

Филиал УО БГТУ

«Белорусский Государственный колледж промышленности строительных материалов»

**Методические указания по выполнению
курсового проекта по дисциплине
«Теплотехника и теплотехническое
оборудование»**

для учащихся специальности 2-48 01 31

*«Технология силикатных и тугоплавких неметаллических
материалов и изделий»*

Курсовое проектирование

Минск 2018

Составители

И.А.Левицкий профессор

М.Н. Буель: преподаватель филиала УО «БГТУ» «Белорусский государственный колледж промышленности строительных материалов»

Содержание

Введение	4
1 Состав и содержание курсовой работы	5
2 Расчёт процесса горения топлива	7
3 Расчет башенной распылительной сушилки	14
4 Расчет сушильного барабана	25
5 Теплотехнический и конструктивный расчет конвейерной линии	29
6 Расчет туннельной печи	47
7 Расчет вращающейся печи	55
8 Расчет автоклава	60
Список использованных источников	67
Приложения	68

Введение

В сушилках и печах керамического производства осуществляются сложные и ответственные процессы, связанные с сушкой и обжигом материалов и изделий.

Сушилки керамического производства характеризуются процессами влагообмена, протекающими одновременно с движением теплоносителя.

В промышленных печах тепловая энергия образуется за счет сжигания топлива (иногда за счет электрической энергии электронагревателей) и передается материалу или изделиям, подвергающимся тепловой обработке. Основными в печах обжига являются процессы сжигания топлива и теплопередачи, которые чаще всего протекают одновременно в рабочем пространстве агрегатов. При этом большую роль играет аэродинамика процесса обжига.

При проектировании тепловых установок и агрегатов необходимо обеспечить следующие теплотехнические и технологические требования:

- высокую тепловую мощность, позволяющую достигнуть требуемой температуры термообработки, соответствующую технологическому режиму производства;
- эффективное сжигание подаваемого в печь топлива, высокий коэффициент его использования при минимальном расходе для обеспечения технологического режима термообработки;
- эффективность эксплуатации, легкость и простоту в обслуживании;
- максимальную продолжительность работы без ремонтов, т.е. высокую стойкость огнеупорной кладки при температурном воздействии;
- агрегат должен обеспечивать автоматизацию режима термообработки с установкой требуемых контрольно-измерительных приборов;
- соблюдение норм техники безопасности, промышленной санитарии и охраны окружающей среды.

Расчеты печей и сушилок позволяют определить их тепловую мощность, количество теплоносителя, которое необходимо подавать в сушильные агрегаты, обеспечивающие заданную производительность печей и сушилок, выбрать тягодутьевые устройства, решить ряд вопросов, определяющих конструкцию агрегатов и их отдельных элементов, а также основные размеры.

Решение этих задач связано с выполнением многообразных расчетов по определению материальных балансов тепловых процессов, конструктивных и теплотехнических расчетов тепловых агрегатов.

Все расчеты, приводимые в пособии, даны в единицах СИ.

1 Состав и содержание курсовой работы

Выполнение курсового проекта по дисциплине осуществляется в соответствии с заданием по курсовому проектированию, включающему тему проекта и исходные данные к проекту: годовую производительность агрегата в натуральном выражении, вид применяемого топлива и тип изготавливаемой продукции.

Курсовой проект состоит из расчетной и графической частей. В задании по курсовой работе указываются основные разделы и подразделы, которые должны быть отражены в пояснительной записке. Она должна включать введение; анализ действующих тепловых агрегатов выбор конструкции печи (сушилки) и ее описание; расчет горения топлива; расчетную часть, включающую технологический и теплотехнический расчет установки; технику безопасности проектируемой установки; заключение; список использованных источников литературы; приложения.

Пояснительная записка выполняется на одной стороне листа формата А4, снабженного основной надписью (приложение А). Каждый раздел текста пояснительной записки следует начинать с нового листа. Основные разделы текста должны снабжаться основной надписью по форме 5 ГОСТ 21.101.. Выполненный курсовой проект должен соответствовать требованиям СТП БГТУ 002–2007 «Проекты (работы) курсовые. Требования и порядок подготовки, представления к защите и защиты».

Разработка пояснительной записки курсового проекта начинается с *введения*, в котором описываются технологические процессы, происходящие в агрегате в период термообработки в зависимости от вида обжигаемой продукции. В качестве источников информации для составления введения используются учебники и учебные пособия в зависимости от вида изготавливаемых изделий.

1 Анализ действующих тепловых агрегатов, выбор конструкции печи (сушилки) и ее описание

Необходимо дать сравнительную оценку применяемого теплового оборудования и указать на преимущества проектируемой установки. Привести характерные особенности данной установки.

Необходимо подробно описать конструкцию проектируемой установки, принцип действия, теплообмен, протекающий между теплоносителем и изделиями, и процессы, происходящие в изделиях в каждом периоде тепловой обработки.

2 Расчет горения топлива

При расчете процесса горения топлива необходимо определить теоретическое и действительное количество воздуха, необходимое для сжигания топлива, состав и количество продуктов горения, теоретическую и действительную температуры горения. Расчет выполняется согласно методике.

3 Расчетная часть

3.1 Исходные данные

Приводятся необходимые для выполнения расчетов данные (производительность цеха, состав топлива, вид изделия, и т. д.).

3.2 Конструктивный расчет установки

Конструктивным расчетом определяются основные размеры проектируемой установки (длина, ширина, высота).

3.3 Теплотехнический расчет установки

Тепловой расчет установки предполагает составление теплового баланса проектируемой установки с последующим определением удельных норм расхода натурального и условного топлива на тепловую обработку изделий. Расчет выполняется согласно методике.

4 Техника безопасности проектируемой установки

В данном разделе приводятся требования по технике безопасности, обеспечивающие нормальную и бесперебойную работу проектируемой установки.

Заключение

В заключении приводятся основные характеристики полученного в результате выполнения проекта теплового агрегата.

Список использованных источников литературы

Приводится перечень литературы, нормативно-технической документации и других информационных источников, которые использовались при выполнении курсового проекта.

Перечень графического материала

Графическая часть проекта должна содержать продольный и поперечные разрезы проектируемой установки, выполненные на листе формата. К чертежу делается спецификация оборудования и материалов.

2 Расчёт процесса горения топлива

Расчет горения топлива необходим для того, чтобы правильно выбрать дутьевые и тяговые устройства к печи, обеспечивающие нормальный процесс горения, движения дымовых газов и необходимый температурный режим в рабочем пространстве печи. Составы различных видов топлива приводятся ниже. Для газообразного топлива состав дается на сухой газ, а для жидкого и твердого – на горючую массу, то необходимо произвести перерасчет всех составляющих на рабочую массу.

Состав и плотность природного газа различных месторождений

Страна, месторождение	Состав сухого газа, % объемн.								Плотность ρ , кг/м 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	
<u>Россия</u>									
Верховское	98,5	0,6	0,1	-	-	0,1	0,7	-	0,730
Коробковское	94,7	0,9	0,04	-	-	0,6	3,76	-	0,753
Кудиновское	86,0	6,0	2,5	0,5	1,0	-	4,0	-	0,844
Деружинское	57,4	1,8	1,16	0,14	0,1	0,9	38,5	-	0,973
Генеральское	83,5	4,3	1,9	1,0	0,5	0,2	8,6	-	0,850
Березанское	87,2	3,6	0,7	0,1	1,0	3,4	4,0	-	0,841
Майкопское	84,6	2,8	0,3	-	0,5	4,2	7,6	-	0,846
Фрунзенское	99,0	0,3	0,1	0,4	-	0,2	-	-	0,733
Журавское	78,0	11,0	4,0	-	-	3,0	4,0	-	0,897
Березовское	88,8	0,1	0,05	-	-	0,6	10,45	-	0,784
Медвежье	99,0	0,1	-	-	-	0,1	0,8	-	0,726
Степковское	95,5	1,9	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	-	0,796
<u>Украина</u>									
Дашавское	98,3	0,3	0,12	0,15	0,03	0,1	2,0	-	0,733
Солоховское	87,0	0,1	-	-	-	-	12,9	-	0,789
Спиваковское	92,1	3,8	0,8	0,3	-	0,1	2,9	-	0,776
Шабелинское	91,1	4,3	0,9	0,3	-	0,1	3,3	-	0,782
Джанкойское	96,0	0,5	0,1	-	-	-	3,4	-	0,742
Стрелковское	98,0	0,1	-	-	-	0,4	1,5	-	0,743
Глебовское	90,0	5,0	2,0	1,0	0,6	0,4	1,0	-	0,820
Западно- Октябрьское	82,0	10,0	4,0	2,0	1,0	0,1	0,9	-	0,900
<u>Республика</u>									
<u>Беларусь</u>									
Речицкое	82,1	3,69	1,5	1,4	2,2	0,5	7,5	1,1	0,897

Состав некоторых жидких топлив

Наименование топлива	Элементарный состав, %					A ^p	W ^p
	C ²	H ²	S ²	N ²	O ²		
Мазут малосернистый							
марок:	87,2	11,7	0,5	0,4	0,2	0,1	2,0
20	87,4	11,2	0,5	0,6	0,3	0,2	3,0
40	87,6	10,7	0,7	0,6	0,2	0,2	3,0
60	87,6	10,5	0,9	0,7	0,3	0,3	4,0
80, 100							
Мазут сернистый	85,2	11,6	2,5	0,4	0,3	0,1	1,0
марок:	85,0	11,6	2,9	0,3	0,2	0,2	2,0
10	85,0	11,4	3,2	0,2	0,2	0,3	3,0
20							
40	72 – 90	7 – 11	0,2 – 1	1 – 6	1 – 4	1,0	5,0
Смолы генераторные							

Характеристика некоторых видов твердых топлив

Наименование место- рождения и района	Марка и сорт	Влага W ^p , %	Зола A ^c , %	Состав горючей массы % (по массе)					
				S ^{общ}	C ²	H ²	N ²	O ²	L ²
Донецкий бассейн	Д	13,0	19,6	5,9	75,0	5,5	1,5	12,0	43
	Г	8,0	16,0	4,3	80,5	5,4	1,5	8,3	39
	Т	4,5	16,0	2,2	90,0	4,2	1,5	2,1	12
	АК	4,0	6,0	1,9	94,0	1,8	1,0	1,3	4
Кузнецкий бассейн									
Кемеровское	С, С С	9,0	16,0	0,7	86,0	5,0	2,0	6,3	26
Ленинское	Д	10,0	5,5	0,5	79,0	5,5	2,4	12,6	40
	Г	8,5	11,0	0,7	83,0	5,8	2,7	7,8	39
Карагандинский бассейн	Ж, П								
	С	7,5	27,0	1,2	85,0	5,1	1,4	7,3	28
Подмосковный бассейн	Б	32,5	35,0	5,9	67,0	5,0	1,3	20,8	45
Уральский бассейн									
Богословское	Б	29,0	20,0	0,6	70,0	4,5	1,3	23,6	45
Буланашское									
Челябинский бассейн	Г	11,0	24,0	1,3	80,5	5,5	1,5	11,2	40
	Б	17,0	32,0	2,1	72,0	5,2	1,7	19,0	43

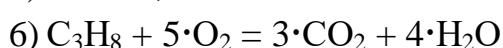
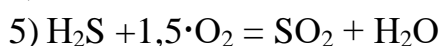
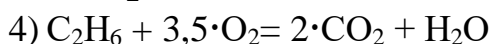
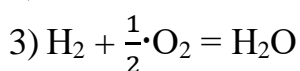
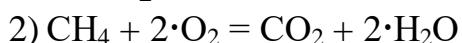
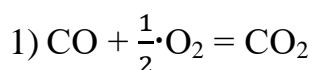
Расчёт процесса горения газообразного топлива

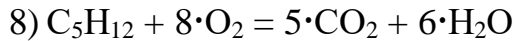
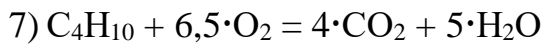
Газообразное топливо состоит из:

горючая часть: CO, H₂, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀, H₂S, C₅H₁₂;

негорючая часть: CO₂, O₂, N₂, H₂O.

Составляем химические реакции горения горючих элементов, входящих в состав топлива:





Определяем теоретический и действительный расход воздуха, необходимый для горения по формуле:

$$V_{теор.} = \frac{(0,5CO + 0,5 H_2 + 1,5 H_2S + 2 CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12})}{0,21 \cdot 100} \frac{M^3}{M^3}$$

где 0,21 – объемная доля кислорода в воздухе,

$CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}$ – процентное содержание горючих газов, входящих в состав топлива.

$$V_{действ} = \alpha \cdot V_{теор.} \left(\frac{M^3}{M^3} \right),$$

где α – коэффициент избытка воздуха; $\alpha = 1,05 - 1,2$

$V_{теор.}$ – теоретический расход топлива.

Определяем состав дымовых газов и их количество:

Дымовые газы состоят из: $CO_2, H_2O, N_2, SO_2, O_2$.

$$V_{CO_2} = \frac{(CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12})}{100} \frac{M^3}{M^3}$$

$$V_{H_2O} = \frac{(2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12})}{100} \frac{M^3}{M^3}$$

$$V(N_2) = \frac{N_2}{100} + 0,79 \cdot V_{действ} \left(\frac{M^3}{M^3} \right),$$

где 0,79 – объемная доля азота в воздухе,

$V_{действ}$ – действительный расход воздуха, $\left(\frac{M^3}{M^3} \right)$.

$$V(O_{2изб}) = 0,21 \cdot (V_{действ} - V_{теор.}) \left(\frac{M^3}{M^3} \right).$$

где 0,21 – объемная доля кислорода в воздухе.

$$1) V(SO_2) = \frac{H_2S}{100} \left(\frac{M^3}{M^3} \right).$$

Пересчитываем объем дымовых газов из объемных долей в массовые по формуле:

$$m = \rho \cdot V,$$

где m – масса дымовых газов, (кг);

V – объем дымовых газов, (M^3);

ρ – плотность дымовых газов, ($\frac{кг}{M^3}$).

$$1) m(CO_2) = V(CO_2) \cdot \rho(CO_2) \quad \rho(CO_2) = \frac{M(CO_2)}{22,4} = \frac{44}{22,4} = 1,96 \left(\frac{кг}{M^3} \right).$$

$$2) m(H_2O) = V(H_2O) \cdot \rho(H_2O), \quad \rho(H_2O) = \frac{M(H_2O)}{22,4} = \frac{18}{22,4} = 0,8 \left(\frac{кг}{M^3} \right).$$

$$3) m(N_2) = V(N_2) \cdot \rho(N_2), \quad \rho(N_2) = \frac{M(N_2)}{22,4} = \frac{28}{22,4} = 1,25 \left(\frac{кг}{M^3} \right).$$

$$4) m(O_2) = V(O_2) \cdot \rho(O_2), \quad \rho(O_2) = \frac{M(O_2)}{22,4} = \frac{32}{22,4} = 1,43 \left(\frac{кг}{M^3} \right).$$

Производим пересчет топлива и воздуха из объемных единиц в массовые:

$$m_{возд} = V_{действ} \cdot \rho_{возд} \quad \rho_{возд} = 1,29 \frac{кг}{M^3}.$$

$$m_{\text{топл}} = V_{\text{топл}} \cdot \rho_{\text{топл}} \quad \rho_{\text{топл}} = \frac{M_{\text{топл}}}{22,4} \text{ кг/м}^3.$$

Определяем плотность и объёмные доли элементов топлива:

$$\begin{aligned} 1) r(\text{CH}_4) &= \frac{V(\text{CH}_4)}{100}; & 2) r(\text{C}_2\text{H}_6) &= \frac{V(\text{C}_2\text{H}_6)}{100}; & 3) r(\text{C}_3\text{H}_8) &= \frac{V(\text{C}_3\text{H}_8)}{100}; \\ 4) r(\text{C}_4\text{H}_{10}) &= \frac{V(\text{C}_4\text{H}_{10})}{100}; & 5) r(\text{N}_2) &= \frac{V(\text{N}_2)}{100}; & 6) r(\text{CO}_2) &= \frac{V(\text{CO}_2)}{100}; \\ 7) r(\text{C}_5\text{H}_{12}) &= \frac{V(\text{C}_5\text{H}_{12})}{100}. \end{aligned}$$

$$M_{\text{топл}} = M(\text{CH}_4) \cdot r(\text{CH}_4) + M(\text{C}_2\text{H}_6) \cdot r(\text{C}_2\text{H}_6) + M(\text{C}_3\text{H}_8) \cdot r(\text{C}_3\text{H}_8) + M(\text{C}_4\text{H}_{10}) \cdot r(\text{C}_4\text{H}_{10}) + M(\text{N}_2) \cdot r(\text{N}_2) + M(\text{CO}_2) \cdot r(\text{CO}_2) + M(\text{C}_5\text{H}_{12}) \cdot r(\text{C}_5\text{H}_{12}) \text{ (кг)}.$$

Рассчитаем массу топлива

$$\rho_{\text{топл}} = \frac{M_{\text{топл}}}{22,4} \text{ кг/м}^3, \quad m_{\text{топл}} = 1 \cdot \rho_{\text{топл}} \text{ (кг)}.$$

Проверяем правильность расчётов путём составления таблицы 2.1 материального баланса.

Таблица 2.1 Материальный баланс процесса горения топлива

Приходные статьи	Количество		Расходные статьи	Количество	
	кг	%		кг	%
Топливо			Продукты сгорания CO ₂ H ₂ O N ₂ O ₂		
Воздух					
Итого:		100	Итого:		100

Невязка баланса:

$$H = \frac{(B-M)}{B} \cdot 100\% , \quad H < 1\%$$

Расчёт температуры горения

Расчёт температуры горения выполняется на основании теплового баланса процесса горения методом подбора.

$$Q_{\text{н}}^p = m_{\text{п.г.}} \cdot c_{\text{п.г.}}^t \cdot t_x,$$

где $m_{\text{п.г.}}$ – масса продуктов горения (кг);

$Q_{\text{н}}^p$ – низшая теплота сгорания топлива, (кДж/кг);

$c_{\text{п.г.}}^t$ – теплоёмкость продуктов горения при их температуре, (кДж/кг·К);

t_x – исходная температура, (°С).

Для нахождения температуры необходимо получить неравенство:

$$Q_1 < Q_{\text{н}}^p < Q_2$$

Определяем низшую рабочую теплоту сгорания топлива

$$Q_H^p = 358 \cdot \text{CH}_4 + 637 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 912 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1187 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1506 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 1713 \cdot \text{H}_2\text{S}, \text{ (кДж/м}^3\text{)},$$

где 358, 637, 912, 1187, 1506, 1713 – тепловые эффекты реакций окисления;

$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10}, \text{C}_5\text{H}_{12}$ – процентное содержание горючих элементов, входящих в состав топлива, (%).

Произвольно задаёмся температурой t_1 , определяем количество тепла Q_1 , которую имели бы продукты сгорания при этой температуре.

Задаёмся t_1 (°C), тогда:

$$Q_1 = t_1 \cdot (m_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{O}_2}), \text{ (кДж);}$$

где m – массовая доля продуктов сгорания;

C – теплоёмкость продуктов горения, (кДж/кг·К).

Далее задаёмся температурой t_2 , определяем количество тепла Q_2 , которую принимают продукты сгорания при температуре t_2 .

$$t_2 = t_1 + 100^\circ\text{C}$$

$$Q_2 = t_2 \cdot (m_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2} + m_{\text{O}_2} \cdot C_{\text{O}_2}), \text{ (кДж).}$$

Получили неравенство

$$Q_1 < Q_H^p < Q_2$$

Определяем теоретическую температуру горения топлива:

$$t_x = t_1 + \frac{(Q_H^p - Q_1) \cdot (t_2 - t_1)}{Q_2 - Q_1} \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Определяем действительную температуру горения топлива:

$$t_d = t_x \cdot \eta, \text{ (}^\circ\text{C)};$$

где η – пирометрический коэффициент. $\eta = 0,75 - 0,8$

Расчёт процесса горения жидкого и твёрдого топлива

Топливо – уголь или мазут.

Переводим состав топлива на рабочую массу:

$$A^p = \frac{A_c \cdot (100 - W_p)}{100\%};$$

$$B = A^p + W^p \text{ (%);}$$

$$C^p = \frac{C_r \cdot (100 - B)}{100\%};$$

$$S^p = \frac{S_r \cdot (100 - B)}{100\%};$$

$$H^p = \frac{H_r \cdot (100 - B)}{100\%};$$

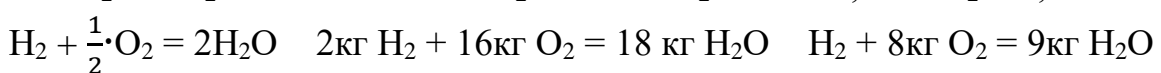
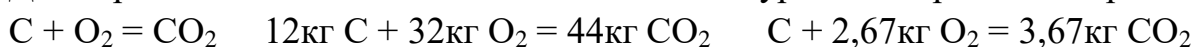
$$O^p = \frac{O_r \cdot (100 - B)}{100\%};$$

$$N^p = \frac{N_r \cdot (100 - B)}{100\%}.$$

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + W^p + A^p = 100\%$$

Расчёт ведётся на рабочую массу топлива – 1 кг.

