

Н.Л. Овчинников, Л.Н. Овчинников

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АГРЕГАТЫ В ОБЖИГЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие



Иваново
2014

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ивановский государственный химико-технологический университет

Н.Л. Овчинников, Л.Н. Овчинников

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АГРЕГАТЫ В ОБЖИГЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Учебное пособие

Иваново 2014

УДК 66.047

Овчинников, Н.Л.

Тепловые процессы и агрегаты в обжиге строительных материалов и изделий / Н.Л. Овчинников, Л.Н. Овчинников; Иван. гос. хим.- технол. ун-т.- Иваново, 2014.- 90с.

В учебном пособии рассматриваются конструкции тепловых агрегатов, применяемых для обжига материалов и изделий силикатной промышленности. Приводятся основные процессы, происходящие при обжиге керамических материалов и изделий, а также конструкции печей, их узлов и вспомогательного оборудования для обжига материалов силикатной промышленности.

Приведены теплотехнические и конструктивные расчёты печей и их узлов применительно к производству керамического кирпича, осуществлен подбор вспомогательного оборудования. Представлены справочные данные по свойствам материалов, газов, топлив.

Учебное пособие предназначено для студентов-технологов и студентов-механиков, обучающихся по направлениям 150100 Материаловедение и технологии материалов, 240100 Химическая технология, 241000 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии при выполнении ими курсовых проектов и квалификационных работ. Кроме того, оно будет полезно для преподавателей специальных кафедр, осуществляющих консультирование студентов по темам, связанным с изучением процессов обжига материалов и изделий в химической и силикатной промышленности.

Табл. 27. Ил. 17. Библиогр.: 7 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета ФГБОУ ВПО Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты:

кафедра строительного материаловедения и специальных технологий Ивановского государственного архитектурно-строительного университета; доктор технических наук, профессор В.Е. Мизонов (Ивановский государственный энергетический университет).

© Овчинников Н. Л., Овчинников Л. Н., 2014

© ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», 2014

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Общие положения процесса обжига в туннельных печах	5
1.1. Процессы, происходящие при обжиге керамических материалов и изделий	5
1.2. Обоснование выбора типа и конструкции печи	9
1.3. Печи для обжига формованных изделий	10
Глава 2. Технологический расчёт туннельной печи	28
2.1. Расчет химического состава шихты и готовых изделий	28
2.2. Расчет производительности туннельной печи	29
2.3. Расчет материального баланса процесса обжига	30
Глава 3. Теплотехнический расчет	31
3.1. Горение топлива	31
3.2. Расчет эффективной теплоемкости керамических материалов	37
3.3. Тепловой баланс зоны подогрева и обжига	38
3.4. Тепловой баланс зоны охлаждения	58
3.5. Определение термического коэффициента полезного действия печи	73
Глава 4. Аэродинамические расчеты	74
4.1. Аэродинамический расчет	74
4.2 Подбор дымососа	76
Список использованных источников	77
Приложения	78

Введение

При промышленном производстве строительных материалов и изделий широко применяют тепловую обработку, на которую затрачивается примерно одна треть стоимости их производства. Поэтому разработка эффективных тепловых процессов и аппаратов, позволяющих получать силикатную продукцию с улучшенными потребительскими свойствами, позволит существенно уменьшить капитальные затраты на их внедрение в сферу строительства.

Для создания эффективного теплового оборудования необходимы глубокие знания в области тепловой обработки строительных материалов и изделий, устройства тепловых установок, их конструирования и эксплуатации.

Большой вклад в разработку теории и практики тепловых процессов применительно к обжигу в строительной индустрии внесли работы М.В. Кирпичева, П.П. Будникова, К.А. Нохратяна, В.В. Перегудова, М.И. Рогового и их учеников.

В работах этих учёных показано, что в результате тепловой обработки в материалах и изделиях происходят сложные физико-химические превращения, формируется их структура, осуществляются процессы тепло- и массопереноса.

Накопление знаний о взаимосвязи тепло- и массообменных процессов, проходящих в установках со сложными физико-химическими превращениями в перерабатываемых материалах, обобщенных на основе законов физики, химии и математики, создают основу для перехода к созданию методик расчета процессов и аппаратов применительно к обжигу материалов и изделий силикатной промышленности.

