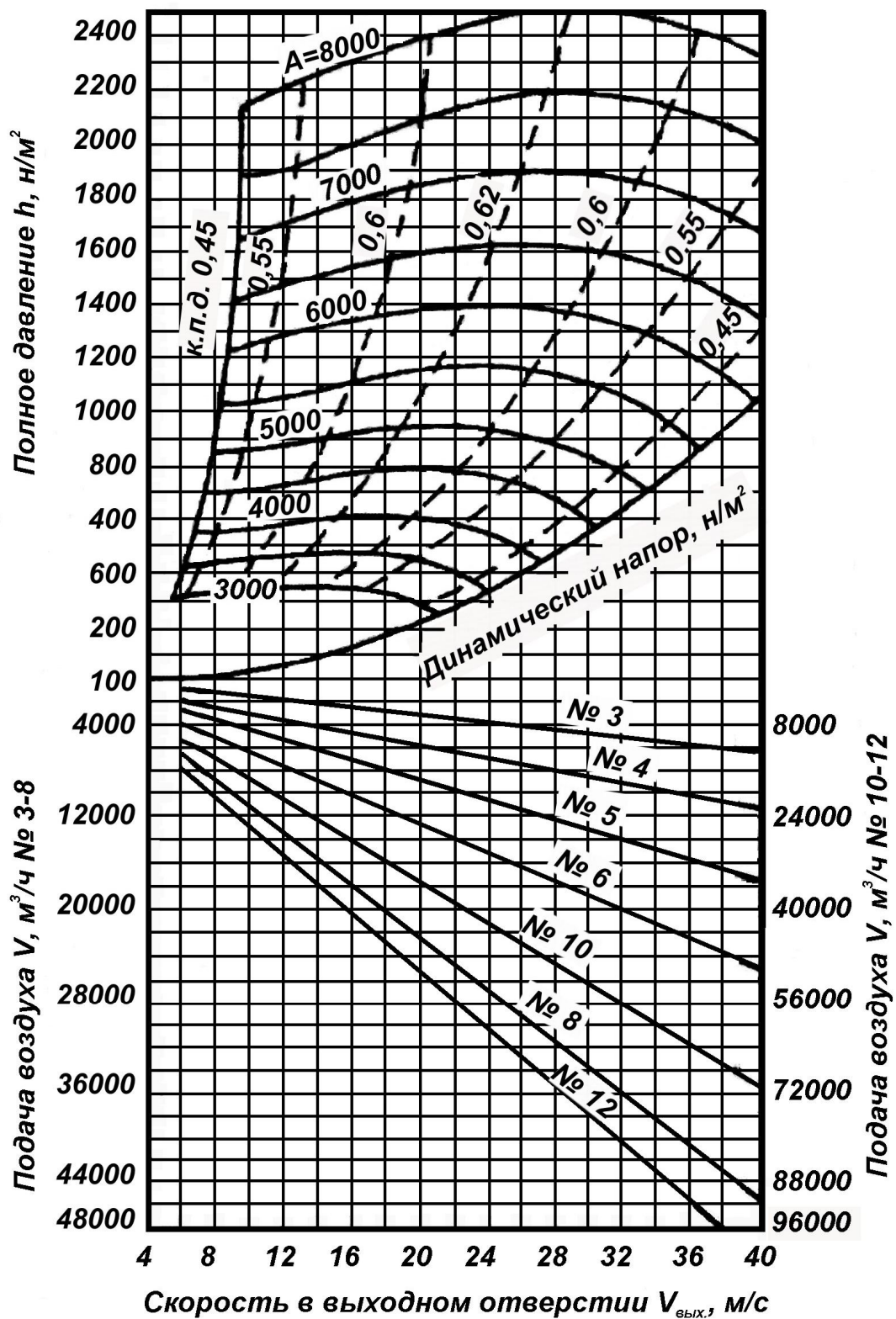


Рисунок 2 – Номограмма для подбора вентиляторов среднего давления серии ВРС

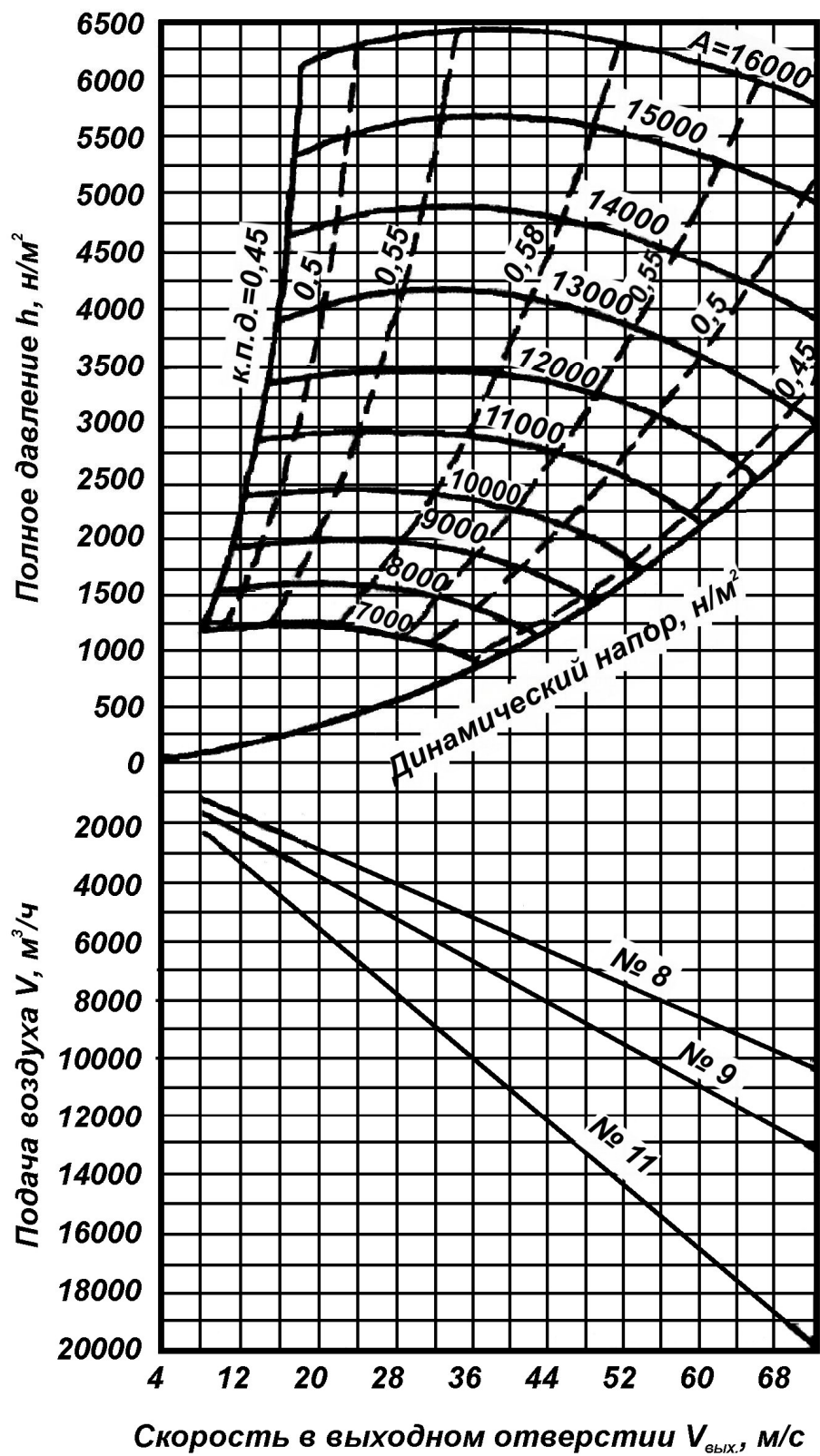


Рисунок 3 – Номограмма для подбора вентиляторов высокого давления серии ВВД

3) из точек пересечения линий расхода с линиями номеров вентиляторов восстанавливаются перпендикуляры до горизонтали давления.

4) из вентиляторов, способных обеспечить работу в требуемом режиме, выбирается тот вентилятор, который имеет максимальный КПД. Линии КПД пересекаются линиями, показывающими условное число оборотов (безразмерная характеристика вентилятора - A). Устанавливают, с каким условным числом оборотов будет работать вентилятор. Действительное число оборотов вентилятора:

$$n = \frac{A}{N_{\text{об}}}, \text{ об/мин} \quad (1.15)$$

где A – условное число оборотов;

Мощность, потребляемая вентилятором:

$$N_{\text{дв}} = \frac{P \cdot V \cdot 10^{-3}}{3600 \cdot K_{\text{в}} \cdot K_{\text{пер}}}, \text{ кВт} \quad (1.16)$$

где P - действительное давление, создаваемое вентилятором, Па;

V - расход газа, м³/час;

$K_{\text{в}}$, $K_{\text{пер}}$ - соответственно КПД вентилятора и передачи. При передаче с помощью эластичной муфты $K_{\text{пер}}$ - 0,98.

Установочная мощность вентилятора с учетом коэффициента запаса:

$$N_{\text{уст}} = K \cdot N_{\text{дв}}, \text{ кВт} \quad (1.17)$$

где K - коэффициент запаса на пусковой момент.

Он принимается в зависимости от потребляемой мощности. Рекомендуемые значения для K :

$N_{\text{дв}}$	K
до 0,5 кВт	1,5
до 1 кВт	1,3
до 2 кВт	1,2
от 2 до 5 кВт	1,15
и свыше 5 кВт	1,1

Таким образом, результат работы должен содержать следующие сведения:

Серия	Номер вентилятора	Производи- тельность, м ³ /ч	Создаваемый напор, Па	Число оборотов, об/мин	Потребляемая мощность, кВт

1.4 Расчет дымовых труб

Дымовые трубы как источник тяги должны создавать у основания разрежение, равное по величине геометрическому напору, возникающему в трубе. За счет этого разрежения будут преодолеваются сопротивления системы. Высота трубы подсчитывается из уравнения геометрического напора, см. формулу 1.8:

$$H = \frac{K \cdot P_{\text{треб}}}{9,8 \cdot (\rho_t^{\text{воз}} - \rho_t^{\text{газ}})}, \text{ м} \quad (1.18)$$

Коэффициентом запаса ($K = 1,4$) учитываются потери напора в самой трубе (на трение и на преодоление местных сопротивлений при выходе газов из трубы). Для расчета плотности воздуха принимается максимальная летняя температура. Плотность газов в трубе рассчитывается при их ожидаемой средней температуре.