Для горючих элементов топлива записывается уравнение реакции горения:



Воздух состоит по массе из 23% кислорода и 77% азота. Количество воздуха, подсчитанное по уравнениям химических реакций, называется теоретическим.

$$L_{\text{теор.}} = \frac{2,67C_p + 8H_p + S_p - O_p}{0,23 \cdot 100} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right).$$

В действительности, при сжигании топлива для лучшего перемешивания с воздухом берется большее количество воздуха:

$$L_{\text{действ}} = L_{\text{теор.}} \cdot \alpha \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

Для твёрдого топлива $\alpha = 1,3 - 2$

Определяем состав продуктов горения

В состав продуктов горения входят: CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 .

$$m(\text{CO}_2) = \frac{3,67 \cdot C_p}{100} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{(9 \cdot H_p)}{100} + \frac{W_p}{100} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

$$m(\text{SO}_2) = \frac{2 \cdot S_p}{100} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

$$m(\text{N}_2) = 0,77 \cdot L_{\text{действ}} + \frac{N_p}{100} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

$$m(\text{O}_2) = 0,23 \cdot (L_{\text{действ}} - L_{\text{теор.}}) \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right);$$

$$m_A = \frac{A_p}{100} \left(\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right).$$

Материальный баланс процесса горения представлен в таблице 2.2

Таблица 2.2 Материальный баланс процесса горения топлива

Приходные статьи	Количество		Расходные статьи	Количество	
	кг	%		кг	%
Воздух ($L_{\text{действ}}$)			CO_2 H_2O SO_2 N_2 $\text{O}_2(\text{изб})$		
Топливо			зола		
Итого:		100	Итого:		100

Невязка баланса:

$$H = \frac{(B-M)}{B} \cdot 100\% , \quad H < 1\%$$

Расчёт температуры горения

Расчёт температуры горения выполняется на основании теплового баланса процесса горения методом подбора.

$$Q_H^p = m_{\text{п.г.}} \cdot c_{\text{п.г.}}^t \cdot t_x,$$

где $m_{\text{п.г.}}$ – масса продуктов горения (кг);

Q_H^p – низшая теплота сгорания топлива, (кДж/кг);

$c_{\text{п.г.}}^t$ – теплоёмкость продуктов горения при их температуре, (кДж/кг·К);

t_x - исходная температура, (°С).

Для нахождения температуры необходимо получить неравенство:

$$Q_1 < Q_H^p < Q_2$$

Определяем низшую рабочую теплоту сгорания топлива

$$Q_H^p = 339 C^p + 1030 H^p - 109(O^p - S^p) - 25W^p \text{ (кДж/кг)}.$$

Произвольно задаёмся температурой t_1 , определяем количество тепла Q_1 , которую имели бы продукты сгорания при этой температуре.

$$C_{п.г.} = gCO_2 \cdot C_{CO_2} + gH_2O \cdot C_{H_2O} + gN_2 \cdot C_{N_2} + gO_2 \cdot C_{O_2},$$

где m – массовая доля продуктов сгорания;

C – теплоёмкость продуктов горения, (кДж/кг·К).

$$g(CO_2) = \frac{m_{CO_2}}{m_{см}}; g(H_2O) = \frac{m_{H_2O}}{m_{см}}; g(SO_2) = \frac{m_{SO_2}}{m_{см}}; g(N_2) = \frac{m_{N_2}}{m_{см}}; g(O_2) = \frac{m_{O_2}}{m_{см}};$$

где $m(CO_2)$, $m(H_2O)$, $m(SO_2)$, $m(N_2)$, $m(O_2)$ – масса продуктов горения (кг);

$m_{см}$ – масса всей смеси (кг).

Определяем количество тепла Q_1 , которую имели бы продукты горения при температуре t_1

$$Q_1 = m_{п.г.} \cdot c_{п.г.}^t \cdot t_1.$$

Задаёмся температурой t_2 на 100°C больше t_1 . ($t_2 = t_1 + 100^\circ\text{C}$)

Находим $C_{п.г.}$ для t_2 .

$$C_{п.г.} = gCO_2 \cdot C_{CO_2} + gH_2O \cdot C_{H_2O} + gN_2 \cdot C_{N_2} + gO_2 \cdot C_{O_2}.$$

$$Q_2 = m_{п.г.} \cdot c_{п.г.}^t \cdot t_2.$$

Получили неравенство:

$$Q_1 < Q_H^p < Q_2$$

Определяем теоретическую температуру горения топлива:

$$t_x = t_1 + \frac{(Q_H^p - Q_1) \cdot (t_2 - t_1)}{Q_2 - Q_1} \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Определяем действительную температуру горения топлива:

$$t_d = t_x \cdot \eta, \text{ (}^\circ\text{C)};$$

где η – пирометрический коэффициент. $\eta = 0,75 - 0,85$

3 Расчет башенной распылительной сушилки

Расчет распылительной сушилок включает определение размеров рабочей камеры сушилки при заданной его производительности (либо, наоборот, определение производительности сушилки при заданных размерах ее рабочей камеры), расчет материального и теплового балансов, определение расхода топлива, аэродинамический расчет газоходного тракта, подбор топочных и вентиляционных устройств.

3.1 Исходные данные

Производительность по годному порошку, кг/ч

$G_{a.c}$

Потери материала при сушке, %

Π

Влажность шликера, %

W_0

Температур шликера, $^\circ\text{C}$

t_{m1}

Влажность порошка, %

W_2

Температура шликера, $^\circ\text{C}$

t_{m2}

Теплоемкость абсолютно сухого порошка, кДж/(кг·К)	C_m
Температура наружного воздуха, °С	t_g
Теплоемкость наружного воздуха, кДж/(кг·К)	C_B
Коэффициент полезного действия топочного устройства	η_m
Коэффициент избытка воздуха	a

3.2 Расчет материального баланса процесса сушки

Общая производительность сушилки, кг/ч:

$$G_{a.c.общ} = \frac{G_{a.c.}}{1 - \Pi/100},$$

где $G_{a.c.}$ – производительность сушилки по абсолютно сухому годному порошку, кг/ч;
 Π – потери порошка при сушке, % (в сушилках НИИ стройкерамики $\Pi=3,5 - 4\%$, в сушилках конструкции МКСМ $\Pi=2,5 - 3\%$)

Количество распыляемой суспензии, кг/ч:

$$G_1 = \frac{G_{a.c.общ}}{1 - W_0/100},$$

где W_0 – влажность шликера, % (36-45)

Количество испаренной влаги, кг/ч:

$$\Delta G_{вл} = \frac{W_0 - W_2}{100 - W_2} \cdot G_1,$$

где W_0 – влажность суспензии, %;

W_2 – влажность порошка, % (7 – 10).

Начальное количество влаги в суспензии, кг/ч:

$$\Delta G_{вл} = G_1 \cdot \frac{W_0}{100},$$

где G_1 – количество распыляемой суспензии, кг/ч;

W_0 – влажность суспензии, %.

Количество остаточной влаги, кг/ч:

$$G_{ост.вл} = G_{вл1} - \Delta G_{вл},$$

где $G_{вл1}$ – начальное количество влаги в суспензии, кг/ч;

$\Delta G_{вл}$ – количество испаряемой влаги, кг/ч.

По рассчитанным данным составляем таблицу материального баланса процесса сушки (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Материальный баланс процесса сушки

Приходные статьи	кг/ч	Расходные статьи	кг/ч
Абсолютно сухой порошок $G_{a.c.общ}$		Абсолютно сухой порошок $G_{a.c.}$	
Влага $G_1 - G_{a.c.общ}$		Остаточная влага в порошке $G_{ост.вл}$	
		Испаренная влага $\Delta G_{вл}$	
		Потери порошка $G_{a.c.общ} - G_{a.c.}$	
Итого:		Итого:	

Невязка баланса не должна превышать $\pm 0,1 \%$.

2.3 Выбор оптимальных размеров сушильной камеры

Техническая характеристика башенных распылительных сушилок приведена в приложении 6

Рабочий объем сушильной камеры (m^3) определяют по формуле

$$V_6 = \frac{\Delta G_{вл}}{R_{w,v}},$$

где $\Delta G_{вл}$ – испаренная влага, кг/ч (из материального баланса);

$R_{w,v}$ – удельный влагосъем, кг/($m^3 \cdot ч$). Для сушилок НИИ стройкерамики $R_{w,v} = 15 - 30$, а для сушилок МКСМ $R_{w,v} = 4,5 - 9$ кг/($m^3 \cdot ч$).

Нормальное соотношение между высотой башни H_6 , м, и ее диаметром D_6 , м, для сушилок с форсуночным распылением находится в пределах $H_6 / D_6 = 0,8 - 1$, откуда

$$H_6 = (0,8 - 1) \cdot D_6$$

Объем цилиндрической части рабочей камеры рассчитывается по формуле

$$V_6 = F_6 \cdot H_6,$$

где F_6 – площадь сечения цилиндрической башни, m^2 :

$$F_6 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 0,785 \cdot D^2.$$

Тогда из уравнения $\frac{G_{вл}}{R_{w,v}} = (0,8 - 1) D_6 \cdot 0,785 D_6^2$

Определяем диаметр, а затем высоту H_6 .

Объем конической части сушилки определяется по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot H_k}{3} (R^2 + r^2 + R \cdot r),$$

где R – радиус цилиндрической части;

r – радиус конической части;

H_k – высота конической части сушилки.

Общая высота сушильной камеры, м:

$$H_c = H_6 + H_k,$$

где H_c – общая высота сушильной камеры, м;

H_k – длина конической части, м, которая принимается по типовым размерам сушилки.

Затем уточняются размеры сушилки в соответствии со справочными данными, нормами и имеющимся опытом работы.

Приближенные параметры башенных распылительных сушилок

Параметры	Типоразмер				
	I	II	III	IV	V
Размеры сушильной камеры (внутренние), м:					
диаметр	4,5	5,5	7	9,5	12,5
высота цилиндра	3	3,7	4,7	6,3	8,8
Тепловая мощность установки, кВт	220	560	1410	3500	8720
Производительность по испаряемой влаге, кг/с	0,07	0,175	0,445	1,1	2,78
Удельный расход теплоты, кДж/кг влаги	3190	3180	3170	3160	3150
Паросъем по цилиндрической части сушильной камеры, кг/(м ³ ·ч)	5,0	7,1	8,9	8,9	9,2
Температура сушильного агента начальная, °С	600	600	600	600	600
Температура отработанного сушильного агента	130	130	130	130	130
Разрежение в сушильной камере, Па	400	400	400	400	400
Потребляемая мощность, включая дымосос	6,3	16	40	100	250

Техническая характеристика распылительных сушилок

Показатель	Конструкция		
	НИИстрой-керамика	СМК – 148	Институт «Гипрострой-материалы»
Вид топлива	Газ	Газ	Газ
Диаметр сушилки, м	4,5	9,2	7,7
Объем сушилки, м ³	94	710	486
Производительность по испаренной влаге, кг/	2020	4300	5575
Производительность по годному порошку, кг/ч, при его влажности 6% и влажности шликера, %:			
40	3460	7360	9540
50	2225	4740	6145
60	1450	3090	4000
Давление распыления, Мпа	1 – 1,3	2,5 – 3	1,9
Диаметр форсунки, мм	1,8 – 2,1	4,5 – 5,5	3,9
Мощность электродвигателя, кВт	19,7	34,3	25,4
Число форсунок, шт	12	3	4
Удельный расход топлива, кг усл.г. испаренной влаги	0,11	0,12	0,133
Удельный влагосъем, кг/(м ³ ·ч)	21	6,05	11,5

3.4 Тепловой расчет распылительной сушилки

В качестве теплоносителя при сушке шликера в башенной распылительной сушилке в основном используются дымовые газы, образующиеся при сжигании топлива. Так как температура дымовых газов может быть больше необходимой для сушки, то в этом случае предусматривается их разбавление воздухом.

3.4.1 Определение начальных параметров процесса сушки

Начальными параметрами процесса сушки являются следующие:

H_1 – энтальпия, кДж/кг; d_1 – влагосодержание, г/кг сухого воздуха; t_1 – температура, °С.

Для их нахождения вначале определяются максимальные параметры теплоносителя с учетом потерь тепла до сушила (т.е. в топке и газоходе при $a=1$). Значение i_{max} , d_{1max} определяются по формулам:

$$H_{max} = \frac{Q_B^P \cdot \eta_m + G_B^0 \cdot C_B \cdot t_B}{G_{с.п.г.}},$$

$$d_{1max} = \frac{G_{H_2O} + 0,001 \cdot d_0 \cdot G_B^0}{G_{с.г.п.}},$$

где Q_B^P – высшая теплота сгорания топлива, кДж/м³;

η_m – коэффициент полезного действия топочного пространства, равняется 1;

G_B^0 – теоретический расход воздуха на горение, кг/м³ (из расчета горения воздуха);

d_0 – влагосодержание воздуха, г/кг ($d_0=8 - 12,5$);

C_B, t_B – теплоемкость, кДж/кг, и температура наружного воздуха, °С;

$G_{с.г.п.}$ – масса сухих продуктов горения, кг/м³.

$$Q_B^P = Q_H^P + 2500 \cdot G_{H_2O},$$

где 2500 – скрытая теплота парообразования, кДж/кг влаги.

$$G_B^0 = p_B \cdot V_B^0,$$

$p_B=1,29$ кг/м³;

$G_{с.п.г.} = G_{п.г.} - G_{H_2O}$; $G_{п.г.} = p_{п.г.} \cdot V_{п.г.}$; $p_{п.г.} \approx 1,35$ кг/м³;

где G_{H_2O} – масса водяных паров в продуктах горения, кг:

$$G_{H_2O} = p_{H_2O} \cdot V_{H_2O} = 0,8 \cdot V_{H_2O}.$$

Начальные параметры теплоносителя для расчета процесса сушки определяются с учетом относительного количества избыточного воздуха X :

$$X = \frac{V_B^{изб}}{V_{с.п.г.}} \text{ (обычно принимается } 0,3 - 0,4);$$

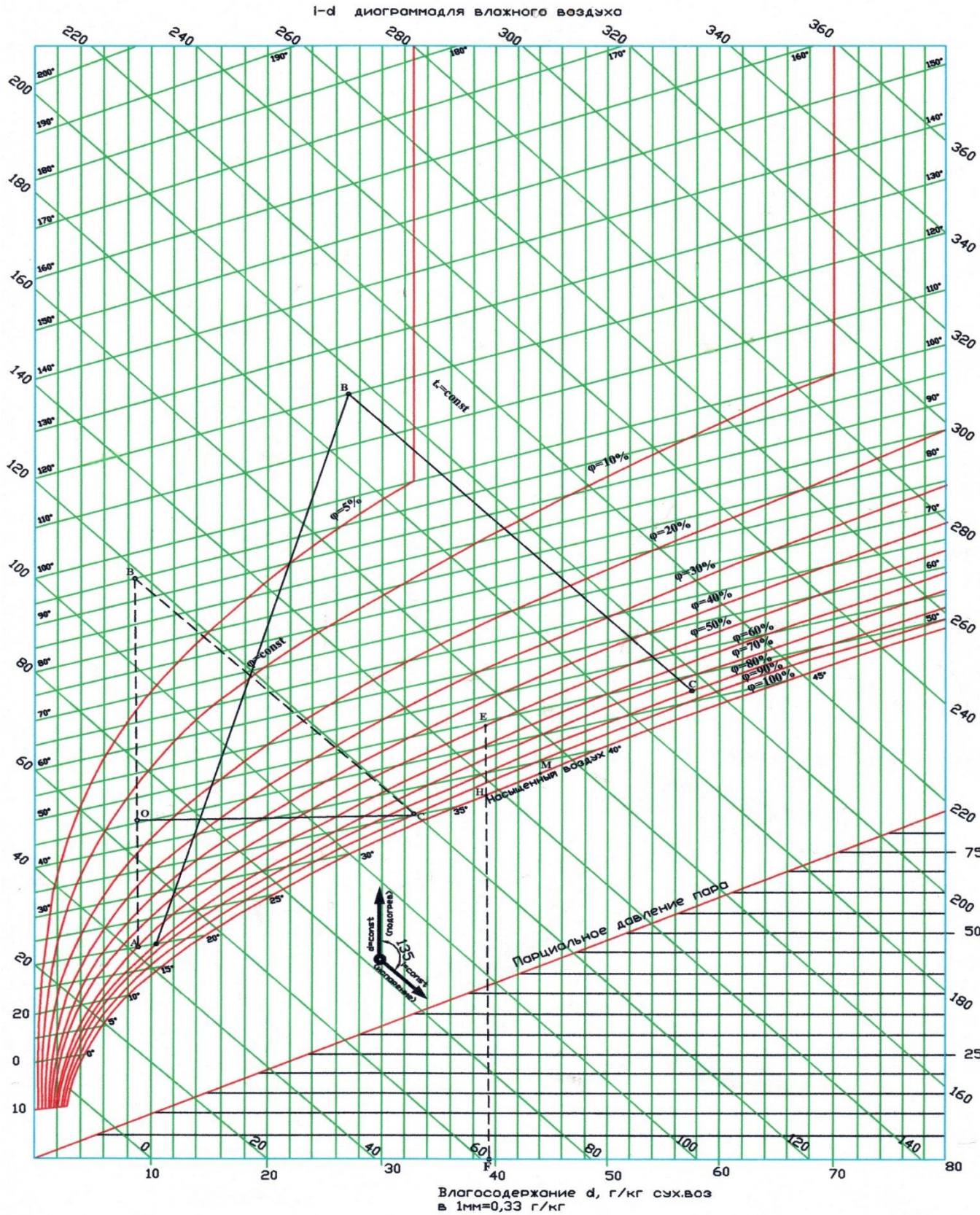
$$H_1 = \frac{H_{max} + X \cdot H_0}{1 + X};$$

$$d_1 = \frac{d_{1max} + X \cdot d_0}{1 + X};$$

$$H_0 = 2,50 \cdot d_0 + \left(1 + 1,97 \frac{d_0}{1000}\right) \cdot t_0;$$

где H_0, d_0, t_0 – энтальпия, влагосодержание и температура воздуха ($t_0=20 - 30^\circ\text{C}$).

Начальная температура теплоносителя t_1 находится или по $H-d$ – диаграмме в месте пересечения линий $H_1=\text{const}$ и $d_1=\text{const}$ или по соответствующим таблицам.
 $H-d$ – диаграмма приведена ниже.



3.4.2 Расчет процесса сушки

В связи с тем, что температура дымовых газов обычно больше необходимой для сушки, то, как уже отмечалось, осуществляется разбавление дымовых газов.

Расчет количества воздуха, идущего на разбавление, определяется из баланса тепла по формуле:

$$N_{\text{общ}} \cdot \eta + \frac{L'_a + X}{V_a} \cdot N'_{\text{возд}} = N_{\text{дым}} + \frac{X}{V_a} \cdot N''_{\text{возд}}$$

где η - к.п.д. топки ($\eta=0,8 - 0,9$);

$N_{\text{общ}}$ - теплосодержание продуктов горения;

L'_a - количество воздуха, идущего на горение;

V_a - общее количество продуктов горения;

X - количество воздуха для смешения при 20°C ;

$N_{\text{дым}}$ - теплосодержание дымовых газов при t_H^Γ ;

$N'_{\text{возд}}$ - теплосодержание воздуха при t_H^Γ .

Начальными параметрами атмосферного воздуха обычно служат температура $t'_{\text{возд}}$ и относительная влажность ϕ , которые зависят от времени года и местности и приведены в приложении 16. $N_{\text{дым}}$ и $N''_{\text{возд}}$ определяются по $H-d$ - диаграмме. Для этого необходимо построить на диаграмме линию смешения топочных газов с воздухом. Эта линия соединяет точки, соответствующие параметрам атмосферного воздуха и топочных газов. При этом точка пересечения линии смешения с линией начальной температуры газов разделяет линию смешения на отрезке, соотношение которых равно соотношению количества дымовых газов и количества воздуха. На приведенных диаграммах можно также определить и влагосодержание полученного сушильного агента (дымовых газов, разбавленных воздухом). Влагосодержание дымовых газов, разбавленных воздухом при барометрическом давлении $99,4 \text{ кН/м}^2$, можно также найти по формуле, г/кг сух. возд.:

$$d_H = \frac{804 \cdot V_{H_2O}}{1,977 \cdot V_{CO_2} + 1,251 \cdot V_{N_2} + 1,429 \cdot V_{O_2}},$$

где V_{H_2O} , V_{CO_2} , V_{N_2} , V_{O_2} - количество отдельных составляющих продуктов горения, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ газа, $\text{нм}^3/\text{кг}$ твердого или жидкого топлива, а также % по объему, которые определяются при расчете горения топлива.

