

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Гжельский государственный художественно-промышленный институт»
(Колледж ГХПИ)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ**

**МДК 02.01 ОСНОВЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТУГОПЛАВКИХ
НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И СИЛИКАТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ
РАЗДЕЛ «ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ»**

Специальность: 18.02.05 Производство тугоплавких неметаллических и силикатных материалов
и изделий

пос. Электроизолятор,
2014 г.

Методические указания по курсовому проектированию разработаны на основе Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 18.02.05 Производство тугоплавких неметаллических и силикатных материалов и изделий.

Рассмотрено и одобрено на заседании комиссии профессионального учебного цикла по специальности 18.02.05 Производство тугоплавких неметаллических и силикатных материалов и изделий.

Протокол № ____ от « ____ » _____ 2014 г.

Председатель комиссии: _____ Коновалова В.М.

Общие вопросы курсового проектирования

Курсовое проектирование имеет целью закрепить и систематизировать знания студентов по общетехническим и специальным предметам, развить навыки студентов в самостоятельной работе и научить их практически применять полученные ими теоретические знания при решении вопросов производственно-технического характера. Кроме того, курсовое проектирование подготавливает студентов к выполнению дипломного проекта, вырабатывает умение пользоваться технической и справочной литературой.

Курсовой проект, как составная часть учебного процесса, служит целью подготовки квалифицированных специалистов, способных применять полученные теоретические знания в проектировании теплотехнического оборудования.

Для студентов, обучающихся без отрыва от производства, тема курсового проекта может быть связана с их работой на производстве.

Курсовой проект состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка должна содержать текстовую часть, основные расчёты и краткие пояснения к ним.

Объём пояснительной записки не должен превышать 40–50 страниц; она печатается 14 шрифтом Times New Roman на одной стороне листа формата А4 с полуторным интервалом. В ней указывается литература, которой пользовался студент при выполнении курсового проекта. Курсовой проект оформляется в соответствии с требованиями ЕСКД.

Графическая часть проекта не должна превышать двух-трёх листов формата А1. Чертежи выполняются с соблюдением установленных норм ЕСКД компьютерным способом, или в исключительном случае карандашом.

Законченные курсовые проекты в установленный срок студенты представляют руководителю курсового проектирования. Чертежи и пояснительная записка после проверки подписываются преподавателем и возвращаются студенту для ознакомления с его замечаниями.

Приём от студентов курсовых проектов проводится в порядке открытой защиты, что повышает их ответственность, активность и готовит их к защите дипломного проекта. После защиты курсовые проекты сдаются в кабинет технологического отделения или, если студент заочник, на заочное отделение. Лучшие образцы курсовых проектов можно передать в архив или в методический кабинет в качестве образцов или наглядных пособий.

Примерная тематика курсовых проектов

1. Сушильный барабан для сушки глины (песка, керамзитовых гранул).
2. Пневматическая сушилка для глины (гипса).
3. Распылительная сушилка для сушки суспензий.
4. Камерная сушилка для сушки кирпича (керамических изделий).

5. Туннельная сушилка для сушки кирпича (керамических камней, гипсобетонных изделий).
6. Противоточная туннельная вагонеточная сушилка (различные изделия)
7. Конвейерная сушилка для сушки черепицы (плиток для полов, изделий тонкой керамики).
8. Туннельная печь для обжига изделий грубой строительной керамики.
9. Вращающаяся печь для обжига материалов (глины, керамзита, цементного клинкера).
10. Щелевая печь для обжига керамических плиток.
11. Рольганговая муфельная печь для утильного или декорированного обжига фарфоровых изделий.
12. Электрическая печь для обжига фарфоровых изделий (технической керамики).
13. Туннельная печь для обжига изделий тонкой керамики (технической керамики).
14. Камерная печь для обжига керамических изделий.
15. Печь кипящего слоя для обжига глины (керамзитового песка).
16. Кольцевая печь для обжига керамических труб (керамических кирпичей).
17. Шахтная печь для обжига извести (цементного клинкера).
18. Сушильная шаровая сепараторная мельница для керамических материалов.
19. Гипсоварочный котёл периодического (непрерывного) действия.
20. Циклонно-вихревая известеобжигательная печь.

I. Пояснительная записка

Введение

Объём введения к курсовому проекту должен быть не более 2-3 страниц. Во введении необходимо кратко изложить состояние данной отрасли промышленности, привести сведения о применении теплотехнического оборудования в производстве выбранного ассортимента изделий, указать пути дальнейшего совершенствования тепловых агрегатов отрасли, с целью сокращения расхода топлива и повышения качества изделий.

1. Общая часть

При выполнении курсового проекта студент должен обосновать выбор теплотехнического агрегата, предназначенного для сушки или обжига материалов или изделий, указав его преимущества и недостатки.

На основании проведённого анализа теплотехнических агрегатов выбрать ассортимент выпускаемой продукции и способ производства продукции, а также способ осуществления процесса тепловой обработки материалов или изделий.

2. Технологическая часть

Необходимо дать краткое описание технологии производства материалов или изделий, для которых проектируется оборудование. Показать роль и значение тепловой обработки в общем технологическом процессе.

Студентом производится выбор сырьевых материалов и составов приготавливаемых масс. Выполняется схема технологического процесса и её описание. Далее подбирается основное и вспомогательное оборудование. Приводятся правила эксплуатации оборудования на предприятии.

3. Теплотехническая часть

Студентом описываются теоретические основы процесса сушки или обжига изделий. Приводится подробное описание конструкции принятого в проекте теплового агрегата и его работы с указанием конкретных параметров теплового процесса.

Приводится описание стадий процессов, происходящих при тепловой обработке изделий или материала, физико-химические превращения, происходящие в материале, влияние данного теплового процесса на свойства получаемой продукции.

Выполняются построение кривых сушки изделий по конкретным параметрам процесса, принятого в расчётах.

Производится расчёт горения топлива, составляется баланс теплоты. Производятся аэродинамические расчёты проектируемого аппарата. Определяются скорости движения газов, динамический напор, сопротивление газового тракта. Подбирается по каталогам вспомогательное оборудование, вентиляторы, циклоны, фильтры, калориферы.

При расчёте печей производится построение температурной кривой обжига изделий в координатах: температура-время, номера позиций вагонеток (плит, поддонов и т.д.), длина печи.

5. Организационная часть

Приводятся требования (инструкции) по охране труда при эксплуатации теплотехнического оборудования. Надо обратить особое внимание на утилизацию горячего воздуха, отбираемого из зоны охлаждения печей и направления его на сушку изделий; на использование отработанного теплоносителя в сушильных установках для осуществления процессов сушки с рециркуляцией газов.

Приводятся мероприятия по пожарной безопасности при эксплуатации теплотехнического оборудования.

Указываются мероприятия по охране окружающей среды, по очистке отработанных газов, утилизации жидких и твёрдых отходов производства.

Рекомендации по расчётному разделу теплотехнической части курсового проекта

1. Расчёт процесса горения топлива

Предусматривает пересчёт заданного состава топлива в рабочее топливо, вычисление теплотворной способности топлива, определение теоретического и действительного расхода воздуха на сжигание топлива, определение состава и количества продуктов горения топлива, вычисление процентного состава продуктов горения топлива и их влагосодержания, составление материального баланса процесса горения топлива, определение теплосодержания продуктов горения, вычисление теоретической температуры горения топлива с использованием H_t – диаграммы, вычисление действительной температуры горения топлива с учётом пирометрического коэффициента горения.

Примеры расчёта процесса горения твёрдого, жидкого и газообразного топлива заданного состава приведены в приложениях № 1, 2, 3.

2. Исходные данные для расчёта теплового агрегата

Техническая характеристика теплового агрегата, принятого в данном проекте; технологическая характеристика выбранного ассортимента изделий, с определением их массы до и после сушки или массы изделий, поступающих на обжиг с остаточной влажностью; определение часового количества испаряемой влаги из изделий при их сушке; определение выхода годных изделий после обжига с учётом брака их в данном процессе.

3. Расчёт производительности теплового агрегата

Определение часовой производительности теплового агрегата по выходу высушенного полуфабриката из одного туннеля, установки, вычисление потребного количества туннелей (камер), установок для обеспечения годовой производительности участка сушки.

В расчётах производительности печных установок определяется их часовая и годовая производительность по выходу готовой продукции и с учётом брака изделий в данном процессе.

4. Расчёт сушильных агрегатов (приложения № 4, 5)

4.1. Расчёт теоретического процесса сушки

По точке проектирования определяют, согласно СН и П 2.01.01 – 82 «Строительная климатология», параметры наружного воздуха: температуру и относительную влажность для летних условий работы.

На H_d – диаграмме производят построение теоретического процесса сушки с определением основных параметров: температуры, влагосодержания и теплосодержания в характерных точках процесса сушки.

4.2. Расчёт тепловых потерь в сушке

Вычисление тепловых потерь для сушилок непрерывного действия: на нагрев изделий и гипсовых форм, на нагрев транспортных средств, потери тепла в окружающую среду.

Для сушилок периодического действия дополнительно определяют расход тепла на нагрев ограждающих конструкций данной установки. Определение суммарных потерь в сушилке.

4.3. Расчёт действительного процесса сушки

Вычисление потерь теплосодержания в процессе сушки и выражение его в виде отрезка прямой.

Построение действительного процесса сушки в H_d – диаграмме и вычисление удельного расхода теплоносителя и тепла на сушку.

4.4. Тепловой баланс сушильного агрегата

Определение приходной и расходной части теплового баланса процесса сушки.

Тепловой баланс позволяет оценить правильность выполняемых ранее расчётов.

Приходная часть баланса включает тепло греющего теплоносителя, поступающего на сушку.

Расходная часть баланса включает тепло:

- на нагрев изделий (материала);
- на нагрев гипсовых форм;
- на нагрев транспортных средств;
- потери тепла в окружающую среду;
- на нагрев ограждающих конструкций сушилки;
- неучтённые потери.

Расхождение приходной и расходной части теплового баланса допускается не более 2 – 3 %.

4.5. Расчёт калориферной установки

Исходные данные для расчета калорифера: расход греющего теплоносителя и потребное количество тепла для осуществления процесса сушки.

Выбор типа парового калорифера по справочнику с определением его технической характеристики.

Расчёт необходимого количества выбранного типа парового калорифера, с определением последовательного или параллельного их включения. Вычисление аэродинамического сопротивления группы паровых калориферов.

Расчёт удельного расхода водяного пара на единицу высушиваемых изделий.

4.6. Расчёт аэродинамических сопротивлений на пути движения газов

По чертежам сушильного агрегата определяют все виды сопротивлений на пути движения газов в каналах сушилки трения, местные сопротивления, сопротивления садки изделий, потери на геометрический напор.

4.7. Подбор вентиляторов

Подбор вентиляторов (нагнетающего, отсасывающего, рециркуляционного) производят на основании расчёта аэродинамических сопротивлений сушильного агрегата, расхода греющего и отработанного теплоносителя по справочным данным.

4.8. Вычисление коэффициента полезного действия сушильной установки

Коэффициент полезного действия установки позволяет качественно оценить работу теплового агрегата по используемому количеству подводимого тепла. Он представляет собой отношение полезно затраченного тепла (на испарение влаги из изделий, на нагрев изделий до температуры сушки) к подведенному количеству тепла.

5. Расчёт печных агрегатов (приложения № 6, 7)

5.1. Вычисление потерь тепла ограждениями печи в окружающую среду

Потери тепла через стены, свод и под печных установок непрерывного действия производят для стационарного режима работы.

Для печей периодического действия потери тепла через ограждения производят для нестационарного режима работы.

Все расчёты по данному разделу рекомендуется сводить в таблицы.

5.2. Расчёт прогрева и охлаждения футеровки вагонеток. Вычисление потерь тепла на аккумуляцию вагонетками и отдачу тепла в окружающую среду

Выбор конструкции футеровки вагонетки.

Вычисление расчётного промежутка времени. Определение расчётной таблицы основного слоя футеровки и эквивалентных её слоёв теплоизоляции.

Составление расчётной таблицы прогрева и охлаждения слоёв футеровки вагонетки на основании температурной кривой обжига изделий в печи. Определение массы слоёв футеровки вагонетки. Составление таблицы средних температур по слоям футеровки вагонетки в соответствии с выбранной температурной кривой обжига.

Вычисление расхода тепла на аккумуляцию кладкой футеровки вагонетки и отдачу тепла наружу нижней поверхностью футеровки вагонетки (данные расчёта оформляются в виде таблицы).

6. Тепловой баланс агрегата

6.1. Тепловой баланс зон подогрева, сушки или обжига

Приходная часть теплового баланса:

- теплота сжигания топлива;
- физическое тепло топлива;
- тепло, вносимое изделиями;
- тепло, вносимое наружным воздухом;
- тепло, вносимое печными вагонетками;
- тепло, вносимое огнеприпасом;
- тепло подогретого воздуха, поступающего из зоны охлаждения печи.

Расходная часть теплового баланса:

- расход тепла на испарение влаги и нагрев водяных паров;
- расход тепла на химические реакции;
- потери тепла на нагрев изделий до температуры обжига;
- потери тепла на нагрев печных вагонеток до температуры обжига;
- потери тепла на нагрев огнеприпаса;
- потери тепла в окружающую среду;

- потери тепла с отходящими газами;
- потери тепла на аккумуляцию футеровкой вагонетки;
- потери тепла от неполноты горения;
- неучтённые потери тепла.

6.2. Тепловой баланс зоны охлаждения

Приходная часть баланса:

- тепло изделий, поступающих из зоны обжига;
- тепло вагонеток, поступающих из зоны обжига;
- тепло огнеприпаса вагонеток, поступающих из зоны обжига;
- тепло воздуха, поступающего на охлаждение изделий.

Расходная часть баланса:

- на нагрев воздуха, поступающего на горение топлива;
- на нагрев воздуха, поступающего в зону обжига;
- на нагрев воздуха, поступающего на сторону (сушку);
- потери тепла с утечкой воздуха;
- потери тепла в окружающую среду;
- тепло выгружаемых изделий;
- тепло выгружаемых печных вагонеток;
- тепло выгружаемого огнеприпаса;
- неучтённые потери тепла.

6.3. Сводный тепловой баланс

Учитываются все вышеприведенные тепловые балансы.

7. Вычисление удельного расхода топлива и коэффициента полезного действия агрегата

По результатам расчёта теплового баланса агрегата определяют удельный расход топлива на обжиг изделий.

Коэффициент полезного действия агрегата представляет собой отношение полезно затраченного тепла на технологические процессы ко всему подведённому количеству тепла от сжигания топлива ($B \cdot Q^p_n$). Приложение № 8.

Полезно затраченное тепло представляет собой сумму следующих статей теплового баланса печи:

- расход тепла на испарение влаги и нагрев водяных паров;
- расход тепла на химические реакции;
- расход тепла на нагрев изделий до температуры обжига;
- тепло горячего воздуха, отбираемого на сторону (сушку), из зоны охлаждения печи.

II. Графическая часть

Графическая часть курсового проекта включает в себя выполнение плана, продольного и поперечного разрезов теплового агрегата, либо общих видов или схем установки. Так же возможно выполнение сборочных узлов тепловых агрегатов или их отдельных механизмов.

При проектировании печных агрегатов выполняется температурная кривая обжига изделий и схема газоздушных потоков в печи.

При выполнении курсового проекта, связанного с проектированием сушильного агрегата, необходимо выполнить кривые процесса сушки и дать схему построения процесса сушки в H_d – диаграмме.

Графическая часть проекта выполняется на листах формата A1 (597×841 мм) компьютерным способом, в исключительном случае карандашом.

Работу над графической частью надо начинать до окончания расчётов, поскольку в расчётах используются некоторые конструктивные данные проектируемого аппарата.

К графической части прилагаются спецификации к чертежам общего вида, сборочным чертежам и к схемам в конце пояснительной записки.

Приложения

Приложение 1

Расчёт процесса горения каменного угля Карагандинского бассейна марки ПЖ, ПС.

Состав топлива в %:

$$W^p = 7,5$$

$$A^c = 27,0$$

$$N^r = 1,4$$

$$O^r = 7,3$$

$$S^r = 1,2$$

$$C^r = 85,0$$

$$H^r = 5,1$$

Производим пересчёт заданного состава топлива в рабочее топливо.

$$A^p = A^c \frac{100 - W^p}{100}, \%$$

$$C^p = C^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100}, \%$$

$$H^P = H^{\Gamma} \frac{100 - (A^P + W^P)}{100}, \%$$

$$S^P = S^{\Gamma} \frac{100 - (A^P + W^P)}{100}, \%$$

$$N^P = N^{\Gamma} \frac{100 - (A^P + W^P)}{100}, \%$$

$$O^P = O^{\Gamma} \frac{100 - (A^P + W^P)}{100}, \%$$

$$A^P = 27,0 \frac{100 - 7,5}{100} = 24,9\%$$

$$C^P = 85,0 \frac{100 - (24,9 + 7,5)}{100} = 57,5\%$$

$$H^P = 5,1 \frac{100 - (24,9 + 7,5)}{100} = 3,5\%$$

$$S^P = 1,2 \frac{100 - (24,9 + 7,5)}{100} = 0,8\%$$

$$N^P = 1,4 \frac{100 - (24,9 + 7,5)}{100} = 0,9\%$$

$$O^P = 7,3 \frac{100 - (24,9 + 7,5)}{100} = 4,9\%$$

Проверка:

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

Состав рабочего топлива в %:

$$A^P = 24,9$$

$$W^P = 7,5$$

$$O^P = 4,9$$

$$N^P = 0,9$$

$$S^P = 57,5$$

$$C^P = 0,8$$

$$H^P = 3,5$$

Итого = 100%

Находим низший предел теплотворной способности топлива:

$$Q_{H}^P = 339 \cdot C^P + 1030 \cdot H^P - 109(O^P - S^P) - W^P \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{H}^P = 339 \cdot 57,5 + 1030 \cdot 3,5 - 109(4,9 - 0,8) - 25 \cdot 7,5 = 22463,1 \text{ кДж/кг}$$

Находим теоретически необходимое количество сухого воздуха:

$$L_O = 0,0889 \cdot C^P + 0,265 \cdot H^P - 0,0333(O^P - S^P) \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$L_O = 0,0889 \cdot 57,5 + 0,265 \cdot 3,5 - 0,0333(4,9 - 0,8) = 5,903 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

или с учётом влажности воздуха при $d = 10 \text{ г/кг с. в.}$ получим:

$$L'_O = (1 + 0,0016 \cdot d) L_O \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$L'_O = (1 + 0,0016 \cdot 10) 5,903 = 5,997 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Определяем действительное количество воздуха по коэффициенту избытка α , где $\alpha = 1,6$ сухого воздуха:

$$L_{\alpha} = \alpha \cdot L_O, \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$L_{\alpha} = 1,6 \cdot 5,903 = 9,44 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

атмосферного воздуха:

$$L'_{\alpha} = \alpha \cdot L'_O, \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$L'_\alpha = 1,6 \cdot 5,997 = 9,59 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Определяем количество и состав продуктов горения при выбранном значении $\alpha = 1,6$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01855 \cdot C^P = 0,01855 \cdot 57,5 = 1,06 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot S^P = 0,007 \cdot 0,8 = 0,0056 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,112 \cdot H^P + 0,0124 \cdot W^P + 0,0016 \alpha L_\alpha \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,112 \cdot 3,5 + 0,0124 \cdot 7,5 + 0,0016 \cdot 1,6 \cdot 9,44 = 0,509 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,008 \cdot N_p, \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 9,44 + 0,008 \cdot 0,9 = 7,46 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1) L_0 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(1,6 - 1) 5,903 = 0,74 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Общий объём продуктов горения при выбранном $\alpha = 1,6$ составит:

$$V_\alpha = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_\alpha = 1,06 + 0,0056 + 0,509 + 7,46 + 0,74 = 9,77 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Определяем % состав продуктов горения:

$$\text{CO}_2 = V_{\text{CO}_2}/V_\alpha \cdot 100\%; \quad \text{CO}_2 = 1,06/9,77 \cdot 100 = 10,84\%$$

$$\text{SO}_2 = V_{\text{SO}_2}/V_\alpha \cdot 100\%; \quad \text{SO}_2 = 0,0056/9,77 \cdot 100 = 0,05\%$$

$$\text{H}_2\text{O} = V_{\text{H}_2\text{O}}/V_\alpha \cdot 100\%; \quad \text{H}_2\text{O} = 0,509/9,77 \cdot 100 = 5,21\%$$

$$\text{N}_2 = V_{\text{N}_2}/V_\alpha \cdot 100\%; \quad \text{N}_2 = 7,46/9,77 \cdot 100 = 76,36\%$$

$$\text{O}_2 = V_{\text{O}_2}/V_\alpha \cdot 100\%; \quad \text{O}_2 = 0,74/9,77 \cdot 100 = 7,57\%$$

Определяем влагосодержание продуктов горения:

$$d = 804 \text{ H}_2\text{O}/1,97 \text{ CO}_2 + 1,251 \text{ N}_2 + 1,429 \text{ O}_2, \text{ г/кг сухого газа:}$$

где CO_2 ; N_2 ; O_2 ; H_2O – состав газов в % по объёму.

$$d = 804 \cdot 5,21/1,977 \cdot 10,84 + 1,251 \cdot 76,36 + 1,429 \cdot 7,57 = 4188,84/127,77457 = 32,78 \text{ г/кг сухого газа.}$$

Составляем материальный баланс процесса горения на 100 кг топлива при выбранном значении $\alpha = 1,6$

Таблица 1.1

Приход	кг	Расход	кг
1.Топливо	100	1.Зола (шлак); A^P	24,9
2.Воздух		2.Продукты	
$\text{O}_2 = 100L_\alpha 0,21 \cdot 1,429$	283,3	горения:	209,6
$\text{N}_2 = 100L_\alpha 0,79 \cdot 1,251$	932,9	CO_2	= 1,6
$\text{H}_2\text{O} = 0,16 \cdot 10L_\alpha 0,804$	12,2	$100V_{\text{CO}_2} \cdot 1,977$	= 40,9
		SO_2	= 933,2
		$100V_{\text{SO}_2} \cdot 2,852$	= 105,7
		H_2O	= 12,5
		$100V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 0,804$	
		$\text{N}_2 = 100V_{\text{N}_2} \cdot 1,251$	
		$\text{O}_2 = 100V_{\text{O}_2} \cdot 1,429$	
		невязка баланса	
Итого:	1328,4	Итого:	1328,4

$$\text{Невязка} = 100 \cdot 12,5/1328,4 = 0,9 \%$$

Определяем теоретическую температуру горения. Для этого находим теплосодержание продуктов горения при выбранном значении $\alpha = 1,6$

$$H_{\text{п.г.}} = Q_{\text{н.г.}}^P / V_\alpha \text{ кДж/нм}^3$$

$$H_{\text{п.г.}} = 22463,1/9,77 = 2299,2 \text{ кДж/нм}^3$$

Далее по Н-t (см. приложение 8) диаграмме находим теоретическую температуру горения при выбранном значении коэффициента избытка $\alpha = 1,6$

$$t_T = 1450^{\circ}\text{C}$$

Затем определяем действительную t горения по формуле:

$$t_d = \eta_r \cdot t_T$$

где: η_r – пирометрический коэффициент процесса горения; $\eta_r = 0,62$

$$t_d = 0,62 \cdot 1450 = 899^{\circ}\text{C}$$

Приложение 2

Расчёт процесса горения мазута малосернистого марки 60.