Для определения средней температуры газов задаются ориентировочно высотой трубы (рисунок 4). Температура газов у основания трубы известна, а для подсчета температуры на выходе газов учитывают падение температуры по высоте. У кирпичных труб падение температуры принимают в пределах 1 – 1,5 градуса на метр высоты (град/м), а у металлических 2 – 3 град/м.

Общее снижение температуры:

$$\Delta t = V \cdot H_{\text{ориен}}, ^\circ\text{C} \quad (1.19)$$

где V - падение температуры на один погонный метр высоты, град/м

Значит:

$$t_{\text{верх}} = t_{\text{осн}} - \Delta t, ^\circ\text{C} \quad (1.20)$$

и

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{осн}} + t_{\text{верх}}}{2} \quad (1.21)$$

При этой температуре и производится расчет плотности газов в трубе.

Для определения диаметра трубы задаются скоростью газов в устье, которая, чтобы трубу не задувало при ветре, принимается равной от 4 до 6 м/с. Таким образом, диаметр устья определяется из выражения:

$$F_{\text{устья}} = \frac{3,14 \cdot D_y^2}{4} = \frac{V_{0\text{дым}}}{W_{0\text{устья}}}, \text{ м}^2 \quad (1.22)$$

где $V_{0\text{дым}}$ - объем дымовых газов, м³/с;

$W_{0\text{устья}}$ - скорость газов на выходе из трубы, м/с.

Диаметр кирпичной трубы из соображений устойчивости должен быть не менее 0,8 м. Диаметр основания принимается равным $1,5 \cdot D_y$.

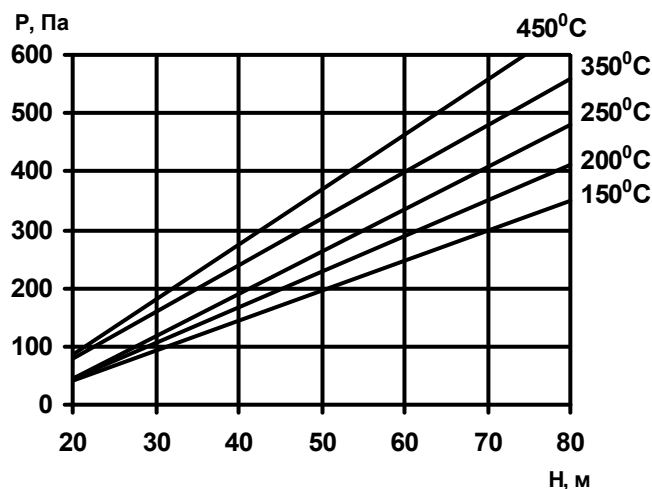


Рисунок 4 – Разрежение, создаваемое дымовой трубой, в зависимости от высоты и средней температуры газов в ней

1.5 Задачи по разделу «Аэродинамика»

Состав газов и исходные параметры, которые используются при решении задач, принимаются согласно таблице 1. Для решения последующих задач используются рассчитанные значения параметров газа.

Задача 1. Построить кривую изменения плотности дымовых газов в зависимости от температуры. Интервал температур от 0 до 1000 °С. Задан состав газов, % объемные.

Задача 2. Определить часовой расход газов при действительных и нормальных условиях. Газы проходят через прямоугольное ($B \times H$) или круглое (D) сечение. Задана температура газов и создаваемый скоростной напор.

Задача 3. Построить график зависимости объема газов от температуры.

Задача 4. Определить потери напора на трение. Температура газов по сравнению с исходными данными (приведенными в таблице 2.), увеличилась на 100 градусов, а расход газов (при нормальных условиях) не изменился.

Задача 5. Для найденного в задаче 2 расхода газов определить при температуре 325 °С потери напора на преодоление местных сопротивлений: 1 – внезапное сужения канала в 2 раза; 2. – плавный поворот канала на 90 градусов.

Задача 6. Определить потери напора на преодоление местного сопротивления, возникающего в месте установки шибер в канале. Степень открытия шибер принять 30 %. Температура газов 250 °С.

Задача 7. Определить потери напора в дымовоздушном борове регенеративной ванной печи, возникающие в месте установки переводного клапана (тройник собирающий). Скорость газов в борове 1,4 м/с. Отношение приведенных диаметров каналов $d_b/d_a = 0,35$.

Задача 8. Определить высоту и диаметр трубы для удаления дымовых газов. Температура окружающего воздуха 35 °С. Требуемое разрежение у основания трубы 250 Па.

Задача 9. Подобрать центробежный вентилятор для удаления дымовых газов из печной системы. Расчетное сопротивление системы составляет 1500 Па. Если температура газов (по заданию) превышает 300 °С, то задачу решать, принимая температуру газов на входе в вентилятор, равной 300 °С.

Таблица 1 – Варианты заданий для решения задач по аэродинамике

Номер задания	Состав газов, % по объёму				Температура, °С	Скоростной напор, Па	Размеры канала, м		Коэффициент трения
	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂			B x H (Д)	L	
1	11,8	10,8	3,3	74,1	200	10,66	1,5x1	20	0,05
2	14,2	7,7	3,3	74,8	250	2,19	1,13	15	0,035
3	8,01	17,2	3,2	71,6	250	2,21	1,2x1	15	0,05
4	9,2	15,2	2,8	72,8	300	3,41	1,2x1	20	0,05
5	9,5	14,8	2,9	72,8	350	4,31	1,3x1	25	0,05
6	10,11	14,6	3,0	72,3	100	4,48	1,5x1	30	0,05
7	10,3	14,4	3,1	72,2	450	4,63	1,7x1	35	0,05
8	10,8	12,2	3,2	74,8	500	5,37	1,77	40	0,035
9	11,2	12,5	3,3	73,0	600	4,66	1,77	50	0,035
10	11,5	12,8	3,4	72,3	500	6,56	1,77	45	0,035
11	11,7	12,0	5,5	70,8	550	3,37	1,78	40	0,035
12	11,7	13,0	2,5	72,8	450	5,29	1,77	35	0,035
13	12,0	14,2	2,6	71,2	400	9,30	1,5x1	30	0,05
14	12,2	14,5	2,7	70,6	350	5,64	1,77	25	0,035
15	12,5	14,7	2,8	70,0	300	10,68	1,5x1	20	0,05
16	12,7	10,2	2,9	74,2	250	6,28	1,77	15	0,035
17	12,8	9,1	3,0	75,1	200	6,15	1,77	10	0,37
18	12,9	9,4	3,1	74,6	150	11,22	1,5x1	5	0,05
19	13,3	9,8	3,2	74,7	200	7,90	1,78	10	0,032
20	13,5	9,9	3,3	73,3	400	12,20	1,2x1	23	0,06

2 Теплотехнические расчеты

Теплотехнические расчеты выполняются с целью определения расхода топлива и эффективности работы тепловых агрегатов.

2.1 Общие положения

Тепловые расчеты непрерывно действующих печей чаще всего выполняют на единицу времени работы – секунду. Тогда данные расчета имеют размерность кДж/с, т.е. кВт. Можно выполнять тепловые расчеты и на час работы агрегата (используют при расчете сушил) – кДж/ч - или на единицу массы произведенного продукта (кДж/кг). Расчеты выполняют относительно нормальных условий.

Расход топлива рассчитывается в результате решения **уравнения теплового баланса установки:**

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{рас}} \quad (2.1)$$

Тепло, выделяемое при работе пламенной печи (**приход**), складывается из следующих статей:

1. - тепло, выделенное при горении топлива, $Q_{\text{гор.}}$;
2. - тепло, внесенное воздухом, идущим на горение (в случае его подогрева), $Q_{\text{физ. воз.}}$;
3. - физическое тепло, внесенное топливом (учитывается в случае подогрева топлива), $Q_{\text{физ. топл.}}$;
4. - физическое тепло сырьевых материалов (можно учитывать в расходной части), $Q_{\text{ф. сыр.}}$.

Расход складывается из того тепла, которое израсходовано на протекание технологических процессов (полезно использованное), и тепла, потерянного в окружающее пространство. Полезно используемое тепло складывается из следующих статей расхода:

1. - тепло, пошедшее на нагрев материала, $Q_{\text{м.}}$;
2. - тепло, израсходованное на испарение влаги и нагрев полученных паров, $Q_{\text{вл.}}$;
3. - тепло, затраченное на осуществление физико – химических процессов в материале, $Q_{\text{хим.}}$.

В окружающее пространство тепло теряется по следующим статьям:

4. - с покидающими печь дымовыми газами, $Q_{\text{дым.}}$;
5. - за счет теплопроводности через ограждения печи, $Q_{\text{огр.}}$;
6. - излучением через открытые отверстия, $Q_{\text{изл.}}$;
7. - учитываются также потери тепла с газами, проходящими через неплотности рабочего пространства печи (окна, щели) $Q_{\text{выб.}}$.

В зависимости от назначения печи, её конструктивных особенностей могут появляться дополнительные статьи расхода тепла, например, тепло на нагрев транспортирующих устройств - в туннельных печах.

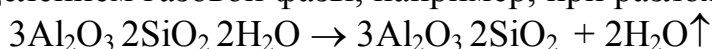
Для сравнения эффективности работы отдельных печей между собой и сопоставления расчетных данных с практическими технико-экономическими показателями печей однотипных конструкций определяют технико-экономические показатели работы печи: коэффициент полезного действия, удельный расход тепла, удельный расход условного топлива.

2.2 Методика выполнения расчетов

2.2.1 Определение расхода тепла на нагрев материалов

$$Q_m = P c_{cp} (t_{кон} - t_{нач}), \text{ кВт} \quad (2.2)$$

где P - производительность агрегата по продукту, кг/с. Если в процессе тепловой обработки материала имеет место химическая реакция с выделением газовой фазы, например, при разложении глины:



при разложении известняка:



то формула 2.2 приобретает вид:

$$Q_m = P_{сыр} c_{сыр}^{cp} (t_{разл} - t_{нач}) + P c_{прод}^{cp} (t_{кон} - t_{разл}), \text{ кВт} \quad (2.3)$$

где $P_{сыр}$ - производительность по сухому сырью, поступающему в печь, кг/с;

$$P_{сыр} = P \cdot 100 / (100 - \Delta m_{пр}), \text{ кг/с} \quad (2.4)$$

где $\Delta m_{пр}$ — потери массы при прокаливании, %;

$t_{нач}$, $t_{разл}$, $t_{кон}$ - соответственно, температура процесса (начальная, разложения и конечная), °С;

c^{cp} ($c_{сыр}^{cp}$, $c_{прод}^{cp}$) - соответственно, средняя массовая теплоемкость сырья и продукта в рассматриваемых интервалах температур существования, кДж/кг град.