В учебном пособии тепловая обработка строительных материалов и изделий рассмотрена с двух сторон. С одной стороны, представлены заключительные процессы, происходящие при обжиге керамических материалов и изделий, в частности, керамического кирпича. С другой стороны, подробно излагаются конструкции печей периодического и непрерывного действия, обосновывается выбор типа и конструкции печи.

Приведён пример теплотехнического расчёта промышленной туннельной печи для обжига керамического кирпича.

Глава 1. Общие положения процесса обжига в туннельных печах

1.1. Процессы, происходящие при обжиге керамических материалов и изделий

Керамическими называют изделия, изготовленные из глинистых пород или из сырьевых смесей с преобладающим содержанием глинистых минералов.

Завершающей стадией технологии всех изделий строительной керамики является их обжиг, который в зависимости от термических свойств сырьевой смеси ведут в широком диапазоне температур (950-1350°C).

Обжигом [1,2] называется процесс высокотемпературной обработки материалов, в результате которой кирпич-сырец превращается в камнеподобное тело, стойкое против механических, физических и химических воздействий.

Режим обжига представляет собой комплекс взаимосвязанных факторов: скорости подъема температуры, конечной температуры обжига, длительности выдержки при конечной температуре, характера газовой среды и скорости охлаждения.

В процессе нагрева при различных температурах в материале керамических изделий происходит ряд сложных физико-химических явлений, вызывающих изменение его свойств.

В интервале температур 0-150°C происходит досушка кирпича-сырца. При этом образуется значительное количество водяного пара, который при быстром подъеме температуры выделяется столь бурно, что может разорвать изделие. При скоростном обжиге это наиболее опасный для изделия этап.

Оптимальная влажность загружаемого в печь кирпича-сырца должна составлять 2-6%. Обычно досушку производят за счет увеличения скорости газового потока при умеренном повышении его температуры (порядка 50-80 °C/ч). При этом процесс происходит весьма интенсивно (примерно 200 г/ч влаги с одного кирпича-сырца) с незначительными температурными перепадами по толщине кирпича-сырца (20-30°C) и без ущерба для качества продукции.

В интервале температур 150-800°C происходит дегидратация - удаление химически связанной воды, входящей в состав глинистых и других минералов. При этом разрушается кристаллическая решетка материала, и глина теряет пластические свойства. Удаление химически связанной воды начинается примерно с 350°C, а отдача главной массы этой воды идет при температуре 450-500°C и может продолжаться до 900°C. При этом происходит усадка изделий и снижение их механической прочности.

При температуре 200—800°C выделяется летучая часть органических примесей глины и введенных в состав массы выгорающих добавок, а

также окисляются органические примеси в пределах температуры их воспламенения.

В этот период материал обладает наибольшей пористостью, способствующей беспрепятственному удалению воды и летучей части органических веществ и запрессованного топлива. Одновременно с отдачей химически связанной влаги оксид железа (II) FeO в результате окисления переходит в оксид железа (III) Fe_2O_3 . Глина меняет окраску, и кирпич приобретает красный цвет.

В интервале температур $300\text{—}1000^\circ\text{C}$ происходит разложение карбонатов (при $300\text{—}400^\circ\text{C}$ карбонатов железа FeCO_3 ; $600\text{—}700^\circ\text{C}$ карбонатов магния MgCO_3 ; $800\text{—}900^\circ\text{C}$ карбонатов кальция CaCO_3). Этот период нагрева, включая период дегидратации и модификационных изменений кварца, является практически безопасным даже при обжиге глин, чувствительных к данному процессу, его можно производить с высокой скоростью ($100\text{—}200^\circ\text{C}/\text{ч}$).