Определение необходимого для подачи в сушилку количества сушильного агента проводят с использованием $H-d$ - диаграммы, которой определяют влагосодержание сушильного агента в конце процесса сушки.

Для этого на диаграмме строится вначале теоретический процесс сушки, в котором тепло расходуется только на испарение влаги без потерь тепла в окружающую среду и без затрат на нагрев высушиваемого материала и транспортирующих устройств. Затем, определив сумму потерь тепла, строится действительный процесс сушки. Теоретический процесс сушки на диаграмме изображен линией BC , потери теплосодержания при сушке - линией CD и действительный процесс сушки - линией BE .

Параметрами точки C являются теплосодержание, конечная температура газов и влагосодержание. Расход сушильного агента для теоретического процесса сушки определяются по формуле, кг/ч:

$$G_{\text{газ}}^{\text{теор}} = \frac{1000 \cdot \Delta G_{\text{вл}}}{d_{\text{к}}^{\text{теор}} - d_{\text{н}}},$$

где $d_{\text{к}}^{\text{теор}}$ – конечное теоретическое влагосодержание газов, г/кг.

3.5.3 Расчет удельных расходов теплоты, теплоносителя и топлива на процесс сушки

Расчет удельного расхода теплоты включает следующие статьи затрат теплоты: на подогрев сухой массы материала и остаточной влаги, на испарение влаги и нагрев водяных паров, подогрев уходящего теплоносителя и потерь теплоты в окружающую среду и неучтенные потери.

1) Расчет удельного количества теплоты на подогрев сухой массы материала, кВт·ч на 1 кг влаги:

$$q_1 = \frac{G_{\text{а.с.общ}} \cdot C_{\text{м}} (t_{\text{м2}} - t_{\text{м1}})}{3600 \cdot \Delta G_{\text{вл}}},$$

где $G_{\text{а.с.общ}}$ – количество абсолютного сухого материала, кг/ч;

$C_{\text{м}}$ – теплоемкость материала, кДж/(кг·К);

$\Delta G_{\text{вл}}$ – часовое количество испаренной влаги, кг/ч;

$t_{\text{м1}}$ – температура шликера, поступающего в сушилку, °С (20 – 30);

$t_{\text{м2}}$ – температура порошка, выгружаемого из сушилки, °С (70 – 85).

2) Расчет удельного количества теплоты на подогрев остаточной влаги, кВт·ч на 1 кг влаги:

$$q_2 = \frac{G_{\text{ост.вл}} \cdot C_{\text{м}} (t_{\text{м2}} - t_{\text{м1}}) \cdot 4,19}{3600 \cdot \Delta G_{\text{вл}}},$$

где $G_{\text{ост.вл}}$ – остаточная влага в материале, кг/ч;

4,19 – теплоемкость воды, кДж/(кг·К).

3) Расчет количества теплоты, теряемой в окружающую среду через ограждающие конструкции: перекрытие, цилиндрическую и коническую части башни.

а) Тепловой поток через плоскую часть перекрытия сушилки. Перекрытие сушилки представляет собой оребренные панели, выполненные из нержавеющей стали, толщиной σ_1 (обычно 5 – 6 мм) с изоляционным слоем минеральной ваты толщиной σ_2 , мм, наружная поверхность – из стали Ст3. Температура на поверхности башни не должна превышать 40°С.

Коэффициент теплопередачи

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \frac{1}{a_2}},$$

где σ_1 и λ_1 – соответственно толщина слоя, м, и теплопроводность, Вт/(м·К), нержавеющей стали;

σ_2 и λ_2 – соответственно толщина слоя и теплопроводность минеральной ваты;

σ_3 и λ_3 – то же стали Ст3;

a_1 – коэффициент теплопередачи от греющей среды к стенкам внутри рабочего пространства, a_1 для смеси воздуха с водяным паром составляет 20 – 200 Вт/(м·К);

a_2 - коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности перекрытия в окружающую среду,

Площадь перекрытия (по чертежу) определяется по формуле, м²:

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4},$$

где D – диаметр перекрытия сушилки, м.

Тепловой поток через перекрытие составляет, Вт.

$$Q_3^1 = K_1 \cdot F_1 \cdot (t_{\text{ВН1}} - t_{\text{ОКР}}),$$

где $t_{\text{ВН1}}$ и $t_{\text{ОКР}}$ – температура среды в камере под перекрытием и окружающей среды соответственно.

Температура теплоносителя под перекрытием по опытным данным составляет 400–450°С, а температура наружного воздуха $t_{\text{ОКР}}$ для сушилок, расположенных вне здания, –10°С; в здании – +20°С.

б) Тепловой поток через ребра перекрытия. Суммарная площадь поверхности в направлении теплового потока через стальные (сталь Ст3) ребра перекрытия составляет, м²:

$$F_2 = l \cdot s,$$

где l - суммарная длина ребра, м;

s - толщина ребра, м, определяется по чертежу (s составляет около 0,08 м).

Тепловой поток через ребра составит, Вт:

$$Q_3^1 = F_2 \cdot \frac{\lambda_1}{\sigma_1} (t_{\text{ВН1}} - t_{\text{ОКР}}),$$

где σ_1 – высота ребер, м, составляющая обычно 0,3 м.

в) Тепловой поток через гладкую поверхность цилиндрической части ограждения конструкции. Цилиндрическое ограждение выполняется из панелей нержавеющей листовой стали толщиной $\sigma_1=0,006$ м с изоляцией минераловатным слоем толщиной σ_4 , наружная поверхность ограждения – из стали Ст3. Температура на поверхности сушилки должна составлять не более 40°С. Температуре цилиндрической части сушилки, составляет 300 – 350°С.

Коэффициент общей теплопередачи через гладкую поверхность цилиндрической части в связи с большим радиусом кривизны цилиндра определяется

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} + \frac{1}{a_2}},$$

где σ_4 – толщина слоя минеральной ваты, м;

λ_4 – теплопроводность слоя минеральной ваты $0,093+0,000256t$, Вт/(м·К).

Площадь боковой поверхности цилиндрической части (по чертежу)

$$F_3 = \pi \cdot D \cdot H.$$

Тепловой поток через гладкую поверхность цилиндрической части составляет, Вт:

$$Q_3^3 = K_3 \cdot F_3 \cdot (t_{\text{ВН2}} - t_{\text{ОКР}}),$$

где $t_{\text{ВН2}}$ – температура среды внутри цилиндрической части сушилки.

г) Тепловой поток через ребра цилиндрической части. Площадь поверхности стальных ребер в направлении теплового потока составляет, м²:

$$F_4 = l_1 \cdot s_1,$$

где l_1 – общая длина ребер, м; средняя толщина ребер, м (0,2м).

Тепловой поток через ребра цилиндрической части составит, Вт:

$$Q_3^4 = F_4 \cdot \frac{\lambda_1}{\sigma_2} \cdot (t_{\text{ВН1}} - t_{\text{ОКР}}),$$

где σ_2 – высота ребер, составляющая около 0,2 м.

д) Тепловой поток через конусную часть ограждения. Конусная часть выполняется из нержавеющей стали толщиной $\sigma_5=0,02$ м без изоляции.

Площадь поверхности конусной части (по череху)

$$F_5 = \pi \cdot (R + r) \cdot H_K,$$

где H_K – высота конусной части, м;

R и r – соответственно радиус большого и меньшего оснований, м.

Коэффициент теплопередачи через конусную часть ограждений

$$K_5 = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{s_5}{\lambda_5} + \frac{1}{a_2}},$$

Тепловой поток составляет, Вт:

$$Q_3^5 = F_5 \cdot K_5 \cdot (t_{\text{ВН2}} - t_{\text{ОКР1}}),$$

где $t_{\text{ВН2}}$ – температура среды внутри конусной части, составляющая 150 – 200°С;

$t_{\text{ОКР1}}$ – температура окружающего воздуха, составляющая 20°С, так как коническая часть располагается в помещении.

Суммарный тепловой поток в окружающую среду составляет, Вт:

$$Q = Q_3^1 + Q_3^2 + Q_3^3 + Q_3^4 + Q_3^5.$$

4) Удельные потери теплоты в окружающую среду, кВт·ч, отнесенные к 1 кг испаренной влаги:

$$q_3 = \frac{Q}{1000 \cdot \Delta G_{\text{вл}}},$$

5) Неучтенные потери принимают равными 10% от потерь теплоты в окружающую среду, кВт·ч на 1 кг влаги:

$$q_4 = 0,1 \cdot (q_1 + q_2 + q_3)$$

6) Суммарный расход удельной теплоты на 1 кг испаренной влаги составит, кВт·ч:

$$q_5 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4.$$

7) Построение действительного процесса сушки на $H - d$ – диаграмме. Определив общие потери в сушилке, находим величину уменьшения теплосодержания

сушильного агента в конце теоретического процесса сушки за счет потерь теплоты, кДж/кг:

$$H_{\text{пот}} = \frac{Q_T}{G_{\text{теор}}^{\text{газ}}}$$

Откладывая величину $H_{\text{пот}}$ вниз точки C , получаем вспомогательную точку D . Линия BD показывает направление линии действительного процесса сушки с учетом тепловых потерь.

По заданным параметрам для конца процесса сушки (по температуре t_k^f или по относительной влажности ϕ_k , находим точку E . Действительный процесс сушки изображается линией BE .

Далее по $H - d$ – диаграмме находится величина конечного влагосодержания d_k , соответствующая точка E , и определяется действительный расход сушильного агента по формуле, кг/ч:

$$G = \frac{1000 \cdot \Delta G_{\text{вл}}}{d_k - d_H}$$

8) Составление теплового баланса башенной распылительной сушилки.

а) Расход теплоты на испарение влаги и нагрев водяных паров, кВт·ч:

$$q_5 = \frac{(2500 + C_{\text{в.п}} \cdot t_{M2} - 4,19 \cdot t_{M1})}{3600}$$

где 2500 – скрытая теплота парообразования, кДж/кг влаги;

4,19 – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

$C_{\text{в.п}}$ – теплоемкость водяного пара ($C_{\text{в.п}} = 1,97$ кДж/(кг·К));

t_{M1} и t_{M2} – соответственно температура шликера и температура порошка, °С.

б) Расход теплоты на подогрев сухой части отработанного теплоносителя, кВт·ч:

$$q_6 = \frac{G_{\text{у.г}} \cdot t_2}{3600 \cdot \Delta G_{\text{вл}}} \cdot \left(1 + 1,97 \cdot \frac{d_1}{1000} \right),$$

$$G_{\text{у.г}} = \frac{1000 \cdot \Delta G_{\text{вл}}}{d_2 - d_1}, \text{ кг/кг влаги;}$$

где d_1 и d_2 – влагосодержание теплоносителя на входе в сушилку и выходе из нее, г/кг; d_2 при $t_2 = 150 - 180^\circ\text{C}$.

Остальные статьи баланса составляют ранее подсчитанные расходы теплоты.

Составляем тепловой баланс агрегата на 1 кг испаренной влаги по форме таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Тепловой баланс башенной распылительной сушилки

Приходные статьи	Количество теплоты		Расходные статьи	Количество теплоты	
	кВт	%		кВт	%
Теплота топочных газов			На испарение влаги и подогрев водяных паров На подогрев сухой массы На подогрев остаточной влаги Потери теплоты в окружающую среду		

			Неучтенные потери На подогрев сухой части отходящих газов		
Итого:		100	Итого:		100

9) Удельный расход воздуха, который определяет расход электроэнергии, вычисляется из выражения, кг/кг:

$$g_B = \frac{G_{y.g.}}{\Delta G_{вЛ}},$$

10) Удельный расход натурального топлива ($m^3/ч$) на 1 кг испаренной влаги определяется по формуле

$$B^T = q_T \cdot \frac{\Delta G_{вЛ}}{Q_H^P},$$

11) Удельный расход условного топлива на 1 кг испаренной влаги, кг усл. топл/кг:

$$B_p = \frac{q_T \cdot \Delta G_{вЛ}}{29300}.$$

3.7 Расчет количества горелок

С точки зрения обеспечения симметричного обогрева обычно устанавливают 2 (конструкция МКСМ), 4, 6, 8, 12 (конструкция НИИстойкерамики) инжекционных горелок с 15 – 25%-ным запасом мощности по газу.

Количество горелок определяется из выражения

$$n = B^T / V_{гор},$$

где B^T – удельный расход топлива, $m^3/ч$;

$V_{гор}$ – производительность горелки, $m^3/ч$.

4 Расчет сушильного барабана

Исходные данные:

Производительность по высушенному материалу, т/ч ...

Топливо ...

Параметры сушки:

- начальная влажность материала, % $W_H =$

- конечная влажность материала, % $W_K =$

- начальная температура теплоносителя, °С $t_1 =$

- конечная температура теплоносителя, °С $t_2 =$

- напряжение сушильного барабана по испаренной влаге, кг/м.куб.*ч ...

- начальная температура материала, °С ...

- конечная температура материала, °С ...

Параметры атмосферного воздуха:

- температура, °С
- влагосодержание, г/кг с.в.

$t_0 =$
...

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ УСТАНОВКИ

В технологический расчёт входят: конструктивный расчёт тепловой установки и составление материального баланса процесса сушки.

Техническая характеристика сушильных барабанов приведена в приложении 4.

Параметры сушки различных материалов в сушильных барабанах приведены в приложении 5.

Конструктивный расчёт установки

Целью расчёта является определение габаритных основных размеров сушильного барабана. Выбор сушильного барабана производится по номограмме приведенной на рисунке 1

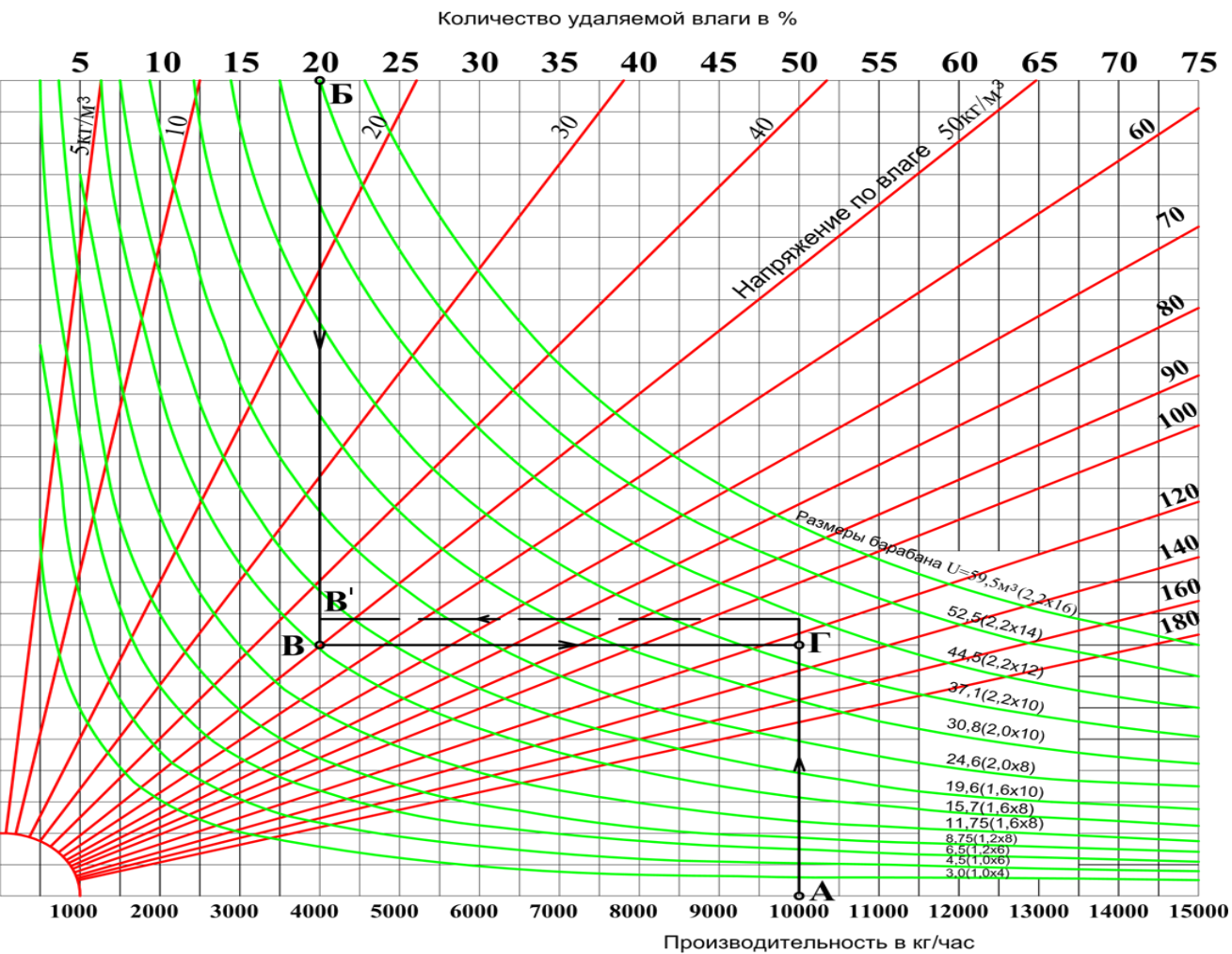


Рисунок 1- номограмма по выбору сушильного барабана
Найдя предварительно количество испарённой влаги W_1 :

$$W_1 = W_H - W_K, \%$$

Материальный баланс процесса сушки, кг/г

Масса абсолютно сухого материала:

$$m_c = m_2 \cdot (100 / (100 + W_K)),$$

где m_2 – масса материала, выходящего из сушки кг/г;

W_K – конечная влажность материала, %.

Масса материала, поступающего в сушилку:

$$m_1 = m_c \cdot ((100 + W_H) / 100),$$

где W_H – начальная влажность материала, %.

Масса испарённой влаги:

$$m = m_1 - m_2$$

Масса остаточной влаги:

$$m_{\text{ост.}} = m_2 - m_c$$

Материальный баланс процесса сушки сводится в таблицу 4.1.

Таблица 4.1- Материальный баланс процесса сушки

Приходная часть	кг/г	Расходная часть	Кг/г
Материал, поступающий в сушилку (m_1)		Абсолютно сухой материал Испарённая влага Остаточная часть	
Итого:		Итого:	

Тепловой баланс установки

Расчёт сушильного барабана производится с использованием $H-d$ – диаграммы влажного воздуха. Для этого необходимо определить удельные потери тепла сушилке, которые складываются из:

1. Потери тепла поверхностью барабана в окружающую среду:

$$Q_{\text{окр.ср}} = (3.6 \cdot \alpha_{\text{сум}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{возд}}) \cdot S) / n,$$

где α – суммарный коэффициент теплоотдачи, принимается в зависимости от температуры наружной поверхности (Л-2, стр. 83, табл. 32)

$t_{\text{ст}}$ - температура наружной стенки сушильного барабана, °С

$t_{\text{возд}}$ – температура воздуха в цехе, °С

S – площадь поверхности барабана, м².

N – количество испаренной влаги, кг/ч (из материального баланса сушки).

$$S = 2\pi RL, \text{ м}^2$$

где R – диаметр сушильного барабана, м;
 L – длина сушильного барабана, м;

2. Потери тепла на нагревание высушиваемого материала:

$$q_{\text{мат.}} = ((m_{\text{см}} \cdot C_{\text{см}} + m_{\text{ост}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{к}})) / n, \text{ кДж/кг}$$

где $m_{\text{см}}$ – масса абсолютно сухого материала, кг/г

$C_{\text{см}}$ – теплоёмкость материала, кДж/кг·К

$m_{\text{ост}}$ – остаточная влага, кг/г;

$C_{\text{H}_2\text{O}}$ – теплоёмкость воды, к Дж/кг·К;

$t_{\text{н}}$ – температура материала на входе в сушилку, °С;

$t_{\text{к}}$ – температура материала на выходе из сушилки, °С.

3. Суммарная потеря тепла:

$$\Delta = q_{\text{окр.ср}} + q_{\text{мат.}}, \text{ кДж/кг.}$$

Графоаналитический расчёт процесса сушки

Построение теоретического процесса сушки.

Теоретический процесс сушки – это такой процесс, в котором всё количества тепла идёт только на испарение влаги.

Строим процесс сушки по H - d – диаграмме (диаграмма приведена в расчете БРС)

1.1 Находим точку A по параметрам наружного воздуха (d_0, t_0) . Ориентировочно можно принять: $d_0 = 6 \cdot 10 \frac{\text{г.вл.}}{\text{кг.с.возд.}}$;

$$t_0 = 10 - 15^\circ\text{C}$$

Находим точку Γ , она соответствует параметрам дымовых газов. Для этого рассчитываем влагосодержание и энтальпию дымовых газов.

$$d_{\text{д.г.}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1000}{M_{\text{CO}_2} + M_{\text{N}_2} + M_{\text{O}_2} + M_{\text{SO}_2}}, \text{ (г/кг сух. газа)}$$

где $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса воды в продуктах горения топлива, кг.