Состав топлива в %:

$$C^{\Gamma} = 87,6$$

$$H^{\Gamma} = 10,7$$

$$S^{\Gamma} = 0,7$$

$$N^{\Gamma} + O^{\Gamma} = 1,0$$

$$A^{\Gamma} = 0,2$$

$$W^P = 3,0$$

Производим пересчёт заданного состава топлива в рабочий состав:

$$C^P = C^{\Gamma} \cdot \frac{100-(A^P+W^P)}{100} = 87,6 \cdot \frac{100-(0,2+3,0)}{100} = 84,8\%$$

$$H^P = H^{\Gamma} \cdot \frac{100-(A^P+W^P)}{100} = 10,7 \cdot \frac{100-(0,2+3,0)}{100} = 10,3\%$$

$$S^P = S^{\Gamma} \cdot \frac{100-(A^P+W^P)}{100} = 0,7 \cdot \frac{100-(0,2+3,0)}{100} = 0,7\%$$

$$N^P + O^P = (N^{\Gamma} + O^{\Gamma}) \cdot \frac{100-(A^P+W^P)}{100} = 1,0 \cdot \frac{100-(0,2+3,0)}{100} = 1,0\%$$

$$A^P = A^{\Gamma} \cdot \frac{100-(A^P+W^P)}{100} = 0,2 \cdot \frac{100-(0,2+3,0)}{100} = 0,2\%$$

Состав рабочего топлива в %:

$$C^P = 84,8$$

$$\begin{array}{l}
H^P = 10,3 \\
S^P = 0,7 \\
N^P + O^P = 1,0 \\
A^P = 0,2 \\
W^P = 3,0 \\
\hline
\text{Итого: } 100 \%
\end{array}$$

Вычисляем теплоту сгорания топлива по формуле Менделеева Д.И.:

$$Q_{H^P} = 339C^P + 1030 H^P - 109(O^P - S^P) - 25 W^P = 339 \cdot 84,8 + 1030 \cdot 10,3 - 109(0,5 - 0,7) - 25 \cdot 3,0 = 39303 \text{ кДж/кг}$$

Находим теоретически необходимое количество сухого воздуха:

$$L_o = 0,0889C^P + 0,265 H^P - 0,0333(O^P - S^P) = 0,0889 \cdot 84,8 + 0,265 \cdot 10,3 - 109(0,5 - 0,7) = 10,3 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

С учётом влажности атмосферного воздуха при $d = 10 \text{ г/кг с.в.}$ получим расход атмосферного воздуха:

$$L'_o = (1 + 0,0016d) L_o = (1 + 0,0016 \cdot 10) \cdot 10,3 = 10,46 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Определяем действительный расход воздуха при коэффициенте избытка $\alpha = 1,2$:

сухого воздуха:

$$L_\alpha = \alpha L_o = 1,2 \cdot 10,3 = 12,36 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

атмосферного воздуха:

$$L'_\alpha = \alpha L'_o = 1,2 \cdot 10,46 = 12,55 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Определяем количество и состав продуктов горения при выбранном значении $\alpha = 1,2$:

$$V_{CO_2} = 0,01855C^P = 0,01855 \cdot 84,8 = 1,6 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{SO_2} = 0,0075 S^P = 0,0075 \cdot 0,7 = 0,0052 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{H_2O} = 0,112 H^P + 0,0124 W^P + 0,0016 d L_\alpha = 0,112 \cdot 10,3 + 0,0124 \cdot 3,0 + 0,0016 \cdot 10 \cdot 12,36 = 1,39 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{N_2} = 0,79 L_\alpha + 0,008 N^P = 0,79 \cdot 12,36 + 0,008 \cdot 0,5 = 9,8 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1) L_o = 0,21(1,2 - 1) 10,3 = 0,43 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Общий объём продуктов горения составит:

$$V_\alpha = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,6 + 0,0052 + 1,39 + 9,8 + 0,43 = 13,22 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

Определяем процентный состав продуктов горения:

$$CO_2 = V_{CO_2}/V_\alpha \cdot 100 = 1,6/13,22 \cdot 100 = 12,1 \%$$

$$SO_2 = V_{SO_2}/V_\alpha \cdot 100 = 0,0052/13,22 \cdot 100 = 0,04 \%$$

$$H_2O = V_{H_2O}/V_\alpha \cdot 100 = 1,39/13,22 \cdot 100 = 10,5 \%$$

$$N_2 = V_{N_2}/V_\alpha \cdot 100 = 9,8/13,22 \cdot 100 = 74,1 \%$$

$$O_2 = V_{O_2}/V_\alpha \cdot 100 = 0,43/13,22 \cdot 100 = 3,26 \%$$

$$\Sigma = 100 \%$$

Определяем влагосодержание продуктов горения по их процентному составу:

$$d = 804 H_2O / (1,977 CO_2 + 1,251 N_2 + 1,429 O_2) = 804 \cdot 10,5 / (1,977 \cdot 12,1 + 1,251 \cdot 74,1 + 1,429 \cdot 3,26) = 8442/121,2 = 69,6 \text{ г/кг с.г.}$$

Составляем материальный баланс процесса горения на 100кг топлива при выбранном значении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

Таблица 2.1

Материальный баланс процесса горения.

Приход	кг	Расход	кг
1.Топливо – мазут	100	1.Зола (А ^Р)	0,2
2.Воздух:	370,91	2.Продукты горения:	316,32
$O_2 = 100L_{\alpha}0,21 \cdot 1,429$	1221,5	$CO_2 = 100V_{CO_2}1,977$	1,48
$N_2 = 100L_{\alpha}0,79 \cdot 1,251$	2	$SO_2 = 100V_{SO_2}2,852$	111,75
$H_2O = 0,16$	110,66	$H_2O = 100V_{H_2O}0,804$	1225,98
$dL_{\alpha}0,804$		$N_2 = 100V_{N_2}1,251$	61,44
		$O_2 = 100V_{O_2}1,429$	-14,08
		Невязка:	
Итого:	1703,09	Итого:	1703,09

Определяем теоретическую температуру горения. Для этого находим теплосодержание продуктов горения при выбранном $\alpha = 1,2$.

По $H-t$ – диаграмме (см. приложение 8) находим теоретическую температуру горения при выбранном значении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

$$t_T = 1840 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Действительная температура горения находится с учётом пирометрического коэффициента процесса горения:

$$t_d = \eta_{п} \cdot t_T = 0,8 \cdot 1840 = 1472 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

где: $\eta_{п} = 0,8$ – пирометрический коэффициент процесса горения.

Приложение 3

Расчёт процесса горения природного газа Газовского месторождения Тюменской области.

Состав сухого газа в %:

$$CH_4 = 99,06$$

$$C_2H_6 = 0,10$$

$$C_3H_8 = 0,05$$

$$C_4H_{10} = 0,10$$

$$C_5H_{12} = -$$

$$CO_2 = 0,69$$

$$N_2 = -$$

$$H_2S = -$$

Производим пересчёт сухого состава газа на влажный рабочий газ, принимая содержание влаги в газе $H_2O = 1\%$.

$$CH_4^{вл} = CH_4 \cdot (100 - H_2O/100), \%$$

$$CH_4^{вл} = 99,06 \cdot (100 - 1/100) = 98,06 \%$$

Остальные составляющие газы оставляем без изменения.

Состав влажного рабочего газа в %:

$$CH_4 = 98,06$$

$$C_2H_6 = 0,10$$

$$C_3H_8 = 0,05$$

$$C_4H_{10} = 0,10$$

$$CO_2 = 0,69$$

$$H_2O = 1,0$$

$$\text{Итого: } 100,0\%$$

Определяем теплоту сгорания газа.

$$Q_H = 358,2CH_4 + 637,5C_2H_6 + 912,5C_3H_8 + 1186,5C_4H_{10} + 1460,8C_5H_{12} + 231H_2S, \text{ кДж/нм}^3.$$

$$Q_H = 358,2 \cdot 98,06 + 637,5 \cdot 0,10 + 912,5 \cdot 0,05 + 1186,5 \cdot 0,10 = 35353,1 \text{ кДж/нм}^3$$

Находим теоретически необходимое количество сухого воздуха.

$$L_o = 0,0476 (2 \text{ CH}_4 + 3,5 \text{ C}_2\text{H}_6 + 5 \text{ C}_3\text{H}_8 + 6,5 \text{ C}_4\text{H}_{10} + 8 \text{ C}_5\text{H}_{12} + 1,5 \text{ H}_2\text{S}), \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$L_o = 0,0476 (2 \cdot 98,06 + 3,5 \cdot 0,10 + 5 \cdot 0,05 + 6,5 \cdot 0,10) = 9,4 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Принимая влагосодержание атмосферного воздуха $d = 10 \text{ г/кг с.в.}$, находим теоретически необходимое количество атмосферного воздуха с учётом его влажности.

$$L'_o = 1,016 L_o, \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$L'_o = 1,016 \cdot 9,4 = 9,55 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Действительное количество воздуха при коэффициенте расхода $\alpha = 1,2$ составит:

сухого воздуха:

$$L_\alpha = L_o \cdot \alpha, \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$L_\alpha = 1,2 \cdot 9,4 = 11,3 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

атмосферного воздуха:

$$L'_\alpha = \alpha \cdot L'_o, \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$L'_\alpha = 1,2 \cdot 9,55 = 11,4 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Определяем количество и состав продуктов горения при выбранном значении коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,2$.

$$V_{\text{RO}_2} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2 \text{ C}_2\text{H}_6 + 3 \text{ C}_3\text{H}_8 + 4 \text{ C}_4\text{H}_{10} + \text{H}_2\text{S}), \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01 (0,69 + 98,06 + 2 \cdot 0,10 + 3 \cdot 0,05 + 4 \cdot 0,10) = 1,0 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 (2 \text{ CH}_4 + 3 \text{ C}_2\text{H}_6 + 4 \text{ C}_3\text{H}_8 + 5 \text{ C}_4\text{H}_{10} + 6 \text{ C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{O} + 0,16 \cdot 10 \cdot L_\alpha + \text{H}_2\text{S}), \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 (2 \cdot 98,06 + 3 \cdot 0,10 + 4 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,10 + 1,0 + 0,16 \cdot 10 \cdot 11,3) = 2,16 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 L_\alpha + 0,01 \text{N}_2, \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 11,3 = 8,92 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 (\alpha - 1) L_o, \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 (1,2 - 1) 9,4 = 0,4 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Общий объём продуктов сгорания составит:

$$V_\alpha = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Определяем % состав продуктов горения:

$$\text{RO}_2 = V_{\text{RO}_2} / V_\alpha \cdot 100 \% \quad \text{RO}_2 = 1,0 / 12,48 \cdot 100 = 8,0 \%$$

$$\text{H}_2\text{O} = V_{\text{H}_2\text{O}} / V_\alpha \cdot 100 \% \quad \text{H}_2\text{O} = 2,16 / 12,48 \cdot 100 = 17,3 \%$$

$$\text{N}_2 = V_{\text{N}_2} / V_\alpha \cdot 100 \% \quad \text{N}_2 = 8,92 / 12,48 \cdot 100 = 71,5 \%$$

$$\text{O}_2 = V_{\text{O}_2} / V_\alpha \cdot 100 \% \quad \text{O}_2 = 0,4 / 12,48 \cdot 100 = 3,2 \%$$

Итого: 100,0%

Определяем влагосодержание продуктов горения:

$$d = \frac{804 \cdot \text{H}_2\text{O}}{1,977 \text{CO}_2 + 1,251 \text{N}_2 + 1,429 \text{O}_2}, \text{ г/кг с.г.}$$

$$d = \frac{804 \cdot 17,3}{1,977 \cdot 0,8 + 1,25 \cdot 71,5 + 1,429 \cdot 3,2} = 126,6 \text{ г / кг. с.г.}$$

Составляем материальный баланс процесса горения на 100 нм^3 природного газа при выбранном значении $\alpha = 1,2$.

Таблица 3.1

Приход	кг	Расход	кг
<u>1. Природный газ</u>		<u>1. Продукты сгорания:</u>	
$\text{CH}_4 = 98,06 \cdot 0,717$	70,3	$\text{CO}_2 = 100 \cdot V_{\text{CO}_2} \cdot 1,977$	197,
$\text{C}_2\text{H}_6 = 0,10 \cdot 1,356$	0,13	$\text{H}_2\text{O} = 100 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 0,804$	7
$\text{C}_3\text{H}_8 = 0,05 \cdot 2,02$	0,10	$\text{N}_2 = 100 \cdot V_{\text{N}_2} \cdot 1,251$	173,
$\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,10 \cdot 2,84$	0,3	$\text{O}_2 = 100 \cdot V_{\text{O}_2} \cdot 1,429$	6

$\text{CO}_2 = 0,69 \cdot 1,539$	1,36	<u>2. Неувязка баланса</u>	1115
$\text{H}_2\text{O} = 1,0 \cdot 0,804$	0,8		,8
<u>2. Воздух:</u>			57,1
$\text{O}_2 = 100 \cdot L_\alpha \cdot 0,21 \cdot$ 1,429	339, 1		6
$\text{N}_2 = 100 \cdot L_\alpha \cdot 0,79 \cdot$ 1,251	1116 ,7		- 1,0
$\text{H}_2\text{O} = 0,16 \cdot$ $10 \cdot L_\alpha \cdot 0,804$	14,5		
Итого:	1543 ,3	Итого:	1543 ,3

Определяем теоретическую температуру горения природного газа, для этого находим теплосодержание продуктов горения при выбранном $\alpha = 1,2$.

$$H_{\text{п.г.}} = Q_{\text{H}} / V_{\alpha}; \text{ кДж/нм}^3$$

$$H_{\text{п.г.}} = 35353 / 12,48 = 2832,7 \text{ кДж/нм}^3$$

По $H-t$ – диаграмме (см. приложение 8) находим теоретическую температуру горения при $\alpha = 1,2$.

$$t_{\text{T}} = 1640 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определяем действительную температуру горения.

$$t_{\text{g}} = \eta_{\text{n}} \cdot t_{\text{T}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

где: η_{n} – пирометрический коэффициент процесса горения, $\eta_{\text{n}} = 0,8$

$$t_{\text{g}} = 0,8 \cdot 1640 = 1312 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Приложение 4

Тепловой расчёт простой противоточной туннельной сушилки для сушки полнотелого глиняного кирпича, обеспечивающей производительность цеха сушки 1500000 шт. кирпича в год.

1. Исходные данные для расчёта:

А/ Изделие – кирпич глиняный полнотелый.

Б/ Теплоноситель – горячий воздух, отбираемый из зоны охлаждения печи.

В/ Точка проектирования – г. Краснодар.

Параметры наружного воздуха:

лето $t = 23,7$ °С; $\phi = 67\%$

зима $t = - 2,1$ °С; $\phi = 90\%$

2. Расчётная часть.

2.1. Расчёт производительности сушильного агрегата.

Принимаем для сушки глиняного кирпича простую противоточную туннельную сушилку со следующими размерами рабочего канала:

длина – 28,6 м.

ширина – 1,2 м.

высота – 1,7 м.

Для сушки изделий выбираем стандартные вагонетки типа ВС – 111 – 6 со следующей технической характеристикой:

Ёмкость вагонетки – 240 шт. кирпича (108 шт. керамических камней), ширина колеи – 750 мм;

Габаритные размеры: $\left. \begin{array}{l} \text{длина} - 1400 \text{ мм;} \\ \text{ширина} - 1110 \text{ мм;} \\ \text{высота} - 1500 \text{ мм;} \end{array} \right\}$

количество полок – 6 шт.

масса – 220 кг.

Завод изготовитель – Ленинградский ремонтно-механический.

Количество вагонеток в одном туннеле составит:

$$n_{\text{ваг.}} = L_{\text{т}} / L_{\text{ваг.}} \text{ шт.};$$

$$n_{\text{ваг.}} = 28,6 / 1,4 = 20 \text{ шт.}$$

Находим ёмкость одного туннеля:

$$E_{\text{т}} = 240 \cdot 20 = 4800 \text{ шт.}$$

Находим часовую производительность одного туннеля:

$$P_{\text{час}}^{1\tau} = E_{\tau} / \tau_c \text{ шт. кирпича/час,}$$

где: τ_c – продолжительность цикла сушки изделий; $\tau_c = 30$ час.

$$P_{\text{час}}^{1\tau} = 4800/30 = 160 \text{ шт. кирпича/час.}$$

Согласно заданию производительность цеха сушки составляет 15 млн. штук кирпича в год.

Определим часовую производительность цеха сушки при условии непрерывной работы цеха, т.е. 350 рабочих дней в году, 3 смены по 8 час. каждая.

$$P_{\text{час}}^{\text{цех}} = \frac{\Pi_{\text{цеха}}^{\text{год}}}{350 \cdot 3 \cdot 8}, \text{ шт/час}$$

$$P_{\text{час}}^{\text{цех}} = \frac{15000000}{350 \cdot 3 \cdot 8} = 1785,7 \text{ шт/час}$$

Потребное количество рабочих туннелей для обеспечения заданной производительности цеха сушки составит:

$$N_{\text{р.т.}} = 1785,7/160 = 12 \text{ шт.}$$

Общее количество туннелей с учетом их ремонта и чистки, из расчета 2 запасных туннелей на 10 рабочих составит:

$$N_{\text{т}} = N_{\text{р.т.}} + (N_{\text{р.т.}}/10) \cdot 2 \text{ шт.};$$

$$N_{\text{т}} = 12 + (12/10) \cdot 2 = 15 \text{ шт.}$$

2.2. Расчёт часового количества испаряемой влаги.

Ассортимент высушиваемых изделий согласно заданию: кирпич глиняный полнотелый.

Объёмная масса составит: $\rho_{\text{об.}} = 1800 \text{ кг/м}^3$

Размеры кирпича: $250 \times 120 \times 65 \text{ мм}$

Объём одного изделия в обожжённом состоянии составит:

$$V_{\text{к}} = 0,25 \cdot 0,12 \cdot 0,065 = 0,00195 \text{ м}^3$$

Масса одного изделия равна:

$$M_{\text{изд}} = \rho_{\text{об.}} \cdot V_{\text{к}}, \text{ кг}$$

$$M_{\text{изд}} = 1800 \cdot 0,00195 = 3,51 \text{ кг}$$

Находим массу одного изделия с учётом формовочной влажности:

$$M_{\text{WФ}} = M_{\text{изд}} \cdot 100^2 / (100 - \text{ппп})(100 - W_{\text{Ф}}), \text{ кг,}$$

где: ппп – потери при прокаливании, (ппп = 10%); $W_{\text{Ф}}$ – формовочная влажность изделия ($W_{\text{Ф}} = 20\%$).

$$M_{\text{WФ}} = 3,51 \cdot 100^2 / (100 - 10)(100 - 20) = 4,9 \text{ кг}$$

Масса одного изделия с учётом остаточной влажности после сушки составит:

$$M_{\text{Wк}} = M_{\text{изд}} \cdot 100^2 / (100 - \text{ппп})(100 - W_{\text{к}}), \text{ кг,}$$

где: $W_{\text{к}}$ – влажность изделия после сушки, $W_{\text{к}} = 8\%$

$$M_{\text{Wк}} = 3,51 \cdot 100^2 / (100 - 10)(100 - 8) = 4,2 \text{ кг}$$

Часовое количество испаряемой влаги составит:

$$n = P_{\text{час}}^{\text{цех}} (M_{\text{WФ}} - M_{\text{Wк}}) \text{ кг/час}$$

$$n = 1785,7 (4,9 - 4,2) = 1249,99 \text{ кг/час}$$

2.3 Расчёт теоретического процесса сушки.