Выдержку изделий при 800°C применяют для выгорания коксового остатка при искусственном введении топлива в глиняную массу. Количество его может достигать $70\text{—}80\%$ от необходимого для обжига. Это усиливает влияние реакции при выгорании органических веществ в глине. Весьма важным условием при обжиге сырца с запрессованным топливом является скорость нагрева изделий. При интенсивном подъеме температур в интервале до 800°C усиленно выделяются газообразные продукты горения, которые препятствуют проникновению кислорода внутрь материала. В этот период часть топлива взаимодействует с кислородом ряда окислов, входящих в состав глины, и с кислородом продуктов частичного восстановления паров воды и углекислоты, выделяющихся при обжиге глины. Летучая часть топлива в этих условиях проникает через поры изделия к поверхности, где, соприкасаясь с кислородом, сгорает. При этом внутри изделия образуется восстановительная среда, о чем свидетельствует чернота в изломе обожженного кирпича. Потери в массе при прокаливании такого образца после обжига не наблюдаются.

Получаемые в период упругих деформаций при быстром подъеме температуры закисные соединения железа, являющиеся более сильными плавнями по сравнению с окисью железа, способствуют получению спекшейся сердцевины в обожженных изделиях, что значительно повышает их механическую прочность.

Выгорание топлива в изделиях происходит следующим образом:

- горение летучей части топлива, выделяющейся при нагреве изделий и сгорающей внутри них при медленном подъеме температуры;
- выгорание части топлива как летучей, так и коксового остатка за счет восстановления окислов железа частично и за счет восстановления паров воды и углекислоты;
- выгорание коксового остатка топлива за счет диффузии кислорода внутрь изделия.

На скорость выгорания топлива большое влияние оказывает температура обжига. Обычно температура, при которой скорость выгорания имеет максимальное значение, на 50—100°C ниже максимальной температуры обжига.

Рекомендуется нагревать кирпич-сырец в печи с максимально допустимой скоростью до температуры, соответствующей наибольшей скорости выгорания запрессованного топлива в кирпич-сырец, затем выдерживать при этой температуре в окислительной атмосфере до полного выгорания остатков углерода.

В дальнейшем температура повышается за счет сжигания дополнительного количества топлива, подаваемого извне.

В интервале температур от 800°C до максимальной (950 - 1100°C) глинозем Al_2O_3 и кремнезем SiO_2 соединяются в безводный алюмосиликат-муллит, значительно улучшающий физико-механические свойства изделий.

Этот период нагрева, связанный с разрушением кристаллической решетки глинистых минералов и значительными структурными изменениями в материале изделий, опасен в отношении трещинообразования.

Допускаемая скорость подъема температуры в период структурных изменений от 800°C до максимальной для полнотелого кирпича-сырца составляет 100—150 град/ч, а для эффективных изделий 200—220 град/ч.

Для осуществления скоростных процессов нагрева на всем протяжении обжига и снижения трещинообразования предусмотрено введение добавок в глину, чувствительную к обжигу.

При высокой температуре в зависимости от вида находящихся в глине легкоплавких примесей и состава газовой среды начинает образовываться жидкая фаза, появление которой с повышением температуры приводит к деформации изделий под нагрузкой. Чтобы избежать этого, подъем температуры при обжиге кирпича следует прекращать на этапе, обеспечивающем появление минимально необходимого количества жидкой фазы для образования спаек или связей между дегидратированными частицами глинообразующих минералов, декарбонизированными частицами известняка и зернами кварца. Это создает условия для достаточной механической и атмосферной стойкости изделия.

При определенном минералогическом составе сырья и максимально допустимой температуре обжига существует предел спекаемости массы, характеризующий его технические качества. Задача рационального обжига заключается в том, чтобы как можно ближе подойти к этому пределу без повреждения изделий.

Одна и та же степень созревания изделия может быть достигнута в процессе кратковременного обжига при высокой конечной температуре или, наоборот, длительного обжига, заканчивающегося при более низкой температуре. Чем выше температура обжига, тем интенсивнее

проявляется спекание массы в результате диффузии частиц. Практически максимальная температура ограничивается неравномерностью температурного поля как по сечению печи, так и по объему изделия.

Выдержку изделий при максимальной температуре обжига применяют для выравнивания температуры по всей толщине изделия, обеспечивающего равномерное распределение жидкой фазы. Эта выдержка необходима также и для выравнивания температуры по сечению обжигательного канала печи и зависит как от конструкции печи, так и от садки и метода сжигания топлива.

Охлаждение изделий после выдержки при максимальной температуре обжига является не менее ответственным периодом обжига, чем нагревание.