В таблицах 2 и 4 приведены значения коэффициентов теплоемкости сырьевых материалов, продуктов разложения сырья и некоторых печестроительных материалов в зависимости от температуры.

Таблица 2 – Теплоемкость некоторых материалов в зависимости от температуры, кДж/кг град, и теплота фазовых процессов

Темпе- ратура, °С	Глина	Шамот	CaCO ₃	MgCO ₃	CaO	MgO	CaSO ₄ ·2H ₂ O	β-CaSO ₄ · 0,5H ₂ O
0	1,075	0,808	0,79	0,85	0,74	0,87	0,53	0,49
100	1,088	0,837	0,87	0,86	0,79	0,91	1,22	0,91
200	1,105	0,871	0,98	0,96	0,79	0,98		1,02
300	1,120	0,905	1,02	0,99	0,84	1,03		
400	1,160	0,935	1,037	1,01	0,86	1,04		
500	1,170	0,964	1,05	1,06	0,86	1,07		
600		0,997	1,08		0,87	1,09		
700		1,030	1,10		0,88	1,12		
800		1,060	1,11		0,88	1,13		
900		1,090	1,11		0,89	1,15		
1000		1,122			0,90	1,16		
1100		1,155			0,90	1,17		
1200		1,182			0,91	1,19		
1300		1,218			0,91	1,20		
1400		1,248			0,91	1,20		
Тепло, затраченное на химические реакции, кДж/кг								
500	290-557			1310		2750		
900			1780		3177			
1000							495	582

2.2.2 Определение расхода тепла на осуществление физико-химических процессов

При нагревании материала происходят химические реакции, и физические превращения, связанные как с поглощением, так и с выделением тепла. Расчет расхода тепла производится по формуле:

$$Q_{хим} = q_{хим} P, \text{ кВт} \quad (2.5)$$

где $g_{хим}$ - теплота, расходуемая на протекание физико - химических процессов, отнесенная к 1 кг продукта, кДж/кг.

Если величина $g_{хим}$ отнесена к 1 кг исходного вещества, то в формуле 2.5 берется производительность по сухому сырью - $P_{сыр.}$. При технологических расчетах величина $g_{хим}$ подсчитывается по существующим методикам, что представляет собой достаточно трудоемкий процесс. Поэтому при выполнении тепловых расчетов величину удельного расхода тепла на протекание физико-химических

процессов можно брать из справочников.

В таблице 2 приведены значения теплоты разложения некоторых материалов. Расход тепла на клинкерообразование составляет 1650 – 2000 кДж/кг клинкера, на процессы стеклообразования около 2700 кДж/кг стекла, для сульфатной шихты возрастает до 3180 кДж/кг.

2.2.3 Определение расхода тепла на испарение физической влаги из материала

Расчет производится по формуле:

$$Q_{исп} = n (r - c_{вл} t_{нач} + c_{пар} t_{ух.газ}), \text{ кВт} \quad (2.6)$$

где n - количество испаряемой влаги, кг/с

$$n = P_{сух} W / (100 - W), \text{ кг/с} \quad (2.7)$$

где W - относительная влажность сырья, %;

r - скрытая теплота парообразования, она равна 2500 кДж/кг влаги (при 0°C);

$c_{вл}$ и $c_{пар}$ - соответственно, удельная теплоемкость жидкой воды (4,2) и пара (1,97), кДж/кг град.

2.2.4 Определение количества тепла, уносимого с дымовыми газами

Потери тепла с отходящими из печи продуктами горения топлива определяются по формуле:

$$Q_{дым} = V_{д.г} c_{д.г} t_{д.г}, \text{ кВт} \quad (2.8)$$

где $V_{д.г}$ - объем дымовых газов при нормальных условиях, $\text{м}^3/\text{с}$;

$c_{д.г}$ - теплоемкость газов при их действительной температуре, кДж/ м^3 град;

$t_{д.г}$ - температура, с которой газы покидают установку, °C.

Теплоемкость смеси газов зависит от их состава и температуры, поэтому надо знать состав газов, % по объему. Состав продуктов горения определяется при расчете горения топлива (смотри раздел 3).

Теплоемкость смеси рассчитывается по принципу аддитивности:

$$c_{см} = \sum r_i c_i, \text{ кДж/м}^3 \quad (2.9)$$

где r_i - доля компонента в смеси газов; $r_i = \kappa_i / 100$;

κ_i - содержание компонента, % по объему;

c_i - объемная теплоемкость компонента при данной температуре, кДж/ м^3 град.

Объем дымовых газов зависит от количества сжигаемого топлива (B), кг/с – для твердого и жидкого или $\text{м}^3/\text{с}$ – для газообразного топлива и удельного объема дымовых газов, образующихся при сжигании этого топлива.

Удельный объем дымовых газов - V_a , $\text{м}^3/\text{кг}$ для жидкого и твердого

топлива или $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ для газообразного топлива. Удельный объем дымовых газов определяется при расчете горения топлива (раздел 3).

$$V_{d.z.} = B V_a, \text{нм}^3/\text{с} \quad (2.10)$$

2.2.5 Определение количества тепла, уносимого с технологическими газами

Технологические газы – это продукты разложения сухого материала. Объем CO_2 , образующийся при декарбонизации CaCO_3 и MgCO_3 :

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 P_{\text{сух}} (0,4 \text{ CaO} + 0,553 \text{ MgO}), \text{нм}^3/\text{с} \quad (2.11)$$

где CaO и MgO – содержание окислов в исходном сырье, %.

Объем влаги, выделившейся при разложении глины, определится из выражения:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,00435 \text{ Al}_2\text{O}_3 P_{\text{сух}}, \text{нм}^3/\text{с} \quad (2.12)$$

где Al_2O_3 – содержание Al_2O_3 в глине, %.

$$Q_{\text{техн}} = (V_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}) t_{\text{ух}}, \text{кВт}$$

где C_{CO_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$ – средняя объемная теплоемкость соответствующих газов, $\text{кДж}/\text{нм}^3 \cdot \text{град}$

В таблице 3 приведены коэффициенты теплоемкости воздуха и составляющих компонентов газовой смеси, в приложении 2 – энтальпии $i = c \cdot t$ газов, $\text{кДж}/\text{нм}^3$.

Таблица 3 – Зависимость теплоемкости газов от температуры

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Теплоемкость газов, $\text{кДж}/\text{нм}^3 \cdot \text{град}$					
	CO_2	H_2O	N_2	O_2	SO_2	Воздух
0	1,5998	1,4943	1,2946	1,3059	1,7334	1,2971
100	1,7003	1,5052	1,2959	1,3176	1,8130	1,3005
200	1,7874	1,5224	1,2996	1,3352	1,8883	1,3076
300	1,8628	1,5425	1,3068	1,3562	1,9553	1,3177
400	1,9298	1,5655	1,3164	1,3775	2,0181	1,3294
500	2,9888	1,5898	1,3277	1,3980	2,0644	1,3428
600	2,0412	1,6149	1,3402	1,4168	2,1144	1,3570
700	1,3537	1,6413	1,3537	1,4345	2,1521	1,3712
800	2,1312	1,6681	1,3670	1,4500	2,1814	1,3846
900	2,1693	1,6957	1,3796	1,4646	2,2149	1,3976
1000	2,2036	1,7230	1,3918	1,4776	2,2359	1,4098
1100	2,2350	1,7502	1,4035	1,4893	2,2777	1,4219
1200	2,2639	1,7770	1,4144	1,5006		1,4328
1300	2,2899	1,8029	1,4256	1,5107		1,4437
1400	2,3137	1,8280	1,4349	1,5203		1,4537
1500	2,3355	1,8527	1,4441	1,5295		1,4629
1600	2,3556	1,8762	1,4529	1,5379		1,4717

2.2.6 Определение количества тепла, теряемого через ограждения печи

Методика расчета теплового потока, проходящего через многослойную стенку высокотемпературной печи, осложняется тем, что коэффициент теплопроводности материалов зависит от температуры, а распределение температур в стенке неизвестно. Задача решается методом последовательных приближений. Расчет ведется по формуле:

$$Q_{opr} = \frac{0,001(t_{внут} - t_{нор})F}{\sum \frac{\delta}{\lambda}}, \text{ кВт} \quad (2.13)$$

где δ - толщина слоя, м;

λ - коэффициент теплопроводности при средней температуре слоя, Вт/м град;

$t_{внут}, t_{нар}$ - соответственно, температура внутренней и наружной поверхности стенки, °С;

F - средняя площадь теплоотдачи (между внутренней, тепловоспринимающей, и наружной, теплоотдающей), м²:

$$F = \frac{F_{внут} + F_{нар}}{2}, \text{ м}^2 \quad (2.14)$$

Последовательность расчета:

1. Задаются ориентировочно температурой слоев $t_1^{cp}, t_2^{cp}, t_3^{cp} \dots$.
2. Для материала каждого слоя рассчитывают коэффициенты теплопроводности при принятой температуре слоя:

$$\lambda_i = \lambda_o \pm \alpha t^{cp}, \text{ Вт/м град} \quad (2.15)$$

В таблице 4 приведены температурные зависимости коэффициента теплопроводности для некоторых огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

3. Определяют термические сопротивления каждого слоя:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_{ii}}, \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт} \quad (2.16)$$

4. Подсчитывают коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\sum R_i}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \quad (2.17)$$

5. Определяют величину удельного теплового потока:

$$g = K \cdot (t_{внут} - t_{нор}), \text{ Вт/м}^2 \quad (2.18)$$

6. Подсчитывают температуры на границе слоев:

$$t_{i+1} = t_i - g \cdot R_i, \text{ °С} \quad (2.19)$$

7. Определяют средние температуры слоев:

$$t_i^{cp} = \frac{(t_i + t_{i+1})}{2}, \text{ °С} \quad (2.20)$$

Таблица 4 – Температурная зависимость теплоемкости и теплопроводности огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Изделия	Коэффициент теплоемкости, кДж/кг град	Плотность, ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/м град
Шамотные огнеупоры	0,837+0,000264t	1900	1,04+0,00015 t
-	-	1900	0,70+0,00064 t
Шамотный легковес	-	1300	0,61+0,00018 t
-	-	1200	0,35+0,00035 t
-	-	1000	0,28+0,00023 t
-	-	800	0,21+0,00043 t
Динасовые огнеупоры	0,795 + 0,000335t	1900	1,07+0,00093 t
-	-	1100	0,58+0,00043 t
Керамический кирпич	0,837 + 0,000264t	1800	0,47+0,00051 t
Высокоглиноземистые	0,837 + 0,000264t	2500	2,1- 0,00062 t
Корундовые	0,795 + 0,000419t	2800	2,1+0,00215 t
Магнезитовые	0,942 + 0,000250t	2700	6,2 – 0,00270 t
Магнезитохромитовые		2750	4,0 – 0,00082 t
Хромомагнезитовые	0,754 + 0,000150t	2900	2,0 – 0,00035 t
Форстеритовые	0,890 + 0,000419t	3000	3,3 – 0,00110 t
Диатомитовые	0,837 + 0,000920t	1100	0,27 + 0,00023 t
Бакор			$2,13 \cdot e^{0,00062 \cdot t}$
Ячеистый фосфатный бетон		900	0,348+0,00010 t
Фосфокерамзитобетон		1200	0,314+0,00024 t
ШВП-1150		350	0,13+0,00010 t
ШВП-1350		500	0,07+0,00030 t
Рулонное каолиновое волокно	0,837 + 0,000264t	130	0,034+0,00026 t

8. Для каждого слоя рассчитывают разницу между принятой ориентировочно и найденной в первом приближении средней температурой Δt . Если эта разница по абсолютной величине окажется для некоторых слоев больше 50°, то расчет повторяют при полученных в первом приближении значениях средних температур слоев. Иногда

для получения удовлетворительного результата требуется сделать несколько приближений.