Рассчитываем расход сухого воздуха для теоретического процесса сушки.

Начальная температура воздуха, поступающего в сушилку $t_{\text{н}} = 100^{\circ}\text{C}$

Для летних условий $t_0 = 23,7^{\circ}\text{C}$; $\phi_0 = 67\%$.

По Hd – диаграмме для этих условий находим $d_0 = 11 \text{ г/кг сух. воз.}$ и теплосодержание $H_0 = 52 \text{ кДж/кг сух. воз.}$

При повышении температуры воздуха в зоне охлаждения печи до $t_n = 100^{\circ}\text{C}$ его влагосодержание не изменится, а теплосодержание повышается до $H_n = 131$ кДж/кг сух. возд. Теоретический процесс сушки, изображённый линией ВС, заканчивается при $d_2 = 31$ г/кг сух. возд.

Точка С находится пересечением линии $H_n = \text{const}$ с линией $\varphi_2 = \text{const}$

Задаём $\varphi_2 = 90\%$

Расчёт сухого воздуха при теоретическом процессе сушки определяем по формуле:

$$G_C^T = \frac{n \cdot 1000}{d_2 - d_1} \text{ кг/час,}$$

где: n – часовое количество испаряемой влаги.

$$G_C^T = \frac{1249,99 \cdot 1000}{36 - 11} = 4999,6 \text{ кг/час}$$

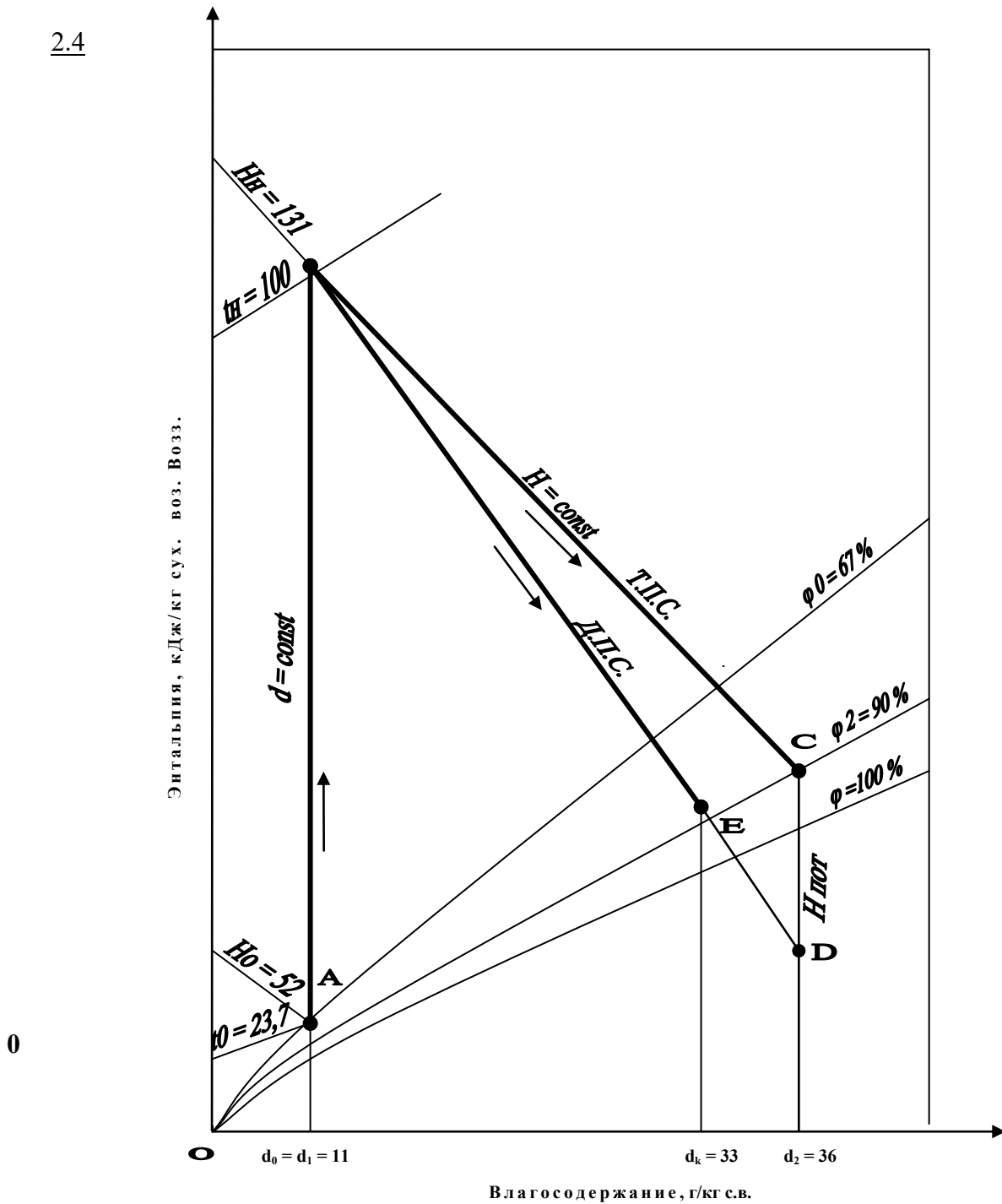


Рис. 1. Схема построения процесса сушки в Nd - диаграмме

Вычисление тепловых потерь в сушильной установке.

Находим потери теплосодержания воздуха в процессе сушки. Для расчёта действительного процесса сушки определяем расход тепла на нагрев материала и транспортных устройств и потери тепла в окружающую среду. Расход тепла на нагрев изделий определяется по формуле:

$$q_H = P_M \cdot C_M (t_k - t_H) \text{ кДж/час,}$$

где: P_M – часовой выход высушенных изделий.

$$P_M = P_{\text{час}}^{\text{цех}} \cdot M_{\text{wk}}, \text{ кг/час}$$

$$C_M = 0,921 \cdot (100 - W_k/100) + (4,2 \cdot W_k/100), \text{ кДж/кг град.}$$

$$C_M = 0,921 \cdot (100 - 8/100) + (4,2 \cdot 8/100) = 1,18 \text{ кДж/кг град.}$$

t_k – температура изделий на выходе из сушилки, $^{\circ}\text{C}$

$t_k = 100 - 15 = 85^{\circ}\text{C}$ (принимается на 15°C ниже начальной температуры сушильного агента при противоточном движении воздуха и вагонеток с изделиями).

t_n – температура изделий на входе в сушилку.

$t_n = 40^{\circ}\text{C}$ (учитывая паропрогрев при формировании изделий).

$$q_n = 7499,94 \cdot 1,18 (85 - 40) = 398246,8 \text{ кДж/час}$$

Расход тепла на нагрев транспортирующих устройств рассчитываем по формуле:

$$q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} \cdot C_{\text{тр}} (t_k - t_n), \text{ кДж/час},$$

где: $G_{\text{тр}} = (G_{\text{мет}} + G_{\text{пол}}) n_{\text{ваг}} N_{\text{р.т}} / T_c$ кг/час

где: $G_{\text{мет}}$ – масса металлической части вагонетки, $G_{\text{мет}} = 220$ кг.

$G_{\text{пол}}$ – масса металлических полок, $G_{\text{пол}} = 50$ кг.

$$G_{\text{тр}} = (220 + 50) 20 \cdot 12 / 30 = 2160 \text{ кг/час}$$

Теплоёмкость стали $C_{\text{тр}} = 0,47$ кДж/кг град

Начальная температура вагонетки $t_n = 10^{\circ}\text{C}$

Конечная температура металлической части вагонетки $t_k = 100^{\circ}\text{C}$, тогда:

$$q_{\text{тр}} = 2160 \cdot 0,47 \cdot (100 - 10) = 91368 \text{ кДж/час}.$$

Потери тепла в окружающую среду через стены, потолок, пол и двери вычисляются по формуле:

$$q_{\text{окр.}} = 3,6k(t'_{\text{ср.}} - t_{\text{окр}})F, \text{ кДж/час},$$

где: k – коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2 \text{ град}.$$

Средняя температура сушильного агента.

$$t'_{\text{ср.}} = 100 + 38/2 = 69^{\circ}\text{C}$$

Температура окружающей среды = $23,7^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи внутри сушилки от движущегося со скоростью 2 м/сек. сушильного агента к стенкам камеры.

$$\alpha_1 = 5,6 + 4 \cdot 2 = 13,6 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}.$$

Коэффициент теплопроводности кирпичной стены $\lambda_k = 0,48$ Вт/м²град.

Конструкция стен и свода сушилки.

Стены сушилки выполнены из строительного кирпича толщиной:

наружные – 380 мм

внутренние – 250 мм

Свод выполнен из железобетонных плит толщиной 70 мм, теплоизоляционной засыпки толщиной 150 мм и слоя красного глиняного кирпича толщиной 65 мм.

Ширина блока сушилки составит:

$$B_c = B_{\text{т}} N_{\text{р.т}} + 0,25(N_{\text{р.т}} - 1) + 0,38 \cdot 2, \text{ м}$$

$$B_c = 1,2 \cdot 12 + 0,25(12 - 1) + 0,38 \cdot 2 = 17,91 \text{ м}$$

Коэффициент теплопроводности кирпичной кладки $\lambda_k = 0,48$ Вт/м²град, железобетона $\lambda_{\text{жб}} = 1,55$ Вт/м²град., теплоизоляционной засыпки $\lambda_{\text{из}} = 0,12$ Вт/м²град.

Коэффициент теплопередачи при толщине стены сушилки $\delta_{\text{ст}} = 0,38$ м. составляет:

$$k_{\text{ст}} = \frac{1}{\frac{1}{13,6} + \frac{0,38}{0,48} + \frac{1}{10,2}} = 1,04 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}.$$

Теплоотдающая поверхность стен определяется обычно по чертежу или эскизу сушилки. В нашем случае она составляет:

$$F_{ст} = 2 \cdot L_T \cdot h_T, \text{ м}^2$$

$$F_{ст} = 2 \cdot 28,6 \cdot 1,7 = 97,24 \text{ м}^2$$

Потери тепла через стены:

$$q_{ст} = 3,6 \cdot 1,04 \cdot (69 - 23,7) \cdot 97,24, \text{ кДж/час}$$

$$q_{ст} = 16492,2 \text{ кДж/час.}$$

Находим поверхность потолка:

$$F_n = L_T \cdot B_c, \text{ м}^2$$

$$F_n = 28,6 \cdot 17,91 = 511,9 \text{ м}^2$$

По номограмме $\alpha_2 = 11,3 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$

Коэффициент теплопередачи тогда будет равен:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{13,6} + \frac{0,07}{1,55} + \frac{0,15}{0,12} + \frac{0,065}{0,48} + \frac{1}{11,3}} = 0,625 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$$

Потери тепла через потолок составляют:

$$q_n = 3,6 \cdot 0,625 \cdot (69 - 23,7) \cdot 511,9 = 52175,4 \text{ кДж/час}$$

Потери тепла через пол принимаем $= 10 \text{ Вт/м}^2$, тогда:

$$q_{пол} = 3,6 \cdot 28,6 \cdot 17,91 \cdot 10 = 18429,8 \text{ кДж/час}$$

Определяем потери тепла через двери со стороны подачи теплоносителя. Поверхность 12 дверей, выполненных из дерева толщиной 50 мм, равна:

$$F_{дв} = h_T \cdot b_T \cdot N_{р.т}, \text{ м}^2$$

$$F_{дв} = 1,7 \cdot 1,2 \cdot 12 = 24,48 \text{ м}^2$$

Коэффициент теплопередачи ($\lambda_{дв} = 0,16 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$) равен:

$$k_{дв} = \frac{1}{\frac{1}{13,6} + \frac{0,05}{0,16} + \frac{1}{10,2}} = 2,09 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$$

тогда:

$$q'_{дв} = 3,6 \cdot 2,09 \cdot (80 - 23,7) \cdot 24,48 = 10369,8 \text{ кДж/час}$$

Потери тепла через двери со стороны выхода теплоносителя:

$$q''_{дв} = 3,6 \cdot 2,09 \cdot (38 - 23,7) \cdot 24,48 = 2633,9 \text{ кДж/час}$$

Суммарные потери тепла в окружающую среду составляют:

$$q_{окр} = q_{ст} + q_{пот} + q_{пол} + q'_{дв} + q''_{дв}, \text{ кДж/час}$$

$$q_{окр} = 16492,2 + 52175,4 + 18429,8 + 10369,8 + 2633,9 = 100101,1 \text{ кДж/час.}$$

Общие потери тепла в сушилке:

$$\sum q_{пот} = q_n + q_{гр} + q_{окр} \text{ кДж/час}$$

$$\sum q_{пот} = 398246,8 + 91368 + 100101,1 = 589715 \text{ кДж/час}$$

Потери теплосодержания воздуха в сушилке находим по формуле:

$$H_{пот} = \sum q_{пот} / G_c^T \text{ кДж/кг сух. возд.}$$

$$H_{пот} = 589715,9 / 49999,6 = 11,795 \text{ кДж/кг сух. возд.}$$

2.5. Расчёт действительного процесса сушки.

Действительный расход воздуха на сушку определяем по $H-d$ – диаграмме, для этого от точки C вниз откладываем величину $H_{пот}$. Направление д. п. с. определяется линией $ВД$, а

заканчиваться он будет в точке Е, которая находится на одной кривой относительной влажности воздуха с точкой С. Таким образом, д. п. с. изображается линией ВЕ.

Находим конечные параметры сушильного агрегата:

$$t_k = 37^0\text{C}; \quad \varphi_k = 90\%; \quad d_k = 33\text{г/кг сух. возд.}; \quad \text{парциальное давление водяных паров } P_n = 4788 \text{ Па}$$

Действительный расход воздуха на сушку равен:

$$G_{\text{своз}} = 1249,99 \cdot 1000/33 - 11 = 56817,7 \text{ кг/час сух. возд.}$$

$$q_w = 56817,7/1249,99 = 45,5 \text{ кг/кг вл.}$$

Количество воздуха, подаваемого в сушилку при $t_0 = 23,7^0\text{C}$ и $V_0 = 0,85 \text{ м}^3/\text{кг сух. возд.}$, составит:

$$V_{\text{воз.}} = V_0 \cdot G_{\text{своз}} = 0,85 \cdot 56817,7 = 48579,1 \text{ м}^3/\text{час}$$

При $t_n = 100^0\text{C}$ действительный расход воздуха составит:

$$V_{\text{воз}} = 48579,1 \cdot (1 + 100 - 23,7/273) = 62132,7 \text{ м}^3/\text{час}$$

Количество отработанного воздуха, удаляемого из сушилки при $t_n = 37^0\text{C}$, определяем из равенства:

$$V_{\text{ух}} = (G_{\text{см}}/\rho_0 + n/0,8)(1 + \beta t_n), \text{ м}^3/\text{час},$$

где: $G_{\text{см}} = (1 + 0,001 \cdot d_0) \cdot G_{\text{своз}}$ кг/час

$$G_{\text{см}} = (1 + 0,001 \cdot 11) \cdot 56817,7 = 57442,7 \text{ кг/час}$$

ρ_0 – плотность отработанного воздуха.

$$\rho_0 = 353 - 0,0013 \cdot 4788/273 = 1,27 \text{ кг/ м}^3$$

тогда:

$$V_{\text{ух}} = (57442,7/1,27 + 1249,99/0,8) \cdot (1 + 1/273 \cdot 37) = 53156,8 \text{ м}^3/\text{час}$$

Расход тепла на сушку находим по формуле:

$$Q = G_{\text{своз}}(H_n - H_0) - 4,2 n t_n^{\text{H}} \text{ кДж/час},$$

где: H_n – теплосодержание воздуха, подаваемого на сушку кДж/кг с.в.

H_0 – теплосодержание неподогретого атмосферного воздуха, кДж/кг с.в.

$4,2 \cdot n \cdot t_n^{\text{H}}$ – количество тепла, внесенного в сушилку влагой материала, кДж/час.

$$Q = 56817,7 \cdot (131 - 52) - 4,2 \cdot 1249,99 \cdot 40 = 4278600 \text{ кДж/час}$$

Удельный расход тепла на сушку (для летних условий) составит:

$$q_w = Q/n = 4278600,0/1249,99 = 3422,9 \text{ кДж/кг исп. вл.}$$

Для зимних условий работы расход тепла будет больше, но количество подаваемого воздуха меньше. Если принять среднее значение температуры для Краснодара.

$$t_0 = -2,1^0\text{C}; \quad \varphi_0 = 90\%; \quad H_0 = 8 \text{ кДж/кг сух. возд.}, \quad d_0 = 3 \text{ г/кг с.в.}$$

Тогда, повторяя построение в Nd – диаграмме, находим для зимнего периода: $d_k = 29 \text{ г/кг с.в.}$

Расход воздуха будет равен:

$$G_{\text{своз}} = \frac{n \cdot 1000}{d_k - d_0}, \text{ кг/час}$$

$$G_{\text{своз}} = \frac{1249,99 \cdot 1000}{29 - 3} = 48076,5 \text{ кг/час}$$

Удельный расход воздуха составит:

$$q_w = 48076,5/1249,99 = 38,5 \text{ кг/кг вл.}$$

Теплосодержание воздуха при $t_n = 100^0\text{C}$ и $d_n = 3 \text{ г/кг}$ равно

$$H_n = 106 \text{ кДж/кг сух. возд.}$$

Расход тепла для зимних условий будет равен:

$$Q = G_{\text{своз}}(H_n - H_0) - 4,2 n t_n^{\text{H}} \text{ кДж/час}$$

$$Q = 48076,5 (106 - 8) - 4,2 \cdot 1249,99 \cdot 40 = 4501498,7 \text{ кДж/час}$$

Удельный расход тепла составит:

$$q_w = Q/n, \text{ кДж/кг вл.}$$

$$q_w = 4501498,7/1249,99 = 3601,2 \text{ кДж/кг вл.}$$

Так как теплоноситель поступает в сушилку из зоны охлаждения печи, то при расчёте вентиляторов для подачи и отбора теплоносителя следует пользоваться данными для летних условий.

2.6. Тепловой баланс сушилки.

ПРИХОД ТЕПЛА.

Потребное количество тепла, которое необходимо внести с воздухом, отбираемым из зоны охлаждения печи, учитывая нагрев его от 23,7 до 100⁰С (для летних условий) равен по расчёту 4278600 кДж/час, удельный расход = 3422,9 кДж/кг вл.

Таблица 4.1

Наименование статей	Количество тепла		
	кДж/час	кДж/кг вл.	%
РАСХОД ТЕПЛА			
1. Нагрев материала, q_m	398246,8	378,6	9,31
2. Нагрев транспортных устройств, $q_{тр}$	91368	73,09	2,14
3. Потери в окружающую среду, $q_{окр}$	100101,1	80,08	2,34
4. Испарение и нагрев влаги материала $q_{исп} = (2493 + 1,97 \cdot t_k - 4,2 \cdot t_n) \cdot n$ $q_{исп} = (2493 + 1,97 \cdot 37 - 4,2 \cdot 40) \cdot 1249,99$	2997338,5	2397,89	70,05
5. Тепло уходящее с отработанным воздухом $q_{ух} = G_{своз} [1(t_k - t_{окр}) + 0,001 d_n \cdot 1,97 (t_k - t_{окр})]$ $q_{ух} = 56817,7 [1(37 - 23,7) + 0,001 \cdot 11 \cdot 1,97(37 - 23,7)]$	772050,89 - 80505,2	617,6 - 55,36	18,04 - 1,88
6. Неувязка баланса			
ИТОГО:	4278600,0	3422,9	100

2.7. Расчёт аэродинамических сопротивлений на пути движения газа.

Количество отбираемых газов по расчёту составляет:

$$V_{yx} = 53156,8 \text{ м}^3/\text{час}$$

или это составит:

$$V'_{yx} = V_{yx}/3600 = 53156,8/3600 = 14,8 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Количество теплоносителя, подаваемого на сушку, составит:

$$V'_{воз} = 62132,7/3600 = 17,3 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Производим расчёт аэродинамических сопротивлений для отсасывающего и нагнетающего вентиляторов.

Данные расчёта приведены в таблице 4.2.

ПОЯСНЕНИЯ К ТАБЛИЦЕ.

Графа 1 – Заносятся те виды сопротивлений, которые встречаются на пути движения газов.