В начальный период охлаждения при падении температуры на 100—200°C керамические материалы претерпевают термическое сжатие и деформируются пластически, подвергаясь незначительным нагрузкам. В этом периоде при быстром охлаждении в изделии могут появиться трещины. Поэтому величина температурного перепада по толщине изделий не должна превышать 25—30°C.

Охлаждение после 850—800 до 650°C можно значительно ускорить. Допускаемая интенсивность охлаждения на этом участке составляет для полнотелого кирпича 250—300°C, а для эффективных изделий 350—400°C в час.

Охлаждение изделий в интервале температур 650—500°C характеризуется модификационным изменением кварца (573°C) с уменьшением объема на 0,82%. Скорость охлаждения на этом участке не должна превышать 150°C в час.

Допускаемая скорость охлаждения после достижения изделием температуры 500°C составляет 500—600°C в час и ограничивается лишь условиями внешнего теплообмена.

Таким образом, кирпич высокого качества может быть получен при весьма коротких сроках обжига (для полнотелого кирпича 9—11 ч, для эффективных изделий 7—8 ч).

1.2. Обоснование выбора типа и конструкции печи

Керамический кирпич обжигают в печах периодического (камерных и горнах) и непрерывного действия: кольцевых, туннельных и однорядных щелевых.

Печи периодического действия занимают небольшую долю в общем количестве печей, используемых в производстве строительной керамики. Их достоинство – возможность в каждом цикле обжигать изделия по определенному температурному режиму. Однако периодическим печам присущи и существенные недостатки, главный из которых высокий удельный расход топлива. Печи периодического действия (горны) для промышленного обжига этих изделий в настоящее время не проектируют, не строят и почти не эксплуатируют.

Кольцевые печи являются печами непрерывного действия. Они представляют собой тепловой агрегат с длинным обжигательным каналом, имеющим форму вытянутого кольца. Агрегат работает при неподвижном материале и с перемещающейся по каналу зоной горения топлива. Изделия, находящиеся в процессе подогрева, обжига и охлаждения, заполняют весь обжигательный канал печи, за исключением некоторого пространства, где происходит их загрузка и выгрузка. Преимуществом кольцевой печи является то, что в ней можно сжигать без особой подготовки твердое, жидкое и газообразное топливо всех видов, в том числе низкосортное. Наиболее существенными недостатками кольцевых печей являются: большие затраты физического труда, неудовлетворительные санитарно-гигиенические условия, сложность механизации работ внутри печи, неравномерность обжига по сечению обжигательного канала.

В туннельных печах в противоположность кольцевым перемещается обжигаемый материал, уложенный в 12 – 14 рядов на вагонетках, а зона обжига находится все время на одном и том же месте. Наиболее важные преимущества туннельных печей – значительное повышение культуры производства на кирпичных заводах, улучшение санитарно-гигиенических условий труда. Расположение технологических зон на определенных местах обжигательного канала туннельной печи создает благоприятные условия для механизации подачи топлива и автоматизации процесса обжига. Туннельная печь представляет собой сплошной прямолинейный канал, по рельсовому пути которого перемещаются вагонетки с садкой обжигаемых изделий навстречу теплоносителю. Обжигательный канал туннельной печи условно разделен по длине на три основные технологические зоны: подогрева, обжига и охлаждения. В зоне подогрева происходят досушка и подогрев изделия отходящими из зоны обжига продуктами горения, затем вагонетки с изделиями проходят через зону обжига, подвергаясь воздействию высоких температур, после чего поступают в зону охлаждения.

Воздух для охлаждения изделий и транспортирующих средств нагнетается в печь в месте выхода вагонеток вентилятором. После нагрева за

счет теплоты остывающей продукции горячий воздух поступает в зону обжига для горения топлива.

Продукты горения топлива из зоны обжига поступают в зону подогрева, где отдают свою теплоту на испарение остаточной влаги в кирпиче и нагревают его до температуры обжига. Из зоны подогрева отработанные дымовые газы отбираются вентилятором и выбрасываются в атмосферу или направляются в сушилку.