Найденное в последнем приближении значение удельного теплового потока g используют для дальнейших расчетов:

$$Q_{\text{оп}} = g \cdot F \cdot 10^{-3}, \text{ кВт} \quad (2.21)$$

Пример:

Определить величину удельного теплового потока через стенку печи, состоящую из трех слоев:

- 1 - шамот с плотностью 1900 кг/м^3 , толщиной $0,46 \text{ м}$,
 - 2 - шамотный легковес с плотностью 1000 кг/м^3 , толщиной $0,115 \text{ м}$,
 - 3 - облицовка из керамического кирпича, толщиной $0,125 \text{ м}$.
- Температуры стенки: внутренняя 1400°C , наружная 50°C .

Решение:

1. Задаемся ориентировочными температурами слоев:

$$\begin{aligned} t_1^{cp} &= 0,8 \cdot t_{\text{вн}}, & t_1^{cp} &= 0,8 \cdot 1400 = 1120 \text{ }^\circ\text{C} \\ t_2^{cp} &= 0,5 \cdot t_1^{cp}, & t_2^{cp} &= 0,5 \cdot 1120 = 560 \text{ }^\circ\text{C} \\ t_3^{cp} &= 0,5 \cdot t_2^{cp}, & t_3^{cp} &= 0,5 \cdot 560 = 280 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

2. Рассчитываем значения коэффициентов теплопроводности материалов при принятых температурах:

$$\begin{aligned} \lambda_1^t &= 1,04 + 0,00015 \cdot 1120 = 1,208 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}, \\ \lambda_2^t &= 0,28 + 0,0023 \cdot 560 = 0,409 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}, \\ \lambda_3^t &= 0,47 + 0,00051 \cdot 280 = 0,613 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}. \end{aligned}$$

3. Термические сопротивления слоев:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{0,46}{1,208} = 0,38 \text{ м}^2\cdot\text{град}, \\ R_2 &= \frac{0,115}{1,409} = 0,28 \text{ м}^2\cdot\text{град}, \\ R_3 &= \frac{0,125}{0,613} = 0,20 \text{ м}^2\cdot\text{град} \end{aligned}$$

4. Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{0,38 + 0,28 + 0,20} = 1,163 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$$

5. Удельный тепловой поток:

$$g = 1,163 \cdot (1400 - 50) = 1569,76 \text{ Вт/м}^2.$$

6. Граничные температуры слоев:

$$t_1^{zp} = 1400 - 1569,76 \cdot 0,38 = 803,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_2^{zp} = 803,5 - 1569,76 \cdot 0,28 = 364 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_{нар} = 364 - 1569,76 \cdot 0,20 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

7. Средние температуры слоев:

$$t_1^{cp} = \frac{1400 + 803,5}{2} = 1101,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_2^{cp} = \frac{803,5 + 364}{2} = 583,7 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$t_3^{cp} = \frac{364 + 50}{2} = 207 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

8. Подсчитываем разницу между принятой ориентировочно и найденной в первом приближении средней температурой для каждого слоя:

$$\Delta t_1 = 1120 - 1101,1 = 18,5 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_2 = 584 - 560 = 24 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_3 = 280 - 207 = 73 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

В последнем слое – для керамического кирпича – разница между принятой и найденной в первом приближении средней температурой превышает 50° .

Поэтому расчет следует повторить, приняв для нахождения коэффициентов теплопроводности те температуры, которые были получены при расчете в первом приближении.

Этот расчет дает возможность уточнить температуру наружной поверхности стенки. В приведенном примере она совпала с заданной до такой степени точности случайно.

2.2.7 Определение количества тепла, теряемого излучением через открытые отверстия

Расчет производится на основе закона Стефана – Больцмана:

$$Q_{изл} = 5,67 \cdot \varphi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot \frac{z}{24} \cdot 10^{-3}; \text{кВт} \quad (2.22)$$

где T_1, T_2 - температуры излучающей и воспринимающей излучение среды, расчет проводится по шкале Кельвина;

F - площадь сечения отверстия, м^2 ;

φ - коэффициент диафрагмирования, определяется в зависимости от

формы отверстия и толщины стенки (рисунок 5);

z - продолжительность открытия отверстия в течение суток, час.

5,67 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·К⁴.

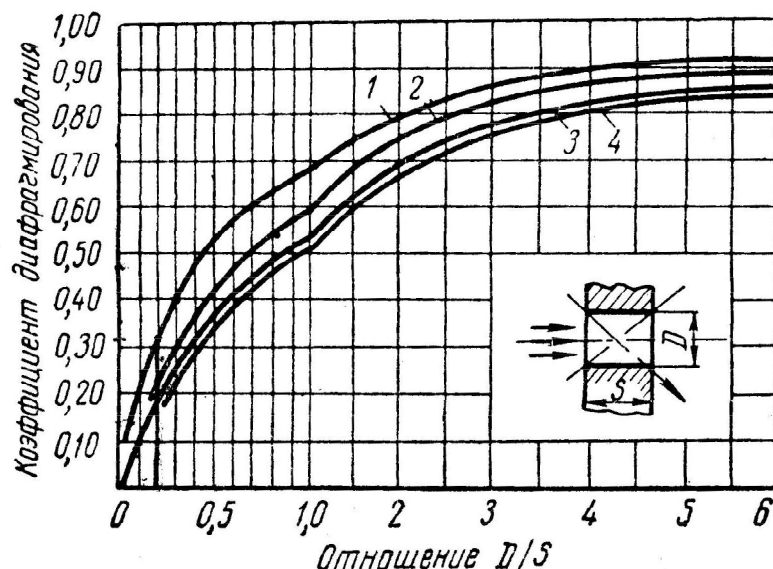


Рисунок 5 – График для определения коэффициента диафрагмирования:

- 1 - прямоугольное вытянутое отверстие;
- 2 - прямоугольное отверстие 2:1;
- 3 - квадратное отверстие;
- 4 - круглое отверстие.

Тепловой баланс проектируемой установки (Сумма статей **Прихода тепла равна** сумме статей **Расхода тепла**) решается относительно неизвестной величины – РАСХОДА ТОПЛИВА. Подставляют найденное значение расхода топлива в соответствующие статьи баланса, а затем выражают тепловой баланс в процентах. Можно оценить результаты выполненных расчетов. Для этих же целей служит и расчет технико-экономических показателей работы.

2.2.8 Технико-экономические показатели работы агрегата

Коэффициент полезного действия

Он представляет собой отношение полезно затраченного тепла на технологические процессы к вводимому количеству тепла от горения топлива:

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q_{гор}} \cdot 100, \% \quad (2.23)$$

$$\eta = \frac{Q_m + Q_x + Q_w}{B \cdot Q_n^p} \cdot 100, \% \quad (2.24)$$

где B - расход топлива, для газа $\text{нм}^3/\text{с}$, для мазута и твердого топлива $\text{кг}/\text{с}$;

Q_n^p - теплотворная способность топлива, $\text{кДж}/\text{нм}^3$ (газ), $\text{Рж}/\text{кг}$ (твердое, жидкое).

Удельный расход тепла, внесенного топливом

$$g = \frac{B \cdot Q_n^p}{P}, \text{ кДж}/\text{кг} \quad (2.25)$$

Удельный расход условного топлива

$$v = \frac{B \cdot Q_n^p \cdot 100}{P \cdot 29300}, \% \quad (2.26)$$

где 29300 - теплотворная способность условного топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$.

2.2.9 Индивидуальные задания по разделу «Теплотехнические расчеты»

Ниже приводятся условия задач и исходные данные для их решения.

Задача 1. Определить расход тепла на нагрев материала. Учесть диссоциацию материала при термообработке.

Задача 2. Определить расход тепла на протекание физико-химических процессов в материале.

Задача 3. Определить расход тепла на испарение влаги.

Задача 4. Определить расход тепла на нагрев технологических газов.

Задача 5. Определить потери тепла с дымовыми газами. Состав газов принять по заданию по аэродинамике.

Задача 6. Рассчитать КПД установки.

Задача 7. Определить удельный расход тепла в установке.

Задача 8. Определить удельный расход условного топлива.

Задача 9. Определить удельный тепловой поток через стену (или свод) печи согласно заданных в таблице 6 условий.