$M_{\text{CO}_2}, M_{\text{N}_2}, M_{\text{O}_2}, M_{\text{SO}_2}$. Массы $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{SO}_2$ в продуктах горения (см. расчёт горения топлива кг.)

Соединяем $(\cdot) A$ и $(\cdot) \Gamma$. Линия $A\Gamma$ – процесс смешивания воздуха с дымовыми газами.

Проводим изотерму характеризующую температуру теплоносителя (t_1) до пересечения с $A\Gamma$ – получаем точку B , которая показывает соотношение воздуха и дымовых газов в теплоносителе и начало процесса сушки.

Находим количество сухого воздуха, необходимого для получения смеси топочных газов с температурой t_1 .

$$n = \frac{B\Gamma}{AB} \text{ кг возд. /кг д.г.}$$

Теоретический процесс сушки выразится линией (адиабатой) ВС. Опустим из точки С перпендикуляр на вертикальную линию, проходящую из точки В, найдём точку Д, а отрезок СД будет характеризовать удельный расход теплоносителя на процесс сушки

$$l_0 = \frac{1000}{CD \cdot M_d} \text{ (кг возд./кг топл.)}$$

Теоретический удельный расход тепла:

$$q_0 = \frac{AB \cdot M_H}{CD \cdot M_d} \cdot 1000 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг исп. в л}} \right)$$

$$m = \frac{M_H}{M_d} \cdot 1000,$$

m – масштаб диаграммы

Строим действительный процесс сушки

Произвольно выбираем отрезок ef и измеряем его в мм.

Определяем отрезок ef по формуле:

$$ef = ef \frac{\Delta}{m}, \text{ мм}$$

$$m = \frac{M_H}{M_d} * 1000.$$

где Δ – суммарные потери тепла

Из (·) f откладываем отрезок Е проводя его перпендикулярно оси абсцисс. Через точки В и Е проводим луч до пересечения с изотермой t_k и получим (·) С'. (·) С' - конечная точка процесса сушки. Из (·) С' проводим перпендикуляр и получаем (·) Д'.

Удельный расход теплоносителя в действительном процессе сушки:

$$l_{\text{пр.}} = \frac{1000}{c' D' \cdot M_d} \text{ (кг/кг в л)}$$

Удельный расход тепла в действительном процессе сушки:

$$q_{\text{пр.}} = \frac{AB \cdot M_H}{c' D' \cdot M_d} \cdot 1000 \left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг вл}} \right)$$

Определяем расход тепла на сушку в 1 час

$$Q_{\text{ч}} = q^{\text{д}} \cdot m \text{ (кДж/г)}$$

где $q^{\text{д}}$ - удельный расход тепла

m- количество влаги испарённой в 1 час, кг вл/ч.

Определяем тепловое напряжение топки с учётом её к.п.д.. Принимаем к.п.д. $\approx 0,8-0,9$

$$Q_{\text{топки}} = \frac{Q_{\text{ч}}}{\text{к.п.д.}} \left(\frac{\text{кДж}}{\text{час}} \right)$$

Определяем расход топлива

$$B = \frac{Q_{\text{топки}}}{Q_H^{\text{р}} n} \left(\frac{\text{кг}}{\text{час}} \right)$$

5 Теплотехнический и конструктивный расчет конвейерной линии

Современные поточные конвейерные линии являются агрегатами для производства всех видов керамических плиток.

На основе обобщения опыта работы действующих печей и анализа путей повышения их производительности разработаны следующие основные рекомендации для конвейерных линий с унифицированными узлами:

- Шаг роликов составляет 70 мм, диаметр роликов 32 мм, установка роликов производится через блоки в виде гребенок;

- Шаг плиток при утильном обжиге составляет 160 – 170 мм; при политом обжиге плиток – 230 – 250 мм (для исключения слипания плиток шаг их должен быть больше диагонали).

Предусматривается установка на границе зоны обжига и зоны охлаждения верхних и нижних экранов.

Применяется верхнее и нижнее расположение горелок для печей утильного обжига облицовочных плиток и обжига плиток для полов и только нижнее расположение горелок для печей политого обжига облицовочных плиток.

Отбор дымовых газов проводится на первых секциях печи.

Подача в зону охлаждения холодного воздуха производится на участках температур выше 600°C и ниже 400°C. Подача воздуха на первом участке должна осуществляться на расстоянии от зоны обжига, равным 5 – 10 обжигаемым изделиям. Окончательно охлаждение (< 400°C) должно осуществляться на открытом участке со струйной обдувкой воздухом. Охлаждение плиток должно происходить до температуры не выше 40°C. Отбор горячего воздуха производится, главным образом, на последней секции зоны охлаждения, примыкающей к открытому участку печи. Должна предусматриваться установка в зоне охлаждения горелок на участке температур 600 – 500°C для смягчения режима охлаждения.

Технологическим расчетом по заданной годовой мощности и при принятом режиме работы определяют часовую производительность, исходя из заданных сроков сушки и обжига разрабатывают компоновочную схему конвейерной линии: раскладку плиток по ширине, скорость движения конвейера и длину отдельных участков линии.

На основе опыта эксплуатации большого количества линий для технологического расчета можно принять следующие исходные данные.

Режим работы линии – непрерывный трехсменный, за исключением восьми праздничных дней. Плановый ремонт кладки печи – один раз в год в течении 12 дней. Число рабочих дней в году $365 - (8 + 12) = 345$. Плановые остановки для правки печных роликов и их очистки от излишней глазури – по одной смене через каждые 10–15 дней работы (в зависимости от температуры обжига), т.е. $345 : (10 - 15) = 35 - 23$ смены.

Число рабочих смен в году $345 \cdot 3 (35 - 23) = 1000 - 1012$ смен. Аварийные остановки линии 2%. Простой линии в течение смены (уборка прессов, чистка пресс-форм и промывка глазурочной машины) 12 – 15 %.

Ремонт и регулировка прессов и смена пресс-формы не вызывают простоя линии, так как в это время в работу включается резервный пресс.

Чистое время работы линии в течение года, ч:

$$\tau = (1000 - 1012) \cdot 8 \cdot 0,98 \cdot (0,85 - 0,88) = 6660 - 6980$$

Исходные данные:

- годовая производительность конвейерной линии, тыс.м²/год;
- режим работы линии – непрерывный;
- число часов работы линии в год, ч (6600 – 6980);
- коэффициент выхода годной продукции $\eta_{e.n} = 0,92 - 0,96$;
- тип изготавливаемой плитки;
- размер плитки, мм;
- шаг плитки по длине конвейера, м;
- количество рядов плиток на ярусах конвейера – n;
- масса 1 м² обожженных плиток, кг/м²;
- потери при прокаливании плиточной массы п.п.п, %
- длительность сушки, мин;
- длительность обжига, мин.

Определение часовой производительности сухой плиточной массы на конвейерной линии, скорости движения конвейера, длин сушила и печи.

Часовая производительность линии в м²/ч определяется о формуле:

$$P_{\text{ч}} = \frac{P_{\text{г}}}{Z \cdot \eta_{\text{г.п}}},$$

где $P_{\text{ч}}$ – заданная производительность линии, м²/год;

Z – число часов работы линии в год, ч;

$\eta_{\text{г.п}}$ - коэффициент выхода годной продукции.

Часовой расход сухой плиточной массы в кг определяется по формуле:

$$G_{\text{м}} = P_{\text{ч}} \cdot a_1,$$

где a_1 - масса 1 м² плиток по сухой массе, кг/м²;

$$a_1 = \frac{a \cdot 100}{100 - \text{п.п.п}},$$

где a – масса 1 м² обожженных плиток, кг/м²;

п. п. п - потери при прокаливании плиточной массы, %.

Скорость движения конвейера $W_{\text{к}}$, м/мин, определяется из выражения

$$W_{\text{к}} = \frac{P_{\text{ч}} \cdot Z}{60 \cdot n \cdot l \cdot b},$$

где $P_{\text{ч}}$ – часовая производительность линии, м²/ч;

Z – шаг плиток по длине конвейера, м;

n – количество плиток по ширине конвейера (на всех ярусах);

l, b – соответственно длина и ширина готовой плитки.

Длина сушила и печи в м определяется по формулам:

$$Z_C = W_k \cdot \tau_c,$$

$$Z_n = W_k \cdot \tau_n,$$

где W_k – скорость движения конвейера, м/мин;

τ_c – длительность сушки, мин ;

τ_n – длительность обжига, мин.

5.1 Теплотехнический расчет конвейерной сушилки

Теплотехнический расчет сушилки выполняется в кВт на 1 час работы конвейерной линии.

Исходные данные:

- производительность сушилки, м²/ч;
- масса 1 м² плиток по сухой массе, кг/м²;
- часовой расход сухой плиточной массы, кг/ч (G_M);
- теплоемкость плиточной массы, кДж/(кг·К), которая определяется по формуле:
 $G_M = 4,19 \cdot (0,193 + 0,75 \cdot 10^{-4} \cdot t)$;
 - число роликов в сушилке;
 - начальная влажность плиток, % (6);
 - влажность плиток после сушилок, °С (0,2–0,5);
 - температура плиток на входе в сушилку, °С (20);
 - температура плиток после сушки, °С (150–170);
 - температура сушки, °С (250–270);
 - температура отходящих газов, °С (200);
 - вид используемого топлива;
 - начальная температура топлива, °С (20);
 - длительность сушки, мин;
 - наружные размеры секции сушилки, м: длина, ширина, высота;
 - число секций сушилки;

5.1.1 Расход теплоты

Расход теплоты на испарение физической влаги из материала, кВт:

$$Q_1 = (2500 - 4,19 \cdot t_H) \cdot G_w,$$

где 2500 – скрытая теплота парообразования, кДж/кг влаги;

4,19 – теплоемкость воды, кДж/кг·К;

t_H – температура влажных изделий, поступающих в сушилку, °С;

G_w – количество испаренной влаги, кг/ч.

$$G_w = G_M \cdot \frac{W_H}{100 - W_H},$$

где G_M – часовой расход сухой плиточной массы, кДж/(кг·К);

W_H – начальная влажность изделий.

Расход теплоты на нагрев плитки, кВт:

$$Q_2 = \frac{[G_M \cdot C_M (t_1 - t_0)]}{3,6},$$

где G_M – теплоемкость плиточной массы, кДж/(кг·К);

t_1 - температура плиток на выходе из сушилки, °С (150 – 170);

t_0 – температура плиток на входе в сушилку, °С (20).

Потери теплоты через ограждения сушилки

$$Q_3 = q \cdot F,$$

где q – удельная теплоотдача в окружающую среду в кДж/(м²·ч) при температуре наружной поверхности сушилки, равной обычно 30°С.;

F -общая наружная поверхность сушилки, м².

Поверхность сушилки подсчитывается по известным габаритам секции и числу секций:

$$F_n = n \cdot 2 \cdot l \cdot b, F_{ст} = n \cdot 2 \cdot l \cdot h, F_{св} = n \cdot 2 \cdot b \cdot h,$$

где $F_n, F_{ст}, F_{св}$ – соответственно площадь пода, стен и свода, м²;

n - число секций сушилки;

l, b, h - габаритные размеры сушилки, м.

Потери теплоты через ролики:

$$Q_4 = Q_p \cdot n_c,$$

где Q_p – потери теплоты одним роликом, кДж/ч;

n_c – количество роликов на участке сушилки, шт.

Потери теплоты через один ролик представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1- потери теплоты через один ролик

Средняя температура в печи °С	1100	1025	950	850	625	425
Потери теплоты через один ролик кДж/ч	285	285	245	150	105	25

Расход тепла на нагрев воздуха для сушки (потери с уходящими газами):

$$Q_5 = C_B (t_{y.g.} - t_B) \cdot G_B,$$

где C_B -теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);

$t_{y.g.}$ - температура уходящих газов, °С (200);

C_B - расход воздуха на сушку, кг/ч;

$$G_B = G_W = \frac{1000}{d_1 - d_0},$$

где d_1 - конечное влагосодержание отработанного воздуха при $t_{y.g.}=200^\circ\text{C}$, г/кг ($d_1=400$ г/кг);

d_0 – исходное влагосодержание воздуха, г/кг ($d_0=10 - 20$ г/кг).

Общий расход тепла $Q_{расх}$ складывается из суммы расходов по отдельным статьям:

$$Q_{расх} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) \cdot K,$$

где K – коэффициент неучтенных потерь ($K=1,1 - 1,15$).

5.1.2 Расчет горения топлива, расход воздуха на горение

и объем продуктов горения

Расчет процесса горения топлива ведем по разделу 2

5.1.3 Приход теплоты

Химическая теплота от сгорания топлива

$$Q_4 = Q_H^P \cdot V_C^M,$$

где Q_H^P - низшая теплота сгорания топлива, кДж/м³;

V_C^M - часовой расход топлива на сушку изделий, м³/ч.

Физическая теплота топлива

$$Q_5 = C_T \cdot t_T \cdot V_C^M,$$

где C_T - теплоемкость топлива, кДж/м³;

t_T - температура топлива, °С.

Физическая теплота воздуха для горения

$$Q_6 = C_B \cdot t_B \cdot L_0 \cdot V_C^M,$$

где C_B - теплоемкость воздуха, кДж/м³·град;

t_B - температура воздуха, °С;

L_0 - расход воздуха на горение, м³/м³.

Физическая теплота входящих плиток

$$Q_7 = C_M \cdot t_0 \cdot G_M,$$

Общий приход теплоты составит, кВт:

$$Q_{\text{прих}} = Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7,$$

5.1.4 Сводный тепловой баланс сушилки

Сводный тепловой баланс работы сушилки составляем по образцу, приведенному в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Тепловой баланс сушилки

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
Химическая теплота топлива			Расход теплоты на испарение физической влаги		
Физическая теплота топлива			Расход теплоты на нагрев плитки		
Физическая теплота воздуха для горения			Потери теплоты через ограждения сушилки		
Физическая теплота входящих плиток			Потери теплоты через ролики		
			Расход теплоты на нагрев воздуха для сушки		
			Прочие расходы и потери		
Сумма		100	Сумма		100

Коэффициент полезного действия сушилки составит:

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_4} \cdot 100 \%$$

5.2 Теплотехнический расчет роликовой печи

Задача теплового расчета – определение расхода топлива, на основании которого подбирают устройство для сжигания топлива и вентиляторы для подачи к ним воздуха. Составная часть теплового расчета – определение количества отходящих газов и воздуха, отбираемого из зоны охлаждения.

Основными данными для расчета являются температурная кривая обжига $t_{обж}=f(\tau)$, степень дегидратации материала или потери при прокаливании (п.п.п) в процессе обжига $\beta=f(\tau, t_{обж})$. Безопасные скорости нагрева и охлаждения плиток приведены в таблице 5.2.1

Таблица 5.2.1 – Безопасные скорости нагрева и охлаждения плиток, допустимые перепады температур по плоскостям плиток

Интервал температур, °С	Скорость нагрева и охлаждения, °С/мин	Перепад температур, °С/мин
До 500	900	410
500 – 700	80	45
700 – 1250	230	120
250 – 650	67	65
650 – 400	45	25
400 – 250	50	60

В соответствии с конструкцией футеровки и заданным температурным режимом печь разбивают на участки различной температуры и интенсивности нагрева и охлаждения. Границами участков в большинстве случаев принимают температуру в зоне подогрева и обжига: 300 – 400; 700 – 800; 900 – 950 °С и максимальную в зоне охлаждения 600; 500 – 400 и 300 – 200 °С. В пределах каждого участка для расчета теплотеря условно принимается линейный закон изменения температуры по длине печи. Для каждого из участков задается свой коэффициент избыточного воздуха. Максимальный коэффициент избытка воздуха задается на участке максимальных температур, где он составляет 1,1 – 1,3; для начального участка зоны подогрева он может достичь величины 1,5 – 2,0.

Температура плиток на границах участков на основе практических данных на 20 – 100 °С ниже (а в зоне охлаждения – выше) температуры в печи (в зависимости от времени нахождения плиток на данном участке и температуры последнего).

Температура в печи на каждом участке определяет конструкцию и материал кладки, которые, в свою очередь, обуславливают теплотеря в окружающую среду.

Температура в печи и температура плиток даны по опытным данным НИИСтройкерамики.

– Исходные данные:

- общая масса плиток до обжига, кг/ч (G_M);
- влажность плиток до обжига, % (0,2 – 0,5);

- температура плиток на входе в печь, °С (140 – 150);
- температура плиток на выходе из корпуса печи, °С (300 – 350);
- температура плиток после обдувки, °С (20 – 30);
- максимальная температура обжига, °С (1100–1200);
- продолжительность обжига, мин;
- потери при прокаливании плиточной массы п.п.п, %;
- содержание Al_2O_3 в плиточной массе, %;
- теплоемкость плиток C_m , кДж/(кг·К), определяемая по (5.7);
- температура воздуха в цехе, °С (20);
 - коэффициент избытка воздуха a в различных участках зоны подогрева и обжига;
 - температура нагретого воздуха, используемого на сторону, °С (около 400);
 - число роликов в печи, шт;
 - длина печи, м, в том числе зона подогрева и обжига и зоны охлаждения;
 - принципиальная схема печи с заданной температурной кривой обжига;
 - характеристика щелевых роликовых печей и основные показатели режимов обжига керамических плиток.

5.2.1 Расчет зоны подогрева и обжига

Тепловой расчет в кВт целесообразно начинать с участка максимальных температур, на котором температура газов и изделий одинакова, т.е. отсутствует статья расхода на нагрев плиток.

5.2.1.1 Теплотехнический расчет участка V

Расход теплоты

1. Потери теплоты в окружающую среду через ограждения печи, кВт:

$$Q_{\phi}^5 = q_{\phi}^5 \cdot F_{\phi}^5$$

где q_{ϕ}^5 - удельный тепловой поток;

F_{ϕ}^5 - площадь стен, пода и свода печи.

Потери теплоты через ограждения рассчитываются отдельно для стен, пода и свода в соответствии со средними температурами внутренней поверхности, принятой по графику обжига на участках с одинаковой футеровкой.

Теплопроводящая площадь наружной поверхности участка, m^2 :

$$F = l \cdot (2b + 2h),$$

где l – длина участка, м;

b – ширина участка, м;

h - высота участка, м.

2. Потери теплоты через выступающие концы роликов. Поток теплоты через один ролик, кВт:

$$Q_p^5 = Q_n^5 \cdot n_p^5,$$

где n - число роликов на данном участке, шт.;

Q_p^5 – потери одним роликом, кВт. Принимаются по таблице 5.1.

Потери теплоты через ролики более точно могут быть рассчитаны по формуле, кВт:

$$Q_p = \left[2 \cdot \frac{\lambda \cdot S}{b} \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) + q_{\text{излуч}} \right],$$

где λ – теплопроводность материала ролика, Вт/(м²·К);

b - толщина стены печи, м;

S - площадь сечения ролика, м²;

$t_{\text{вн}}$ – температура в рабочем канале печи, °С;

$t_{\text{нар}}$ - температура ролика в плоскости наружной поверхности печи, °С;

$q_{\text{излуч}}$ - поток теплоты излучением через 2 отверстия для ролика в стенах печи, кВт.

Поток теплоты излучением через отверстия для роликов можно определить по номограмме или формуле, кВт:

$$q_{\text{излуч}} = 5,67 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4 \cdot 2 \cdot S^I \cdot \phi,$$

где ϕ – коэффициент диафрагмирования для роликов 0.1-1.0;

S^I - площадь отверстия.

3. Потери теплоты излучением на соседний участок зоны охлаждения VI:

$$Q_{\text{излуч}}^5 = C_{\text{ч}} \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \phi \cdot \left[\left(\frac{t_{\text{ср}}^5 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{ср}}^6 + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где $C_{\text{ч}}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, кДж/(м²·ч·К⁴);

ε - степень черноты тела;

F - сечение отверстия, м²;

ϕ - коэффициент диафрагмирования;

$t_{\text{ср}}^5$ и $t_{\text{ср}}^6$ средние температуры на V и VI участках, °С.

4. Расход теплоты на плавление глазури, кВт:

$$Q_{\text{глаз}}^5 = G_{\text{глаз}} \cdot (t_{\text{к}} \cdot C_{\text{к.глаз}} - t_{\text{н}} \cdot C_{\text{н.глаз}}) \cdot 0,6,$$

где $G_{\text{глаз}}$ - масса глазури подлежащей обжигу, кг/ч (составляет примерно 10% от массы обжигаемых изделий);

0,6 – коэффициент, учитывающий степень плавления глазури;

$C_{\text{к.глаз}}$ и $C_{\text{н.глаз}}$ теплоемкость глазури соответственно при конечной и начальной температурах обжига, кДж/(кг·К).