Для отключения канала печи от окружающей атмосферы печь снабжена металлическими дверями. Расположение зоны обжига на определенном месте обжигательного канала печи и перемещение изделий на подвижных вагонетках вдоль печного канала создают благоприятные условия для механизации подачи топлива в зону обжига. Загрузку и выгрузку изделий можно легко механизировать.

Состав вагонеток с изделиями перемещается в печи с помощью гидравлических или механических толкателей. В зависимости от конструкции туннельной печи толкатель продвигает весь состав вагонеток на одну вагонетку, на часть вагонетки или непрерывно перемещает весь поезд вагонеток.

1.3. Печи для обжига формованных изделий

На предприятиях строительной индустрии обжигают керамические формованные изделия (кирпич, керамические камни, плитки, трубы) и некоторые виды теплоизоляционных изделий: диатомовый кирпич, легковесные огнеупоры, перлитокерамические изделия и др. В технологии этих изделий обжиг является завершающей стадией, определяющей в большинстве случаев качество готовой продукции.

Кольцевые печи. Наиболее широкое распространение они получили для обжига керамического кирпича, стеновых керамических камней и керамических дренажных труб. Распространенность и «живучесть» кольцевых печей объясняются их высокой тепловой экономичностью, сравнительно высокой производительностью, возможностью сжигания любых видов топлива, включая самые низкосортные разновидности и топливные суррогаты, а также возможностью на ходу переключаться с одного вида твердого топлива на другой без каких-либо конструктивных изменений в печи. Однако несмотря на указанные достоинства, кольцевым печам присущи очень крупные недостатки: относительно тяжелые условия обслуживания и трудности полной механизации процессов загрузки сырца в печь и выгрузки обожженного кирпича из печи. Тем не менее большая их распространенность и перспективы относительно длительного их существования требуют изучения приемов эффективной эксплуатации и совершенствования существующих конструкций кольцевых печей. В общем случае принцип действия кольцевой печи представлен на рис. 1.1а, а поперечный разрез печи на рис. 1.2б. Основным элементом печи является замкнутый сквозной обжигательный канал 1 овальной формы, не имеющий