Таблица 5 – Варианты заданий к задачам по тепловому расчету печей

Номер задания	Продукт	Р, т/ч	Содержание в сырье, % (мас.)					Темп-ра материала, °С		Расход топлива, нм ³ /с	Температура газов, °С	Вид агрегата
			Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Δm _{np}	W	Нач.	Кон.			
1	Шамот	12	33,3			8,42	10	20	1400	0,39 [*]	200	Печь вращающ.
2		13	25,5			9,8	12	20	1380	0,41 [*]	220	
3		14	36,0			13,2	15	20	1420	0,45 [*]	250	
4	Шамот	1,5	36,7			12,5	7	10	1380	0,025 [*]	200	Печь шахтная
5		2,0	38,8			13,6	8	15	1400	0,03 [*]	220	
6		2,5	35,2			12,1	9	17	1420	0,04 [*]	240	
7		3,0	28,7			10,2	10	20	1430	0,04 [*]	250	
8		3,5	32,4			9,4	11	15	1400	0,05 [*]	230	
9	Известь	4,2		50	2	42,2	10	15	1000	0,24 ^{**}	200	Печь шахтная пересыпная
10		5,3		51	1	41,7	12	18	1100	0,31 ^{**}	210	
11		5,5		52	3	43,0	9	10	1150	0,32 ^{**}	220	
12		6,0		48	3	42,4	8	10	1200	0,43 ^{**}	250	
13		6,5		49	2	42,7	7	15	1150	0,44 ^{**}	200	
14		7,0		48	1	43,2	9	20	1100	0,55 ^{**}	250	
15		7,5		51	2	43,7	8	17	1200	0,57 ^{**}	200	
16		8,0		50	1	41,2	11	19	1150	0,69 ^{**}	220	
17	Гипс	10				14	8	10	120	0,11 [*]	170	Барабан сушильный
18		7,0				12	10	15	130	0,7 [*]	180	
19		8,5				13	12	17	140	0,8 [*]	190	
20		5,0				11	15	20	150	0,6 [*]	200	

* - топливо – природный газ, теплота сгорания 35000 кДж/нм³,
удельный объем продуктов горения $V_a=13$ нм³/нм³;

** - топливо – каменный уголь, теплота сгорания 20000 кДж/кг,
удельный объем продуктов горения $V_a=7,7$ нм³/кг.

Таблица 6 – Исходные данные к задаче по определению теплового потока тепла через стенку

Номер задания	Материал слоя			Толщина слоя, м			Температура внутр. пов-ти, °С
	1	2	3	1	2	3	
1	1900 шамот	ШВП-1150	керамич. кирпич	0,38	0,20	0,065	1400
2				0,46	0,10	0,125	1300
3				0,23	0,30	0,250	1450
4	1900 шамот	диатомит	керамич. кирпич	0,38	0,23	0,065	1400
5				0,46	0,23	0,125	1450
6				0,23	0,46	0,250	1500
7	динас 1900	динас 1100	керамич. кирпич	0,46	0,23	0,250	1500
8				0,38	0,38	0,125	1550
9				0,23	0,46	0,250	1450
10	динас 1900	яч.фосф. бетон	фосфо-керамзит	0,5	0,2	0,2	1550
11				0,5	0,3	0,1	1580
12				0,5	0,1	0,3	1540
13	динас 1900	динас 1100	каолин. волокно	0,3	0,23	0,09	1550
14				0,4	0,115	0,105	1560
15				0,5	0,065	0,09	1580
16	хромо-магнезит	динас 800	динас 1300	0,46	0,46	0,46	1600
17				0,46	0,575	0,335	1620
18				0,46	0,69	0,23	1650
19	форстерит	шамот 800	шамот 1300	0,46	0,46	0,23	1600
20				0,46	0,23	0,46	1650

Сравнение результатов расчета позволит выявить наиболее целесообразные варианты изоляции печей. Печь считается удовлетворительно запроектированной, если температура наружной стенки не выше 50°C. Поэтому для решения задачи в первом приближении принимать наружную температуру $t_{нар}=50^{\circ}\text{C}$, а если после уточнения получится более высокая температура на поверхности, надо увеличить толщину изоляции.

3 Расчеты горения топлива

3.1 Выбор топлива

При проектировании промышленных предприятий выбор топлива для печей и сушил производится на основании технико-экономических расчетов с учетом топливного баланса региона. Стоимость мазута в 1,5 раза выше, чем природного газа. Твердое топливо может быть

использовано как местное дешевое топливо, не требующее дальних перевозок.

Топливо при сжигании должно обеспечить необходимые температуры в рабочем пространстве печи, достижение которых связано с видом топлива, его теплотворной способностью, а также с конструкцией печи.

При выполнении теплотехнических и аэродинамических расчетов печей и сушил необходимо знать объемы газов – продуктов горения топлива, а также воздуха, который участвует в сжигании топлива.

3.2 Расчет процесса горения

Целью данного расчета является определение следующих параметров процесса сжигания топлива на единицу массы (или объема):

1. расхода воздуха,
2. объёма и состава дымовых газов,
3. температуры горения топлива,
4. для проверки правильности расчетов составляется материальный баланс процесса горения.

В основе расчета лежат стехиометрические реакции окисления горючих компонентов топлива. Расчет ведется на рабочее топливо (с учетом его влаги и золы).

Методика расчета горения газообразного топлива проще, т.к. состав его выражается в объёмных процентах, а газы вступают в реакции пропорционально своим объёмам.

Методика расчета горения твердого и жидкого топлива, состав которого выражается в массовых процентах, предусматривает пересчет полученных по уравнениям реакций горения масс воздуха и продуктов окисления в кубометры путем деления на плотность.

Все расчеты выполняются при нормальных условиях.

В таблице 7 приведены составы некоторых природных газов (объемные %). В таблице 8 приведены составы твердого и жидкого топлив (% мас.).

3.2.1 Пересчет состава топлива на рабочий

Влажность природного газа $W = 0,5 - 2 \%$. Зольность (А) и влажность (W) мазута и угля приведены в таблице 9.

Формулы пересчета состава топлива на рабочее:

- для газа:

$$CH_4^p = \frac{CH_4 \cdot (100 - W)}{100}, \%, \quad C_2H_6^p = \frac{C_2H_6 \cdot (100 - W)}{100}, \% \text{ и т.д.} \quad (3.1)$$

Таблица 7 – Состав природных газов

Номер задания	Название газа	Состав сухого газа, % по объёму								Теплотворная способность, кДж/нм ³
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S	
1	Шебелинский	93,2	4,4	0,8	0,6	0,3	0,1	0,8		35800
2	Ставропольский	98,0	0,3	0,1	0,1	-	0,3	1,2		35380
3	Газлинский	95,6	2,7	0,3	0,3		0,1	1,2		36010
4	Дашавский	97,9	0,5	0,2	0,1		0,1	1,2		35590
5	Саратовский	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3		35720
6	Коми АССР	85,9	3,1	1,0	0,4	0,1	0,1	9,4		33370
7	Бугурусланский	81,7	5,0	2,0	1,2	0,6	0,4	8,5	0,6	36720
8	Березовский	91,6	1,6	0,8	0,4	0,2	0,6	4,7	0,1	33100
9	Лесмуровский (Томская обл.)	84,9	4,7	2,6	0,8	0,2	2,0	4,8		38240
10	Двуреченский (Томская обл.)	86,5	2,0	1,2	0,6	0,1	0,4	9,2		35404

Таблица 8 – Составы мазута и угольного топлив

Номер задания	Наименование	Элементарный состав, % мас.						Q ^p _н , кДж/кг
		C ^г	H ^г	S ^г	N+O ^г	A _p	W _p	
Жидкое топливо								
11	Мазут 20	87,2	11,7	0,5	0,6	0,1	2,0	40400
12	Мазут 40	87,4	11,2	0,5	0,9	0,2	3,0	39440
13	Мазут 60	87,6	10,7	0,7	1,0	0,3	4,0	39020
14	Мазут 80	87,6	10,5	0,8	1,0	0,3	4,0	38690
15	Мазут 100	87,5	10,5	0,9	1,0	0,3	4,0	38690
Твердое топливо, каменный уголь								
16	Кемеровский	86,0	5,0	0,7	8,3	16,0	9,0	21186
17	Ленинский	79,0	5,5	0,5	15,0	5,5	10,0	26378
18	Подмосковный	67,0	5,0	5,9	22,1	35,0	32,5	10635
19	Воркутский	85,0	5,3	1,3	8,4	23,0	8,0	23740
20	Буланашский	80,0	5,5	1,3	12,7	24,0	11,0	21396
21	Челябинский	72,0	5,2	2,1	20,7	32,0	17,0	15157

- для мазута и угля:

$$C^p = \frac{C \cdot (100 - A - W)}{100}, \%, \quad H^p = \frac{H \cdot (100 - A - W)}{100}, \% \text{ и т.д.} \quad (3.2)$$

Пересчет ведется для всех компонентов топлива. Сумма всех компонентов рабочего топлива с золой и влагой составляет 100 %.

3.2.2 Уточнение теплотворной способности топлива

Для расчета теплотворной способности топлива используются тепловые эффекты реакций окисления компонентов. Формула для природного газа:

$$Q_n^p = 358,2CH_4 + 637,5C_2H_6 + 912,5C_3H_8 + 1186,5C_4H_{10} + 1460,8C_5H_{12}, \quad \text{кДж/нм}^3 \quad (3.3)$$

Для твердого и жидкого топлива:

$$Q_n^p = 339C^p + 1030H^p + 108,9S^p - 108,9O^p - 25W^p, \quad \text{кДж/кг} \quad (3.4)$$

3.2.3 Определение расхода воздуха

Теоретический расход воздуха, необходимый для полного окисления всех горючих компонентов топлива, рассчитывается по уравнениям реакций горения. Кислорода в воздухе 21% по объему, поэтому объем сухого воздуха в 4,76 раза больше, чем рассчитанный объем кислорода.

Для газа:

$$L_o = 0,0476(2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12}), \quad \text{нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3.5),$$

для мазута и твердого топлива:

$$L_o = 0,0889C^p + 0,265H^p - 0,0333(O^p - S^p), \quad \text{нм}^3/\text{кг} \quad (3.6)$$

С учетом влаги воздуха

$$L'_0 = (1 + 0,0016 \cdot d) \cdot L_o, \quad \text{нм}^3/\text{нм}^3; \quad \text{нм}^3/\text{кг} \quad (3.6')$$

где d - влагосодержание атмосферного воздуха, г/кг;

0,0016 - коэффициент пересчета d в размерность $\frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3} \frac{H_2O}{\text{возд.}}$, $\frac{\rho_{\text{возд.}}}{\rho_{H_2O} \cdot 1000} = 0,0016$.