5. Неучтенные тепловые потери, кВт:

$$Q_{\text{неучт}}^5 = (Q_{\text{фут}}^5 + Q_{\text{рол}}^5 + Q_{\text{излуч}}^5 + Q_{\text{галз}}^5) \cdot 0,2,$$

где 0,2 коэффициент неучтенных потерь.

6. Общий расход теплоты на V участке, кВт:

$$Q_{\text{расх}}^5 = Q_{\text{фут}}^5 + Q_{\text{рол}}^5 + Q_{\text{излуч}}^5 + Q_{\text{галз}}^5 + Q_{\text{неучт}}^5,$$

Расход топлива на участке V определяется по формуле

$$B^5 = \frac{Q_{расх}^5}{Q_H^p - H_{o,г}^i},$$

где $H_{o,г}^i$ – теплосодержание уходящих газов с данного участка, кДж/нм³.

Коэффициент избытка воздуха α принимается из расчета горения топлива.

Выход продуктов горения $V_{o,г}^a$, нм³/нм³ газа, принимается из расчета горения топлива.

Температура отходящих газов $t_{o,г}$ равна максимальной температуре обжига 1100°C.

Теплопередача отходящих газов при 1100°C, $\alpha=1,2$, Н кДж/нм³ составит:

$$B^5 = \frac{Q_{расх}^5}{Q_H^p - H_{1,2}}.$$

7. Расход воздуха на горение L_B^5 , нм³/ч:

$$L_B^5 = L_a \cdot B^5,$$

где L_a - расход воздуха на горение 1 нм³ газа при коэффициенте расхода воздуха α нм³/нм³ (эта величина берется из расчета горения топлива).

8. Выход продуктов горения $V_{o,г}^5$, нм³/ч:

$$V_{o,г}^5 = V_{o,г}^a \cdot B^5,$$

где $V_{o,г}^a$ - количество продуктов, образующихся при сжигании 1 нм³ газа при коэффициенте избыточного воздуха α нм³/нм³ (эта величина берется из расчета горения топлива).

9. Расчет необходимого количества горелок. Для сжигания топлива в роликовой печи обычно используются инжекционные горелки среднего смещения, которые устанавливаются с обеих сторон канала печи. С точки зрения равномерности обогрева, исключения местных перегревов противоположных стен и ближайших роликов в печах отдается предпочтение большому количеству горелок меньшей производительности, в которых факел в значительной степени «размывается» в атмосфере печи до столкновения с роликом и стенами. Для обогрева рабочего канала зон подогрева и обжига горелки размещаются в шахтном порядке над и под рольгангом.

Потребное количество горелок на участке V определяется, шт.:

$$n_r^5 = \frac{B^5}{N_r} \cdot 1,05,$$

где 1,05 – коэффициент запаса для обеспечения регулировочных возможностей, а также на момент снижения калорийности газа;

N_r - производительность горелки, м³/с, $N_r = 0,006$.

Полученное количество горелок необходимо округлить в сторону увеличения до их четного количества.

5.2.1.2 Расчет VI участка

Расход теплоты

Расход теплоты на нагрев плиток, кВт:

$$Q_{н.т}^4 = G_M \cdot \frac{100 - \text{п.п.п}}{100} (t_1 \cdot C_M^I - t_2 \cdot C_M^{II}),$$

где G_M - общая масса плиток до обжига, кг/ч;

п. п. п - потери плиточной массы при прокаливании, %;

C_M^I, C_M^{II} - теплоемкость плиток соответственно при температурах t_1, t_2 , кДж/(кг·К).

1. Потери теплоты в окружающую среду через футеровку, включая под, стены и свод агрегата на участке IV, кВт:

$$Q_{\phi}^4 = q_{\phi}^4 \cdot F_{\phi}^4.$$

2. Потери теплоты через ролики, кВт:

$$Q_{\phi}^4 = Q_{\phi}^4 \cdot n_p^4.$$

3. Расход теплоты на плавление глазури, кВт:

$$Q_{\text{глаз}}^4 = G_{\text{глаз}} \cdot (t_k \cdot C_{к.глаз} - t_n \cdot C_{н.глаз}) \cdot 0,4,$$

где 0,4 – коэффициент, учитывающий степень плавления глазури.

4. Неучтенные тепловые потери, кВт:

$$Q_{\text{неуч}}^4 = (Q_{\phi}^4 + Q_{\phi}^4 + Q_{\text{глаз}}^4) \cdot 0,2,$$

где 0,2 коэффициент неучтенных потерь.

5. Приход теплоты с дымовыми газами, пришедшими с участка V, кВт:

$$Q_{0,2}^5 = (I_{0,г}^{t_1} - I_{0,г}^{t_2}) \cdot B^5,$$

где $H_{0,г}^{t_1}$ и $H_{0,г}^{t_2}$ - теплосодержание отходящих газов соответственно при температурах, с которыми газы приходят и уходят с данного участка, кДж/нм³:

$$H_{0,г}^t = H \cdot V_{0,г}, \text{ или } H_{0,г}^t = C_{0,г} \cdot t_{0,г} \cdot V_{0,г},$$

где H – энтальпия продуктов горения, кДж/нм³, при температуре и известном $I_{0,г}$ при $t_{0,г}$ (находится по H-д – диаграмме);

$V_{0,г}$ - объем продуктов горения при том же α (из расчета горения топлива), нм³;

$C_{0,г}$ – теплоемкость отходящих газов, кДж/(нм³·К):

$$C_{0,г} = \frac{\sum P_i \cdot C_i}{100},$$

где P_i – содержание каждого компонента в отходящих газах при $\alpha=1,2$ (CO₂, H₂O, O₂ и т.д., %);

C_i - теплоемкость каждого компонента при температуре $t_{0,г}$, кДж/(нм³·К).

6. Общий расход теплоты на IV участке. Общий расход теплоты на участке IV включает, кВт:

$$Q^4 = (Q_{н.пл}^4 + Q_{\phi}^4 + Q_p^4 + Q_{\text{глаз}}^4 + Q_{\text{неучт}}^4) - Q_{0,г}^5.$$

7. Расход газа на участке IV – B^4

Коэффициент избыточного воздуха $\alpha=1,4$.

Определяем расход воздуха на горение L_B^a , нм³/нм³ газа (при $\alpha=1,4$).

Определяем выход продуктов горения $V_{0,г}$, нм³/нм³ газа (при $\alpha=1,4$).

Определяем теплосодержание отходящих газов $H_{1,4}^{950}$, кДж/нм³ (при $\alpha=1,4$).

$$B^4 = \frac{Q^4}{Q_H^p - I_{1,4}^{950}}$$

8. Расход воздуха на горение L_B^4 , нм³/ч:

$$L_B^4 = L_B^a \cdot B^4.$$

9. Выход продуктов горения $V_{o.g}^4$, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$V_{o.g}^4 = V_{o.g}^a \cdot B^4.$$

10. Требуемое количество горелок на участке IV составляет, шт.:

$$n_{\Gamma}^4 = \frac{B^4}{N_{\Gamma}} \cdot 1,05$$

Полученное значение горелок следует округлить в сторону увеличения до четного количества.

5.2.1.3 Расчет III участка

1. Расход теплоты на химические реакции.

Расход теплоты на химические реакции для первого (утильного) и однократного обжига складывается из эндотермических процессов дегидратации глинистых минералов и диссоциации присутствующих карбонатов, а также теплоты, уносимой с продуктами дегидратации и декарбонизации:

а) расход теплоты на диссоциацию глинистых минералов определяется по формуле, кВт:

$$Q_{д.гл}^3 = 2100 \cdot 0,2 \cdot G_x,$$

где 2100 кДж/кг Al_2O_3 – теплотребление при обжиге глинистой составляющей;

0,2 – коэффициент, учитывающий степень дегидратации глинистой составляющей на III участке;

G_x количество Al_2O_3 , вносимое глинистой составляющей с материалом, загружаемым в печь, кг/ч;

$$G_x = 0,01 \cdot \eta \cdot G_c,$$

где η – процентное содержание Al_2O_3 , вносимое глинистой составляющей;

G_c – количество сухого материала, поступающего в печь, кг/ч:

$$G_c = P_c;$$

б) расход теплоты на диссоциацию карбонатов, кВт:

$$Q_{д.СаСО_3}^3 = G_c \cdot \frac{z}{100} \cdot 1779 \cdot 0,7,$$

где z – содержание CaCO_3 в плиточной массе;

0,7 – коэффициент, учитывающий степень дегидратации CaCO_3 .

Этот расчет может быть выполнен на содержание CaO , тогда теплота диссоциации составляет 3176,7 кДж/кг CaO .

в) теплота, выносимая с CO_2 , выделяющимся при декарбонизации CaCO_3 , кВт:

$$Q_{\text{CO}_2}^3 = C_{\text{CO}_2}^3 \cdot t_{\text{отх.}}^3 \cdot G_{\text{CO}_2},$$

где C_{CO_2} – теплоемкость CO_2 , кДж/(кг·к);

G_{CO_2} – количество выделяющегося CO_2 , кг;

$t_{\text{отх.}}$ – температура отходящих газов.

Общий расход теплоты на химические реакции по участку определяется

$$Q_x^3 = Q_{д.гл.}^3 + Q_{д.СаСО_3}^3 + Q_{\text{CO}_2}^3, \text{кВт}$$

2. Расход теплоты на нагрев плиток, кВт

$$Q_{н.пл}^3 = G_{\text{к}}^3 \cdot 950 \cdot C_{\text{к}}^3 - G_{\text{н}}^3 \cdot 900 \cdot C_{\text{н}}^3.$$

$$G_H^3 = P; G_H^3 = \frac{100 - (\text{п.п.п} \cdot 0,8)}{100} \cdot P_c.$$

3. Потери теплоты через футеровку печи, кВт:

$$G_{\phi}^3 = q_{\phi}^3 \cdot F_{\phi}^3.$$

4. Потери теплоты через ролики при 950°C, кВт:

$$Q_p^3 = Q_n^3 \cdot n_p^3.$$

5. Неучтенные тепловые потери, кВт:

$$Q_{\text{неучт}}^3 = (Q_{\phi}^3 + Q_p^3) \cdot 0,2.$$

6. Общий расход теплоты на III участке, кВт:

$$Q^3 = Q_x^3 + Q_{\text{н.пл}}^3 + Q_{\phi}^3 + Q_p^3 + Q_{\text{неучт}}^3.$$

7. Расход газа V^3 на участке III.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,5$.

Определяем расход воздуха на горение L_B^a , $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ газа (при $\alpha = 1,5$).

Определяем выход продуктов горения $V_{\text{о.г.}}$, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ газа (при $\alpha = 1,5$).

Температура отходящих газов 950°C.

Определяем теплосодержание отходящих газов $I_{1,5}^{950}$, кДж/ч (при $\alpha = 1,5$).

$$V^3 = \frac{Q^3}{Q_H^p - I_{1,5}^{950}}$$

8. Расход воздуха на горение L_B^3 , $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$L_B^3 = L_B^a \cdot V^3.$$

9. Выход продуктов горения $V_{\text{о.г.}}^3$, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$V_{\text{о.г.}}^3 = V_{\text{о.г.}}^a \cdot V^3.$$

5.2.1.4 Расчет II участка

1. Расход теплоты на химические реакции.

а) расход теплоты на диссоциацию глинистых минералов, кВт:

$$Q_{\text{д.гли}}^2 = 2100 \cdot 0,4 \cdot G_x,$$

где 0,4 – коэффициент, учитывающий степень дегидратации;

б) расход теплоты на диссоциацию карбонатов, кВт:

для MgCO_3

$$Q_{\text{д.}\text{MgCO}_3}^2 = G_c \cdot \frac{f}{100} \cdot 1315 \cdot 0,2$$

где f – содержание MgCO_3 в плиточной массе, мас. %.

для CaCO_3

$$Q_{\text{д.}\text{CaCO}_3}^2 = G_c \cdot \frac{z}{100} \cdot 1779 \cdot 0,2$$

где 0,2 – коэффициент, учитывающий степень дегидратации.

Расчет может быть выполнен на содержание MgO , тогда теплота диссоциации составляет 2769 кДж/кг MgO .

Расчет может быть выполнен на содержание CaO , тогда теплота диссоциации составляет 3176,7 кДж/кг CaO .

в) теплота, выносимая с CO_2 , выделяющимся при декарбонизации CaCO_3 и MgCO_3 , кВт:

$$Q_{\text{CO}_2}^2 = C_{\text{CO}_2}^2 \cdot t_{\text{отх.}}^2 \cdot G_{\text{CO}_2},$$

где $t_{\text{отх.}}$ температура отходящих газов на II участке.

Расход теплоты на химические реакции составит, кВт:

$$Q_{\text{х}}^2 = Q_{\text{д.гл.}}^2 + Q_{\text{дCaCO}_3}^2 + Q_{\text{дMgCO}_3}^2 + Q_{\text{CO}_2}^2,$$

2. Расход теплоты на нагрев плиток:

$$Q_{\text{н.пл.}}^2 = G_{\text{к}}^2 \cdot 900 \cdot C_{\text{к}}^2 - G_{\text{н}}^2 \cdot 700 \cdot C_{\text{н}}^2.$$

$$G_{\text{к}}^2 = G_{\text{н}}^2; G_{\text{н}}^2 = \frac{100 - (\text{п.п.п.} \cdot 0,4)}{100} \cdot P_{\text{с}}.$$

3. Потери теплоты через футеровку печи, кВт:

$$G_{\text{ф}}^3 = q_{\text{ф}}^3 \cdot F_{\text{ф}}^3.$$

4. Потери теплоты через ролики при 950°C , кВт:

$$Q_{\text{р}}^2 = Q_{\text{н}}^2 \cdot n_{\text{р}}.$$

5. Неучтенные тепловые потери, кВт:

$$Q_{\text{неучт}}^2 = (Q_{\text{ф}}^2 + Q_{\text{р}}^2) \cdot 0,2.$$

6. Приход теплоты с отходящими газами с III, IV, V участков, кВт:

$$Q_{\text{о.г.}}^2 = (H_{1,5}^{850} - H_{1,4}^{850})(B^5 + B^4 + B^3).$$

7. Общий расход теплоты на II участке, кВт:

$$Q^2 = (Q_{\text{х}}^2 + Q_{\text{н.пл.}}^2 + Q_{\text{ф}}^2 + Q_{\text{р}}^2 + Q_{\text{неучт}}^2) - Q_{\text{о.г.}}^2.$$

8. Расход газа B^2 на участке II.

Коэффициент избытка воздуха $\alpha=1,6$.

Определяем расход воздуха на горение $L_{\text{в}}^a$, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ газа (при $\alpha=1,6$).

Определяем выход продуктов горения $V_{\text{о.г.}}$, $\text{нм}^3/\text{нм}^3$ газа (при $\alpha=1,6$).

Температура отходящих газов 850°C .

Определяем теплосодержание отходящих газов $H_{1,6}^{850}$, кВт (при $\alpha=1,6$).

$$B^2 = \frac{Q^2}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} - H_{1,6}^{850}}$$

9. Расход воздуха на горение $L_{\text{в}}^2$, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$L_{\text{в}}^2 = L_{\text{в}}^a \cdot B^2.$$

10. Выход продуктов горения $V_{\text{о.г.}}^2$, $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$V_{\text{о.г.}}^2 = V_{\text{о.г.}}^a \cdot B^2.$$

5.2.1.5 Расчет I участка

1. Расход теплоты на химические реакции.

а) расход теплоты на дегидратацию глинистых минералов, кВт:

$$Q_{\text{д.гл.}}^1 = 2100 \cdot 0,4 \cdot G_{\text{х}},$$

где 0,4 – коэффициент, учитывающий степень декарбонизации;

б) потери теплоты на дегидратацию карбонатов, кВт:

для MgCO_3

$$Q_{\text{д.MgCO}_3}^1 = G_{\text{с}} \cdot \frac{f}{100} \cdot 1315 \cdot 0,8,$$

для CaCO_3

$$Q_{д.СаСО_3}^1 = G_c \cdot \frac{z}{100} \cdot 1779 \cdot 0,1$$

где 0,8 и 0,1 – коэффициенты, учитывающие степень диссоциации $MgCO_3$ и $CaCO_3$ соответственно.

в) теплота, выносимая с CO_2 , выделяющимся при диссоциации $CaCO_3$ и $MgCO_3$, кВт:

$$Q_{CO_2}^1 = C_{CO_2}^1 \cdot t^1 \cdot G_{CO_2},$$

где t^1 – температура отходящих газов на участке I.

2. Расход теплоты на нагрев плиток:

$$Q_{н.пл}^1 = G_k^1 \cdot 700 \cdot C_k^1 - G_n^1 \cdot 140 \cdot C_n^1.$$

$$G_1 = P_c; G_k^1 = G_k^1.$$

3. Потери теплоты через футеровку печи, кВт:

$$G_\phi^1 = q_\phi^1 \cdot F_\phi^1.$$

4. Потери теплоты через ролики при $625^\circ C$, кВт:

$$Q_p^1 = Q_n^1 \cdot n_p^1.$$

5. Потери теплоты излучаемые через загрузочное отверстие, кВт:

$$Q_{излуч}^1 = 21 \cdot 0,75 \cdot F_{сеч}^{1-вход} \cdot \varphi^{1-вход} \cdot \left[\left(\frac{T^1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T^{нв}}{100} \right)^4 \right]$$

где $F_{сеч}^{1-вход}$ площадь поперечного сечения отверстия, m^2 ;

T^1 средняя температура на участке I:

h - 0,145мм; v - определяется шириной канала, толщина перегородки 0,125мм.

$$T^1 = 273 + \frac{850+450}{2} = 898 \text{ К.}$$

где $T^{нв}$ температура окружающего воздуха, $T^{нв} = 20 + 273 = 293 \text{ К}$;

$\varphi^{1-вход}$ коэффициент диафрагмирования загрузочного отверстия

6. Неучтенные тепловые потери, кВт:

$$Q_{неучт}^1 = (Q_\phi^1 + Q_p^1 + Q_{излуч}^1) \cdot 0,2.$$

7. Приход теплоты с отходящими газами с II, III, IV, V участков, кВт:

$$Q_{о.г}^1 = (H_{1,6}^{850} - H_{1,6}^{400})(B^5 + B^4 + B^3) + (H_{1,6}^{850} - H_{1,6}^{400}) \cdot B^2.$$

8. Общий расход теплоты на I участке, кВт:

$$Q^1 = (Q_x^1 + Q_{н.пл}^1 + Q_\phi^1 + Q_p^1 + Q_{излуч}^1 + Q_{неучт}^1) - Q_{о.г}^1.$$

9. Расход газа B^1 на участке I.

Коэффициент избытка воздуха $a=1,8$.

Определяем расход воздуха на горение L_B^a , nm^3/nm^3 газа (при $a=1,8$).

Определяем выход продуктов горения $V_{о.г}$, nm^3/nm^3 газа (при $a=1,8$).

Температура отходящих газов $400^\circ C$.

Определяем теплосодержание отходящих газов $H_{1,8}^{400}$, кВт (при $a=1,8$).

$$B^1 = \frac{Q^1}{Q_H^p - I_{1,8}^{400}}$$

10. Расход воздуха на горение L_B^1 , $nm^3/ч$:

$$L_B^1 = L_B^a \cdot B^1.$$

11. Выход продуктов горения $V_{о.г}^1$, $nm^3/ч$:

$$V_{о.г}^1 = V_{о.г}^a \cdot B^1.$$

5.2.1.6

Сводные показатели по зонам подогрева и обжига

1. Общий расход газа V , $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$V = V^5 + V^4 + V^3 + V^2 + V^1.$$

2. Общий расход воздуха на горение L , $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$L = L_B^5 + L_B^4 + L_B^3 + L_B^2 + L_B^1.$$

3. Общий расход продуктов горения V , $\text{нм}^3/\text{ч}$:

$$V = V_{0.г}^5 + V_{0.г}^4 + V_{0.г}^3 + V_{0.г}^2 + V_{0.г}^1.$$

4. Теплосодержание продуктов горения, отбираемых из печи, при $t=400^\circ\text{C}$, кВт:

$$Q_{0.г} = H_{1,8}^{400} \cdot (V^5 + V^4 + V^3) + H_{1,8}^{400} \cdot V^2 + H_{1,8}^{400} \cdot V^1.$$

5. Удельный расход теплоты на обжиг 1 м^2 плиток, кВт/ м^2 :

$$Q_{\text{уд}} = \frac{Q_P^H \cdot V}{P_{\text{п}}},$$

где $P_{\text{п}}$ - производительность печи, м^2 .