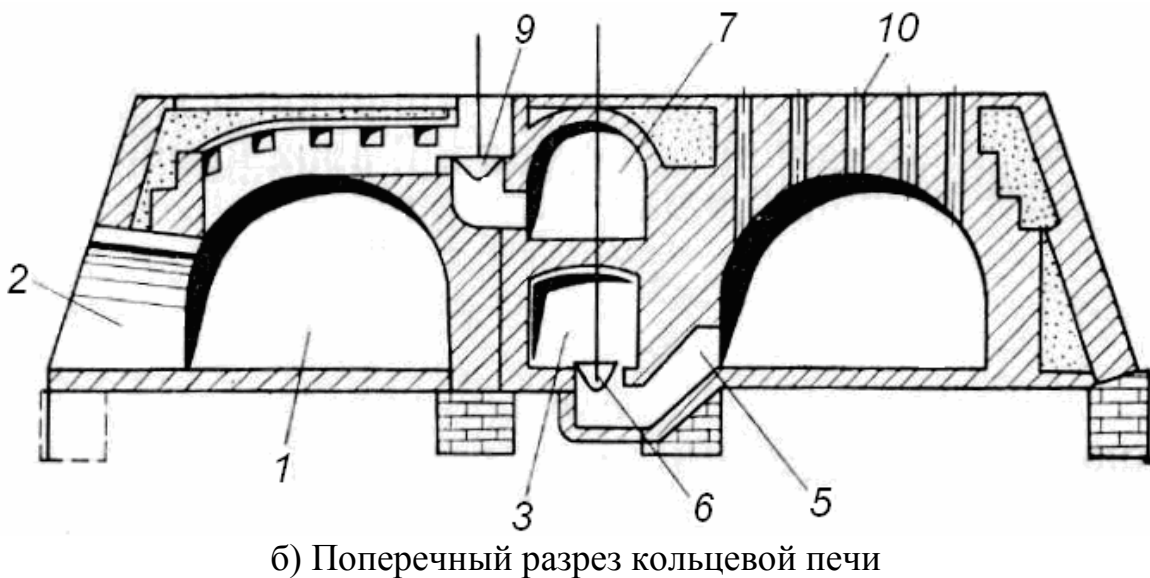
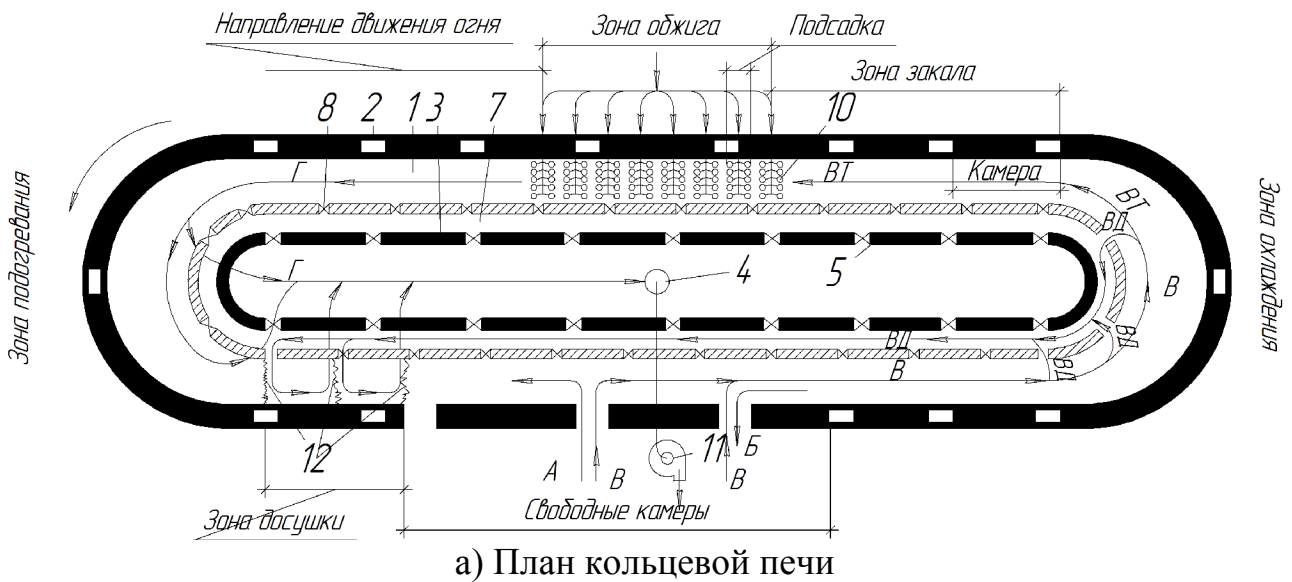


Рис. 1.1. Схема работы кольцевой печи:

1-обжигательный канал; 2-отверстия; 3-дымовой проход; 4-отверстие; 5-отверстия (очелки) 6-конические клапаны; 7-жаровой канал; 8-жаровые отверстия; 9-жаровые конусы; 10-топливные трубки; 11-дымосос; 12-бумажные ширмы

внутри постоянных перегородок и являющийся рабочей камерой печи. В наружных стенах обжигательного канала имеются отверстия 2, именуемые обычно ходками, через которые в печь загружают сырец (стрелка А) и выгружают обожженный кирпич (стрелка Б). Часть обжигательного канала, соответствующая расстоянию между двумя ходками, условно называют камерой, хотя канал сквозной и камеры друг от друга не отделены. Во внутренней стене печи расположен дымовой канал 3 с отверстием 4, соединяющим дымовой канал с дымососом 11 (или дымовой трубой). Обжигательный канал соединяется с дымовым посредством отверстий 5 во внутренней стене печи. Дымовые отверстия снабжены подъемными

коническими клапанами 6 (дымовыми конусами), посредством которых дымовой канал может подключаться к обжигательному либо отключаться от него. Над дымовым каналом расположен жаровой канал 7. На рис. 1.1а он условно изображен рядом с дымовым каналом. Он предназначен для использования горячего воздуха, остужающего обожженные изделия. Жаровой канал можно подключать к обжигательному посредством жаровых отверстий 8 и конических подъемных клапанов 9 — жаровых конусов.