Расчет действительного расхода воздуха производится, принимая коэффициент избытка воздуха в пределах $\alpha=1,05-1,3$. Действительное количество воздуха:

$$L_\alpha = \alpha \cdot L_o, \quad \text{нм}^3/\text{нм}^3; \quad \text{нм}^3/\text{кг} \quad (3.7)$$

С учетом влажности воздуха

$$L'_\alpha = \alpha \cdot L'_0, \text{ нм}^3/\text{нм}^3; \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (3.7')$$

3.2.4 Определение объема и состава продуктов горения

Общий объем продуктов горения складывается из объемов продуктов окисления горючих составляющих топлива, объема азота, поступающего из топлива и воздуха, и объема кислорода, не участвующего в окислении топлива (поступающего из избыточного воздуха).

$$V_\alpha = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{SO_2}, \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ или } \text{нм}^3/\text{кг} \quad (3.8)$$

Для газообразного топлива:

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}), \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3.9)$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + W + 0,16 \cdot d \cdot L_\alpha), \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3.10)$$

$$V_{N_2} = 0,79L_\alpha + 0,01N_2, \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3.11)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) \cdot L_\alpha, \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3.12)$$

$$V_{SO_2} = 0,01H_2S, \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \quad (3.13)$$

Для мазута и угля

$$V_{CO_2} = 0,01855C, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (3.14)$$

$$V_{H_2O} = 0,12H + 0,0124(W + 100n_{нар}) + 0,0016\alpha \cdot L_\alpha, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (3.15)$$

$$V_{N_2} = 0,79L_\alpha + 0,008N, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (3.16)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)L_\alpha, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (3.17)$$

$$V_{SO_2} = 0,07S, \text{ нм}^3/\text{кг} \quad (3.18)$$

Процентный состав продуктов горения

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2} \cdot 100}{V_\alpha}, [\%]; H_2O = \frac{V_{H_2O} \cdot 100}{V_\alpha}, [\%] \text{ и т.д.} \quad (3.19)$$

3.2.5. Определение температуры горения

Температура горения определяется из уравнения баланса тепла для 1 нм³ или 1 кг топлива:

$$Q_{топл}^{зоп} + Q_{воз}^{cp} + Q_{топл}^{cp} = Q_{д.з.}, \text{ кДж} \quad (3.20)$$

$$Q_n^p + C_\epsilon \cdot t_\epsilon \cdot L_\alpha + C_T \cdot t_T = V_\alpha \cdot C_{д.з.} \cdot L_{д.з.}, \text{ кДж} \quad (3.21)$$

откуда теплосодержание продуктов горения:

$$i_{об} = C_{д.з.} \cdot t_{д.з.} = \frac{Q_n^p + C_\epsilon \cdot t_\epsilon \cdot L_\alpha + C_T \cdot t_T}{V_\alpha}, \text{ кДж/нм}^3 \quad (3.22)$$

По рассчитанному теплосодержанию можно найти калориметрическую и теоретическую температуру горения.

Действительная температура горения будет ниже вследствие потерь тепла в процессе горения за счет недожога топлива и прямой – в виде излучения – передачи тепла от факела. Действительное теплосодержание продуктов горения:

$$i_{дейст} = \eta \cdot i_{общ}, \text{ кДж/нм}^3 \quad (3.23)$$

где η - пирометрический коэффициент горения, учитывает условия сжигания топлива.

Температуру горения ориентировочно, без учета состава продуктов горения, можно найти по $i - t$ диаграмме (рисунки 6, 7).

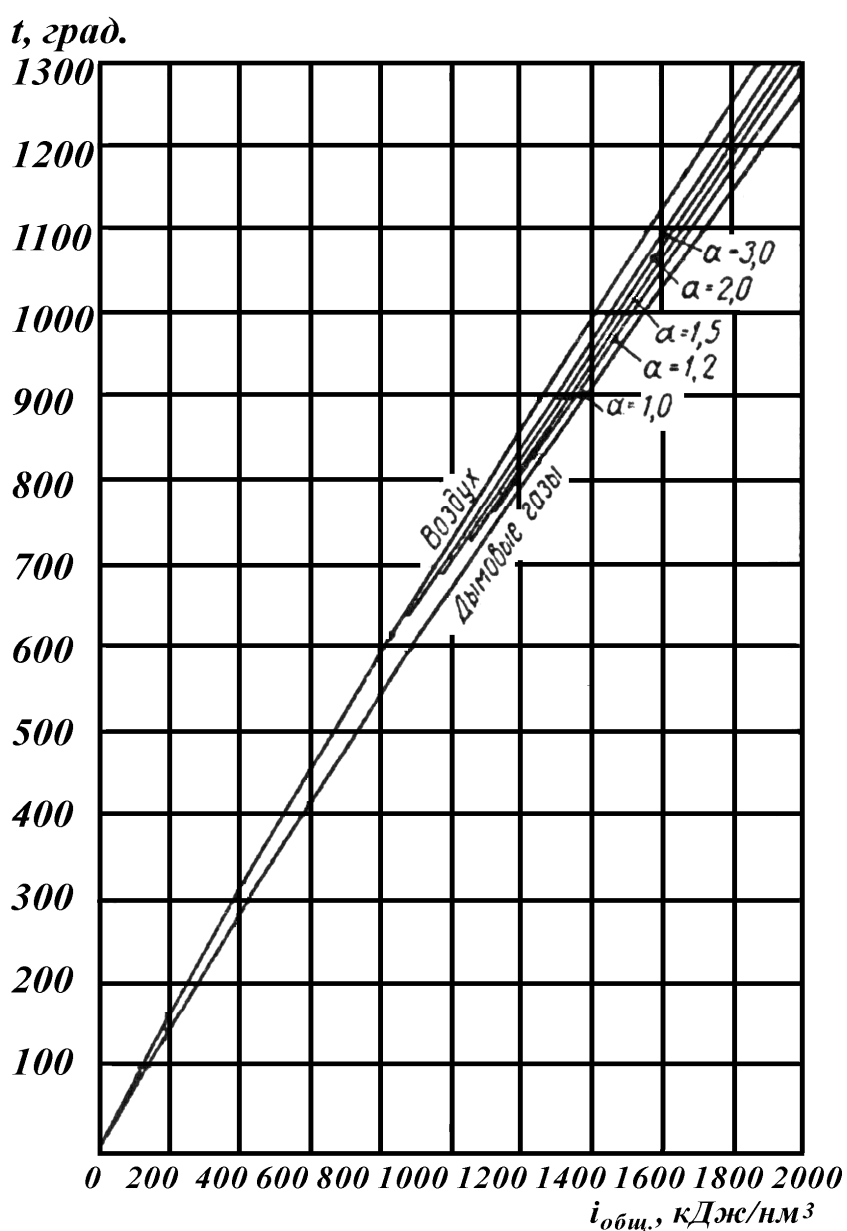


Рисунок 6 – $i-t$ диаграмма для низких температур

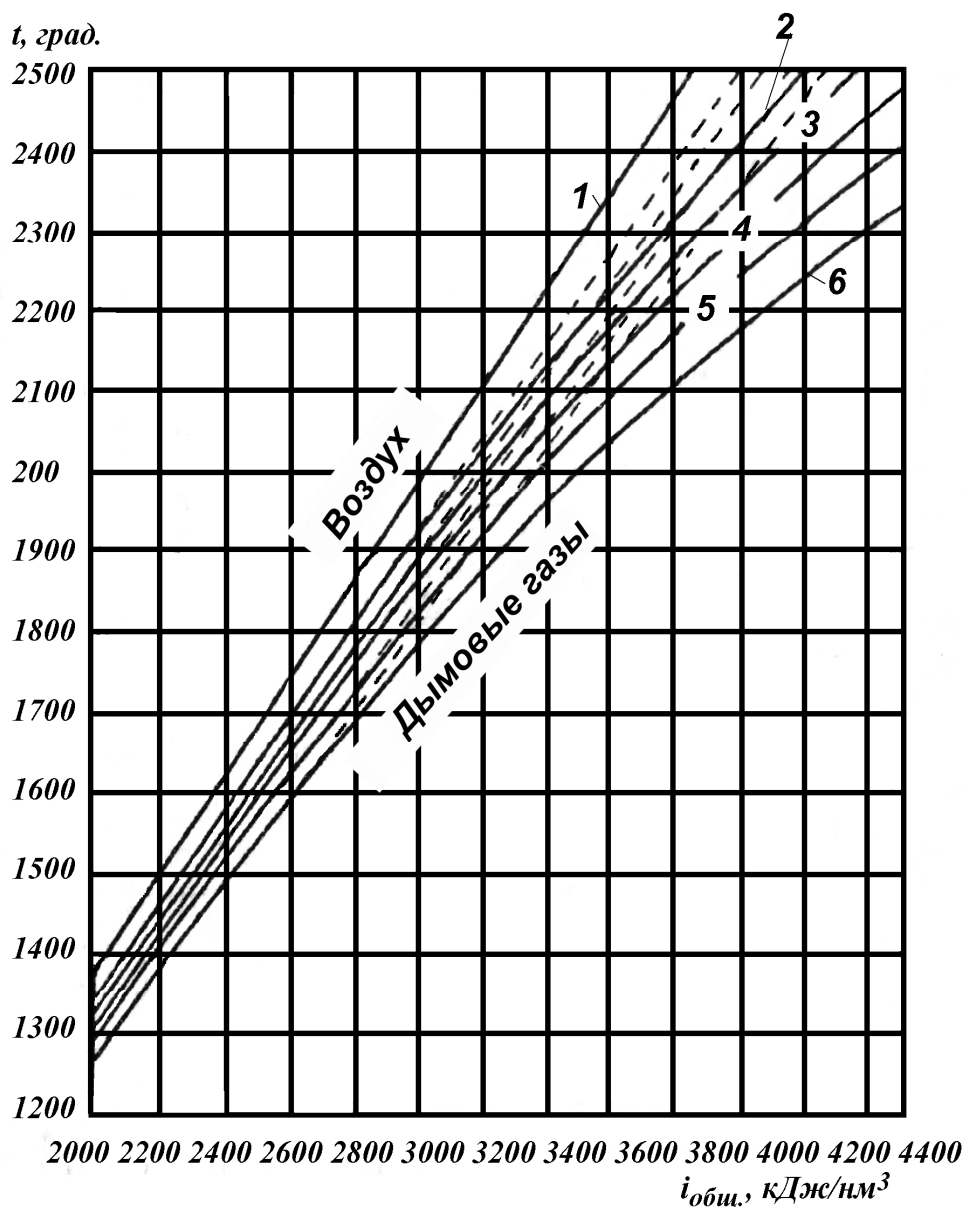


Рисунок 7 – $i - t$ диаграмма для высоких температур

1 – воздух; 2-6 – продукты горения природного газа при разных значениях коэффициента избытка воздуха:

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 2- $\alpha = 3,0$; | 5- $\alpha = 1,2$; |
| 3- $\alpha = 2,0$; | 6 - $\alpha = 1,0$. |
| 4- $\alpha = 1,5$; | |

----- (штрих линия) - калориметрическая температура.

Значения пирометрического коэффициента процесса горения зависят от типа печи и вида топлива.

В туннельных печах при сжигании природного газа, мазута он принимается равным 0,78 – 0,83.

В шахтных пересыпных печах (на твердом топливе) 0,52 – 0,62.