Графа 2 – Секундный расход газов в м³/сек.

Графа 3 – Сечение канала, по которому движется газ, м²

Графа 4 – Скорость движения газа, м/сек. Определяем по формуле $V_0 = \frac{V_0}{F}$; то есть, делением графы 2 на графу 3

Графа 5 – Значения $\frac{V_0^2}{2}$ определяем по приложению 42 (П.В. Левченко, стр. 347).

Графа 6 – Плотность газа при нормальных условиях для воздуха $\rho_0 = 353 - 0,0013P_n/273$ кг/м³

где: P_n – парциальное давление водяных паров.

Для продуктов горения $P_n = 1,3 - 1,31$ кг/м³

Графа 7 – Температура газа, °С.

Падение температуры газов (град) при движении по каналам и дымоходам, можно принимать в следующих пределах в зависимости от температуры газов.

°С	300	400	500	600	700
Кирпичные подземные	1,5	2	2,5	3	3,5
Изолированные надземные	1,5	3	3,5	4,5	5,5
Металлические	2,5	4,5	5,5	7	10

неизолированные

Графа 8 – Значения “ $1 + \beta t$ ” определяют по приложению 41 П.В. Левченко в зависимости от температуры газов.

Графа 9 – Коэффициент трения можно приблизительно принять:

Для металлических труб (чистых) – 0,025

— // — с малой коррозией – 0,035

— // — с сильной коррозией – 0,045

для кирпичных каналов – 0,05

Графа 10 – Отношение длины канала к его приведённому диаметру $d_{пр}$,

$\frac{l}{d_{пр}}$

$d_{пр}$ – приведённый диаметр канала, равный для круглого сечения диаметру трубы; для квадратного канала стороне квадрата «а»; для прямоугольного сечения со сторонами «а» и «в»

$$d_{пр} = \frac{2ab}{a + b}, \text{ м}$$

Графа 11 – Коэффициент местного сопротивления, который можно принять по приложению 45 (П.В. Левченко).

Графа 12 – Потери напора, Па

Сопротивление на трение рассчитывают по формуле:

$$h_{тр} = \lambda \frac{l}{d_{пр}} \cdot \frac{V_0^2}{2} \cdot \rho_0 (1 + \beta t), \text{ Па}$$

местные сопротивления рассчитывают по формуле:

$$h_m = \xi \cdot \frac{V_0^2}{2} \cdot \rho_0 (1 + \beta t), \text{ Па}$$

2.8. Подбор вентилятора и вычисление к.п.д. сушильной установки.

Подбор вентиляторов осуществляется на основании приведённых аэродинамических расчётов на пути движения газов и технической характеристики сушилки.

К установке принимаем нагнетающий центробежный вентилятор со следующей характеристикой:

Тип – Ц4 – 70 №12
 Производительность – 62132,7 м³/час
 Напор при 20⁰С – 428, Па

К.П.Д. – 0,5
Число оборотов – 700 об/мин
Установочная мощность двигателя – 15 кВт.

Приведение напора газа к 20⁰С:

$$h_{20} = h_t \cdot \frac{273 + 100}{273 + 20}$$

$$h_{20} = 336,31 \cdot \frac{273 + 100}{273 + 20} = 428 \text{ Па}$$

К установке принимаем отсасывающий центробежный вентилятор со следующей характеристикой:

Тип – Ц4 – 70 №12
Производительность – 53156,8 м³/час
Напор при 20⁰С – 301,5 Па
К.П.Д. – 0,5
Число оборотов – 600 об/мин.
Установочная мощность двигателя – 10 кВт

Приведение напора газа к 20⁰С:

$$h_{20} = h_t \cdot \frac{273 + 137}{273 + 20}, \text{ Па}$$

$$h_{20} = 284,97 \cdot \frac{273 + 37}{273 + 20} = 301,5 \text{ Па}$$

2.9. Вычисление коэффициента полезного действия туннельной сушилки.

Коэффициент полезного действия блока туннельных сушил рассчитываем по формуле:

$$\eta_c = \frac{q_m + q_{\text{исп}}}{Q} \cdot 100 = \frac{398246,8 + 2997338,5}{4278600} \cdot 100 = 79,4\%$$

Приложение 5

Тепловой расчёт конвейерного сушила для сушки фарфоровых изделий.

1. Исходные данные для расчета

Техническая характеристика конвейерного сушила.

Размеры: (в метрах) длина – 15,200
 ширина – 1,800
 высота – 4,400

Количество люлек в рабочей части сушила $N_{л} = 300$ штук

Количество полок на одной люльке – 2 шт.

Длина цепи в рабочей части сушилки – 100 м

Масса одного погонного метра цепи $m_{\text{пог.м.}} = 11$ кг

Масса люльки $m_{\text{мет.л.}} = 15$ кг

Длительность цикла сушки $\tau_{\text{суш.}} = 3$ часа

Количество изделий выбранного ассортимента, укладываемых на I люльку $N_{\text{изд.}} = 9$ штук.

Масса гипсовой формы $M_{\text{ф}} = 0,700$ кг

Влажность гипсовой формы $W_{\text{ф}} = 5\%$

Привод сушилки: электродвигатель мощностью = 1,1 кВт.

Число оборотов – 930 об/мин.

Ассортимент высушиваемых изделий – блюдо $\varnothing 150$ мм.

Масса одного изделия в обожжённом состоянии = 0,133 кг

Влажность изделий, поступающих на сушку $W_{\text{нач.}} = 20\%$

Влажность изделий, выходящих из сушилки $W_{\text{кон}} = 2\%$

2. Расчет производительности конвейерного сушила.

1. Находим ёмкость конвейерного сушила.

$$E_c = N_{\text{л}} \cdot N_{\text{изд.}}$$

$$E_c = 300 \cdot 9 = 2700 \text{ шт.}$$

2. Находим часовую производительность конвейерного сушила.

$$P_{\text{час}} = \frac{E_c}{\tau} = \frac{2700}{3} = 900 \text{ шт/час}$$

3. Масса одного изделия с остаточной влажностью после сушки составит:

$$M_{w_n} = \frac{M_{\text{изд.}} \cdot 100^2}{(100 - \text{ППП})(100 - W_{\text{нач.}})} = \frac{0,130 \cdot 10000}{(100 - 6)(100 - 20)} = 0,172 \text{ кг,}$$

где: ППП – потери при прокаливании; ППП = 6%

4. Масса одного изделия с остаточной влажностью после сушки составит:

$$M_{w_k} = \frac{M_{\text{изд.}} \cdot 100^2}{(100 - \text{ППП})(100 - W_k)} = \frac{0,130 \cdot 10000}{(100 - 6)(100 - 2)} = 0,141 \text{ кг}$$

5. Часовое количество изделий с остаточной влажностью после сушки составит:

$$n = P_{\text{час}} (M_{w_n} - M_{w_k}) = 900 (0,172 - 0,141) = 27,81 \text{ кг/час}$$

6. Часовой выход люлек составит:

$$N_{\text{час}} = \frac{N_k}{\tau_c} = \frac{300}{3} = 100 \text{ шт/час}$$

3. Расчет теоретического процесса сушки

Начальная температура воздуха, поступающего в сушило $t_n = 60^\circ\text{C}$.

Для летних условий города Новосибирска $t_{\text{возд}} = 19^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$

По $H-d$ – диаграмме для этих условий находим $d_n = 8$ гр./кг сух. возд.

При повышении температуры воздуха в калориферной установке до $t_n = 60^\circ\text{C}$ его

влажносодержание не изменяется, а теплосодержание повышается до $H_n = 81,0$ кДж/кг сух. возд.

Теоретический процесс заканчивается при $d_2 = 21$ г/кг сух. возд.

Точка С находится пересечением линии $H_n = \text{const}$ с линией $\varphi_k = \text{const}$

Задаёмся $\varphi_k = 90\%$.

Расход сухого воздуха при теоретической сушке определяется по формуле:

$$G_c^T = \frac{n \cdot 1000}{d_2 - d_1} = \frac{27,81 \cdot 1000}{21 - 8} = 2139,2 \text{ кг/час}$$

4. Расчет тепловых потерь

Находим потери теплосодержания воздуха в процессе сушки. Для расчёта действительного процесса сушки определяем расход тепла на нагрев материала, гипсовых форм, транспортирующих устройств и потери тепла в окружающую среду.

Расход тепла на нагрев изделий определяется по формуле:

$$q = P_M \cdot C_M \cdot (t_k - t_n), \text{ кДж/час,}$$

где: P_M – часовой выход высушенных изделий

$$P_M = P_{\text{час}} \cdot M_{\text{вк}}, \text{ кг/час}; P_M = 900 \cdot 0,141 = 126,9 \text{ кг/час}$$

C_M – теплоёмкость высушенных изделий

$$C_M = 0,921(100-w_k/100) + (4,2 \cdot w_k/100), \text{ кДж/кг град.}$$

$$C_M = 0,921(100-2/100) + (4,2 \cdot 2/100) = 0,986 \text{ кДж/кг град.}$$

t_H – температура изделий на входе в сушилку, $t_H = 20^{\circ}\text{C}$

t_K – температура изделий на выходе из сушики

$t_K = 60 - 15 = 45^{\circ}\text{C}$ (принимаем на 15°C ниже температуры сушильного агента при входе в сушилку)

$$\text{Тогда: } q_M = 126,9 \cdot 0,986(45 - 20) = 3128,0 \text{ кДж/час}$$

Расход тепла на нагрев гипсовых форм составит:

$$q_{\text{ф}} = P_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} (t_K - t_H) \text{ кДж/час,}$$

где: $P_{\text{ф}}$ – часовой выход гипсовых форм

$$P_{\text{ф}} = P_{\text{час.изд}} \cdot M_{\text{ф}}, \text{ кг/час}$$

$$P_{\text{ф}} = 900 \cdot 0,70 = 630 \text{ кг/час}$$

$C_{\text{ф}}$ – теплоёмкость гипсовых форм

$$C_{\text{ф}} = 0,837 \frac{100-w_{\text{ф}}}{100} + \frac{4,2 \cdot w_{\text{ф}}}{100} \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

$$C_{\text{ф}} = 0,837 \frac{100-5}{100} + \frac{4,2 \cdot 5}{100} = 1,0051 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$$

t_K – температура гипсовых форм на выходе из сушилки

$t_K = 60 - 20 = 40^{\circ}\text{C}$ (принимаем на 20°C ниже температуры сушильного агента).

t_H – температура гипсовых форм на входе в сушилку, $^{\circ}\text{C}$; $t_H = 15^{\circ}\text{C}$

Тогда: $q_{\text{ф}} = P_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} (t_K - t_H) \text{ кДж/час}$

$$q_{\text{ф}} = 630 \cdot 1,0051 \cdot (40 - 15) = 15830,3 \text{ кДж/час}$$

Расход тепла на нагрев транспортирующих устройств определяем по формуле:

$$q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} \cdot C_{\text{тр}} (t_K - t_H) \text{ кДж/час}$$

где: $G_{\text{тр}}$ – часовой выход транспортных средств (люлька с полками + цепь)

$$G_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{л}} \cdot M_{\text{л}}}{\tau_{\text{с}}} + \frac{2L_{\text{ц}} \cdot M_{\text{пог.м}}}{\tau_{\text{с}}}, \text{ кг/час}$$

$$G_{\text{тр}} = \frac{3001,5}{3} + \frac{2 \cdot 100 \cdot 11}{3} = 2233,3 \text{ кг/час}$$

$C_{\text{тр}}$ – теплоёмкость транспортных средств $C_{\text{тр}} = 0,47 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град.}$

t_K – температура транспортных средств на выходе из сушилки $t_K = 60^{\circ}\text{C}$

t_H – температура транспортных средств на входе в сушилку $t_H = 20^{\circ}\text{C}$

тогда: $q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} \cdot C_{\text{тр}} (t_K - t_H) \text{ кДж/час}$

$$q_{\text{тр}} = 2233,3 \cdot 0,47 \cdot (60-20) = 41986 \text{ кДж/час}$$

Потери тепла в окружающую среду через стены, потолок, пол и двери определяем по формуле:

$$q_{\text{окр}} = 3,6 k (t_{\text{ср}} - t_{\text{окр}}) \cdot F, \text{ кДж/час}$$

где: k – коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$$

Средняя температура сушильного агента:

$$t_{\text{ср}} = (60 + 18)/2 = 39^{\circ}\text{C}$$

Температуру окружающей среды принимаем равной 18°C . Коэффициент теплоотдачи внутри сушилки от движущегося со скоростью 2 м/сек. сушильного агента к стенам камеры $\alpha_1 = 5,6 + 4 \cdot 2 = 13,6 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$

5. Расчёт конструкции стен и свода сушилки

Стены и свод сушилки выполнены из древесно-стружечных плит толщиной 25 мм.

Коэффициент теплопроводности древесно-стружечных плит равен:

$$\lambda = 0,16 \text{ Вт/м}^2\text{град.}$$

Коэффициент теплоотдачи от стены в окружающую среду для $\Delta t = 15^{\circ}\text{C}$, $\alpha_2 = 10,2 \text{ Вт/м}^2\text{град.}$

Коэффициент теплоотдачи для стен составит:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{13,6} + \frac{0,025}{0,16} + \frac{1}{10,2}} = 3,058 \text{ Вт/м}^2\text{град.}$$

Теплоотдающую поверхность стен определяем по чертежу сушилки. В нашем случае она составит:

$$F_{\text{ст}} = 2 \cdot L_c \cdot h_c + 2V_c \cdot h, \text{ м}^2$$
$$F_{\text{ст}} = 2 \cdot 15,2 \cdot 4,4 + 2 \cdot 1,80 \cdot 4,4 = 149,6 \text{ м}^2$$

Потери тепла через стены составят:

$$q_{\text{ст}} = 3,6 \cdot k (t_{\text{ср}} - t_{\text{окр}}) \cdot F_{\text{ст}}, \text{ кДж/час}$$
$$q_{\text{ст}} = 3,6 \cdot 3,058 (39 - 18) \cdot 149,9 = 42819,8 \text{ кДж/час}$$

Находим поверхность потолка:

$$q_{\text{пот}} = 3,6 \cdot k_{\text{пот}} (t_{\text{ср}} - t_{\text{окр}}) \cdot F_{\text{пот}}, \text{ кДж/час}$$
$$F_{\text{пот}} = L_c \cdot V_c = 15,2 \cdot 1,80 = 27,36 \text{ м}^2$$

Коэффициент теплопередачи будет равен:

$$k_{\text{пот}} = \frac{1}{\frac{1}{13,6} + \frac{0,025}{0,16} + \frac{1}{11,3}} = 3,154 \text{ Вт/м}^2\text{град}$$

Потери тепла через потолок составят:

$$q_{\text{пот}} = 3,6 \cdot k_{\text{пот}} (t_{\text{ср}} - t_{\text{окр}}) \cdot F_{\text{пот}}, \text{ кДж/час}$$
$$q_{\text{пот}} = 3,6 \cdot 3,154 (39 - 18) \cdot 27,36 = 8077 \text{ кДж/час}$$

Потери тепла через пол принимаем 10 Вт/м^2 , тогда:

$$q_{\text{пола}} = 10 \cdot F_{\text{пол}} \cdot 3,6 = 10 \cdot 27,36 \cdot 3,6 = 984,9 \text{ кДж/час}$$

Суммарные потери тепла в окружающую среду составят:

$$q_{\text{окр}} = q_{\text{ст}} + q_{\text{пот}} + q_{\text{пол}}, \text{ кДж/час}$$
$$q_{\text{окр}} = 42819,8 + 8077 + 984,9 = 51881,7 \text{ кДж/час}$$

Общие потери тепла в сушилке составят:

$$\sum q_{\text{потерь}} = q_m + q_f + q_{\text{тр}} + q_{\text{окр}}, \text{ кДж/час}$$
$$\sum q_{\text{потерь}} = 3128,0 + 15830,0 + 41986 + 51881,7 = 112826 \text{ кДж/час}$$

Потери теплосодержания в сушилке находим по формуле:

$$H_{\text{пот}} = \frac{\sum q_{\text{пот}}}{G_c^T} = \frac{112826}{2139,2} = 52,74 \text{ кДж/кг с.в.}$$

Или это составит в отрезке: $СД = \frac{H_{\text{пот}}}{M_h}$, мм $M_h = 0,5$

$$СД = \frac{52,74}{0,5} = 105,48 \text{ мм}$$

6. Расчет действительного процесса сушки

Действительный расход воздуха на сушку определяется по $H-d$ – диаграмме. Для этого от точки C вниз откладываем величину $H_{\text{пот}}$, кДж/кг с. в. Направление действительного процесса сушки

определяется линией ВД, а заканчиваться будет в точке Е, которая находится на одной кривой относительной влажности воздуха с точкой С.

Таким образом действительный процесс сушки изображается линией ВЕ. Находим конечные параметры сушильного агента:

$$\varphi = 90\%$$

$$t_k = 22^{\circ}\text{C}$$

$$d_k = 14 \text{ г/кг сух. возд.}$$

Парциальное давление $P_H = 15 \cdot 133 = 1995 \text{ Па}$

Действительный расход воздуха на сушку равен:

$$G_{с.в} = \frac{n \cdot 1000}{d_k - d_H}, \text{ кг/час}$$

$$G_{с.в} = \frac{27,8 \cdot 1000}{14 - 8} = 4635 \text{ кг/час}$$

Удельный расход воздуха составит:

$$q_w = \frac{G_{с.в.}}{n} = \frac{4635}{27,81} = 167 \text{ кг/ кг вл.}$$

Количество воздуха подаваемого в сушилку при $t_b = 19^{\circ}\text{C}$

$V = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг сух. возд.}$ составит $V'_{\text{возд.}} = V \cdot G_{с.в.}, \text{ м}^3/\text{час}$

$$V'_{\text{возд.}} = 0,86 \cdot 4635 = 3986,1 \text{ м}^3/\text{час}$$

При $t_H = 60^{\circ}\text{C}$ действительный расход воздуха составит:

$$V_{\text{возд}} = V'_{\text{возд}} \left(1 + \frac{t_H - t_{\text{возд}}}{273} \right), \text{ м}^3 / \text{ час}$$

$$V_{\text{возд}} = 3986,1 \left(1 + \frac{60 - 19}{273} \right) = 4438,7 \text{ м}^3 / \text{ час}$$

Количество отработанного воздуха, удаляемого из сушилки при t_k определяется из равенства:

$$V_{\text{ух}} = \left(\frac{G_{с.м}}{\rho_0} + \frac{n}{0,8} \right) (1 + \beta t_k), \text{ м}^3 / \text{ час},$$

где: $G_{с.м} = (1 + 0,001 d_H) G_{с.в} = (1 + 0,001 \cdot 8) 4635 = 4672,0 \text{ м}^3/\text{час}$

ρ_0 – плотность отработанного воздуха:

$$\rho_0 = \frac{353 - 0,0013 \cdot P_H}{273} = \frac{353 - 0,0013 \cdot 1195}{273} = 1,27 \text{ кг/м}^3$$

$$\beta = \frac{1}{273} = 0,003$$

$$V_{\text{ух}} = \left(\frac{4672,0}{1,27} + \frac{27,81}{0,8} \right) (1 + 0,003 \cdot 22) = 3958,5 \text{ м}^3 / \text{ час}$$

Расход тепла на сушку находим по формуле:

$$Q = G_{с. \text{возд.}} (H_H - H_{\text{возд}}) - 4,2 \cdot n \cdot t_{\text{м.}}^H, \text{ кДж/час},$$

где: $t_{\text{м.}}^H$ – начальная температура материала на входе в сушило, $^{\circ}\text{C}$

$H_{\text{возд}}$ – теплосодержание атмосферного воздуха, кДж/кг сух. возд.

H_H – теплосодержание подогретого атмосферного воздуха, кДж/кг сух. возд.