Работа печи. При установившемся режиме, т.е. когда печь находится в регулярной непрерывной эксплуатации, обжигательный канал почти целиком заполнен обжигаемым материалом. Свободными остаются лишь три камеры, через которые непрерывно загружают сырец и выгружают обожженный кирпич. В этих камерах ходки открыты. В остальных они заложены временными кирпичными стенками или закрыты специальными щитами. Топливо подают (стрелка Т) в печь через отверстия 10 (топливные трубки в своде обжигательного канала). Часть обжигательного канала, заключенную между двумя поперечными рядами топливных трубок, называют подсадкой. Топливо поступает на предварительно раскаленную садку обжигаемых изделий и, получая от нее начальный импульс подогрева (энергию активации), быстро загорается, продолжая нагревать садку. Ту часть обжигательного канала, в которую загружают топливо, называют зоной обжига. В этой зоне закрыты как дымовые, так и жаровые конусы. Образующиеся в зоне обжига дымовые газы направляются вперед (стрелка Г), пронизывают садку и подогревают относительно холодный сырец до температуры, несколько превышающей температуру воспламенения топлива, которое сжигают в печи.

Зону, в которой сырец подогревается дымовыми газами, называют зоной подогрева. Остывшие дымовые газы удаляются из зоны подогрева в дымовой канал через дымовые отверстия и открытые дымовые конусы. Причем, как видно из рис. 1.1а, в этой зоне открыты не все дымовые конусы; ближайшие к зоне обжига закрыты, чтобы горячие дымовые газы не уходили неиспользованными в дымовой канал. Из дымового канала через сборное отверстие 4 газы направляются к дымососу 11, которым выбрасываются в атмосферу. Воздух засасывается в обжигательный канал через открытые ходки (стрелки В) свободных камер печи. Из свободных камер воздух направляется через садку уже обожженного кирпича и охлаждает его. По прохождении нескольких камер поток воздуха раздваивается - часть его продолжает движение вперед (стрелка ВГ), пронизывая садку, подогревается и поступает в зону обжига, где участвует в горении топлива. Другая часть воздуха также горячего, отсасывается в жаровой канал (стрелки ВД) и из него поступает в камеры со свежезагруженным сырцом. В этих камерах воздух досушивает загруженный в печь сырец. Часть зоны остывания, в которой воздух не отсасывается в жаровой канал, называют зоной закала. Она примыкает к зоне взвара. Между свободными камерами и зоной закала располагается зона охлаждения. В этой зоне часть воздуха обычно отсасывается в жаровой канал. Зону, в которой происходит досушка сырца горячим воздухом, нагретым за счет теплоты остывающего кирпича, называют зоной досушки. Для

осуществления описанного принципа работы кольцевой печи холодный воздух, попавший в свободные камеры, должен получить направленное движение в сторону зоны охлаждения. Для этого нужно преградить ему путь движения в противоположном направлении, т. е. в сторону зоны досушки. С этой целью камеры, составляющие зону досушки, отделены от свободных камер, от зоны подогрева и друг от друга бумажными ширмами 12 (на рис. 1.1а они изображены волнистыми линиями).

Как видно из описанной схемы, в кольцевой печи теплота горячих дымовых газов, покидающих зону обжига, используется для подогрева сырца, а теплота остывающего кирпича — для досушки сырца и подогрева воздуха, используемого для горения топлива. Это и обуславливает довольно высокую тепловую экономичность кольцевых печей. Все зоны в кольцевой печи не остаются неподвижными, они непрерывно перемещаются, в этом главная особенность принципа действия кольцевой печи: обжигаемые изделия в течение всего цикла остаются неподвижными, а тепловые зоны относительно материала непрерывно перемещаются, и таким образом изделия, находясь неподвижно в каждой камере, последовательно подвергаются досушке, подогреву, обжигу, закалу и охлаждению. При нормальном ведении процесса обжига все зоны взаимосвязанно перемещаются с сохранением позонного режима, т.е. с сохранением взаимного распределения всей длины обжигательного канала между отдельными зонами. Каждая камера печи работает в тепловом отношении как бы по периодическому циклу, но вся печь в целом, благодаря перемещению зон работает непрерывно, т.е. в каждый данный момент времени в печи выполняются все стадии процесса обжига. Транспортируют сырец в кольцевые печи, как правило, электропогрузчиками. Сажают сырец в большинстве случаев вручную. Садка сырца в кольцевой печи должна создавать возможно меньшее сопротивление проходу через нее газов и наиболее благоприятные условия теплообмена между кирпичом и омывающими его газами, обеспечивать рациональное заполнение кирпичом объема обжигательного канала и равномерное распределение топлива в садке, обуславливающее одинаковый прогрев кирпича по всему сечению обжигательного канала. Садка при отоплении печи углем должна обладать определенной топливемкостью, т.е. способностью удерживать на себе то количество топлива, которое при обжиге загружается каждый раз в рядок топливных трубок, а также должна быть устойчивой, исключаяющей возможность обвалов. Существуют многочисленные системы садок сырца, выполняемых вручную. Одна из систем, относительно полно удовлетворяющих перечисленным требованиям, приведена на рис. 1.2.