В шахтных печах на газообразном топливе 0,67 – 0,73.

Во вращающихся печах независимо от вида топлива 0,70 – 0,75.

В стекловаренных регенеративных печах пирометрический коэффициент горения составляет 0,70 – 0,75.

3.2.6 Материальный баланс процесса горения

Он выражает закон сохранения массы и составляется на 100 кг или 100 нм³ рабочего топлива.

Массу газов находят умножением объема компонента на его плотность.

Структура материального баланса процесса горения топлива приведена в таблице 9.

В приходной части - CH_4 , C_2H_6 и т.д. - это процентное содержание компонентов в газообразном рабочем топливе.

В расходной части V_{CO_2} , V_{H_2O} и т.д. – это объемы компонентов в продуктах горения топлива, полученные при расчете, нм³/нм³ (или нм³/кг).

Таблица 9 – Материальный баланс процесса горения

Приход	Кг	Расход	Кг
Топливо: мазут, уголь или газ: $CH_4 \cdot 0,717$	100 кг		
$C_2H_6 \cdot 1,356$	кг	$100 \cdot 1,977 \cdot V_{CO_2}$	кг
$C_3H_8 \cdot 2,020$	кг	$100 \cdot 0,804 \cdot V_{H_2O}$	кг
$C_4H_{10} \cdot 2,840$	кг	$100 \cdot 1,251 \cdot V_{N_2}$	кг
$C_5H_{12} \cdot 3,218$	кг	$100 \cdot 1,429 \cdot V_{H_2O}$	кг
$CO_2 \cdot 1,77$	кг	Зола /из мазута/	кг
$N_2 \cdot 1,251$	кг		
$W \cdot 0,804$	кг		
Воздух:		Невязка	$\pm \Delta$
$O_2 = 21L_\alpha 1,429$	кг		
$N_2 = 79L_\alpha 1,251$	кг		
$H_2O = L_\alpha 0,16d 0,804$	кг		
	сумма, кг		сумма, кг

Невязка баланса, рассчитанная в процентах, не должна быть больше 1%.

3.3 Расчет и подбор устройств, используемых при сжигании топлива

В установках силикатной промышленности топливо сжигается либо непосредственно в рабочем пространстве, либо в выносных топках.

Выбор устройства для сжигания топлива зависит от типа печи, ее производительности, от температуры подогрева вторичного воздуха.

В топках, представляющих собой замкнутые камеры определенного объема, можно сжигать любое топливо: твердое, жидкое и газообразное.

Твердое топливо сжигают на колосниковой решетке в слое. При расчете слоевых топок определяют площадь колосниковой решетки и объем топочного пространства. Размеры топок по длине и ширине определяются конструктивно, исходя из удобства обслуживания (длина не более 2 м, ширина не более 1 м). Расчет объема топки производят по формуле:

$$V = B Q_p / Q_v, \text{ м}^3 \quad (3.24.)$$

где B – секундный расход топлива, кг/с или $\text{нм}^3/\text{с}$

Q_v – тепловое напряжение топочного объема, $\text{кВт}/\text{м}^3$, (таблица 11)

Площадь колосниковой решетки (при сжигании твердого топлива) рассчитывают по формуле:

$$F = B Q_p / Q_f, \text{ м}^2 \quad (3.25)$$

где Q_f – тепловое напряжение колосниковой решетки, $\text{кВт}/\text{м}^2$ (таблица 10).

Таблица 10 – Тепловое напряжение топок

Вид топлива	$Q_f, \text{ кВт}/\text{м}^2$	$Q_v, \text{ кВт}/\text{м}^3$	
		Топка для сушил	Топка для печей
Каменный уголь	600 – 700	290 – 350	580 – 700
Антрацит	460 – 580	290 – 350	700 – 830
Бурый уголь	580 – 785	290 – 350	580 – 700
Природный газ		230 – 390	
Мазут		230 – 350	

Форсунки (устройства для распыливания и сжигания жидкого топлива), бывают высокого, низкого давления и механические. Выбор типа форсунки зависит от типа печи. Наиболее распространенной форсункой высокого давления является форсунка Шухова (рисунок 6)

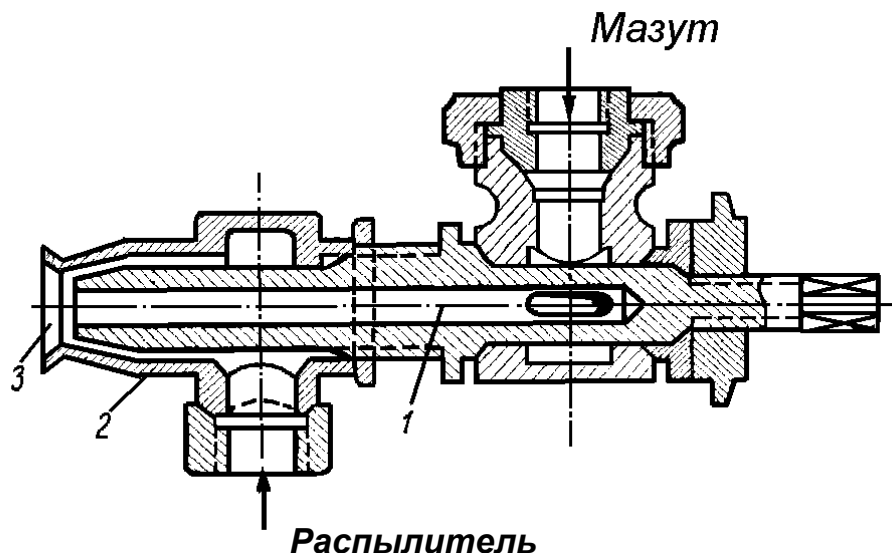


Рисунок 8 – Форсунка системы Шухова

- 1 – мазутное сопло,
- 2 – корпус форсунки,
- 3 выходное сопло

Производительность форсунок может изменяться в широких пределах в зависимости от давления мазута в системе (таблица 11) и давления распылителя. В качестве распылителя используется пар и воздух.

Таблица 11 – Производительность форсунок системы Шухова

Номер форсунки	Производительность, кг/час, при давлении мазута, кПа		
	До 5	60 – 100	200 – 250
1	3	7	10
2	6	20	30
3	12	40	60
4	19	60	90
5	27	80	120
6	38	100	150
7	50	130	180
8	70	180	240
9	125	250	320
10	200	350	400

Газовые горелки. Для сжигания газообразного топлива применяют горелки разного типа.

На рисунке 9 изображена горелка низкого давления конструкции Теплопроекта типа ГНП, применяемые в туннельных печах, для отопления топок сушильных установок.

Производительность этих горелок приведена в таблице 12.

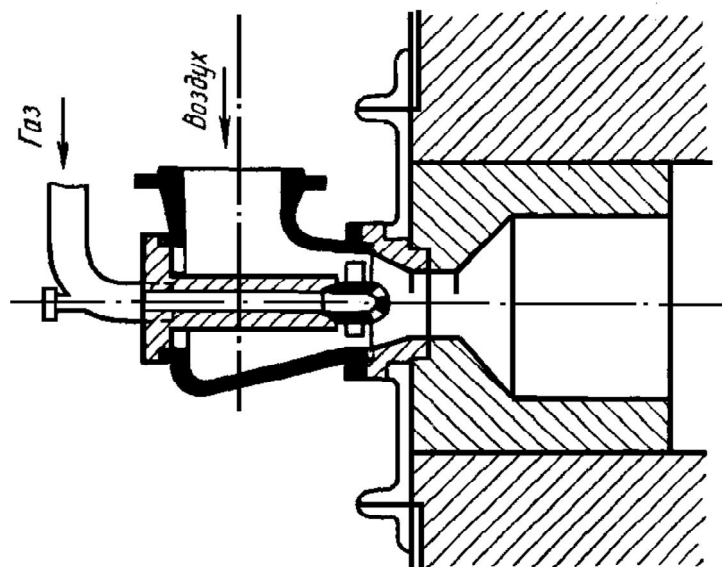


Рисунок 9 – Газовая горелка ГНП

Таблица 12 – Производительность горелок ГНП

Номер горелки	ГНП-1	ГНП-2	ГНП-3	ГНП-4	ГНП-5	ГНП-6	ГНП-7	ГНП-8	ГНП-9
Производительность, м ³ /ч	1,5-6	2,5-10	5-12	7-30	13-52	20-80	30-120	39-156	51-204

При проектировании печей выбирают тип горелки, а затем по каталогам подбирают номер горелки требуемой производительности.

К примеру, в стекловаренных регенеративных печах используют горелки со свободной подачей нагретого воздуха, а в туннельных печах – с принудительной подачей воздуха для горения или инжекционные горелки.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. -М.: Высшая школа, 1968. -366 с.
2. Роговой М.И., Кондакова М.Н., Сагановский М.Н. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1975.- 320 с.
3. Воробьев Х.С., Мазуров Д.Я., Соколов А.Л, Теплотехнологические процессы и аппараты силикатных производств.- М.: Высшая школа, 1965. - 723 с.
4. Булавин И.А. и др. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов. - М.: Стройиздат, 1962. - 249 с.
5. Баренбойм А.М. и др. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности – М.: Стройиздат, 1964. – 496 с.
6. Гинзбург Д.Б. и др. Печи и сушилки силикатной промышленности. – М.: Стройиздат, 1963. - 343 с.

Дополнительная

1. Мазуров Д.Я.и др. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов. Часть П. Промышленная теплотехника. – М.: Стройиздат, 1966. – 450 с.
2. Д.Я. Мазуров Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов. М.: Стройиздат, 1975. – 287 с.
3. Волгина Ю.М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов. М.: Стройиздат, 1982. – 276с.
4. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Госэнергоиздат, 1960.
5. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
6. Огнеупоры и огнеупорные изделия. М.: Издательство стандартов. 1975. – 671 с.