$4,2n t_{\text{м.}}^H$ – количество тепла, внесённое в сушилку влагой материала при $t_{\text{м.}}^H = 20^{\circ}\text{C}$, кДж/час

$$Q = 4635 (81 - 39) - 4,2 \cdot 27,81 \cdot 20 = 192334 \text{ кДж/час}$$

Удельный расход тепла на сушку (для летних условий)

$$q_w = \frac{Q}{n} = \frac{192334}{27,81} = 6916 \text{ кДж/кг вл.}$$

7. Составляем тепловой баланс сушила

ПРИХОД ТЕПЛА

Потребное количество тепла, которое необходимо внести с воздухом, нагреваемым в калориферных установках, учитывая нагрев его от $t_{\text{возд.}} = 19^{\circ}\text{C}$ до $t_{\text{н}} = 60^{\circ}\text{C}$, равен по расчёту:

$$Q = 192334 \text{ кДж/час.}$$

Удельный расход тепла:

$$q_w = 6916 \text{ кДж/кг вл.}$$

Таблица 5.1

Наименование статей	Количество тепла		%
	кДж/час	кДж/кг вл.	
РАСХОД ТЕПЛА:			
Нагрев материала, q_m	3128,0	112,4	1,2
На нагрев гипсовых форм, q_{ϕ}	15830,3	569,2	8,6
На нагрев транспортных устройств, $q_{\text{тр}}$	41986	1509,7	21,4
Потери в окружающую среду, $q_{\text{окр}}$	51881,7	1865,5	26,4
Испарение и нагрев влаги материала $q_{\text{исп}} = (2493 + 97 \cdot t_k - 4,2 \cdot t_{\text{н}})n$ = = $(2493 + 1,97 \cdot 22 - 4,2 \cdot 20) \cdot 27,81 = 68200$	68200	2452,3	35,3
Тепло, уходящее с отработанным воздухом: $q_{\text{ух}} = G_{\text{с.в}} [I(t_k - t_{\text{в}}) + 0,001 \cdot d_{\text{н}} \cdot 1,97 (t_k - t_{\text{в}})] = 4635 I (22 - 19) + 0,001 \cdot t \cdot 1,97 \cdot (22 - 19) = 13900$	13900	499,8	7,2
Неувязка баланса	-2592	-9,2	-0,1
ИТОГО:	Q = 192334	q = 6916	100%

8. Расчет калориферов

Потребное количество тепла от калориферных установок составляет Q , равное расходу тепла на сушку с учётом теплопотерь в каналах и калориферах – 10%

$$Q = (Q : 4,2) \cdot 1,1 = (192334 : 4,2) \cdot 1,1 = 50373 \text{ ккал/час}$$

В связи с тем, что в дальнейших расчётах будут использованы справочные данные, где они даны в старой системе единиц, поэтому производим перевод Q из кДж/час в ккал/час, разделив при этом на величину 4,2.

Потребный объём теплоносителя равен количеству воздуха, подаваемого в сушило, т.е.

$$V = V_{\text{возд}} = 4438,7 \text{ м}^3/\text{час}$$

Расчёт поверхности нагрева калориферной установки:

$$F = \frac{Q \cdot \eta}{K(T_{\text{ср}} - t_{\text{ср}})} = \frac{50373,1 \cdot 1,20}{27,4(113,3 - 47)} = 33,8 \text{ м}^2,$$

где: Q – часовая потребность в тепле, ккал/час.

K – коэффициент теплопередачи калорифера, ккал/м² час град., принимаем по таблице в зависимости от выбранного типа калорифера и весовой скорости воздуха.

K установке выбираем калорифер модели КФБ № 5 с поверхностью нагрева $f = 26,8 \text{ м}^2$.

Весовую скорость теплоносителя $v\gamma$ в живом сечении калорифера принимаем $11 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}$, тогда коэффициент теплопередачи составит $K = 27,4 \text{ ккал/м}^2 \text{ час град}$. $T_{\text{ср}}$ – равна температуре насыщенного пара при соответствующем его давлении, $^{\circ}\text{C}$.

Для расчёта принимаем пар абсолютного давления 160 КПА ., тогда температура насыщенного пара будет равна $T_{\text{ср}} = 113,3^{\circ}\text{C}$

$t_{\text{ср}}$ – среднеарифметическая температура поступающего и нагретого воздуха в калориферах.

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{к}}}{2} = \frac{19 + 75}{2} = 47^{\circ}\text{C},$$

где: $t_{\text{н}}$ – начальная температура нагреваемого воздуха, $t_{\text{н}} = 19^{\circ}\text{C}$,

$t_{\text{к}}$ – конечная температура нагреваемого воздуха, принимаем по температуре воздуха на входе в сушило с учётом потерь её при охлаждении воздуха по тракту на 15°C выше; $t_{\text{к}} = t_{\text{суш.}} + 15 = 60 + 15 = 75^{\circ}\text{C}$,

η – коэффициент, учитывающий теплопотерь в установке $\eta = 1,20$.

Расчетное число калориферов будет равно:

$$n = \frac{F}{f} = \frac{33,8}{26,8} = 2 \text{ (округляем до целого числа)},$$

где f – поверхность нагрева одного калорифера, м^2 .

Для выбранного калорифера КФБ-5 поверхность нагрева составляет $26,8 \text{ м}^2$.

Расчетное число калориферов по проходу воздуха составляет:

$$n_1 = \frac{V_{\text{возд}} \cdot 1,20}{3600 \cdot f_{\text{в}} \cdot v \cdot \gamma} = \frac{4438,7 \cdot 1,20}{3600 \cdot 0,244 \cdot 11} = 1 \text{ (принимаем за 1 штуку) –}$$

– параллельная сборка калориферов,

где: $V_{\text{возд}}$ – часовой объём теплоносителя подаваемого в сушилку, $\text{м}^3 / \text{час}$.

$f_{\text{в}}$ – живое сечение одного калорифера по проходу воздуха, м^2 . Для выбранного калорифера КФБ-5 сечение по проходу воздуха составит $f_{\text{в}} = 0,244 \text{ м}^2$

$v\gamma$ – принятая весовая скорость воздуха в калорифере, $\text{кг/м}^2 \text{ сек}$. $v\gamma = 11 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}$

Определяем последовательно соединенные калориферы в установке:

$$n = \frac{n}{n_1} = \frac{2}{1} = 2 \text{ шт.}$$

Расчет сопротивления калориферной установки.

Сопротивление движения воздуха калориферной установки равно

$$H = h n_2 \eta \eta_1 = 16,8 \cdot 2 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 40,6 \text{ кг/м}^2,$$

где: h – сопротивление оказываемое одним калорифером, кг/м^2 ,

$$h = 16,8 \text{ кг/м}^2$$

η – коэффициент запаса, равный $1,1 - 10\%$

η_1 – сопротивление воздуховодов $1,1 - 10\%$

Полученное значение в кг/м^2 следует перевести в Па по формуле:

$$H = H(\text{кг/г}^2) \cdot 9,81 = 40,6 \cdot 9,81 = 398,8 \text{ Па}$$

Определение расхода пара в калориферах:

$$G_{\text{п}} = \frac{Q \cdot 4,2}{r} = \frac{50373,1 \cdot 4,2}{2220,8} = 95,26 \text{ кг/час},$$

где: r – скрытая теплота парообразования при соответствующем, выбранном значений давления пара, ккал/кг . Для выбранного значения абсолютного давления пара, 160 КПА скрытая теплота парообразования составит: $r = 2220,8 \text{ кДж/кг}$.

Q – потребное количество тепла от калориферных установок, ккал/час .

Удельный расход пара на 1 штуку изделий составит:

$$G_{\text{п}}^{\text{уд}} = \frac{G_{\text{п}}}{P_{\text{час}}}, \text{ кг пара/шт.}$$

$$G_{\text{п}} = \frac{95,26}{900} = 0,103 \text{ кг пара/шт.}$$

где: $P_{\text{час}}$ - часовая производительность сушилки, шт/час.

9. Подбор вентиляторов

Подбор вентиляторов производим, учитывая тепловой расчет сушильной установки, технический паспорт сушилки и практический опыт их работы на действующих заводах по сушке идентичных видов изделий. Для обеспечения нормальной работы конвейерной сушилки устанавливаем 1 отсасывающий и 1 нагнетающий вентилятор со следующей технической характеристикой:

Нагнетающий вентилятор

Тип – ВР № 3

Производительность – 4438 м³/час

К.П.Д. – 0,45

Число оборотов – 1600 об/мин.

Установочная мощность двигателя – 2,8 кВт

Напор – 60 мм вод. ст.

Отсасывающий вентилятор

Тип – ВР № 3

Производительность – 4672 м³/час

Напор – 60 мм вод. ст.

К.П.Д. – 0,45

Число оборотов – 1600 об/мин.

Установочная мощность двигателя – 2,8 кВт

10. Вычисление коэффициента полезного действия конвейерного сушила

Коэффициент полезного действия конвейерной сушилки рассчитывают по формуле:

$$\eta_c = \frac{Q_m + Q_{\text{исп}}}{Q} \cdot 100 = \frac{3128,0 + 68200}{192334} \cdot 100 = 37,1\%$$

Приложение 6

Расчёт рольганговой муфельной печи для декорированного обжига изделий бытового фарфора.

1. Расчёт процесса горения природного газа Комсомольского месторождения Тюменской области.

Состав сухого газа в %

$$\text{CH}_4 = 94,71$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 0,21$$

$$\text{CO}_2 = 0,82$$

$$\text{N}_2 = 4,26$$

Производим пересчёт заданного состава топлива на влажный рабочий газ, принимая содержание влаги в газе – 1%

$$\text{CH}_4^{\text{вл}} = \text{CH}_4^{\text{сух}} \cdot \frac{100 - \text{H}_2\text{O}}{100} = 94,71 \cdot \frac{100 - 1}{100} = 93,71\%$$

Остальные составляющие газа оставляем без изменения.

Состав влажного рабочего газа в %:

$$\text{CH}_4 = 93,71$$

$$\text{C}_2\text{H}_6 = 0,21$$

$$\text{CO}_2 = 0,82$$

$$\text{N}_2 = 4,26$$

$$\text{H}_2\text{O} = 1,0$$

$$\Sigma = 100,00 \%$$

· Определяем теплотворную способность природного газа:

$$Q_h = 358,2 \cdot \text{CH}_4 + 637,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 912,5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 1186,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1460,8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} = 358,2 \cdot 93,71 + 637,5 \cdot 0,21 = 33700,8 \text{ кДж/нм}^3$$

Вычисление топливного эквивалента:

$$\Theta_T = Q_h / Q_{\text{усл}} = 33700,8 / 29300 = 1,15$$

Определяем теоретический расход сухого воздуха:

$$L_o = 0,0476 (2 \cdot \text{CH}_4^{\text{вл.}} + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6^{\text{вл.}} + 5 \text{C}_3\text{H}_8^{\text{вл.}} + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10}^{\text{вл.}} + 8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}^{\text{вл.}}) = 0,0476 (2 \cdot 93,71 + 3,5 \cdot 0,21) = 8,9 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Принимая влагосодержание атмосферного воздуха $d = 10 \text{ г/кг с.в.}$, определяем теоретический расход атмосферного воздуха:

$$L'_o = 1,016 \cdot L_o = 1,016 \cdot 8,9 = 9,04 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Действительное количество воздуха при коэффициенте избытка $\alpha = 1,2$ составит:
для сухого воздуха:

$$L_\alpha = \alpha \cdot L_o = 1,2 \cdot 8,9 = 10,7 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

для атмосферного воздуха:

$$L'_\alpha = \alpha \cdot L'_o = 1,2 \cdot 9,04 = 10,8 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Находим объём продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 (\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3 \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \text{C}_5\text{H}_{12}) = 0,01 (0,82 + 93,71 + 2 \cdot 0,21) = 0,9 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 (\text{H}_2 + 2 \text{CH}_4 + 3 \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \text{C}_4\text{H}_{10} + 6 \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{S} + 0,16 \cdot 10 \cdot L_\alpha) = 0,01 \cdot (2 \cdot 93,71 + 3 \cdot 0,21 + 1,0 + 0,16 \cdot 10 \cdot 10,7) = 2,06 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,01 \cdot \text{N}_2 = 0,79 \cdot 10,7 + 0,01 \cdot 4,26 = 8,54 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 (\alpha - 1) \cdot L_o = 0,21 (1,2 - 1) \cdot 8,9 = 0,4 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Общий объём продуктов горения составит:

$$V_\alpha = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 0,9 + 2,06 + 8,54 + 0,4 = 11,9 \text{ нм}^3 / \text{нм}^3$$

Определяем процентный состав продуктов горения:

$$1) \text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_\alpha} \cdot 100 = \frac{0,9}{11,9} \cdot 100 = 7,6\%$$

$$2) \text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_\alpha} \cdot 100 = \frac{2,06}{11,9} \cdot 100 = 17,3\%$$

$$3) \text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_\alpha} \cdot 100 = \frac{8,54}{11,9} \cdot 100 = 71,8\%$$

$$4) \text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_\alpha} \cdot 100 = \frac{0,4}{11,9} \cdot 100 = 3,3\%$$

$$\Sigma = 100,00 \%$$

Определяем влагосодержание продуктов горения:

$$d_r = 804 \cdot \text{H}_2\text{O} / (1,977 \cdot \text{CO}_2 + 1,251 \cdot \text{N}_2 + 1,429 \cdot \text{O}_2) = 804 \cdot 17,3 / (1,977 \cdot 7,6 + 1,251 \cdot 71,8 + 1,429 \cdot 3,3) = 127,0 \text{ г/кг с.г}$$

где: H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 – составляющие дымовых газов в % по объёму.

Таблица 6.1

Материальный баланс процесса горения

Приход	кг	Расход	кг
1. Природный газ:		1. Продукты	
$CH_4 = CH_4^{вл.} \cdot 0,717$	67,2	горения	177,9
$C_2H_6 = C_2H_6 \cdot 1,356$	0,3	$CO_2 = 100 \cdot V_{CO_2} \cdot 1,$	165,6
$CO_2 = CO_2 \cdot 1,977$	0,8	977	1068,3
$N_2 = N_2 \cdot 1,251$	5,33	$H_2O = 100 \cdot V_{H_2O} \cdot 0,8$	57,16
$H_2O = H_2O \cdot 0,804$	13,9	04	
2. Воздух:		$N_2 = 100 \cdot V_{N_2} \cdot 1,$	1,19
$O_2 = 100 L_\alpha$	321,1	251	
$\cdot 0,21 \cdot 1,429$	1057,5	$O_2 = 100 \cdot V_{O_2} \cdot 1,429$	
$N_2 = 100 L_\alpha \cdot 0,79 \cdot$	17,12		
1,251		2. Неувязка	
$H_2O = 0,16 \cdot 10 L_\alpha \cdot$		баланса:	
0,804			
Итого:	1470,2	Итого:	1470,2

Определение теоретической и действительной температуры горения топлива при $\alpha = 1,2$:

$$H_{пр.гор} = Q_H / V_\alpha = 33700,8 / 11,9 = 2832 \text{ кДж/нм}^3$$

По $H-t$ – диаграмме (см. приложение 8) при выбранном значении $\alpha = 1,2$ находим теоретическую температуру горения топлива $t_t = 1690^\circ\text{C}$.

Находим действительную температуру горения с учётом пирометрического коэффициента горения топлива.

$$t_d = \eta_n \cdot t_t, \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_d = 0,8 \cdot 1690 = 1352 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Расчёт производительности рольганговой печи

Техническая характеристика рольганговой печи для декорированного обжига:

Размеры рабочего канала печи в метрах:

длина – 28,98 м.

ширина – 1,1 м.

высота – 0,46 м.

Количество поддонов в рабочем канале печи – 56 шт.

Масса одного поддона – 4,1 кг.

Размеры поддона 480 × 1000 мм.

Таблица 6.2

Ассортимент обжигаемых изделий.

Наименование изделий	Емкость, см ³	Длина, мм	Диаметр (ширина), мм	Высота, мм	Толщина черенка, мм	Масса, гр.	Кол-во изд. в серв. шт.	Масса изд. в сервизе, гр.
Кофейник	0,75	170	103	135	3,5	540	1	}600
Крышка	–	–	55	27	3,5	60	1	
Кружка 4 вел.	0,1	76	55	55	2,5	75	6	}600
Сахарница фас. Киевск.	0,35	137	98	78	3	210	1	
Крышка	–	–	56	29	4	–	1	

$$M_{\text{сер.}}=1260 \text{ гр.}$$

Количество изделий, укладываемых на поддон:

- кофейник – 20 шт.
- сахарница – 20 шт.
- кружка – 120 шт.

Длительность цикла обжига – 3 часа

Температура обжига – 810°C .

Топливо – природный газ Комсомольского месторождения Тюменской области.

$$Q_{\text{H}} = 33700,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Находим ёмкость печи:

$$N_{\text{сер}} = 360 \text{ шт. сервизов (по расчёту раскладки изделий на поддон).}$$

$$E_{\text{п}} = 20 \text{ сер.} \cdot 56/3 \sim 360 \text{ сервизов в печи.}$$

Часовая производительность печи составит:

$$P_{\text{час}} = E_{\text{п}}/t_{\text{обж}} \text{ сер./час,}$$

где: $t_{\text{обж}}$ – длительность цикла обжига в часах.

$$P_{\text{час}} = 360/3 = 120 \text{ сер./час.}$$

Часовая производительность печи по массе обжигаемой продукции:

$$G_{\text{ч}} = P_{\text{час}} \cdot M_{\text{сер.}}, \text{ кг/час.}$$

где: $M_{\text{сер.}}$ – масса сервиза в обожжённом состоянии в кг.

$$G_{\text{ч}} = 120 \cdot 1,26 = 151,2 \text{ кг/час.}$$

Часовой выход поддонов составит:

$$n_{\text{под}}^{\text{час}} = N_{\text{под.}}/t_{\text{обж}} \text{ шт/час.}$$

$$n_{\text{под}}^{\text{час}} = 56/3 = 18,6 \text{ шт/час.}$$

Годовая производительность печи составит:

$$P_{\text{год.}} = P_{\text{ч}} \cdot \tau_{\text{год}} \text{ шт/год,}$$

где: $\tau_{\text{год}}$ – годовой фонд рабочего времени работы печи.

$$\tau_{\text{год}} = 350 \cdot 3 \cdot 8 = 8400 \text{ час.}$$

$$P_{\text{год.}} = 8400 \cdot 120 = 100800 \text{ шт. сервизов/год}$$

3. Расчёт потерь тепла в окружающую среду

Потери тепла через стенки и свод печи рассчитываем для отдельных её участков. Каждый из них по длине печи, характеризующийся определённой конструкцией стены (или свода), дополнительно разбивается на расчётные участки, соответствующие прямолинейным участкам обжига. Такая дополнительная разбивка не требуется в том случае, если границы участков с определённой конструкцией ограждений совпадают с точками излома на ломаной кривой обжига. Дальнейшие расчёты записываем в виде таблицы. При составлении таблицы руководствуемся:

а) последовательностью нумерации слоёв в направлении от внутренних поверхностей к наружным;

б) толщиной слоёв, принимаемой по чертежам;

в) коэффициентами по средней температуре в данном слое.

Для первого слоя средняя температура составляет:

$$t_{\text{ср.1}} = t_{\text{вн}} + t_2/2$$

Для второго:

$$t_{\text{ср2}} = t_2 + t_3 \text{ и т.д.}$$

где: $t_{\text{вн}}$ – средняя температура в печи на данном участке;

t_2 – температура на границе второго и третьего слоя.

t_3 – температура на границе третьего и четвёртого слоя и тд.

Общее тепловое сопротивление стен или свода подсчитывается по формуле:

$$R = \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3 + \delta_n/\lambda_n + 1/\alpha_2 \text{ м}^2 \text{ град/Вт}$$

где: α_2 – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки к окружающему воздуху, значения его можно принимать в зависимости от температуры стен $t_{ст.}$, °С:

$t_{ст.}, \text{ в } ^\circ\text{C}$	40	80	120	200
$\alpha_2, \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$	10,5	12,8	16,2	18,6

При определении величины общего теплового сопротивления по формуле условно принимается, что сопротивление от печных газов к внутренней поверхности стен ($1/\alpha_1$) исчезающе мало в сравнении с остальными слагаемыми.

Правильность предварительно выбранных температур проверяют по соотношениям:

$$\frac{t_{вн} - t_2}{t_{вн} - t_{нар}} = \frac{\delta_1/\lambda_1}{R}; \quad \frac{t_2 - t_3}{t_{вн} - t_{нар}} = \frac{\delta_2/\lambda_2}{R},$$

а отсюда уточняем величины t_2, t_3, t_4 .

Температура наружной среды ($t_{нар}$) обычно принимается 20°С.

Если значение температуры слоёв выбранные будут отличаться не более, чем на 100°С, такой погрешностью обычно пренебрегают. В случае большой разницы методом последовательных приближений подбирают новые значения температур и вновь делают проверку расчётом. Общий коэффициент теплопередачи подсчитываем из соотношения $K = 1/R \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$.

Теплопроводящая площадь $F_{в}$ м² принимается равной $0,5 \cdot (F_1 + F_2)$,

где: F_1 – внутренняя поверхность стены или свода на участке туннеля;

F_2 – наружная теплоотдающая поверхность на этом участке.

Потери тепла через стены или свод на рассматриваемом участке определяем по формуле:

$$Q = 3,6 \cdot F \cdot K (t_{вн} - t_{нар}) \text{ кДж/час},$$

где: $F_{ст} = 2 \cdot l_{уч} \cdot h_{уч}; \text{ м}^2$

$$F_{св} = F_{под} = l_{уч} \cdot V_{уч}; \text{ м}^2$$

Таблица 6.3

Расчёт тепла в окружающую среду через стены

№ участка	Средн. t в печи, °С	Характеристика стен по слоям						$R_{ст}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	$K_{ст}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$	$F_{ст}, \text{ м}^2$	$Q_{ст}, \text{ кДж/ч}$
		шамот ШБ			шамот легков. ШЛБ						
		$\delta_1, \text{ м}$	$\lambda_1, \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$	$\delta_1/\lambda_1, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$	δ_2	λ_2	δ_2/λ_2				
Зона подогрева											
1	235	0,115	0,79	0,147	0,23	0,22	1,04	1,28	0,8	11,1	6873
Зона обжига											
2	630	0,115	0,9	0,127	0,345	0,28	1,23	1,5	0,66	18,7	27103
Зона обжига											
3	810	0,115	1,08	0,1	0,345	0,32	1,07	1,7	0,6	5,1	$\frac{8703}{=42679}$
Зона охлаждения											
4	783	0,115	0,1	0,115	0,315	0,31	1,11	1,32	0,8	16,8	36916
Зона охлаждения											
5	483	0,115	0,78	0,14	0,23	0,32	0,7	0,94	1,06	11,3	19965
Зона охлаждения											
6	145	0,115	0,75	0,15	0,23	0,25	0,9	1,15	0,9	9,95	$\frac{4029}{=60910}$

4. Тепловой баланс рольганговой печи

4.1. Тепловой баланс печи зон подогрева и обжига.