5.2.1.7 Составление сводного баланса зон подогрева и обжига

Приходными статьями в тепловом балансе будут:

- приход теплоты от сгорания топлива Q_T , кВт
- приход тепла, выносимого воздухом, подаваемым на горение;
- тепло, вносимое плитками, поступающими на обжиг.

$$Q_T = Q_P^H \cdot V.$$

Расходными статьями будут следующие:

1. Расход теплоты на нагрев плиток $Q_{\text{н.пл}}$, кВт:

$$Q_{\text{н.пл}} = Q_{\text{н.пл}}^4 + Q_{\text{н.пл}}^3 + Q_{\text{н.пл}}^2 + Q_{\text{н.пл}}^1,$$

2. Расход теплоты на химические реакции Q_x , кВт:

$$Q_x = Q_x^3 + Q_x^2 + Q_x^1.$$

3. Потери теплоты через футеровку печи $Q_{\text{ф}}$, кВт:

$$Q_{\text{ф}} = Q_{\text{ф}}^5 + Q_{\text{ф}}^4 + Q_{\text{ф}}^3 + Q_{\text{ф}}^2 + Q_{\text{ф}}^1,$$

4. Потери теплоты излучением $Q_{\text{излуч}}$, кВт:

$$Q_{\text{излуч}} = Q_{\text{излуч}}^5 + Q_{\text{излуч}}^1. \quad (5.80)$$

5. Потери теплоты с отходящими газами $Q_{0.г}$, кВт:

$$Q_{0.г} = H_{1,2}^{400} \cdot V^5 + H_{1,4}^{400} \cdot V^4 + H_{1,5}^{400} \cdot V^3 + H_{1,6}^{400} \cdot V^2 + H_{1,8}^{400} \cdot V^1.$$

6. Потери теплоты через ролики Q_p , кВт:

$$Q_p = Q_p^4 + Q_p^3 + Q_p^2 + Q_p^1.$$

7. Расход теплоты на плавление глазури $Q_{\text{глаз}}$, кВт:

$$Q_{\text{глаз}} = Q_{\text{глаз}}^5 + Q_{\text{глаз}}^4.$$

8. Неучтенные потери $Q_{\text{неучт}}$, кВт:

$$Q_{\text{неучт}} = Q_{\text{неучт}}^5 + Q_{\text{неучт}}^4 + Q_{\text{неучт}}^3 + Q_{\text{неучт}}^2 + Q_{\text{неучт}}^1.$$

Полученные результаты заносим в сводную таблицу 5.2.2 теплового баланса зон подогрева и обжига

Таблица 5.2.2 – Тепловой баланс зон подогрева и обжига

Приход тепла	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
Теплота от сгорания топлива			Нагрев плиток		
Физическое тепло			Химические реакции		
			Потери теплоты через футеровку печи		

воздуха, подаваемого на горение Физическая теплота, вносимая плитками, поступающими на обжиг			Потери теплоты излучением в зону охлаждения Потери теплоты с отходящими газами Потери теплоты через ролики Расход теплоты на плавление глазури Неучтенные потери		
Всего		100	Всего		100

5.2.2 Расчет теплового баланса зоны охлаждения

5.2.2.1 Расчет VI участка

1. Потери теплоты через футеровку, кВт:

$$Q_{\phi}^6 = q_{\phi}^6 \cdot F_{\phi}^6.$$
2. Потери теплоты через ролики, кВт:

$$Q_p^6 = Q_n^6 \cdot n_p^6$$

5.2.2.2 Расчет VII участка

1. Потери теплоты через футеровку, кВт:

$$Q_{\phi}^7 = q_{\phi}^7 \cdot F_{\phi}^7.$$
 2. Потери теплоты через ролики, кВт:

$$Q_p^7 = Q_n^7 \cdot n_p^7.$$
 3. Потери теплоты с выходящими плитками определяется по формуле, кВт:

$$Q_{\text{вых.плл}} = P \cdot C_{\text{вых.плл}} \cdot t_{\text{вых.плл}},$$
- где $C_{\text{вых.плл}}$ теплоемкость плиток в конце закрытого участка печи, кДж/(кг·К);
 $t_{\text{вых.плл}}$ температура в конце участка, °С (400°С).

5.2.3 Общий тепловой баланс зоны охлаждения

5.2.3.1 Приход теплоты

1. Теплота, вносимая плитками, поступающими в зону охлаждения, определяется по формуле, кВт:

$$Q_{\text{плл}} = P \cdot C_{\text{плл}} \cdot t_{\text{max}},$$

где $C_{\text{плл}}$ - теплоемкость плиток при t_{max} , кДж/(кг·К);

t_{max} - максимальная температура обжига, т.е. температура V участка, °С (1100°С).

2. Теплота, поступающая в зону охлаждения излучением из зоны выдержки, берется из расчета участка V $Q_{\text{излуч}}^5$.

3. Физическая теплота воздуха, поступающего на охлаждение плиток, кВт:

$$Q_v = X \cdot C_v \cdot t_v,$$

где X - искомый расход воздуха на охлаждение плиток, нм³/ч;

C_v - объемная теплоемкость воздуха, кДж/нм³;

t_v - температура воздуха, °С (принимается равной 20°С).

4. Общий приход теплоты $Q_{\text{прих}}^{\text{охл}}$, кВт:

$$Q_{\text{прих}}^{\text{охл}} = Q_{\text{пл}} + Q_{\text{излуч}}^5 + Q_{\text{в}}$$

5.2.3.2 Расход теплоты

1. Потери теплоты через футеровку, кВт:

$$Q_{\text{ф}}^{\text{охл}} = Q_{\text{ф}}^6 + Q_{\text{ф}}^7 + Q_{\text{ф}}^8$$

2. Потери теплоты через ролики, кВт:

$$Q_{\text{р}}^{\text{охл}} = Q_{\text{р}}^6 + Q_{\text{р}}^7 + Q_{\text{р}}^8$$

3. Потери теплоты с выходящими плитками, кВт:

$$Q_{\text{вых.пл}} = P \cdot C_{\text{вых.пл}} \cdot t_{\text{вых.пл}}$$

4. Теплота нагретого воздуха, используемого на сторону, подсчитывается по формуле, кВт:

$$Q_{\text{в}}^{\text{н}} = X \cdot C_{\text{в}}^{\text{н}} \cdot t_{\text{в}}^{\text{н}}$$

где $t_{\text{в}}^{\text{н}}$ - температура нагретого воздуха (принимается равной 400°C);

$C_{\text{в}}^{\text{н}}$ - теплоемкость воздуха при этой же температуре, кДж/(м³·К).

5. Неучтенные потери теплоты принимается в размере 10 – 20 % от учтенных потерь, кВт:

$$Q_{\text{прих}}^{\text{охл}} = (Q_{\text{ф}}^{\text{охл}} + Q_{\text{р}}^{\text{охл}} + Q_{\text{в}}^{\text{н}} + Q_{\text{вых.пл}}) \cdot (1,1 - 1,2).$$

Количество воздуха, используемого на сторону X, определяют из уравнения теплового баланса зоны охлаждения:

$$Q_{\text{прих}}^{\text{охл}} = Q_{\text{расх}}^{\text{охл}}$$

Определив из уравнения X, составляют таблицу теплового баланса зоны охлаждения (табл. 5.2.3) и всей печи (табл. 5.2.4).

Таблица 5.2.3 – Тепловой баланс зоны охлаждения

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
Физическая теплота нагретых плиток $Q_{\text{пл}}$			Потери теплоты через футеровку $Q_{\text{ф}}^{\text{охл}}$		
Теплота, поступающая излучением из зоны обжига, $Q_{\text{излуч}}^5$			Потери теплоты через ролики $Q_{\text{р}}^{\text{охл}}$		
Физическая теплота воздуха для охлаждения плиток $Q_{\text{в}}$			Потери теплоты с выходящими плитками $Q_{\text{вых.пл}}$		
			Теплота нагретого воздуха, используемого на сторону, $Q_{\text{в}}^{\text{н}}$		
Всего		100	Всего		100

Коэффициент полезного действия в % определяется отношением полезной затраченной теплоты на обжиг к химической теплоте топлива:

$$\eta = \frac{Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{хим.реак}}}{Q_{\text{т}}}$$

Таблица 5.2.4 – Сводный тепловой баланс роликовой печи

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
Теплота от сгорания топлива			На химически процессы		
Физическая теплота воздуха для охлаждения плиток			Потери теплоты через футеровку		
			Потери теплоты через ролики		
			Потери теплоты через загрузочное отверстие		

Физическая теплота воздуха, подаваемого на давление			Потери теплоты с отходящими газами		
Физическая теплота, вносимая плитками, поступающими на обжиг			Потери теплоты с выходящими плитками		
			Теплота нагретого воздуха, используемого на сторону		
			На плавление глазури		
			Неучтенные потери		
Всего		100	Всего		100

6. Расчет туннельной печи

Исходные данные

- Годовая производительность цеха штук в год
- Продолжительность обжига часов
- Температура обжига °С
- Химический состав сырья (шихты)
- Элементарный состав топлива
- Масса единицы продукции кг
- Относительная влажность изделий, поступающих в печь %
- Производственные потери при обжиге %
- Продолжительность работы печи в год
- Коэффициент использования рабочего времени
- Коэффициент избытка воздуха, подаваемого к горелкам печи
- Коэффициент избытка воздуха в зоне обжига
- Коэффициент избытка воздуха у дымососа печи
- Температура топлива, поступающего на горение °С
- Температура первичного воздуха °С
- Температура вторичного воздуха °С
- Температура изделий, поступающих в печь °С
- Температура изделий, выходящих из печи °С
- Потери топлива с химическим недожогом %

Конструктивный расчёт печи

В задании на курсовое проектирование указывается годовая производительность печи, по готовому продукту и род продукции.

В задачу конструктивного расчёта входит определение количества печей, необходимого для обеспечения заданной производительности, интервала между двумя загрузками вагонеток, длин отдельных зон печи.

При заданной годовой производительности расчётная часовая производительность цеха обжига определяется по формуле:

$$\Pi_{\text{ч}} = \frac{\Pi_{\text{год}} \cdot (1 + 0,01 \text{ Б})}{24 Z \cdot K_{Z(1)}}$$

где $\Pi_{\text{год}}$ - годовая производительность печи, $[\frac{\text{м}^2}{\text{год}}; \frac{\text{м}^3}{\text{год}}; \frac{\text{шт}}{\text{год}}; \frac{\text{т}}{\text{год}}]$;

Б - производительные потери при обжиге (брак), [%];

Z - годовой фонд рабочего времени ($Z = 345 - 360$ дней);

K_Z - коэффициент использования рабочего времени ($K_Z = 0,94 - 0,97$);

$\Pi_{\text{ч}}$ - часовая производительность цеха обжига, $[\frac{\text{шт}}{\text{ч}}]$.

Требуемая ёмкость печей (печи) подсчитывается по формуле:

$$E_{\text{п}} = \Pi_{\text{ч}} \cdot F_{\text{ц}} = 40 ,$$

где $F_{\text{ц}}$ - длительность цикла обжига в час.

Расчётную длину рабочей части обжигательного канала находят по формуле:

$$Z_{\text{р}} = \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{в}}} \cdot l_{\text{в}} ,$$

где $l_{\text{в}}$ - длина вагонетки, [м];

$E_{\text{в}}$ - ёмкость вагонетки, [шт].

Количество печей, необходимое для обеспечения заданной производительности определяется по формуле:

$$N = \frac{Z_{\text{р}}}{Z} ,$$

где Z - длина принятой к установке печи, [м].

Число вагонеток в печи равно:

$$n_{\text{в.р.}} = \frac{Z}{l_{\text{в}}} , [\text{шт}] .$$

Общая длина печи с учётом форкамеры:

$$Z' = Z + n_{\text{в.ф.}} \cdot l_{\text{в}} , [\text{м}] ;$$

где $n_{\text{в.ф.}}$ - количество вагонеток в форкамере.

Общее число вагонеток в печи:

$$n_{\text{в}} = n_{\text{в.р.}} \cdot p + n_{\text{в.ф.}} , [\text{шт}] .$$

Интервал времени между двумя загрузками вагонеток определяется по формуле:

$$Z_{\text{з}} = \frac{60 \cdot F_{\text{ц}}}{n_{\text{в.р.}} \cdot p} , [\text{мин}] .$$

Количество загруженных вагонеток или температура загрузки:

$$T = \frac{60}{Z_{\text{з}}} , [\frac{\text{шт}}{\text{ч}}] .$$

При указанных условиях часовая производительность одной печи составит:

$$\Pi'_{\text{ч}} = T \cdot E_{\text{в}} .$$

Длины отдельных зон печи зависят от графика обжига изделий и находятся следующим образом:

$$Z_{\text{охл}} = \frac{\tau_{\text{охл}}}{F_{\text{ц}}} \cdot Z , [\text{м}] ;$$

$$Z_{\text{п}} = Z - (Z_{\text{охл}} + Z_{\text{обж}}) , [\text{м}] ;$$

где $\tau_{\text{охл}}$ - продолжительность периода охлаждения в ч.;

$Z_{\text{охл}}$ - длина зоны охлаждения, [м];

$Z_{\text{обж}}$ - длина зоны обжига, [м];

$\tau_{\text{обж}}$ - продолжительность периода обжига в ч.;

$Z_{\text{п}}$ - длина зоны подогрева, [м].

Материальный баланс печи

Материальный баланс печи составляется для определения массы сырца, загружаемого в печь. Уравнение материального баланса туннельной печи имеет вид:

$$\mu_{\text{с}} = \mu_{\text{ч}} + \mu_{\text{пот}},$$

где $\mu_{\text{с}}$ - масса сырца, поступающего в печь, $[\frac{\text{кг}}{\text{ч}}]$;

$\mu_{\text{ч}}$ - часовая производительность печи по обожжённому материалу, $[\frac{\text{кг}}{\text{ч}}]$;

$\mu_{\text{пот}}$ - потери массы при обжиге изделий, $[\frac{\text{кг}}{\text{ч}}]$.

Часовая производительность печи по массе обожжённного материала:

$$\mu_{\text{ч}} = \Pi'_{\text{ч}} \cdot m_{\text{из}},$$

где $m_{\text{из}}$ - масса единицы изделий, [кг].

Потери массы в обжиге состоят из ряда слагаемых:

$$\mu_{\text{п}} = \mu_{\text{w}}^2 + \mu_{\text{w}}^{\text{x}} + \mu_{\text{т.д.}} + \mu_{\text{л}},$$

где μ_{w}^2 - гигроскопическая влага материала;

$\mu_{\text{w}}^{\text{x}}$ - химически связанная влага;

$\mu_{\text{т.д.}}$ - органические (топливные) добавки;

$\mu_{\text{л}}$ - летучие части неорганических компонентов шихты (карбонаты).

Определяются потери массы при обжиге следующим образом:

$$\mu_{\text{w}}^2 = 0,01 \cdot \mu_{\text{с}} \cdot \mu_{\text{с}}^{\text{x}},$$

где W_0 - влажность сырца, поступающего на обжиг, [%];

$$\mu_{\text{т.д.}} = 0,01 \cdot (\mu_{\text{с}} - \mu_{\text{w}}^2),$$

$$\mu_{\text{л}} = 0,01 \cdot \left(\frac{44}{56} \mu_{\text{CaO}} + \frac{44}{40} \mu_{\text{MgO}} \right) \cdot (\mu_{\text{с}} - \mu_{\text{w}}^2),$$

где μ_{CaO} и μ_{MgO} - содержание в массе CaO и MgO, [%].

(находится по химическому составу глинистого и карбонатного сырья)

$$\mu_{\text{w}}^{\text{x}} = 0,1 \cdot \text{п. п. п.} \cdot (\mu_{\text{с}} - \mu_{\text{w}}^2 - \mu_{\text{л}}),$$

где п. п. п. - потери массы при прокаливании сухого сырца, [%].

(находится по химическому составу сырья)

Масса сырца, загружаемого в печь, определяется решением уравнения материального баланса. Затем находятся числовые значения μ_{w}^2 , $\mu_{\text{w}}^{\text{x}}$, $\mu_{\text{т.д.}}$, $\mu_{\text{л}}$.

Данные расчёта материального баланса сводятся в таблицу 6.1, в дальнейшем используется при расчёте теплового баланса печи

Таблица 6.1 Материальный баланс

Статьи прихода	$\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$	%	Статьи расхода	$\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$	%
Масса, загружаемого в печь сырца			Масса обожжённного материала Потери массы при обжиге:		

			<ul style="list-style-type: none"> ➤ гигроскопическая влага ➤ химически связанная влага ➤ органические добавки ➤ летучие части шихты 		
Итого:			Итого:		

Тепловой расчёт туннельной печи

Расчёт горения топлива

Расчёт горения топлива производится по уравнениям реакции горения. При расчёте количественного состав продуктов горения топлива следует учитывать коэффициент избытка воздуха в зоне обжига печи. Количественно состав дымовых газов, уходящих из печи, находится с учётом избытка воздуха в зоне обжига печи рекомендуется принимать в зависимости от температуры обжига изделий:

$$\begin{aligned} &\text{при } t_{\text{обж}} > 1400^{\circ}\text{C}, \quad \alpha' = 1,05 - 1,15; \\ t_{\text{обж}} = 1100 - 1400^{\circ}\text{C}, \quad &\alpha' = 1,15 - 1,4; \\ t_{\text{обж}} < 1100^{\circ}\text{C}, \quad &\alpha' = 1,4 - 2,0. \end{aligned}$$

Избыток воздуха у дымососа для туннельных печей равен: 2,5–4.

Количественный состав отходящих газов равен:

$$V_{\text{д.г.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{возд}},$$

где $V_{\text{CO}_2}, V_{\text{H}_2\text{O}}, V_{\text{SO}_2}, V_{\text{O}_2}, V_{\text{N}_2}$ количество $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{SO}_2, \text{O}_2, \text{N}_2$ в составе дымовых газов (при: α');

$V_{\text{возд}}$ избыток воздуха в дымовых газах,

$$V_{\text{возд}} = V_{\text{T}} \cdot (\alpha'' - \alpha'),$$

где V_{T} – теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания единицы топлива.

Коэффициент избытка воздуха в зоне обжига туннельной печи может быть найден расчётным путём на основании уравнения теплового баланса горения.

$$Q_{\text{p}}^{\text{H}} + V_{\text{T}} \cdot \alpha' \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} + C_{\text{T}} \cdot t_{\text{T}} = [V_{\text{д.г.}} + V_{\text{T}} \cdot (\alpha' - 1)] C_{\text{п.г.}} \cdot t_{\text{к}},$$

где Q_{p}^{H} – низшая теплота сгорания топлива, $[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}; \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}]$;

V_{T} – теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания топлива, $[\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кг}}{\text{кг}}]$;

α' – коэффициент избытка воздуха в зоне обжига печи (искомая величина);

C_B - теплоёмкость воздуха при t_B , с которой оно поступает в зону обжига, $[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}]$;

C_T - теплоёмкость топлива при температуре, с которой он поступает на горение, $[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}]$;

$V_{д.г.}$ - удельное количество дымовых газов, образовавшихся в зоне обжига печи при $\alpha = 1$, $[\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}; \frac{\text{кг}}{\text{кг}}]$;

$C_{п.г.}$ - теплоёмкость продуктов горения при калометрической температуре горения t_K , $[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}]$;

$$C_{п.г.} = 1,355 + 0,0000755 \cdot t_K [\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}]; \quad t_K = \frac{t_{обж}}{\eta_{пир}}$$

$t_{обж}$ - температура обжига изделий, $[^{\circ}\text{C}]$;

$\eta_{пир}$ - пирометрический коэффициент процесса горения топлива.

Тепловой баланс печи

Приходная часть ($\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$)

1. Тепло от сжигания топлива, кВт:

$$Q_1^n = Q_p^n \cdot B,$$

где B – часовой расход топлива, при использовании твёрдого и жидкого топлива $[\frac{\text{кг}}{\text{ч}}]$; при использовании газообразного топлива $[\frac{\text{нм}^3}{\text{ч}}]$.

(находится решением уравнения теплового баланса)

2. Физическое тепло топлива, кВт:

$$Q_2^n = B \cdot C_T \cdot t_T,$$

где C_T - теплоёмкость топлива при температуре, с которой оно поступает к горелкам печи:

$$\text{для угля } C_T = 1257 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}};$$

$$\text{для мазута } C_T = 1738 + 0,0025 t_T \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}};$$

$$\text{для газа } C_T = 1353 + 0,00075 t_T \frac{\text{кДж}}{\text{нм}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}}.$$

3. Физическое тепло первичного воздуха, подаваемого к горелкам (форсункам печи), кВт:

$$Q_3^n = V_T \cdot \alpha \cdot B \cdot C_B \cdot t_B,$$

где V_T - теоретическое количество воздуха, необходимое для сжигания единицы топлива, $[\text{нм}^3; \text{кг}]$;

α - коэффициент избытка воздуха, подаваемого к горелкам печи (первичного);

C_B - теплоёмкость воздуха при температуре, с которой он поступает к горелкам (принимается по таблицам).