Содержание

	С.
Введение	3
1. Аэродинамика печей и сушил	4
1.1 Основные понятия и зависимости	4
1.2. Расчет сопротивлений движению газов	6
1.3. Подбор центробежных вентиляторов	9
1.4. Расчет дымовых труб	12
1.5. Задачи по аэродинамике	14
2. Теплотехнические расчеты	16
2.1. Общие положения	16
2.2. Методика выполнения расчетов	17
2.2.1. Определение расхода тепла на нагрев материалов	17
2.2.2. Определение расхода тепла на осуществление физико-химических процессов	19
2.2.3. Определение расхода тепло на испарение физической влаги из материала	19
2.2.4. Определение количества тепла, уносимого с дымовыми газами	20
2.2.5. Определение количества тепла, уносимого с технологическими газами	20
2.2.6. Определение количества тепла, теряемого через ограждения печи	22
2.2.7. Определение количества тепла, теряемого излучением через открытые отверстия	26
2.2.8. Техничко – экономические показатели работы агрегата	27
2.2.9. Индивидуальные задания по разделу «Теплотехнические расчеты»	28
3. Расчеты горения топлива	31
3.1. Выбор топлива	31
3.2. Расчет процесса горения	31
3.2.1. Пересчет состава топлива на рабочий	33
3.2.2. Уточнение теплотворной способности топлива	34
3.2.3. Определение расхода воздуха	34
3.2.4. Определение объема и состава продуктов горения	34
3.2.5. Определение температуры горения	35
3.2.6. Материальный баланс процесса горения	36
3.3. Расчет и подбор устройств, используемых для сжигания топлива	37
Литература	38
Содержание	39
Приложение	40

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Номер п.п.	Местные сопротивления	Эскиз	Расчет коэффициента ξ	
1	Вход в отверстие с острыми краями		$\xi = 0,5$	
2	Выход из канала		$\xi = 1$	
3	Плавный поворот на 90° круглых и квадратных каналов		r/b	ξ
			0,5	1,2
			0,75	0,38
			1	0,19
			2	0,12
			5	0,08
4	То же при угле поворота от 30° до 180°		Значение ξ (п.3) умножается на коэффициент К	
			α^0	К
			30	0,5
			60	0,8
			90	1
			120	1,2
			150	1,3
			180	1,4
5	Резкий поворот прямоугольного канала без закруглений		α^0	ξ
			30	0,6
			60	1
			90	1,2
			120	1,4
			180	1,7
6	Внезапное сужение канала (к скорости W_2)		F_2 / F_1	ξ
			0,1	0,5
			0,5	0,3
7	Внезапное расширение канала		F_2 / F_1	ξ
			0,1	0,8
			0,5	0,3
8	Частично открытый шибер или заслонка		0,9	0,1
			Степень открытия, %	ξ
			10	230
			30	17
			50	4
			70	1
			90	0,2
			100	0,1

Номер п.п.	Местные сопротивления	Эскиз	Расчет коэффициента ξ	
9	Дроссельная заслонка		α^0	ξ
			10	0,52
			30	3,9
			50	32,6
			70	151
10	Острая диафрагма		F_2 / F_1	ξ
			0,1	246
			0,2	51
			0,3	18
			0,4	8
			0,6	2
			0,7	1
			0,8	0,3
11	Вход в систему каналов		Отверстия: квадратные $\xi = 2 \dots 2,5$ круглые $\xi = 3 \dots 3,5$ прямоугольные $\xi = 1,5 \dots 2$	
12	Клапан		h / d	ξ
			0,15	9
			0,2	4,5
			0,3	2,1
			0,4	1,6
			0,45	1,5
13	Клапан переводной		$\xi = 2$	
14	Ниша в канале		$\xi = 0,1 \dots 1$ и возрастает с увеличением h / d	
15	Колено круглого сечения (поворот на 90°)		Q / d	ξ
			0	1,3
			1	0,4
			2	0,3
			3	0,3
16	Крестовина (слияние потоков)		W / W_k	ξ
			0,1	1,5
			0,3	1,4
			0,5	1,2
			0,7	0,9
			0,9	0,5
			1	0,2

Номер п.п.	Местные сопротивления	Эскиз	Расчет коэффициента ξ																																																							
17	Встреча двух струй под углом 180° и поворотом на 90°		При $W_1 = W_2 = W_k$ $\xi = 3$																																																							
18	Тройник раздающий		<table border="1"> <tr> <td colspan="4">$W_b \cdot \xi_b$</td></tr> <tr> <td rowspan="2">W_a</td><td colspan="3">d_b/d_a</td></tr> <tr> <td>0,35</td><td>0,58</td><td>1</td></tr> <tr> <td>0,6</td><td>3,2</td><td>4,0</td><td>6,2</td></tr> <tr> <td>0,8</td><td>1,9</td><td>2,5</td><td>4,5</td></tr> <tr> <td>1,0</td><td>1,6</td><td>2,1</td><td>3,6</td></tr> <tr> <td>1,2</td><td>1,4</td><td>1,6</td><td>3,4</td></tr> <tr> <td>1,4</td><td>1,2</td><td>1,4</td><td>2,8</td></tr> <tr> <td colspan="4">ξ_a при $d_b/d_a=1$</td></tr> <tr> <td colspan="4">-0,2</td></tr> <tr> <td colspan="4">-0,1</td></tr> <tr> <td colspan="4">0</td></tr> <tr> <td colspan="4">0,12</td></tr> <tr> <td colspan="4">0,34</td></tr> </table>	$W_b \cdot \xi_b$				W_a	d_b/d_a			0,35	0,58	1	0,6	3,2	4,0	6,2	0,8	1,9	2,5	4,5	1,0	1,6	2,1	3,6	1,2	1,4	1,6	3,4	1,4	1,2	1,4	2,8	ξ_a при $d_b/d_a=1$				-0,2				-0,1				0				0,12				0,34			
$W_b \cdot \xi_b$																																																										
W_a	d_b/d_a																																																									
	0,35	0,58	1																																																							
0,6	3,2	4,0	6,2																																																							
0,8	1,9	2,5	4,5																																																							
1,0	1,6	2,1	3,6																																																							
1,2	1,4	1,6	3,4																																																							
1,4	1,2	1,4	2,8																																																							
ξ_a при $d_b/d_a=1$																																																										
-0,2																																																										
-0,1																																																										
0																																																										
0,12																																																										
0,34																																																										
19	Тройник собирающий		<table border="1"> <tr> <td colspan="4">$W_b \cdot \xi_b$</td></tr> <tr> <td rowspan="2">W_a</td><td colspan="3">d_b/d_a</td></tr> <tr> <td>0,35</td><td>0,58</td><td>1</td></tr> <tr> <td>0,6</td><td>-3,8</td><td>-1,6</td><td>0,1</td></tr> <tr> <td>0,8</td><td>-1,0</td><td>0</td><td>0,6</td></tr> <tr> <td>1,0</td><td>-0,6</td><td>0</td><td>1,2</td></tr> <tr> <td>1,4</td><td>0,4</td><td>0,4</td><td>1,3</td></tr> </table>	$W_b \cdot \xi_b$				W_a	d_b/d_a			0,35	0,58	1	0,6	-3,8	-1,6	0,1	0,8	-1,0	0	0,6	1,0	-0,6	0	1,2	1,4	0,4	0,4	1,3																												
$W_b \cdot \xi_b$																																																										
W_a	d_b/d_a																																																									
	0,35	0,58	1																																																							
0,6	-3,8	-1,6	0,1																																																							
0,8	-1,0	0	0,6																																																							
1,0	-0,6	0	1,2																																																							
1,4	0,4	0,4	1,3																																																							
20	Регенеративная насадка: а) сплошными колодцами б) чередующимися рядами	-	а) $\xi = \frac{1,14}{\sqrt[4]{d}} \cdot h_{нас}$, б) $\xi = \frac{1,57}{\sqrt[4]{d}} \cdot h_{нас}$, где d -гидравлический диаметр канала насадки, $h_{нас}$ -высота насадки																																																							

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Энтальпия газов $i = c_0^t \cdot t$, кДж/м³, (при 101 кН/м²)

t °	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	H ₂ S	N ₂	O ₂	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
100	170,0	150,7	150,7	153,2	129,0	131,9	129,0	164,1	206,4	249,5	350,9	470,6	583,7
200	357,6	377,7	304,4	312,3	260,0	267,1	259,6	351,7	456,4	554,8	793,0	1051,4	1303,0
300	558,9	586,6	462,7	478,6	391,9	407,0	289,8	566,1	748,6	913,2	1310,9	1731,7	2140,8
400	772,1	807,2	626,4	653,2	526,7	551,0	520,9	806,1	1074,4	1323,5	1903,8	2506,8	3096,3
500	994,4	1034,2	795,1	835,3	664,1	699,2	652,7	1070,2	1431,9	1776,5	2546,9	3344,6	4128,4
600	1224,7	1268,7	968,9	1025,0	804,3	850,0	784,6	1356,6	1815,5	2266,8	3259,2	4269,1	5269,8
700	1462,1	1506,5	1148,9	1222,2	947,5	1004,0	918,6	1663,9	2219,1	2790,6	4006,5	5239,6	6462,2
800	1704,9	1745,1	1334,4	1426,9	1093,6	1159,8	1053,4	1995,5	2646,6	3345,0	4790,8	6246,6	7700,3
900	1952,4	1993,4	1526,2	1635,4	1241,9	1318,1	1190,4	2342,2	3088,3	3925,7	5608,5	7303,0	8992,8
1000	2203,6	2235,9	1722,9	1850,6	1391,7	1477,6	1328,9	2699,4	3547,2	4529,5	6461,4	8404,1	10344,8
1100	2458,6	2487,1	1925,2	2072,6	1543,7	1638,4	1469,6	3065,3	4021,2	5152,5	7345,7	9546,8	11747,5
1200	2716,5	2733,3	2132,4	2291,1	1697,4	1800,8	1612,0	3435,8	4503,5	5790,6	8258,0	10726,	13196,
1300	2976,9	-	2343,9	-	1852,7	1963,7	1756,4	-	-	-	-	-	-
1400	3239,1	-	2559,1	-	2008,9	2128,2	1902,6	-	-	-	-	-	-
1500	3503,3	-	2779,3	-	2166,3	2294,5	2051,2	-	-	-	-	-	-
1600	3769,1	-	3002,1	-	2324,6	2460,7	2200,7	-	-	-	-	-	-
1700	4036,7	-	3229,4	-	2484,1	2628,6	2351,8	-	-	-	-	-	-
1800	4305,1	-	3458,5	-	2643,7	2797,7	2505,1	-	-	-	-	-	-
1900	4574,3	-	3690,4	-	2804,4	2967,3	2659,6	-	-	-	-	-	-

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Методические указания к самостоятельной работе и курсовому проектированию по дисциплинам «Теплотехника» и «Тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» для студентов очной и заочной формы обучения направления 240100 «Химическая технология и биотехнология» и специальности 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»

Составители: к.х.н., доцент Вера Николаевна Гурина
к.т.н., ассистент Инна Борисовна Ревва

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага офсетная

Печать RISO. Усл. печ. л. . Уч. изд. л. .

Тираж экз. Заказ . Цена свободная

Издательство ТПУ. 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

Типография ТПУ. 634034, Томск, пр. Ленина, 30.