4.1.1. Приход тепла.

1. *Теплота сжигания топлива*

$$Q_{1n}^n = Q_n^p \cdot V \text{ кДж/нм}^3,$$

где: Q_n^p – низшая теплотворная способность топлива в кДж/час.

$$Q_{1n}^n = 33700,8 \cdot V \text{ кДж/нм}^3$$

2. *Теплосодержание топлива*

$$Q_{2n}^n = V \cdot C_T \cdot t_T \text{ кДж/час},$$

где: t_T – температура топлива, поступающего в печь, $^{\circ}\text{C}$, принимается для всех видов топлива, сжигаемых в непогретом состоянии $t = 20^{\circ}\text{C}$.

C_T – теплоёмкость природного газа, кДж/м³град.

$$C_T = 4,19(0,323 + 0,000018 \cdot t) = 1,35 \text{ кДж/м}^3\text{град.}$$

$$C_T = 4,19(0,323 + 0,000018 \cdot 20) = 1,35 \text{ кДж/м}^3\text{град.}$$

$$Q_{2n}^n = V \cdot 1,35 \cdot 20 = 27V \text{ кДж/час.}$$

3. *Теплосодержание воздуха* (рассчитывается в том случае, когда производится подогрев).

$$Q_{3n}^n = V \cdot L_{\alpha} \cdot I_{\text{воз}} \text{ кДж/час.}$$

где: L_{α} – действительное количество воздуха, подаваемого для горения топлива, нм³/ нм³,

$I_{\text{воз}}$ – энтальпия воздуха, кДж/нм³ находится в зависимости от температуры подогрева воздуха.

$$Q_{3n}^n = 0, \text{ т.к. подогрев воздуха не производится.}$$

4. *Теплосодержание изделий*

$$Q_{4n}^n = G_{\text{ч}} \cdot C_{\text{из}} \cdot t_{\text{из}} \text{ кДж/час},$$

где: $C_{\text{из}}$ – теплоёмкость изделий = 0,92 кДж/м³град.

$G_{\text{ч}}$ – часовой выход изделий, кг/час

$t_{\text{из}}$ – температура изделий = 20⁰С.

$$Q_{4n}^n = 151,2 \cdot 0,92 \cdot 20 = 2782,08 \text{ кДж/час.}$$

5. *Теплосодержание подсосываемого окружающего воздуха.*

$$Q_{5n}^n = V \cdot L_0(\alpha_{\text{о.г}} - \alpha) \cdot t_B \cdot C_B, \text{ кДж/час},$$

где: L_0 – теоретическое количество воздуха, расходуемого на горение топлива, нм³/ нм³

$\alpha_{\text{о.г}}$ коэффициент избытка воздуха в дымовых газах $\alpha_{\text{о.г}} = 2,5$,

t_B – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ $t_B = 20^{\circ}\text{C}$,

C_B – теплоёмкость воздуха = 1,3 кДж/м³град.,

$$Q_{5n}^n = V \cdot 8,9(2,5 - 1,2) \cdot 20 \cdot 1,3 = V \cdot 300,82 \text{ кДж/час.}$$

6. *Теплосодержание подогреваемого воздуха, поступающего из зон охлаждения печи.*

$$Q_{6n}^n = V \cdot L_{\alpha} \cdot C_B \cdot t_B \text{ кДж/час},$$

где: L_{α} – действительное количество воздуха, идущего на горение топлива, нм³/ нм³

$C_B = 1,34 \text{ кДж/нм}^3\text{град.},$

t_B – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_B = 300^{\circ}\text{C}$,

$$Q_{6n}^n = 0, \text{ т.к. воздух из зоны охлаждения отбирается на сторону.}$$

7. *Тепло, вносимое печными поддонами.*

$$Q_{7n}^n = n_{\text{под}}^{\text{час}} \cdot M_{\text{под}} \cdot C_{\text{под}} \cdot t_{\text{под}}, \text{ кДж/час},$$

где: $n_{\text{под}}^{\text{час}}$ – часовой выход поддонов,

$M_{\text{под}}$ – масса 1 поддона в кг,

$C_{\text{под}}$ – теплоёмкость поддонов, $C_{\text{под}} = 0,482 \text{ кДж/м}^3 \text{ град},$

$t_{\text{под}}$ – температура поддона на входе в печь, $t_{\text{под}} = 20^{\circ}\text{C}$

$$Q_{7n}^n = 18,6 \cdot 4,1 \cdot 0,482 \cdot 20 = 735 \text{ кДж/час.}$$

Итого приход тепла:

$$\sum_1^7 Q_n^n = Q_{1n}^n + Q_{2n}^n + Q_{3n}^n + \dots + Q_{7n}^n \text{ кДж/час}$$

$$\sum_1^7 Q_n^n = 33700,8 \cdot B + 27 \cdot B + 0 + 2782,08 + 300,82 \cdot B + 0 + 735,15 = \\ = 34027,62 \cdot B + 3517,23 \text{ кДж/час}$$

4.1.2. Расход тепла.

1. *Теплосодержание изделий при температуре обжига*

$$Q_{1n}^P = G_{\text{изд}}^{\text{час}} \cdot C_{\text{изд}} \cdot t_{\text{обж}} \text{ кДж/час,}$$

где: $G_{\text{изд}}^{\text{час}}$ – выход обожжённых изделий, кг/час,

$C_{\text{изд}}$ – теплоёмкость изделий, кДж/кг град.,

$t_{\text{обж}}$ – температура обжига изделий, °С. $t_{\text{обж}} = 810^0\text{С}$.

$$Q_{1n}^P = 151,2 \cdot 1,02 \cdot 810 = 124921,44 \text{ кДж/час.}$$

2. *Теплосодержание печных поддонов при t обжига.*

$$Q_{2n}^P = n_{\text{под}}^{\text{час}} \cdot M_{\text{под}} \cdot C_{\text{под}} \cdot t_{\text{обж}}, \text{ кДж/час.}$$

$$Q_{2n}^P = 18,6 \cdot 4,1 \cdot 0,52 \cdot 810 = 32120,71 \text{ кДж/час.}$$

3. *Потери тепла в окружающую среду.*

$$Q_{3n}^P = Q_{\text{ст}}^n + Q_{\text{св}}^n + Q_{\text{под}}^n \text{ кДж/час,}$$

где: $Q_{\text{ст}}^n$, $Q_{\text{св}}^n$, $Q_{\text{под}}^n$ – потери тепла через стены, свод, под печи в зоне подогрева и обжига в кДж/час.

$$Q_{3n}^P = 42679 + 41699 + 58756 = 143134 \text{ кДж/час.}$$

4. *Потери тепла с отходящими газами.*

$$Q_{4n}^P = B[V_{\alpha} + L_0(\alpha_{\text{о.г.}} - \alpha)] \cdot C_{\text{г}} \cdot t_{\text{о.г.}} \text{ кДж/час,}$$

где: V_{α} – количество продуктов горения, $\text{нм}^3 / \text{нм}^3$,

L_0 – теоретический расход воздуха на горение топлива, $\text{нм}^3 / \text{нм}^3$,

$\alpha_{\text{о.г.}}$ – коэффициент избытка воздуха, в отходящих газах = 2,5,

α – коэффициент избытка воздуха, идущего на горение топлива $\alpha = 1,2$,

$C_{\text{г}}$ – средняя теплоёмкость дымовых газов, кДж/нм³град.,

$t_{\text{о.г.}}$ – температура отходящих газов, °С; $t_{\text{о.г.}} = 150^0\text{С}$,

$$C_{\text{г}} = 1,35 + 0,00075 \cdot 150 = 1,46 \text{ кДж/нм}^3 \cdot \text{град.}$$

$$Q_{4n}^P = B[11,9 + 8,9(2,5 - 1,2)] \cdot 150 = B \cdot 5139,93 \text{ кДж/час}$$

5. *Потери тепла от химического недожога топлива.*

$$Q_{5n}^P = 0,01X \cdot B \cdot Q_{\text{н}} \text{ кДж/час,}$$

где: X – химический недожог топлива в % (для газообразного топлива X = 0,5%)

$$Q_{5n}^P = 0,01 \cdot 0,5B \cdot 33700,8 = 168,504B \text{ кДж/час.}$$

6. *Неучтённые потери тепла.*

$$Q_{6n}^P = 0,03 \cdot B \cdot Q_{\text{н}} \text{ кДж/час.}$$

$$Q_{6n}^P = 0,03 \cdot B \cdot 33700,8 = B \cdot 1011,024 \text{ кДж/час.}$$

Итого расход тепла:

$$\sum_1^6 Q_n^P = Q_{1n}^P + Q_{2n}^P + \dots + Q_{6n}^P \text{ кДж/час}$$

$$\sum_1^6 Q_n^P = 124921,44 + 32120,71 + 143134 + B \cdot 5139,93 + 168,504 \cdot B + \\ + B \cdot 1011,024 = 300176,15 + 6319,458 \cdot B \text{ кДж/час}$$

Уравнение теплового баланса зон подогрева и обжига:

$$\sum_1^7 Q_n^n = \sum_1^6 Q_n^P \text{ кДж/час}$$

В этом уравнении одна неизвестная величина, поэтому, решая это уравнение, определяем расход топлива В в м³/час для газообразного топлива.

$$34027,62В + 3517,23 = 6319,458В + 300176,15$$

$$В = \frac{300176,15 - 3517,23}{34027,62 - 6319,458} = \frac{296658,92}{27709,16} = 10,7 \text{ м}^3 / \text{ час}$$

4.1.3. Тепловой баланс зон подогрева и обжига.

Таблица 6.6
Приход тепла

Наименование статей	кДж/час	%
1. Теплота сжигаемого топлива	360598,56 288,9	98,08 0,08
2. Теплосодержание топлива	0	0
3. Теплосодержание воздуха	2782,77	0,76
4. Теплосодержание изделий		
5. Теплосодержание подсасываемого воздуха	3218,77	0,86
6. Теплосодержание горячего воздуха из зоны охлаждения печи	0 735	0 0,20
7. Тепло, выносимое печными поддонами		
Итого:	367623,31	100,00

Таблица 6.7
Расход тепла

Наименование статей	кДж/час	%
1. Теплосодержание изделий при температуре обжига	124921,44	33,97
2. Теплосодержание печных поддонов при температуре обжига	32120,71 143134	8,73 38,92
3. Потери тепла в окружающую среду	54997,25	14,95
4. Потери тепла с отходящими газами	1802,95 10817,91	0,49 2,94
5. Потери тепла от химического недожога топлива		
6. Неучтённые потери тепла		
Итого:	367794,26	100,00

$$\text{Неувязка баланса} = \frac{367623,31 - 367794,26}{367623,31} \cdot 100 = -0,04 \%$$

4.2. Тепловой баланс зоны охлаждения

4.2.1. Приходная часть баланса

1. Тепло, выделяемое при охлаждении обожжённых изделий.

$$Q_{1ox}^n = Q_{1п}^p \text{ кДж/час}$$

$$Q_{1ox}^n = 124921,44 \text{ кДж/час}$$

2. Тепло, выделяемое при охлаждении поддонов.

$$Q_{2ox}^n = Q_{2п}^p \text{ кДж/час}$$

$$Q_{2ox}^n = 32120,71 \text{ кДж/час}$$

3. Тепло, вносимое окружающим воздухом.

$$Q_{3ox}^n = (V \times L_{\alpha} + V_{вн} + V_y)C_b + t_b \text{ кДж/час},$$

где: $V_{вн}$ – количество избыточного нагретого воздуха, отбираемого на сторону, $\text{м}^3/\text{час}$,

V_y – потери воздуха через не плотности в зоне охлаждения, $\text{м}^3/\text{час}$,

$$V_y = 0,5 L_{\alpha} = 0,5 \cdot 10,7 = 5,35 \text{ м}^3/\text{час},$$

C_b – теплоёмкость воздуха, равная $1,3 \text{ кДж/нм}^3\text{град.}$,

t_b – температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$. $t_b = 20^{\circ}\text{C}$,

$$Q_{3ox}^n = (10,7 \cdot 10,7 + V_{вн} + 5,35) \cdot 1,3 \cdot 20 = 3115,84 + 26 V_{вн} \text{ кДж/час}$$

Итого приход тепла:

$$\sum_1^3 Q_{ox}^n = Q_{1ox}^n + Q_{3ox}^n \text{ кДж/час}$$

$$\sum_1^3 Q_{ox}^n = 124921,44 + 32120,71 + (3115,84 + 26V_{вн}) = 157042,15 +$$

$$+ (3115,84 + V_{вн} \cdot 26) = 160157,99 + 26 \cdot V_{вн} \text{ кДж/час}$$

4.2.2. Расчётная часть баланса.

1. Расход тепла на нагрев воздуха, идущего на горение топлива.

$$Q_{1ox}^p = Q_{3п}^n \text{ кДж/час}$$

$$Q_{1ox}^p = 0 \text{ (нагрев воздуха не производится)}$$

2. Расход тепла на нагрев воздуха, идущего в зону подогрева и обжига.

$$Q_{2ox}^p = Q_{3п}^n \text{ кДж/час}$$

$$Q_{2ox}^p = 0 \text{ кДж/час}$$

3. Избыточное тепло воздуха, отбираемого на сторону.

$$Q_{3ox}^p = V_{вн} \cdot C_b \cdot t_{вн} \text{ кДж/час},$$

где: $t_{вн}$ – температура воздуха, отбираемого на сторону, $^{\circ}\text{C}$; $t_{вн} = 150^{\circ}\text{C}$,

C_b – теплоёмкость воздуха, $\text{кДж/нм}^3\text{град.}$; $C_b = 1,3 \text{ кДж/нм}^3\text{град.}$

$$Q_{3ox}^p = V_{вн} \cdot 1,3 \cdot 150 = V_{вн} \cdot 195 \text{ кДж/час}$$

4. Потери тепла с утечкой нагретого воздуха.

$$Q_{4ox}^p = V_y \cdot C_b \cdot t_{by} \text{ кДж/час},$$

где: C_b – теплоёмкость воздуха, равная $1,3 \text{ кДж/нм}^3\text{град.}$,

t_{by} – температура теряемого воздуха. $t_{by} = 50^{\circ}\text{C}$,

$$Q_{4ox}^p = 0,5 \cdot 10,7 \cdot 1,3 \cdot 50 = 347,75 \text{ кДж/час}$$

5. Потери тепла в окружающую среду.

$$Q_{5ox}^p = Q_{ox}^{ст} + Q_{св}^{ox} + Q_{ox}^n \text{ кДж/час},$$

где: $Q_{ox}^{ст}$; $Q_{св}^{ox}$; Q_{ox}^n – потери тепла в окружающую среду стенами, сводом, подом печи, кДж/час ,

$$Q_{5ox}^p = 60910 + 32209 + 41727 = 134846 \text{ кДж/час.}$$

6. Теплосодержание выгружаемых изделий.

$$Q_{6ox}^p = G_{из} \cdot C_{из} \cdot t_{из}, \text{ кДж/час},$$

где: $G_{из}$, $C_{из}$, $t_{из}$ – количество изделий в кг/час , их теплоёмкость в кДж/кг град. ; температура в $^{\circ}\text{C}$ ($t_{из} = 80^{\circ}\text{C}$)

$$Q_{6ox}^p = 151,12 \cdot 0,85 \cdot 80 = 10281,6 \text{ кДж/час}$$

7. Теплосодержание выгружаемых поддонов.

$$Q_{7ox}^p = n_{под}^{час} \cdot M_{под} \cdot C_{под} \cdot t_b, \text{ кДж/час}$$

$$Q_{7ox}^p = 18,6 \cdot 4,1 \cdot 0,49 \cdot 80 = 2989,4 \text{ кДж/час}$$

8. Неучтённые потери тепла:

$$Q_{8ox}^p = 0,02B \cdot Q_H^p \text{ кДж/час}$$

$$Q_{8ox}^p = 0,02 \cdot 10,7 \cdot 33700,8 = 7211,97 \text{ кДж/час}$$

Итого расход тепла:

$$\sum_1^8 Q_{ox}^p = Q_{1ox}^p + Q_{2ox}^p + \dots + Q_{8ox}^p \text{ кДж/час}$$

$$\sum_1^8 Q_{ox}^p = 0 + 0 + 195V_{вн} + 347,75 + 134846 + 10281,6 + 2989,4 + 7211,97 = 195V_{вн} + 155676,72 \text{ кДж/час}$$

Уравнение теплового баланса зоны охлаждения:

$$160157,99 + 26V_{вн} = 195V_{вн} + 155676,72$$

$$V_{вн} = \frac{160157,99 - 155676,72}{195 - 26} = \frac{4481,27}{169} = 26,5 \text{ м}^3/\text{час}$$

В этом уравнении одна неизвестная величина $V_{вн}$, а B – расход топлива был вычислен при решении уравнения теплового баланса зон подогрева и обжига. Поэтому, решая это уравнение, определяем величину $V_{вн}$, т.е. количество горячего воздуха, отбираемого на сторону $V_{вн}$, $\text{м}^3/\text{час}$.

4.2.3. Тепловой баланс зоны охлаждения печи.

Таблица 6.8
Приход тепла

Наименование статей	кДж/час.	%
1. Тепло, выделяемое при охлаждении изделий, Q_{1ox}^p	124921,44	77,67
2. Тепло, выделяемое при охлаждении поддонов, Q_{2ox}^p	32120,71	19,06
3. Тепло, выносимое окружающим воздухом, Q_{3ox}^p	3804,84	2,37
Итого приход тепла:	160846,99	100,00

Таблица
6.9

Расход тепла

Наименование статей	кДж/час.	%
1. Расход тепла на нагрев воздуха, идущего на горение топлива, Q_{1ox}^p	0	0
2. Расход тепла на нагрев воздуха, идущего в зону подогрева и обжига, Q_{2ox}^p	0	0
3. Тепло воздуха, отбираемого на сторону, Q_{3ox}^p	5167,5	3,21
4. Потери тепла с утечкой нагретого воздуха, Q_{4ox}^p	347,75	0,23
5. Потери тепла в окружающую среду, Q_{5ox}^p	134846	83,84
6. Теплосодержание выгружаемых изделий, Q_{6ox}^p	10281,6	6,39
7. Теплосодержание выгружаемых поддонов, Q_{7ox}^p	2989,4 7211,97	1,85 4,48
8. Неучтённые потери тепла,		

Q_{8ox}^P		
Итого расход тепла:	160844,22	100,00

$$\text{Неувязка баланса} = \frac{160846,99 - 160844,22}{160846,99} \cdot 100 = 0,0017\%$$

4.3. Сводный тепловой баланс печи

Таблица 6.10

Приход тепла

Наименование статей	кДж/час	%
1. Тепло от сгорания топлива, Q_{1n}^n	360598,56	97,08
2. Физическое тепло топлива, Q_{2n}^n	288,9	0,07
3. Тепло изделий и поддонов, $Q_{4n}^n + Q_{7n}^n$	3517,08	0,95
4. Тепло воздуха для горения	0	0
5. Тепло подсасываемого воздуха, Q_{5n}^n	3218,77	0,87
6. Тепло воздуха охлаждения, Q_{3ox}^n	3804,84	1,03
Итого приход тепла:	371428,15	100,00

Таблица 6.11

Расход тепла

Наименование статей	кДж/час.	%
1. Тепло воздуха, отбираемого на сторону, Q_{3ox}^P	5167,5	1,4
2. На химические реакции и испарение влаги, $Q_{1n}^P + Q_{2n}^P$	157042,15	42,3
3. Потери тепла:		
а) с отходящими газами Q_{6n}^P	10817,95	2,9
б) в окружающую среду Q_{5n}^P + Q_{5n}^P	136648,99	36,8
в) вынос тепла поддонами и изделиями $Q_{6n}^P + Q_{6n}^P$	13271	3,6
г) прочие потери	48480,56	13,0
Итого расход тепла	371428,15	100,00

5. Вычисление удельных затрат топлива и коэффициента полезного действия печи

Удельный расход натурального топлива на обжиг:

$$V_{нат}^{уд} = \frac{B}{P_{час}} = \frac{10,7}{120} = 0,09 \text{ м}^3 / \text{сервиз},$$

где: B – расход топлива, $\text{нм}^3/\text{час}$,

P – часовая производительность печи, $\text{серв.}/\text{час}$.