4. Физическое тепло вторичного воздуха, поступающего в зону обжига печи на зоны охлаждения, кВт:

$$Q_4^n = V_T \cdot (\alpha' - \alpha) \cdot B \cdot C'_B \cdot t'_B,$$

где α' - коэффициент избытка воздуха в зоне обжига печи;

C'_B - теплоёмкость воздуха при температуре t'_B , с которой он поступает из зоны охлаждения печи.

$$t'_B = 150 - 250^\circ\text{C}$$

5. Тепло, вносимое избыточным воздухом, подсасываемым вне зоны горения топлива, кВт:

$$Q_5^n = V_T \cdot (\alpha'' - \alpha') \cdot B \cdot C''_B \cdot t''_B,$$

где α'' - коэффициент избытка воздуха у дымососа печи;

C''_B - теплоёмкость воздуха при t''_B , которую он имеет в помещении цеха обжига.

6. Тепло, вносимое в печь сырцом, кВт :

$$Q_6^n = \mu_c \cdot C_c \cdot t_c,$$

где C_c - теплоёмкость сырца при температуре t_c , с которой он поступает в печь, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right]$.

$$C_c = 0,92 \cdot \frac{100 - W_0}{100} + \frac{4,19 \cdot W_0}{100}, \left[\frac{\text{кВт}}{\text{кг}}\right],$$

где W_0 - относительная влажность сырца, поступающего в печь, [%].

7. Тепло, вносимое печными вагонетками, кВт:

$$Q'_7 = (\mu_c \cdot C_m + \mu_\phi \cdot C_\phi + \mu_{из} \cdot C_{из} + \mu_\Pi \cdot C_\Pi) \cdot t_B \cdot T,$$

где $\mu_\phi, \mu_m, \mu_{из}, \mu_\Pi$ - соответственно массы металлической части футеровки, вагонетки, пода, тепловой изоляции пода, огнеупорного припаса (капсели, этажерки, подставки и пр.) на вагонетке, [кг]: $C_m, C_\phi, C_{из}, C_\Pi$;

μ_Π - теплоёмкость металлической части вагонетки, футеровки, изоляции, припаса при температуре t_B , с которой вагонетка поступает в печь, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$;

T - температура загрузки вагонеток, $\left[\frac{\text{шт}}{\text{ч}}\right]$.

$$C_T = 0,482 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$C_\phi = 0,88 + 0,0023 t \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}};$$

$$C_{из} = 1,01 + 0,00084 t \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

т.к. и футеровка и припас выполнены из шамота.

Расходная часть $\left(\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}\right)$

1. Расход тепла на испарении влаги и нагрев при этом образующихся водяных паров, кВт:

$$Q_1^P = \mu_{вл} \cdot (2490 + 1,96 \cdot t_{от}),$$

где $\mu_{вл}$ - масса влаги, испаряемой в печи из материала, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{ч}}\right]$.

$$\mu_{вл} = \mu_W^\Gamma + \mu_W^X,$$

$t_{от}$ - температура отходящих из печи газов, [°C].

Практическая температура отходящих газов. Принимается в пределах 100-400°C. Эта температура зависит от температуры обжига изделий, длины печи, длины зоны обжига, зоны подогрева и пр.

Учитывая влияние отмеченных факторов, температуру отходящих газов можно принимать при обжиге:

Керамического кирпича и черепицы	100–120°C
Изделий строительной керамики	150–250°C
Фаянса	200–300°C
Фарфора	250–400°C
Шамотных огнеупоров	150–250°C
Динаса	150–300°C
Магнезиальных изделий	160–250°C

2. Расход теплоты на химические реакции, протекающие в глине в период обжига, кВт:

$$Q_2^P = (\mu_c - \mu_W^2) \cdot (23A + 28C),$$

где A и C – содержание глинозёма и оксида кальция в глине, [%].
(химический состав сырья)

3. Потери теплоты от химической неполноты горения топлива, кВт:

$$Q_3^P = 0,01 \cdot x \cdot B \cdot Q_H^P,$$

где x – потери топлива с химическим недожогом, [%].

Для твёрдого топлива	2-3 %
Для мазута	1-2 %
Для газа	0,5-1 %

4. Потери теплоты с отходящими газами, кВт:

$$Q_4^P = (B \cdot V_{о.г.} + V_L^C) \cdot C_{от} \cdot t_{от},$$

где $V_{о.г.}$ - суммарный объём отходящих от печи газов, [$\frac{нм^3}{нм^3}$].

$$V_{O_2} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{возд},$$

где $V_{CO_2}; V_{H_2O}$ - содержание CO_2 и H_2O в дымовых газах в расчёте на единицу топлива;

V_L^C - объём летучих продуктов, выделившихся из сырья, [$\frac{м^3}{ч}$].

$$V_L^C = \frac{\mu_L}{\rho_{CO_2}},$$

ρ_{CO_2} - плотность CO_2 при н.у. ($1,97 \frac{кг}{м^3}$);

$C_{от}$ – теплоёмкость отходящих газов при их температуре $t_{от}$

$$C'_{от} = 1,35 + 0,000075 \cdot t_{от} \left[\frac{кДж}{м^3 \cdot К} \right];$$

$$C_{\text{ом}} = 1,05 + 0,000058 \cdot t_{\text{ом}} \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right].$$

5. Избыточное тепло, отбираемое из зоны охлаждения печи на сушку, кВт:

$$Q_5^P = Q_{\text{изд}} - Q_n^n,$$

$$Q_{\text{изд}} = [\mu_{\text{ч}} \cdot C_o + (\mu_{\text{ч}} \cdot C_o + \mu_{\text{ч}} \cdot C_o) \cdot T] \cdot [t_{\text{об}} - t_{\text{в}}],$$

где C_o - теплоёмкость о обожжённых изделий, ($C_o = 0,92 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$);

$t_{\text{об}}$ - температура обжига изделий, [°C];

$t_{\text{в}}$ - температура выгружаемых из печи изделий, [°C].

Данную статью теплового баланса следует рассчитывать с учётом конструкции печи, ибо в туннельных печах при подаче воздуха из зоны охлаждения в зону подогрева отсутствует отбор его на сторону, и наоборот.

6. Потери тепла с газами, выбираемыми через неплотности печи, кВт:

$$Q_6^P = 0,01g \sum Q_{\text{прих}},$$

где $\sum Q_{\text{прих}}$ - сумма приходных статей теплового баланса, $[\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}]$;

g - потери тепла через неплотности печи, [°C]. ($g=2-12\%$).

7. Теплосодержание выгружаемых изделий, кВт:

$$Q_7^P = \mu_{\text{ч}} \cdot C_o \cdot t_{\text{в}}.$$

8. Теплосодержание, выходящих из печи вагонеток, кВт:

$$Q_8^P = (\mu_{\text{т}} \cdot C_{\text{т}} + \mu_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} + \mu_{\text{из}} \cdot C_{\text{из}} + \mu_{\text{п}} \cdot C_{\text{п}}) \cdot t_{\text{в}}.$$

9. Потери тепла в окружающую среду через ограждающие конструкции печи, кВт:

$$Q_9^P = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{св}} + Q_{\text{пв}},$$

где $Q_{\text{ст}}$ - потери тепла через стены печи;

$Q_{\text{св}}$ - потери тепла через свод печи;

$Q_{\text{пв}}$ - потери тепла через под вагонеток.

При определении данных величин печь разбирается на расчётные участки (минимально три) по температурной кривой обжига. Расчёт ведётся отдельно по каждому участку. Результаты затем суммируются. Потери тепла ограждениями печи подсчитывается по формуле:

$$Q = \frac{3,6(t_{\text{в.н.}} - t_{\text{н}}) \cdot F}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{nS}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{\text{кДж}}{\text{ч}} \right],$$

где $t_{\text{в.н.}}$ - средняя температура газов внутри печи на расчётном участке, [°C];

$t_{\text{н}}$ - температура воздуха в помещении цеха, [°C];

S - толщина отдельных слоёв кладки печи, [м];

λ - коэффициент теплопроводности материала кладки, $[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}]$;

α_1 и α_2 - соответственно коэффициенты теплоотдачи от печных газов ограждениям печи и от ограждений окружающему воздуху, $[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}]$;

F - теплоотдающая поверхность расчётного участка, [м].

Уравнение теплового баланса:

$$\sum_9^7 Q^n = \sum_1^{10} Q^1.$$

Решением уравнения теплового баланса определяется величина V . Для сравнения теплового потребления рассчитанной печи с действующими печами находится удельный расчёт условного топлива.

$$V = \frac{B \cdot Q_H^p}{29300 \cdot \Pi'_q} \left[\frac{\text{кг условного топлива}}{\text{единицу изделия}} \right].$$

За единицу изделий в керамической промышленности приняты:

Тыс. шт. усл. кирпича	- для кирпича;	
м^3	- для керамзита;	
тыс. шт	- для санитарно-строительных изделий,	
	керамических блоков;	
м^2	- для плиток различного назначения.	

Тепловой баланс сводится в таблицу

Таблица 6.3– Тепловой баланс

Статьи прихода	$\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$	%	Статьи расхода	$\frac{\text{кВт}}{\text{ч}}$	%
<ul style="list-style-type: none"> - Тепло от сжигания топлива - Физическое тепло топлива - Физическое тепло первичного воздуха, подаваемого к горелкам (форсункам печи) - Физическое тепло вторичного воздуха, поступающего в зону обжига печи на зоны охлаждения - Тепло, вносимое избыточным воздухом, подсасываемым вне зоны горения топлива - Тепло, вносимое в печь сырцом - Тепло, вносимое печными вагонетками 			<ul style="list-style-type: none"> - Расход тепла на испарении влаги и нагрев при этом образующихся водяных паров - Расход теплоты на химические реакции, протекающие в глине в период обжига - Потери теплоты от химической неполноты горения топлива - Потери теплоты с отходящими газами - Избыточное тепло, отбираемое из зоны охлаждения печи на сушку - Потери тепла с газами, выбираемыми через неплотности печи - Теплосодержание выгружаемых изделий - Теплосодержание, выходящих из печи вагонеток - Потери тепла в окружающую среду через ограждающие конструкции печи 		
Итого:			Итого:		

7 Расчет вращающейся печи

Тепловой расчёт вращающихся печей заключается в составлении материального и теплового балансов, определении удельного расхода топлива и тепла, выбора тягодутьевых устройств.

Материальный и тепловой балансы составляются на 1 кг клинкера.

Расходные статьи материального баланса.

Расход топлива

$$X^m \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кг клинкера}}; \frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где X^m – величина неизвестная, определяется путём решения уравнения теплового баланса.

Расход сырья с учётом безвозвратного уноса

1. Расход сухого сырья с учётом безвозвратного уноса:

$$G_c = \frac{G_c^m \cdot 100}{100 - d_{\text{ун}}}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right],$$

где $d_{\text{ун}}$ – количество сырьевой пыли, принимается в процентах от расхода сухого сырья, [%]; $d_{\text{ун}} = 3 \div 7 \%$

G_c^m – теоретический удельный расход сухого сырья, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right]$.

$$G_c^m = \frac{100 - d \cdot X^m \cdot A^p}{100 - \text{п.п.п.}^c}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right] -$$

для случая сжигания твёрдого (жидкого) топлива:

где d – массовая доля золы (в долях), осаждающейся в печи и входящей в состав клинкера; $d = 0,8 \div 1,0$

A^p – массовое содержание золы в топливе, [%];

п. п. п.^c – потери при прокаливании сырьевой смеси, [%].

при сжигании газообразного топлива:

$$G_c^m = \frac{100}{100 - \text{п.п.п.}^c}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

1.2. Расход влажной шихты (или шлама) с учётом безвозвратного уноса:

$$G_c^W = \frac{G_c \cdot 100}{100 - W_c}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right],$$

где G_c – расход сухого сырья с учётом безвозвратного уноса, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right]$;

W_c – влажность сырьевой смеси (или шлама), [%].

1.3. Расход воздуха на горение топлива

$$G_{\text{возд}} = X^m \cdot V_{\text{действ}}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где X^m – удельный расход топлива, величина неизвестная, $\left[\frac{\text{м}^3}{\text{кг клинкера}}; \frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right]$;

$V_{\text{действ}}$ – действительный расход воздуха на горение 1 м³ или 1 кг топлива, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{т}} \right]$.

1.4. Расход влаги воздуха

$$G_{\text{возд}}^W = V_{\text{действ}} \cdot X^m \cdot \frac{d}{1000}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right],$$

где d – влагосодержание воздуха, $\left[\frac{\text{г}}{\text{кг сухого воздуха}} \right]$. $d = 10 \frac{\text{г}}{\text{кг сухого воздуха}}$

2 Приходные статьи

2.1. Выход клинкера – 1 кг.

2.2. Выход углекислого газа (CO₂) из сырьевой смеси:

$$G_{CO_2}^c = \frac{CO_2^c}{100} \cdot [G_c^m + (G_c - G_c^m) \cdot \beta], \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right],$$

где CO_2^c – содержание химически связанного углекислого газа в сырьевой смеси, [% от массы сухого сырья].

$$CO_2^c = \frac{M_{CO_2} \cdot CaO^c}{M_{CaO}} + \frac{M_{CO_2} \cdot MgO^c}{M_{MgO}}, \left[\text{ \%} \right],$$

где M_{CO_2} , M_{CaO} , M_{MgO} - молекулярные массы CO_2 , CaO , MgO ;

β - степень полноты декарбонизации безвозвратного уноса. $\beta = 0,3 \div 0,6$

$$V_{CO_2}^c = \frac{G_{CO_2}^c}{\rho_{CO_2}}, \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{кг клинкера}} \right],$$

где $\rho_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{22,4}$, $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$ – плотность CO_2 .

2.3. Выход влаги из сырьевой смеси

2.3.1. Физическая влага:

$$G_W^\Phi = G_c^W - G_c, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

$$V_W^\Phi = \frac{G_W^\Phi}{\rho_{H_2O}}, \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{кг клинкера}} \right]; \quad (\rho_{H_2O} = 0,804 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}).$$

2.3.2. Химическая (гидратная) влага:

$$G_c^r = G_c \cdot \left(\frac{M_{H_2O} \cdot Al_2O_3^c}{M_{Al_2O_3} \cdot 100} \right) = 0,0035 G_c \cdot Al_2O_3^c, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где $Al_2O_3^c$ - процентные содержания Al_2O_3 в сырьевой смеси.

$$V_W^r = \frac{G_W^r}{\rho_{H_2O}}, \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{кг клинкера}} \right].$$

2.4. Количество уносимой и теряемой с газами пыли из сырьевой смеси.

$$G_{yH}^c = (G_c - G_c^m) \cdot (1 - \text{п. п. п.}^c \cdot \beta \cdot 10^{-2}), \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

2.5 Общий выход отходящих газов из топлива и сырья:

$$G_{o.g.} = G_{o.g.}^T \cdot X^m + G_{CO_2}^c + G_W^\Phi + G_W^r + G_W^{\text{возд}}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right],$$

где $G_{o.g.}^T$ – масса продуктов горения 1 кг (м^3) топлива, принимается из расчёта процесса горения топлива;

$$G_{o.g.}^T = M_{CO_2}^T + M_{H_2O}^T + M_{SO_2}^T + M_{O_2}^T + M_{N_2}^T, \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{ топлива}} \right]; \quad \text{или}$$

$$V_{o.g.} = V_{o.g.}^T \cdot X^m + V_{CO_2}^c + V_W^\Phi + V_W^r + V_W^{\text{возд}}, \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где $V_{o.g.}^T = V_{CO_2}^T + V_{H_2O}^T + V_{SO_2}^T + V_{O_2}^T + V_{N_2}^T$ - принимается из расчёта процесса горения топлива.

$$V_W^{\text{возд}} = \frac{G_W^{\text{возд}}}{\rho_{H_2O}}, \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{кг клинкера}} \right].$$

Данные материального баланса сводятся в таблицу 7.1

Таблица 7.1 материальный баланс

Расходные статьи $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right]$	Приходные статьи $\left[\frac{\text{кг}}{\text{кг клинкера}} \right]$
--	--

Топливо	X^m	клинкер	1
Сырьё	G_c^w	унос	$G_{ун}^c$
Воздух	$G_{возд}$	отходящие газы	$G_{о.г.}$
Влага воздуха	$G_{возд}^w$		
Итого:		Итого:	

Тепловой баланс

Приходные статьи

1. Приход тепла в результате горения топлива:

$$q = X^m \cdot Q_n^p, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

2. Приход тепла с топливом (физическое тепло топлива):

$$Q_T^\Phi = X^m \cdot C_T \cdot t_T, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где M_T - масса топлива, [кг];

C_T - массовая теплоёмкость топлива, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ (для мазута, твёрдого топлива)
или $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$ (для газа).

t_T - температура топлива, [°C].

3. Приход тепла с первичным воздухом:

$$Q'_V = X^m \cdot v_d \cdot C'_V \cdot t'_V \cdot K, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где v_d - действительный расход воздуха на горение 1 м^3 топлива, $\left[\frac{\text{м}^3 \text{ воздуха}}{\text{м}^3 \text{ топлива}} \right]$ (принимается из расчёта процесса горения топлива);

C'_V - объёмная теплоёмкость воздуха, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$;

t'_V - температура первичного воздуха, [°C];

K - доля первичного воздуха.

4. Приход тепла с вторичным воздухом:

$$Q''_V = X^m \cdot v_d \cdot C''_V \cdot t''_V \cdot (1 - K), \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где t''_V - температура вторичного воздуха, [°C];

C''_V - объёмная теплоёмкость воздуха при t''_V , $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$;

$1 - K$ - доля вторичного воздуха.

5. Приход тепла с сырцом:

$$Q_c = (G_c \cdot C_c + G_w^\Phi \cdot C_w) \cdot t_c, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где C_c - теплоёмкость сырья, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$; ($C_c = 0,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$)

G_w^Φ (см. материальный баланс);

C_w - теплоёмкость воды, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$; ($C_w = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$).

Итого:

$$Q_{\text{прих}} = q + Q_{\text{T}}^{\Phi} + Q_{\text{C}} + Q'_{\text{B}} + Q''_{\text{B}}, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

Расходные статьи

1. Теоретический расход тепла (тепловой эффект клинкерообразования):

$$q^{\text{T}} = G_{\text{C}}^{\text{T}} \cdot (4,5\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{C}} + 30,2\text{CaO}^{\text{C}} + 17\text{MgO}^{\text{C}}) - 285, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где G_{C}^{T} - теоретический удельный расход сухого сырья, принимается из материального баланса, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right]$.

2. Расход тепла на испарение влаги из сырьевой шихты:

$$Q_{\text{W}}^{\Phi} = G_{\text{W}}^{\Phi} \cdot 2493, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где 2493 – теплота парообразования при 0 °С, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг влаги}} \right]$.

1. Потери тепла с отходящими газами:

$$Q_{\text{о.г.}} = [(V_{\text{CO}_2}^{\text{T}} \cdot C_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{T}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^{\text{T}} \cdot C_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}^{\text{T}} \cdot C_{\text{O}_2}) \cdot X^{\text{m}} + V_{\text{возд}}^{\text{W}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}_2}^{\text{C}} \cdot C_{\text{CO}_2} + V_{\text{W}}^{\text{T}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{W}}^{\text{T}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}] \cdot t_{\text{о.г.}}, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где $t_{\text{о.г.}}$ - температура отходящих газов на выходе из печи, [°С];

$V_{\text{CO}_2}^{\text{T}}, V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{T}}, V_{\text{N}_2}^{\text{T}}, V_{\text{O}_2}^{\text{T}}$... выход отходящих газов из топлива и сырья, $\left[\frac{\text{нм}^3}{\text{м}^3\text{T}} \right]$ (для топлива) и $\left[\frac{\text{нм}^3}{\text{кг клинкера}} \right]$ (для сырья);

$C_{\text{CO}_2}, C_{\text{H}_2\text{O}}, C_{\text{N}_2}$... объёмные теплоёмкости газов, принимаются по таблицам для $t_{\text{о.г.}}$, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right]$.