Удельный расход условного топлива на обжиг изделий составит:

$$V_{усл}^{уд} = \frac{V_{нат}^{уд} \cdot Q_n^P}{Q_{усл}}, \text{ кг усл.топл./сервиз},$$

где: $Q_{усл}$ – теплотворная способность условного топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$,

$$Q_{\text{усл}} = 29300 \text{ кДж/кг.}$$

$$V_{\text{усл}}^{\text{уд}} = \frac{0,09 \cdot 33700,8}{29300} = 0,10 \text{ кг усл.топл./сервиз}$$

Тепловой баланс печи позволяет оценить качество её работы, экономичность по расходу топлива и степень использования вводимого тепла. Коэффициент полезного действия печи представляет собой отношение затраченного тепла на химические процессы к вводимому количеству тепла от горения топлива, т.е. КПД печи показывает, какая часть от вводимой тепловой энергии топлива расходуется полезно на тепловую обработку материала.

$$n = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{гор}}} = \frac{Q_{1n}^p + Q_{3ox}^p}{Q_{1n}^n} \cdot 100\%$$

$$n = \frac{124921,44 + 5167,5}{360598,6} \cdot 100 = 36,1\%$$

Расчёт электрической рольганговой печи для утильного обжига фарфоровых изделий.

1.Расчёт производительности электрической рольганговой печи
Ассортимент обжигаемых изделий – чайный сервиз.

Таблица 7.1

Характеристика чайного сервиза.

Ассортимент изделий	Емкость	Длина, мм	Диаметр (шир.), мм	Высота, мм	а черепка,	Масса, гр.	Кол-во изд. в сервизе	Масса сервиза, кг
Ваза для варенья	—	—	150	107	6	230	1	$1 \times 0,23 = 0,23$
Блюдце чайное 170 мм	—	—	170	26	3	190	3	$3 \times 0,19 = 0,57$
Чашка чайная Ф.39	0,21	101	81	55	2	90	3	$3 \times 0,09 = 0,27$

$\Sigma = 1,07$ кг

Техническая характеристика электрической рольганговой печи.

Размеры рабочего канала: длина 14,95 м
 ширина 0,81 м
 высота 0,405 м

Длина тепловых зон: подогрева 5,06 м
 обжига 4,14 м
 охлаждения 5,75м

Размеры поддона 1000 × 500 мм

Количество поддонов в печи – 15 шт.

Количество изделий на 1 поддоне: ваза – 18 шт., чашка – 27 шт., блюдце – 54 шт.

Время обжига $T_{обж} = 8$ часов

Нагревательный элемент – нихром

Температура обжига $950^{\circ}C$

Определение производительности печи.

На 18 сервизов необходимо 4 поддона. Количество поддонов в печи 15 шт. Таким образом количество сервизов в печи составит:

$$E_n = 18 \cdot 15/4 = 67,5 \text{ серв.}$$

Часовая производительность печи будет равна:

$$P_{\text{час}} = \frac{E_n}{\tau_{обж}} = \frac{67,5}{8} = 8,43 \text{ шт. серв/час}$$

Находим часовую производительность печи по массе изделий:

$$G_{\text{час}} = P_{\text{час}} \cdot M_{\text{сер}} = 8,43 \cdot 1,07 = 9,02 \text{ кг/час}$$

Часовой выход поддонов составит:

$$P_{\text{час}}^{\text{под}} = \frac{n_{\text{под}}}{\tau_{обж}} \cdot G_{\text{под}} = 1,87 \cdot 5 = 9,35 \text{ кг/час}$$

$G_{\text{под}} = 5 \text{ кг}$ – масса 1 поддона.

2. Материальный баланс печи

При данной часовой производительности печи по массе обожжённой продукции ($G_{\text{час}}$) масса загружаемого в печь сырца будет равна:

$$G_c = G_q + G_n,$$

где: G_n – потери массы при обжиге. Они складываются из гигроскопической влаги $G_{\text{вг}}$, химически связанной влаги $G_{\text{вх}}$, летучих частей неорганических компонентов шихты $G_{\text{л.н}}$

$$G_n = G_{\text{вг}} + G_{\text{вх}} + G_{\text{л.н}}$$

Количество гигроскопической влаги:

$$G_{\text{вг}} = 0,01 G_c W_c = 0,02 G_c \text{ кг/час},$$

где: $W_c = 2\%$ – влажность сырца, поступающего на утильный обжиг.

Количество химически связанной влаги:

$$G_{\text{вх}} = 0,01 \text{ nnn} (G_c - G_{\text{вг}}) - G_{\text{л.н}} = 0,05(G_c - 0,02 G_c) - G_{\text{л.н}} = 0,049 G_c - G_{\text{л.н}} \text{ кг/час},$$

где: $\text{nnn} = 5\%$ – потери массы при прокаливании.

Потери массы при обжиге составляют:

$$G_n = 0,02 G_c + 0,049 G_c - G_{\text{л.н}} + G_{\text{л.н}} = 0,069 G_c,$$

тогда: $G_c = 9,02 - 0,069 G_c$

$$G_c = 9,02 / (1 - 0,069) = 9,02 / 0,931 = 9,69 \text{ кг/час}$$

Количество гигроскопической влаги:

$$G_{\text{вг}} = 0,02 G_c = 0,02 \cdot 9,69 = 0,1938 \text{ кг/час}$$

Масса сухого сырца:

$$G_{c,c} = G_c - G_{\text{вг}} = 9,69 - 0,1938 = 9,4962 \text{ кг/час} \approx 9,5 \text{ кг/час}.$$

3. Расчёт потерь тепла в окружающую среду

Таблица 7.2

Зона подогрева			
I участок		II участок	
Длина – 0,95 м		Длина – 4,11 м	
Высота – 0,5 м		Высота – 0,5 м	
Ширина – 1,53 м		Ширина – 1,53 м	
<u>Стены</u>	<u>Толщина</u>	<u>мм</u>	<u>Толщина</u>
Шамотный кирпич	115 мм	<u>Стены</u>	115 мм
Марки ШВ – I	115 мм	Шамотный	115 мм
Кирпич ШВ	235 мм	кирпич	
Стальная обшивка	5 мм	Легковес ШЛБ – I	235 мм
		Шамотный	5 мм
		легковес ШЛБ –	
<u>Свод</u>		0,4	
Шамотный кирпич	114 мм	Стальная	
ША	114 мм	обшивка	115 мм
Шамотный	365 мм		5 мм
легковес	365 мм	<u>Свод</u>	
Кирпич ШЛБ – 0,8	5 мм	Шамотный	
Стальная обшивка		легковес	
		ШЛБ – 1	
<u>Под</u>	175 мм	Стальная	115 мм
Шамотный кирпич	420 мм	обшивка	115 мм
ША – I			210 мм
Шамотный			5 мм

легковес ШЛБ	<p align="center"><u>Под</u> Шамотный кирпич кирпич ША – 1 Кирпич ШЛБ – 0,4 Стальная обшивка</p>																																																											
Зона обжига	Зона охлаждения																																																											
<p>Длина – 4,14 м Ширина – 1,53 м Высота – 0,8 м</p> <table border="0"> <tr> <td align="center"><u>Стены</u></td> <td align="center"><u>Толщина</u></td> </tr> <tr> <td>ШЛБ – I</td> <td align="center">115 мм</td> </tr> <tr> <td>ШЛБ – 0,4</td> <td align="center">235 мм</td> </tr> <tr> <td>Стальная обшивка</td> <td align="center">5 мм</td> </tr> <tr> <td align="center"><u>Свод</u></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШЛБ – I</td> <td align="center">115 мм</td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШЛБ – 0,4</td> <td align="center">210 мм</td> </tr> <tr> <td>Стальная обшивка</td> <td align="center">5 мм</td> </tr> <tr> <td align="center"><u>Под</u></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Кирпич ША – I</td> <td align="center">115 мм</td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШЛБ – 0,4</td> <td align="center">210 мм</td> </tr> <tr> <td>Стальная обшивка</td> <td align="center">5 мм</td> </tr> </table>	<u>Стены</u>	<u>Толщина</u>	ШЛБ – I	115 мм	ШЛБ – 0,4	235 мм	Стальная обшивка	5 мм	<u>Свод</u>		Кирпич ШЛБ – I	115 мм	Кирпич ШЛБ – 0,4	210 мм	Стальная обшивка	5 мм	<u>Под</u>		Кирпич ША – I	115 мм	Кирпич ШЛБ – 0,4	210 мм	Стальная обшивка	5 мм	<p>Длина – 5,75 м Ширина – 1,53 м Высота – 0,65 м</p> <table border="0"> <tr> <td align="center"><u>Стены</u></td> <td align="center"><u>Толщина</u></td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШБ – I</td> <td align="center">115 мм</td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШВ</td> <td align="center">235 мм</td> </tr> <tr> <td>Стальная обшивка</td> <td align="center">5 мм</td> </tr> <tr> <td align="center"><u>Свод</u></td> <td align="center">50 мм</td> </tr> <tr> <td>Карборундовый</td> <td align="center">160 мм</td> </tr> <tr> <td>Воздух</td> <td align="center">115 мм</td> </tr> <tr> <td>Кирпич ША – I</td> <td align="center">90 мм</td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШЛБ – 0,8</td> <td align="center">5 мм</td> </tr> <tr> <td>Стальная обшивка</td> <td align="center">50 мм</td> </tr> <tr> <td></td> <td align="center">130 мм</td> </tr> <tr> <td align="center"><u>Под</u></td> <td align="center">65 мм</td> </tr> <tr> <td>Карборундовый</td> <td align="center">115 мм</td> </tr> <tr> <td>Воздух</td> <td align="center">5 мм</td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШБ – I</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Кирпич ШВ</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Стальная обшивка</td> <td></td> </tr> </table>		<u>Стены</u>	<u>Толщина</u>	Кирпич ШБ – I	115 мм	Кирпич ШВ	235 мм	Стальная обшивка	5 мм	<u>Свод</u>	50 мм	Карборундовый	160 мм	Воздух	115 мм	Кирпич ША – I	90 мм	Кирпич ШЛБ – 0,8	5 мм	Стальная обшивка	50 мм		130 мм	<u>Под</u>	65 мм	Карборундовый	115 мм	Воздух	5 мм	Кирпич ШБ – I		Кирпич ШВ		Стальная обшивка	
<u>Стены</u>	<u>Толщина</u>																																																											
ШЛБ – I	115 мм																																																											
ШЛБ – 0,4	235 мм																																																											
Стальная обшивка	5 мм																																																											
<u>Свод</u>																																																												
Кирпич ШЛБ – I	115 мм																																																											
Кирпич ШЛБ – 0,4	210 мм																																																											
Стальная обшивка	5 мм																																																											
<u>Под</u>																																																												
Кирпич ША – I	115 мм																																																											
Кирпич ШЛБ – 0,4	210 мм																																																											
Стальная обшивка	5 мм																																																											
<u>Стены</u>	<u>Толщина</u>																																																											
Кирпич ШБ – I	115 мм																																																											
Кирпич ШВ	235 мм																																																											
Стальная обшивка	5 мм																																																											
<u>Свод</u>	50 мм																																																											
Карборундовый	160 мм																																																											
Воздух	115 мм																																																											
Кирпич ША – I	90 мм																																																											
Кирпич ШЛБ – 0,8	5 мм																																																											
Стальная обшивка	50 мм																																																											
	130 мм																																																											
<u>Под</u>	65 мм																																																											
Карборундовый	115 мм																																																											
Воздух	5 мм																																																											
Кирпич ШБ – I																																																												
Кирпич ШВ																																																												
Стальная обшивка																																																												

Потери через стенки, свод и под печи рассчитываем для отдельных её участков. Каждый из участков по длине печи, характеризующийся определённой конструкцией стены или свода и пода, дополнительно разбивается на расчётные участки, соответствующие прямолинейным участкам кривой обжига.

Принимаем конструкцию стен, свода и пода печи по чертежам.

Составляем таблицу потерь тепла через стены, свод и под печи в окружающую среду.

ПОЯСНЕНИЯ К ТАБЛИЦЕ.

Графа 1 – Номера расчётных участков берутся согласно кривой обжига.

Графа 2 – Согласно кривой обжига находится средняя температура на расчётных участках.

Толщина материала стен, свода и пода принимается согласно конструкции в м (δ).

Коэффициенты теплопроводности материала находят по графикам задаваясь предварительно средней температурой в указанном слое, Вт/м·град. (λ).

Термическое сопротивление теплопроводности (δ/λ) находят путём деления толщины слоя на его коэффициент теплопроводности. Общее термическое сопротивление теплопроводности подсчитывается по формуле:

$$R = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots + \delta_n / \lambda_n + 1/\alpha_2, \text{ м}^2\text{град/Вт}$$

где: α_2 – коэффициент теплопередачи от наружной стены к окружающему воздуху. Значение его можно принимать в зависимости от температуры слоя.

$\alpha_2 = 10,5 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$ – зона подогрева и охлаждения

$\alpha_2 = 12,8 \text{ Вт/м}^2 \text{ град}$ зона обжига

$K = 1/R$ – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$.

Теплопроводящая площадь в м^2 принимается равной

$F_{\text{ст}} = l_{\text{уч}} \cdot h_{\text{уч}} (\text{м}^2)$; $F_{\text{св}} = F_{\text{под}} = l_{\text{уч}} \cdot v_{\text{уч}} (\text{м}^2)$

Потери тепла через стены, свод и под печи

$Q = 3,6FK(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \text{ кДж/час}$

$t_{\text{нар}} = 20^0\text{C}$

4. Тепловой баланс рольганговой электрической печи

4.1. Тепловой баланс зон подогрева и обжига.

4.1.1. Приход тепла.

1. Тепло электрического тока $Q_{1n}^n = W_{\text{кВт}}$

2. Теплосодержание изделий

$Q_{2n}^n = G_{\text{с.с}} \cdot C_{\text{изд}} \cdot t_{\text{изд}} \cdot 1/3600, \text{ кВт}$,

где: $G_{\text{с.с}}$ – количество изделий в $\text{кг/час} = G_{\text{час}}$,

$C_{\text{изд}}$ – теплоёмкость изделий = $0,92 \text{ кДж/кг град}$.,

$t_{\text{изд}}$ – температура изделий, входящих в печь, $t_{\text{изд}} = 20^0\text{C}$,

$Q_{2n}^n = 9,5 \cdot 0,92 \cdot 20 (1/3600) = 0,0485 \text{ кВт}$.

3. Теплосодержание поддонов.

$Q_{3n}^n = G_{\text{под}}^{\text{час}} C_{\text{под}} t_{\text{под}} 1/3600, \text{ кВт}$.

$Q_{3n}^n = 9,35 \cdot 0,482 \cdot 20 \cdot 1/3600 = 0,025 \text{ кВт}$.

Итого приход тепла:

$\sum_1^3 Q_n^n = Q_{1n}^n + Q_{2n}^n + Q_{3n}^n$

$\sum_1^3 Q_n^n = W + 0,0485 + 0,025 = 0,0735 + W, \text{ кВт}$

4.1.2. Расход тепла.

1. Тепло, затраченное на нагрев изделий до температуры обжига:

$Q_{1n}^p = G_{\text{час}} C_{\text{изд}} t_{\text{обж}} 1/3600, \text{ кВт}$,

где: $G_{\text{час}}$ – выход обожжённых изделий из печи, кг/час ,

$C_{\text{изд}}$ – теплоёмкость изделий из печи, кг/час ,

$t_{\text{обж}}$ – t обжига изделий – 950^0C ,

$Q_{1n}^p = 9,02 \cdot 0,98 \cdot 950 \cdot 1/3600 = 2,333 \text{ кВт}$.

2. Тепло, затраченное на нагрев поддонов до температуры обжига.

$Q_{2n}^p = G_{\text{под}}^{\text{час}} C_{\text{под}} t_{\text{обж}} 1/3600, \text{ кВт}$.

$Q_{2n}^p = 9,35 \cdot 0,52 \cdot 950 \cdot 1/3600 = 1,28 \text{ кВт}$.

3. Потери тепла излучением через открытые отверстия:

$Q_{3n}^p = 0,0057[(\frac{T_{\text{пр}}}{100})^4 - (\frac{T_{\text{окр}}}{100})^4] F \cdot \varphi \cdot Z, \text{ кВт}$,

где: $T_{\text{пр}}$; $T_{\text{окр}}$ – температура печного пространства, откуда происходит излучение и окружающей среды, ^0K ,

$T_{\text{окр}} = 293^0\text{K}$,

F – площадь сечения отверстия, м^2 ,

φ – коэффициент диафрагмирования, который определяется по графику (рис. 28, П.В.

Левченко «Расчёт печей и сушил силикатной промышленности», М.: Высшая школа, 1968),

Z – продолжительность открытия окна, час

Значение $(T/100)^4 = (273 + t/100)^4$ приведены в приложении (П.В. Левченко).

$$Q_{3n}^p = 0,0057 \left[\left(\frac{273+45}{100} \right)^4 - \left(\frac{273+20}{100} \right)^4 \right] 0,08 \cdot 0,405 \cdot 0,8 \cdot 1 = 0,042 \text{ кВт}$$

4. Потери тепла в окружающую среду.

$$Q_{4n}^p = (Q_{ст}^n + Q_{св}^n + Q_{под}^n) \cdot 1/3600, \text{ кВт},$$

где: $Q_{ст}^n$; $Q_{св}^n$; $Q_{под}^n$ – потери тепла через стены, свод и под печи в кДж/час,

$$Q_{4n}^p = (13403,7 + 11165,2 + 7739,7) \cdot 1/3600 = 8,72 \text{ кВт}$$

5. Неучтённые потери тепла.

(Принимаем в размере 5% от предыдущих статей расхода)

$$Q_{5n}^p = 0,05(Q_{1n}^p + Q_{2n}^p + Q_{3n}^p + Q_{4n}^p)$$

$$Q_{5n}^p = 0,05 (2,332 + 1,28 + 0,042 + 8,72) = 0,618 \text{ кВт}$$

Итого расход тепла:

$$Q_n^p = Q_{1n}^p + Q_{2n}^p + Q_{3n}^p + Q_{4n}^p + Q_{5n}^p, \text{ кВт}$$

$$Q_n^p = 2,332 + 1,28 + 0,042 + 8,72 + 0,6187 = 12,9927 \text{ кВт}$$

Уравнение теплового баланса зон подогрева и обжига:

$$\sum_1^3 Q_n^n = \sum_1^5 Q_n^p$$

$$W + 0,0735 = 12,9927$$

$$W = 12,9927 - 0,0735$$

$$W = 12,9192 \text{ кВт}$$

Таблица 7.6

Тепловой баланс зон подогрева и обжига.

Наименование статей	кВт	%	Наименование статей	кВт	%
Приход тепла			Расход тепла		
1. Тепло электронагревателей	12,919	99,4	1. Нагрев изделий	2,333	18,0
2. Теплосодержание изделий	0,049	0,4	2. Нагрев поддонов	1,28	9,9
3. Теплосодержание поддонов	0,025	0,2	3. Потери тепла излучением	0,042	0,3
			4. Потери тепла в окружающую среду	8,72	67,0
			5. Неучтенные потери тепла	0,618	4,8
ИТОГО:	12,993	100,0	ИТОГО:	12,993	100,0

4.2. Тепловой баланс зоны охлаждения.

4.2.1. Приход тепла.

1. Тепло, выделяемое при охлаждении изделий

$$Q_{1ox}^n = Q_{2n}^p = 2,333 \text{ кВт}$$

2. Тепло, выделяемое при охлаждении поддонов

$$Q_{2ox}^n = Q_{2n}^p = 1,28 \text{ кВт}$$

Итого приход тепла:

$$\sum_1^2 Q_{ox}^n = Q_{1ox}^n + Q_{2ox}^n$$

$$\sum_1^2 Q_{ox}^n = 2,33 + 1,28 = 3,613 \text{ кВт}$$

4.2.2. Расход тепла.

1. Потери тепла в окружающую среду:

$$Q_{1ox}^p = (Q_{ox}^{ct} + Q_{ox}^{cb} + Q_{ox}^{под}) \cdot 1/3600, \text{ кВт},$$

где: $Q_{ox}^{ct} + Q_{ox}^{cb} + Q_{ox}^{под}$ – потери тепла в окружающую среду в зоне охлаждения печи, кДж/час,

$$Q_{1ox}^p = (2964,5 + 4850 + 3223,02) \cdot 1/3600 = 3,09 \text{ кВт}.$$

2. Теплосодержание выгружаемых изделий:

$$Q_{2ox}^p = G_{изд} \cdot C_{изд} \cdot t_{изд} \cdot 1/3600, \text{ кВт},$$

где: $G_{изд}$ – количество изделий, выгружаемых из печи, кг/час,

$C_{изд}$ – теплоёмкость выгружаемых изделий, кДж/кг град.,

$t_{изд}$ – температура изделий при выгрузке из печи $t_{изд} = 50^0\text{C}$,

$$Q_{2ox}^p = 9,02 \cdot 0,92 \cdot 50 \cdot 1/3600 \text{ кВт}$$

3. Теплосодержание выгружаемых поддонов.

$$Q_{3ox}^p = G_{час}^{под} C_{под} t_{под} 1/3600, \text{ кВт}$$

$$Q_{3ox}^p = 9,35 \cdot 0,49 \cdot 50 \cdot 1/3600 = 0,064 \text{ кВт}.$$

4. Потери тепла излучением через открытые отверстия.

$$Q_{4ox}^p = 0,0057 \left[\left(\frac{T_{отв}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{окр}}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot \tau \cdot Z, \text{ кВт}$$

$$Q_{4ox}^p = 0,0057 \left[\left(\frac{273 + 50}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + 20}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,8 \cdot 0,405 \cdot 0,8 \cdot 1 =$$

$$= 0,0519 \text{ кВт}$$

5. Потери тепла с муфельным охлаждением изделий.

$$Q_{5ox}^p = \sum_1^2 Q_{ox}^n - \sum_1^4 Q_{ox}^n, \text{ кВт}$$

$$\sum_1^4 Q_{ox}^p = Q_{1ox}^p + Q_{2ox}^p + Q_{3ox}^p + Q_{4ox}^p$$

$$\sum_1^4 Q_{ox}^p = 3,09 + 0,115 + 0,064 + 0,0519 = 3,3209 \text{ кВт}$$

$$Q_{5ox}^p = 3,613 - 3,3209 = 0,2921 \text{ кВт}$$

Итого расход тепла:

$$\sum_1^5 Q_{ox}^p = Q_{1ox}^p + Q_{2ox}^p + Q_{3ox}^p + Q_{4ox}^p + Q_{5ox}^p, \text{ кВт}$$

$$\sum_1^5 Q_{ox}^p = 3,613 \text{ кВт}$$

Таблица 7.7

Тепловой баланс зоны охлаждения.

Наименование статей	кВт	%	Наименование статей	кВт	%
<u>Приход тепла</u>			<u>Расход тепла</u>		
1. Тепло, выделенное при охлаждении изделий	2,333	65,6	1. Потери тепла в окружающую среду.	3,09	85,5
			2. Потери тепла	0,115	3,2

2. Тепло охлаждаемых поддонов	1,28	35,4	выгружаемых изделий. 3. Теплосодержание выгружаемых поддонов. 4. Потери теплоизлучением. 5. Потери тепла с муфельным охлаждением изделий.	0,064 0,0519 0,2921	1,8 1,4 8,1
ИТОГО:	3,613	100,0	ИТОГО:	3,613	100,0

4.3. Сводный тепловой баланс печи.

Таблица 7.8

Наименование статей	кВт	%	Наименование статей	кВт	%
<u>Приход тепла</u>			<u>Расход тепла</u>		
1. Тепло электронагревателей	12,919	99,4	1. Потери тепла в окружающую среду во всех зонах.	8,72+3,09	90,9
2. Теплосодержание изделий	0,049	0,4	2. Потери тепла с излучением во всех зонах.	0,042+ +0,0519	0,7
3. Теплосодержание поддонов	0,025	0,2	3. Теплосодержание выгружаемых изделий.	0,115	0,9
			4. Теплосодержание выгружаемых поддонов.	0,064	0,5
			5. Потери тепла с муфельным охлаждением.	0,2921 0,618	2,2 4,8
			6. Прочие потери.		
ИТОГО:	12,993	100,0	ИТОГО:	12,993	100,0

4.4. Вычисление удельного расхода электроэнергии и к. п. д. печи.

Удельные затраты электроэнергии на 1 кг обожжённой продукции составят:

$$W_{уд} = W/G_{час} = 12,919/9,02 = 1,432 \text{ кВт/кг}$$

Затраты электроэнергии на одно изделие составят:

$$W_{уд} = W/P_{час} = 12,919/8,43 = 1,533 \text{ кВт/1 изд.}$$

КПД печи составит:

$$\eta_n = (Q_{1n}^p / Q_{1n}^n) \cdot 100 = (2,333 / 12,919) \cdot 100 = 18,1 \%$$

Номограмма зависимости температуры воздуха и дымовых газов от теплосодержания.

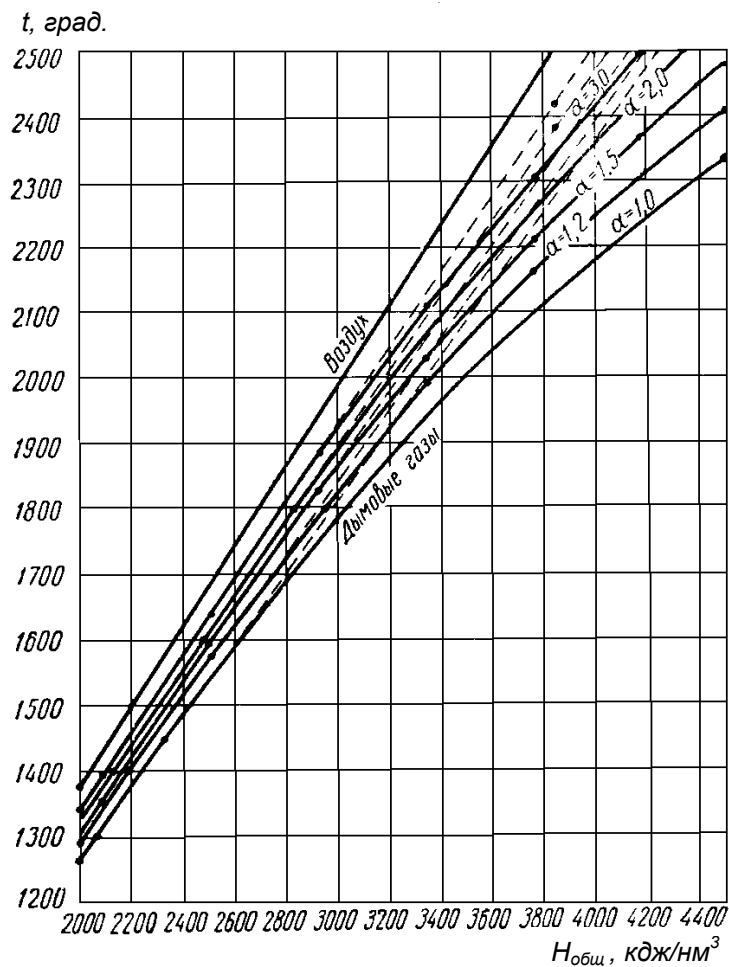


Рис. 2. H–t диаграмма для высоких температур

Дополнительные таблицы к приложениям

Таблица 6.4

Расчёт потерь тепла в окружающую среду через под печи

Средн. t в печи, °C	Характеристика пода по слоям												
	шамот кремнезем			шамот ШБ			шамот легковес			R _{под} , м² К/Вт	K _{под} , Вт/ м²К	F _{под} , м²	Q _{под} , кДж/час
	δ ₁ , м	λ ₁ , Вт/ /м·К	δ ₁ /λ ₁ м²К/Вт	δ ₂	λ ₂	δ ₂ /λ ₂	δ ₃	λ ₃	δ ₃ /λ ₃				
	Зона подогрева												
235	-	-	-	0,06	0,75	0,08	0,13	0,15	0,86	1,03	1,0	9,6	743,0
	Зона обжига												
630	0,07	0,97	0,07	0,06	0,82	0,07	0,2	0,3	2,2	2,42	0,41	11,9	10714
	Зона обжига												
810	0,7	2,25	0,03	0,06	1,08	0,06	0,2	0,32	0,62	0,8	1,2	11,9	40612 Q _{под} =58756
	Зона охлаждения												
783	0,07	2,03	0,03	0,06	1,0	0,06	0,2	0,34	0,58	0,8	1,2	8,04	26501
	Зона охлаждения												

483	-	-	-	0,06	0,95	0,06	0,2	0,32	0,62	0,8	1,2	5,7	11401
Зона охлаждения													
145	-	-	-	0,06	0,75	0,08	0,13	0,32	0,4	0,6	1,7	5	$\frac{3825}{Q_{охл}=41727}$

Таблица 6.5

Расчет потерь тепла в окружающую среду через свод

№ участка	Средн. t в печи, °С	Характеристика по слоям												$R_{ср}, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$K_{ср}, \text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	$F_{ср}, \text{м}^2$	$Q_{ср}, \text{кДж}/\text{ч}$
		шамот ШБ			шамот легков. ШЛБ			засыпка			шамот легков. ШЛБ						
		$\delta_1, \text{м}$	$\lambda_1, \text{Вт}/\text{мК}$	$\delta_1/\lambda_1, \text{м}^2/\text{Вт}$	δ_2	λ_2	δ_2/λ_2	δ_3	λ_3	δ_3/λ_3	δ_4	λ_4	δ_4/λ_4				
Зона подогрева																	
1	235	0,23	0,75	0,3	-	-	-	0,1	0,14	0,7	0,06	0,3	2,1	3,19	0,31	9,6	2303
Зона обжига																	
2	630	0,23	0,85	0,27	0,06	0,33	0,18	0,1	0,16	0,63	0,06	0,31	1,19	1,16	0,86	11,9	22474
Зона обжига																	
3	810	0,26	1,0	0,23	0,06	0,35	0,18	0,18	0,18	0,66	0,66	0,32	0,2	2,2	0,5	11,9	$\frac{16922}{Q_{ср}^n = 41699}$
Зона охлаждения																	
4	783	0,23	1,0	0,23	-	-	-	0,1	0,2	0,5	0,06	0,32	0,2	1,03	1,0	8,04	22084
Зона охлаждения																	
5	483	0,23	0,9	0,25	-	-	-	0,1	0,15	0,66	0,06	0,31	0,2	1,16	0,9	5,7	8550
Зона охлаждения																	
6	145	0,23	0,75	0,23	-	-	-	0,1	0,12	0,8	0,06	0,31	0,2	1,35	0,7	5	$\frac{1575}{Q_{ср}^{ох} = 32209}$

Расчёт аэродинамических сопротивлений.

	Наименование сопротивления	V, м ³ /сек	F, м ²	v ₀ м/сек	$\frac{v_0^2}{2}$	ρ_0 кг/м ³	t, °C	1+βt	λ	/d _{пр}	ξ	h _{пот} Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<u>Отсасывающий вентилятор</u>												
1	Трение туннеля	14,8/12 = 1,23	1,7 · 1,2 · 0,4 = 0,82	1,5	1,125	1,27	36	1,13	0,05	28,6/2,3 = 12,43	—	1,003 · 12 = 12,04
2	Поворот на 90 ⁰ с изменением сечения	1,23	0,8 · 0,7 = 0,56	2,2	2,42	1,27	36	1,13	—	—	2,0	6,95 · 12 = 83,4
3	Сопротивление шибера	1,23	0,8 · 0,7 = 0,56	2,3	2,42	1,27	36	1,13	—	—	0,5	1,74 · 12 = 20,88
4	Трение вертикального канала	1,23	0,8 · 0,5 = 0,84	1,46	1,07	1,27	36	1,3	0,05	2,4/2,3 = 1,04	—	0,08 · 12 = 9,6
5	Поворот на 90 ⁰ с изменением сечения (вход в горизонтальный канал)	1,23	0,84 · 0,84 = 0,71	1,73	1,5	1,27	36	1,3	—	—	1,5	3,23 · 12 = 38,76
6	Трение горизонтального канала	1,23	0,84 · 0,84 = 0,71	1,73	1,5	1,27	36	1,3	0,05	1,225/0,84 = 1,46	—	0,16 · 12 = 1,92
7	Поворот на 90 ⁰ с изменением сечения (вход в подводящий коллектор)	1,23	0,84 · 0,84 = 0,71	1,73	1,5	1,27	36	1,3	—	—	1,0	2,15 · 12 = 25,8
8	Трение отводящего коллектора	14,8	1,3 · 1,8 = 2,34	6,32	19,97	1,27	36	1,3	0,05	1,79/2,3 = 7,72	—	11,15
9	Неучтённые потери напора (40 % от суммы предыдущих потерь)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(03,55 · 40)/100 = 81,42
ИТОГО:												284,97

Таблица 4.3

Расчёт аэродинамических сопротивлений.

	Наименование сопротивления	V, м ³ /сек	F, м ²	v ₀ м/сек	$\frac{v_0^2}{2}$	ρ_0 кг/м ³	t, °C	1+βt	λ	/d _{пр}	ξ	h _{пот} Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<u>Нагнетающий вентилятор</u>												
1	Сопротивление трения подводящего коллектора	17,3	1,3·1,8 =2,34	17,3/2, 34 = 7,4	27,38	1,293	100	1,37	0,05	17,91/2,3 = 7,78	—	18,9
2	Поворот на 90 ⁰ с изменением сечений (вход в горизонтальный канал)	17,3/12 = 1,44	0,84· 0,84 = 0,71	2,03	2,06	1,293	100	1,37	—	—	2,0	7,3 · 12 = 87,6
3	Трение горизонтального канала	1,44	0,71	2,03	2,06	1,293	100	1,37	0,05	1,295/0,8 4 = 1,46	—	0,27 · 12 = 3,24
4	Поворот на 90 ⁰ с изменением сечения (вход в вертикальный канал)	1,44	0,71	2,03	2,06	1,293	100	1,37	—	—	1,5	5,31 · 12 63,72
5	Трение вертикального канала	1,44	0,8· 1,05 =0,84	1,71	1,46	1,293	100	1,37	0,05	2,4/2,3 = 1,04	—	0,13 · 12 = 1,56
6	Сопротивление шибера	1,44	0,8·0,7 = 0,56	2,57	3,3	1,293	100	1,37	—	—	0,5	2,92 · 12 = 35,04
7	Поворот на 90 ⁰ с изменением сечения (вход в туннель)	1,44	0,56	2,57	3,3	1,293	100	1,37	—	—	1,0	5,85 · 12 = 70,2
8	Неучтённые потери напора (20% от суммы предыдущих статей)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	(280,26 · 20)/100 = 56,05
ИТОГО:												336,31

Таблица 7.3

Расчёт потерь в окружающую среду через стены.

№ участка	Средняя температура в печи, °С	Характеристика стен по слоям															R _{ст} , м ² ·К/Вт	K _{ст} , Вт/м ² ·К	F _{ст} , м ²	Q _{ст} , кДж/час
		ШБ –1			ШВ			ШЛБ –1			ШЛБ – 4			Стальная обшивка						
		δ ₁	λ ₁	δ ₁ /λ ₁	δ ₂	λ ₂	δ ₂ /λ ₂	δ ₃	λ ₃	δ ₃ /λ ₃	δ ₄	λ ₄	δ ₄ /λ ₄	δ ₅	λ ₅	δ ₅ /λ ₅				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Зона подогрева																				
1	45	0,1	0,	0,3	0,2	0,	0,8	–	–	–	–	–	–	0,0	45	0,00	1,2	0,8	0,9	68,7
2	34	15	37	11	35	28	99	0,1	0,	0,3	0,2	0,1	2,0	05	,4	011	45	03	5	1880,
	5	–	–	–	–	–	–	15	3	83	35	13	79	0,0	45	0,00	2,5	0,3	4,1	2
														05	,4	011	57	19	1	
Зона обжига																				
3	78	–	–	–	–	–	–	0,1	0,	0,2	0,2	0,2	0,8	0,0	45	0,00	2,2	0,4	4,54	564
4	5	–	–	–	–	–	–	15	48	39	35	8	39	05	,8	011	15	51	4	3,9
	95							0,1	0,	0,2	0,2	0,1	1,3	0,0	47	0,00	1,9	0,5	2,08	357
	0							15	55	09	35	7	82	05	,2	011	48	13		2,4
																				Q ^н _{ст} =11165,
Зона охлаждения																				
5	50	0,1	0,	0,4	0,2	0,	0,8	–	–	–	–	–	–	0,0	45	0,00	1,1	0,8	7,47	485
	0	15	42		35	29	1							05	,4	011	79	48	5	0
																				Q ^{ох} _{ст} =4850

Таблица 7.4

Расчет потерь в окружающую среду через свод стен

№ участка	Средняя температура в печи, °С	Характеристика свода по слоям																		R _{св} , м ² ·К/Вт	K _{св} , Вт/м ² ·К	F _{св} , м ²	Q _{св} , кДж/час			
		Карборунд			Воздух			ША –1			ШЛБ – 1 / ШЛБ – 0,8			ШЛБ – 0,6			ШЛБ – 0,4							Стальная обшивка		
		δ ₁	λ ₁	δ ₁ /λ ₁	δ ₂	λ ₂	δ ₂ /λ ₂	δ ₃	λ ₃	δ ₃ /λ ₃	δ ₄	λ ₄	δ ₄ /λ ₄	δ ₅	λ ₅	δ ₅ /λ ₅	δ ₆	λ ₆	δ ₆ /λ ₆					δ ₇	λ ₇	δ ₇ /λ ₇
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Зона подогрева																										
1	4	–	–	–	–	–	–	0,	0	0,	–	–	–	0,	0	1,	–	–	–	0,	4	0,0	1,	0,	1,	76,68
2	5	–	–	–	–	–	–	1	,	3	0,	0	0,	3	,	3	0	0	3,	0	5	00	7	0,	4	1684,7
	3							1	3	0	1	,	4	6	2	0	,	,	8	0	,	11	0	8	5	
	4							4	7	8	1	2	4	5	8	4	4	1	3	5	4	0,0	7	6	4	
	5							–	–	–	5	6	2	–	–	–	6	2	3	0	4	00	4	0,	6,	
																				3	2	2				
Зона обжига																										
3	7	–	–	–	–	–	–	–	–	0,	0	0,	–	–	–	0	0	2,	0,	4	0,0	3,	0,	3,6	3306	
4	8	–	–	–	–	–	–	–	–	1	,	2	–	–	–	,	,	7	0	6	00	0	3	,8		
	5							1	4	7	5	2	4	–	–	4	1	0	0	,	11	5	2	1,9	2671	
	9							5	2	4	0	0	0,	0	0	6	7	6	5	2	0,0	8	7	9	,6	
	5							0,	0	0,	0	0	0,	0	0	0	0	2,	0,	4	00	2,	0,			
	0							1	,	2	1	,	2	–	–	,	,	1	0	8	11	4	4			
																				9	0	0				
																				3	1	1				
																										Q ^н _{св} =7739,7
Зона охлаждения																										

5	5000	0,05	1,9	0,026	0,016	0,004	4	0,115	0,039	0,025	-	-	-	0,090	0,029	0,031	-	-	-	0,005	45,4	0,0011	4,726	0,212	8,798	3223,02	Q ^{ок} _{ст} =3223,02
---	------	------	-----	-------	-------	-------	---	-------	-------	-------	---	---	---	-------	-------	-------	---	---	---	-------	------	--------	-------	-------	-------	---------	--

Таблица 7.5

Расчет потерь в окружающую среду через под печи

№ участка	температура в	Характеристика пода по слоям																			R _{под} , м ² ·К/Вт	K _{под} , Вт/м ² ·К	F _{под} , м ²	Q _{под} , кДж/час			
		Карборунд			Воздух			ША -1			ШЛБ -1 / ШЛБ -0,8			ШЛБ -0,6			ШЛБ -0,4			Стальная обшивка							
		δ ₁	λ ₁	δ ₁ /λ ₁	δ ₂	λ ₂	δ ₂ /λ ₂	δ ₃	λ ₃	δ ₃ /λ ₃	δ ₄	λ ₄	δ ₄ /λ ₄	δ ₅	λ ₅	δ ₅ /λ ₅	δ ₆	λ ₆	δ ₆ /λ ₆	δ ₇					λ ₇	δ ₇ /λ ₇	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Зона подогрева																											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Зона обжига																											
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Зона охлаждения																											
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32

Литература

Основная

1. ГОСТ 26691-98. Теплотехника. Термины и определения.
2. ГОСТ 30486-97. Энергоснабжение. Средства и методы измерений тепловых величин. Общие положения.
3. Левченко П.В. Расчёты печей и сушил силикатной промышленности. - М.: Высшая школа, 1998.
4. Никифорова Н.М. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов. - М.: Высшая школа, 1997.
5. Павлов В.Ф., Павлов С.В. Основы проектирования тепловых установок. - М.: Высшая школа, 1996.
6. Перегудов В.В. Теплотехника и теплотехническое оборудование. - М.: Стройиздат, 2007.
7. Роговой М.И. Теплотехническое оборудование керамических заводов. - М.: Стройиздат, 2008.
9. Роговой М.И., Кандакова М.Н., Сагановский М.Н. Расчёты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1998.
10. Мазуров Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов Вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 2006.

Дополнительная

11. Мазуров Д.Я., Роговой М.И., Волгина Ю.М. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов. - М.: Высшая школа, 1993.
12. Мороз А.С. Технология производства керамики. - М.: Высшая школа, 1996.
13. Балкевич В.Л. Техническая керамика. - М.: Высшая школа, 1999.
14. Боханько В.М., Махнович А.С. Противопожарная защита и охрана труда на предприятиях промышленности строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1999.
15. Боголюбов С.К., Воинов А.В. Черчение. – М.: Машиностроение, 1998.
16. Гинзбург Д.Б., Деликишкин С.Н., Ходоров Е.И., Чижский А.Ф. Печи и сушила силикатной промышленности. М.: промышленности строительных материалов. - М.: Стройиздат, 2006.
17. Рахалин И.А., Югай Б.С., Гришанов А.Г. Основы проектирования керамических заводов. - М.: Стройиздат, 2003.