4. Потери тепла с клинкером, выходящим из холодильника:

$$Q_{\text{кл}} = C_{\text{кл}} \cdot t_{\text{кл}}, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где $C_{\text{кл}}$ – теплоёмкость клинкера, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$;

$t_{\text{кл}}$ - температура клинкера, [°С].

$$t_{\text{кл}} = 200^{\circ}\text{C}; C_{\text{кл}} = 0,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$t_{\text{кл}} = 100^{\circ}\text{C}; C_{\text{кл}} = 0,78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

5. Потери тепла с уносом:

$$Q_{\text{ун}} = C_{\text{ун}} \cdot t_{\text{ун}} \cdot t_{\text{о.г.}}, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

$$\text{при } t_{\text{кл}} = 200^{\circ}\text{C}; C_{\text{ун}} = 1,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

6. Потери тепла, вызываемые остыванием уловленной и возвращенной в печь пыли на участке «печь – пылеуловитель – печь»:

$$Q'_{\text{ун}} = K_{\text{ун}} \cdot G_{\text{C}} \cdot C_{\text{ун}} \cdot (t_{\text{о.г.}} - t'_{\text{C}}), \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right];$$

где $K_{\text{ун}}$ - доля уноса от расхода сухого сырья; $K_{\text{ун}} = 0,05 \div 0,2$

$C_{\text{ун}}$ - теплоёмкость уноса, $\left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right]$; $t'_{\text{C}} = 50 \div 100^{\circ}\text{C}$

t'_{C} - температура уловленной пыли в момент возврата её в печь, [°С].

7. Расход тепла на дегидратацию и декарбонацию уноса:

$$Q_{\text{ун}}^{\text{дек}} = G_{\text{ун}} \cdot (4,5\text{Al}_2\text{O}_3^c + 30,2\text{CaO}^c + 17\text{MgO}^c), \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

8. Потери тепла корпусом печи в окружающую среду:

$$Q_{\text{о.с.}} = (0,15 \div 0,20) \cdot X^m \cdot Q_{\text{н}}^p, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right] - \text{для мокрого способа производства}$$

$$Q_{\text{о.с.}} = (0,15 \div 0,30) \cdot X^m \cdot Q_{\text{н}}^p, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right] - \text{для сухого способа производства}$$

Итого расход топлива:

$$Q_{\text{расх}} = q^T + Q_c^w + Q_{\text{о.г.}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{ун}} + Q'_{\text{ун}} + Q_{\text{ун}}^{\text{дек}} + Q_{\text{о.с.}}$$

Записываем уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$$

Решая это уравнение относительно неизвестной величины X^m , определяем удельный расход топлива на 1 кг клинкера.

Зная X^m , находим практический расход тепла:

$$q = X^m \cdot Q_{\text{н}}^p, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

Составляем таблицу теплового баланса по общеизвестной методике.

Таблица 7.2 тепловой баланс

Приход			Расход		
статьи	$\frac{\text{кВт}}{\text{кг клинкера}}$	%	статьи	$\frac{\text{кВт}}{\text{кг клинкера}}$	%
q			q^T		
$Q_{\text{т}}^{\Phi}$			Q_c^w		
$Q'_{\text{в}}$			$Q_{\text{о.г.}}$		
...			..		
Итого:		100	Итого:		100

Тепловой К.П.Д. печи

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{полезное}}}{Q_{\text{затраченное}}} \cdot 100\%;$$

$$Q_{\text{полезное}} = q^T + Q_c^w, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

$$Q_{\text{затр}} = Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}, \left[\frac{\text{кДж}}{\text{кг клинкера}} \right].$$

Технический К.П.Д.

$$\eta = \frac{q^T}{q} \cdot 100\%.$$

8 Расчет автоклава

- годовая производительность цеха $P_{\text{год}}, \text{м}^3$

- топливо
- объемная плотность сухого бетона ρ_B , кг/м³
- рабочее давление автоклава, МПа
- температура, °С
- начальная температура изделий t_n , °С
- количество массивов на вагонетке, шт
- ёмкость массива E_m , м³
- массовая теплоемкость сухого бетона $C_{с.б.}$, КДж/кг·К
- теплоемкость воды C_B , КДж/кг·К
- начальная влажность изделий W_n , %
- конечная влажность изделий W_k , %.
- температура в цеху = 20 °С

Конструктивный расчет установки

Конструктивный расчёт установки не производим, так как она является унифицированным оборудованием. Поэтому по данным завода-изготовителя принимаем автоклав эксплуатирующийся по технологии со следующей технической характеристикой:

- рабочая длина мм
- диаметр мм
- рабочее давление МПа
- масса автоклава кг
- ширина колес вагонетки мм
- число вагонеток в одном автоклаве $n =$ шт.
- количество массивов на вагонетке

Габаритные размеры автоклава:

- длина мм
- ширина мм
- высота мм

Техническая характеристика вагонетки:

- длина мм
- масса кг
- высота

Число вагонеток в автоклаве, шт

$$n = L_{авт} / l_B$$

где $L_{авт}$ – длина автоклава, м
 l_B – длина вагонетки, м

Ёмкость автоклава, м³

$$E_a = E_B \cdot n$$

где E_B – ёмкость вагонетки, м³
 n – число вагонеток в автоклаве, шт

Заполнение автоклава изделиями

$$K = (E_a / V_{авт}) 100\%$$

где $V_{авт}$ – объем автоклава, м³

$$V_{авт} = (\pi \cdot D^2 / 4) \cdot L, \text{ м}^3$$

где D – диаметр автоклава, м

L – рабочая длина автоклава, м

Число автоклавов, обеспечивающих годовую производительность цеха

$$m = (P_{год} \cdot \tau_{ц} / T \cdot C \cdot E_a \cdot K_{исп}),$$

где $P_{год}$ – годовая производительность цеха,

$\tau_{ц}$ – длительность работы автоклава, ч

$$\tau_{ц} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_{доп}$$

где C – количество часов в сутках,

T – число рабочих дней в году,

$K_{исп}$ – коэффициент использования автоклава, $K_{исп} = 0,9 - 0,95$.

$\tau_{доп}$ – время загрузки, выгрузки, чистки автоклава.

Для обеспечения заданной производительности берём 3 автоклава.

Техническая характеристика проходных автоклавов и режим автоклавной обработки изделий из ячеистого бетона приведены в приложении 7 и 8

Техническая характеристика автоклавов диаметром 2 м

Показатель	Длина автоклава, м					
	17		19		21	40
Тип автоклава	Проходной	Тупиковый	Проходной	Тупиковый	Проходной	
Рабочее давление пара, МПа	1,2	1,2	1,2	1,2	1,6	1,6
Рельсовая колея, мм	750	750	750	750	750	750
Привод механизма открывания крышек	Механический				Гидравлический	
Габариты, мм:						
длина	18670	18160	20730	20225	23200	40400
ширина	2690	2690	2690	2690	2560	
высота	3830	3830	3830	3830	3720	
Масса, кг	23070	21600	25707	23440	32150	47400

Режим автоклавной обработки силикатного кирпича

Операция	Продолжительность, ч, при давлении P , МПа			
	0,8	1,2	1,6	1,6
	Полнотелый кирпич	Облегченный кирпич	Многopустотный и полнотелый кирпич	Многopустотный камень
Загрузка сырца	1	1	0,25	1
Закрывание крышек	0,2	0,2	0,15	0,15
Подъем давления пара:				
без перепуска	1,1	1,15	1,5	1,15
	1,3	1,4	1,6	1,4

с перепуском				
Выдержка под максимальным давлением	6	5	4	4,5
Выпуск пара:				
без перепуска	0,8	0,9	1,1	1
с перепуском	1,1	1,1	1,3	1,1
Открывание крышек	0,2	0,2	0,15	0,15
Выгрузка состава с кирпичом	0,25	0,25	0,25	0,25
Чистка автоклава	0,15	0,15	0,3	0,15
Общая длительность:				
без перепуска	9,7	8,85	7,7	8,35
с перепуском	10,2	9,3	8	8,7

Тепловой расчет установки

Тепловой расчёт автоклава - определение расхода тепла и пара на ТВО ячеистых изделий. Она определяется решением уравнения теплового баланса, который состоит из приходной и расходной частей. Тепловой баланс автоклава определяется на период его работы и на всю массу загруженных изделий.

Приход тепла, кДж / период

- С паром

$$Q = D_{\text{п}} \cdot h''$$

где h'' - энтальпия рабочего пара, КДж/кг;

$D_{\text{п}}$ - расход пара за период, кг/период; величина неизвестная, определяем из уравнения теплового баланса.

Расход тепла, кДж / период

- На нагрев сухой массы бетона от начальной температуры до максимальной

$$Q_1 = M_{\text{сух}} \cdot C_{\text{сух}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$$

где $M_{\text{сух}}$ - масса сухого бетона, находящегося в автоклаве, кг

$C_{\text{сух}}$ - массовая теплоемкость сухого бетона, кДж/кг · К

$C_{\text{сух}} = 0,75$ кДж/кг · К,

$t_{\text{к}}$ - максимальная температура нагрева изделий, °С

$t_{\text{н}}$ - начальная температура изделий, °С

$$M_{\text{сух}} = \gamma_{\text{сух}} \cdot n \cdot V_{\text{б}}, \text{ кг}$$

где n - число изделий в автоклаве, шт

$V_{\text{б}}$ - объём одного изделия, м³

$\gamma_{\text{сух}}$ - объемная плотность сухого бетона, кг/ м³

- На нагрев влаги изделий

$$Q_2 = M_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$$

где C_B – теплоемкость воды, $C_B = 4,19$ кДж/кг · К

M_B – общая масса воды в изделиях перед запариванием, кг

$$M_B = M_{\text{сух}} \cdot (W_H / 100), \text{ кг}$$

где W_H – начальная влажность изделий, %

- На нагрев решеток

$$Q_3 = C_M \cdot M_{\Phi} \cdot (t_k - t_H)$$

где M_{Φ} – масса форм находящихся в автоклаве, кг

C_M – теплоемкость металла, $C_M = 0,48$ кДж/кг · К

$$M_{\Phi} = n \cdot m_{\Phi}$$

где n – количество вагонеток, шт.

m_{Φ} – масса решёток на одной вагонетке, кг

- На нагрев вагонеток, находящихся в автоклаве

$$Q_4 = C_M \cdot M_B \cdot (t_k - t_H)$$

где M_B – масса вагонеток находящихся в автоклаве, кг

$$M_B = n \cdot m_B, \text{ кг}$$

где m_B – масса одной вагонетки, кг

- На аккумуляцию корпуса автоклава при нагреве его от 40 °С до 120 °С и выше

$$Q_5 = C_M \cdot M_A \cdot (t_k - t_H)$$

где M_A – масса автоклава, кг

- Теплопотери в окружающую среду

$$Q_6 = 3,6 \cdot \alpha_{\text{сум}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{о.с}}) \cdot F \cdot \tau_{\text{то}}$$

где $\alpha_{\text{сум}}$ – суммарный коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К,

$t_{\text{ст}}$ – температура наружной поверхности автоклава в период изотермической выдержки, °С

t_B – температура воздуха в помещении цеха, °С

$\tau_{\text{то}}$ – время подъема температуры и время изотермической выдержки, час

$$\tau_{\text{то}} = \tau_1 + \tau_2$$

F – площадь поверхности автоклава, м²

$$F = (\pi \cdot D \cdot L) + (2 \cdot (\pi \cdot D^2/4)), \text{ м}^2$$

где D – диаметр автоклава, м

L – длина автоклава, м

- На испарение влаги

$$Q_7 = 2487 \cdot M_{\text{сух}} \cdot ((W_H - W_K) / 100)$$

где 2487 – удельная теплота парообразования, кДж / кг

W_H, W_K – начальная и конечная влажность изделий, %

- Потери тепла с паром

$$Q_8 = h'' \cdot \rho'' \cdot V_{CB}$$

где ρ'' – плотность рабочего пара, кг/м³

V_{CB} – свободный объем автоклава, м³

$$V_{CB} = V_A - V_{ИЗД} - V_B - V_{Ф}, \text{ м}^3$$

где V_A – объем автоклава, м³

$V_{ИЗД}$ – объем, занимаемый изделиями, м³

V_B – объем, занимаемый вагонетками, м³

$V_{Ф}$ – объем, занимаемый формами, м³

$$V_B = M_B / \rho_M$$

где ρ_M – плотность материала вагонеток, кг/м³,

- Потери тепла с конденсатом

$$Q_9 = C_K \cdot M_K \cdot t_K$$

где C_K – теплоемкость конденсата (вода), кДж/кг · К

t_K – температура конденсата, °С

M_K – масса конденсата, кг

$$M_K = D_{II} - (0,05D_{II} + V_{CB} \cdot \rho'')$$

- Потери тепла с учетной паром через неплотности составляют до 5 % от прихода тепла

$$Q_{10} = 0,05 \cdot h'' \cdot D_{II}$$

Всего расход тепла:

$$Q_P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10}, \text{ кДж/ период}$$

Уравнение теплового баланса

$$Q_{расх} = Q_{прих}$$

Решая уравнение, определяем расход пара за период, кг/период

Тепловой баланс представлен в таблице 8.1.

Таблица 8.1 тепловой баланс

Наименование статей	Количество	
	кВт	%
Приход тепла		
- С паром		
Итого:		
Расход тепла		
- На нагрев сухой массы		
- На нагрев влаги изделия		
- На нагрев решёток		
- На нагрев вагонеток		
- На аккумуляцию корпуса		

- Потери в окружающую среду		
- На испарение влаги		
- На потери тепла с паром		
- Потери с конденсатом		
- Потери через неплотности		
Итого:		100

Удельный расход рабочего пара, кг / м³_{бетона}

$$d = D_{\Pi} / E_A$$

Определяем расход рабочего пара в год, сутки, смену, час

$$d_{\text{год}} = d \cdot P_{\text{год}}, \text{ кг/год}$$

$$d_{\text{сут}} = d_{\text{год}} / T, \text{ кг/сут}$$

$$d_{\text{см}} = d_{\text{сут}} / C$$

$$d_{\text{час}} = d_{\text{сут}} / \text{Ч}, \text{ кг/час}$$

Удельный расход нормального пара, кг / м³_{бетона}

$$d_{\text{н.п}} = (d \cdot h'') / H$$

где H – энтальпия нормального пара, кДж/кг

Определяем расход нормального пара в год, сутки, смену, час

$$d_{\text{н.п.год}} = d_{\text{н.п.}} \cdot P_{\text{год}}, \text{ кг/год}$$

$$d_{\text{н.п.сут}} = d_{\text{н.п.год}} / T, \text{ кг/сут}$$

$$d_{\text{н.п.см}} = d_{\text{н.п.сут}} / C, \text{ кг/смену}$$

$$d_{\text{н.п.час}} = d_{\text{н.п.сут}} / \text{Ч}, \text{ кг/час}$$

Удельный расход тепла, кДж/м³

$$q = d \cdot h''$$

Определяем расход тепла в год, сутки, смену, час

$$q_{\text{год}} = q \cdot P_{\text{год}}, \text{ кДж/год}$$

$$q_{\text{сут}} = q_{\text{год}} / T, \text{ кДж/сут}$$

$$q_{\text{см}} = q_{\text{сут}} / C, \text{ кДж/смену}$$

$$q_{\text{час}} = q_{\text{сут}} / \text{Ч}, \text{ кДж/час}$$

Удельный расход рабочего топлива, кДж/кг

$$B = q / (Q^H \cdot \eta_{\text{к.у.}})$$

где $\eta_{\text{к.у.}}$ – коэффициент полезного действия установки; $\eta_{\text{к.у.}} = 0.9$

Определяем расход рабочего топлива в год, сутки, смену, час

$$V_{p.t.год} = V \cdot P_{год}, \text{ кДж/год}$$

$$V_{p.t.сут} = V_{p.t.год} / T, \text{ кДж/сут}$$

$$V_{p.t.см} = V_{p.t.сут} / C, \text{ кДж/смену}$$

$$V_{p.t.час} = V_{p.t.сут} / Ч, \text{ кДж/час}$$

Удельный расход условного топлива, кДж/кг

$$V = q / (29300 \cdot \eta_{ку})$$

где 29330 – теплота сгорания условного топлива, кДж/кг

Определяем расход условного топлива в год, сутки, смену, час

$$V_{y.t.год} = V_{y.t.} \cdot P_{год}, \text{ кДж/год}$$

$$V_{y.t.сут} = V_{y.t.год} / T, \text{ кДж/сут}$$

$$V_{y.t.см} = V_{y.t.сут} / C, \text{ кДж/смену}$$

$$V_{y.t.час} = V_{y.t.сут} / Ч, \text{ кДж/час}$$

Данные расчета сводим в таблицу 8.2

Таблица 8.2 данные расчета

Составляющие	Ед. изм.	Расход			
		Год	Сутки	Смена	Час
Бетон	м ³				
Нормальный пар	кг/м ³				
Рабочий пар	кг/м ³				
Тепло	кДж/м ³				
Рабочее топливо	кг/м ³				
Условное топливо	кг/м ³				

Список использованных источников

1 Левицкий, И.А. Расчет тепловых процессов установок и агрегатов керамического производства: учебное пособие / И.А. Левицкий – Минск: БГТУ, 2003.

2 Роговой М.И. Теплотехническое оборудование керамических заводов.- М: Стройиздат,1983.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средние теплоемкости газов при различных температурах (кДж/м³*К)

t°С	CO ₂	SO ₂	H ₂ S	H ₂ O	H ₂	CO	N ₂	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	Сухой воздух
-----	-----------------	-----------------	------------------	------------------	----------------	----	----------------	----------------	-----------------	-------------------------------	-----------------

0	1,5998	1,7334	1,5073	1,4943	1,2766	1,2992	1,2946	1,3059	1,5500	1,6268	1,2971
100	1,7003	1,8130	1,5324	1,5052	1,2908	1,3017	1,2959	1,3176	1,6421	2,0621	1,3005
200	1,7874	1,8083	1,5617	1,5224	1,2971	1,3072	1,2996	1,3352	1,7590	1,2828	1,3076
300	1,8628	1,9558	1,5952	1,5425	1,2992	1,31168	1,3068	1,3582	1,8862	2,4955	1,3177
400	1,9298	1,0181	1,6329	1,5655	1,3022	1,3269	1,3164	1,3775	2,0156	2,6860	1,3294
500	1,988	2,0884	1,6706	1,5896	1,3951	1,3428	1,3277	1,3980	2,1404	2,8635	1,3428
600	2,0412	2,1144	1,7063	1,6149	1,3080	1,3574	1,3402	1,4168	2,2610	3,02259	1,3570
700	2,0885	2,1521	1,7460	1,6413	1,3122	1,3721	1,3537	1,4345	2,3770	3,1700	1,3712
800	2,1312	2,1814	1,7837	1,6681	1,3168	1,3863	1,3670	1,4500	2,4942	3,3082	1,3846
900	2,1693	2,2149	1,8172	1,6957	1,3227	1,3997	1,3796	1,4646	2,6026	3,4317	1,39976
1000	2,2036	2,2359	1,8507	1,7230	1,3289	1,4127	1,3918	1,4776	2,6994	3,5472	1,4098
1100	2,2610	1,8842	1,7502	1,3361	1,4248	1,4035	1,4893	1,4893	2,7865	3,6657	1,4219
1200	2,2639	2,2777	1,9093	1,7770	1,3432	1,4361	1,4144	1,5006	2,8631	3,7528	1,4328
1300	2,2899			1,8029	1,3511	1,4466	1,4253	1,5107			1,4437
1400	2,3137			1,8280	1,3591	1,4567	1,4349	1,5203			1,4537
1500	2,3535			1,8527	1,3675	1,4659	1,4441	1,5295			1,4629
1600	2,3556			1,8762	1,3754	1,4747	1,4529	1,5379			1,4717
1700	2,3745			1,8996	1,3834	1,4826	1,4613	1,5463			1,4797
1800	2,3916			1,9214	1,3918	1,4901	1,4688	1,5542			1,4872
1900	2,4075			1,9424	1,3997	1,4973	1,4759	1,5618			1,4948
2000	2,4222			1,9629	1,4077	1,5040	1,4825	1,5693			1,5015
2100	2,4360			1,9825	1,4152	1,5102	1,4893	1,5770			1,5082
2200	2,4486			2,0010	1,4227	1,5161	1,4952	1,5831			1,5140
2300	2,4603			2,0190	1,4303	1,5216	1,5010	1,5898			1,5203
2400	2,4712			2,0366	1,4374	1,5270	1,5065	1,5965			1,5257
2500	2,4812			2,0529	1,4449	1,5320	1,5115	1,6028			1,5312

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Приближенные значения пиromетрического коэффициента процесса горения, %

Тип печи	Вид топлива	%
Камерные периодические	Газообразное	0,73 – 0,78
	Твердое	0,66 – 0,70
Туннельные	Газ, мазут	0,78 – 0,83
Шахтные	Газообразное	0,67 – 0,73
	Твердое	0,52 – 0,62
Вращающиеся	Газообразное	0,80 – 0,90
	Пылевидное	
	Мазут	0,70 – 0,75

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Среднемесячное значение t_{6030} и относительная влажность городов Беларуси

Наименование	Январь	Июль
--------------	--------	------

города	$t_{возд}$	Относительная влажность, %	$t_{возд}$	Относительная влажность, %
Брест	8	85	22,6	62
Витебск	11	84	21	53
Гомель	12	83	22,8	75
Гродно	8	84	22,5	62
Минск	10	88	21,4	78
Могилев	12	89	21,3	76