Многолетние и многочисленные попытки механизировать процесс садки штучного сырца в кольцевую печь не увенчались успехом. Поэтому

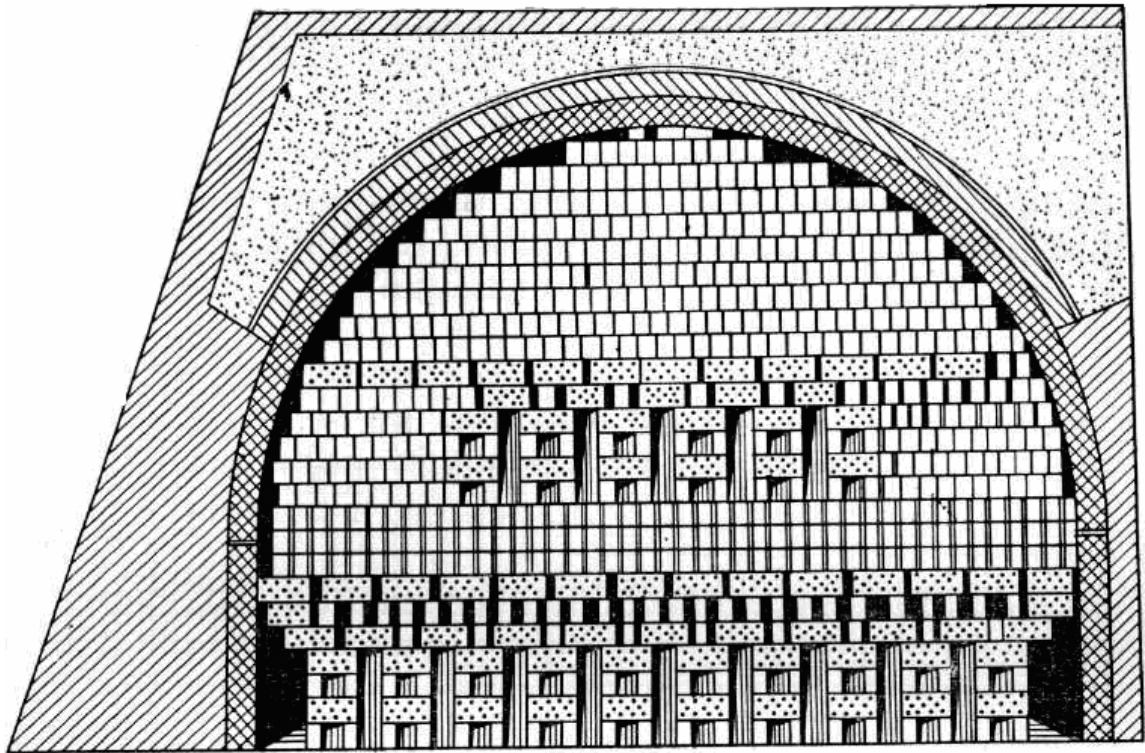


Рис. 1.2. Садка сырца в кольцевой печи (система И. А. Мазова)

сейчас развивается другое направление — пакетная садка (рис.1.3) и выгрузка кирпича. При этом способе вне печи формируют пакет и загружают в печь электрогрузчиком. При полуциркульном своде обжигательного канала часть пространства, ограниченную криволинейным очертанием свода, докладывают вручную. В настоящее время созданы автоматы для формирования пакетов.

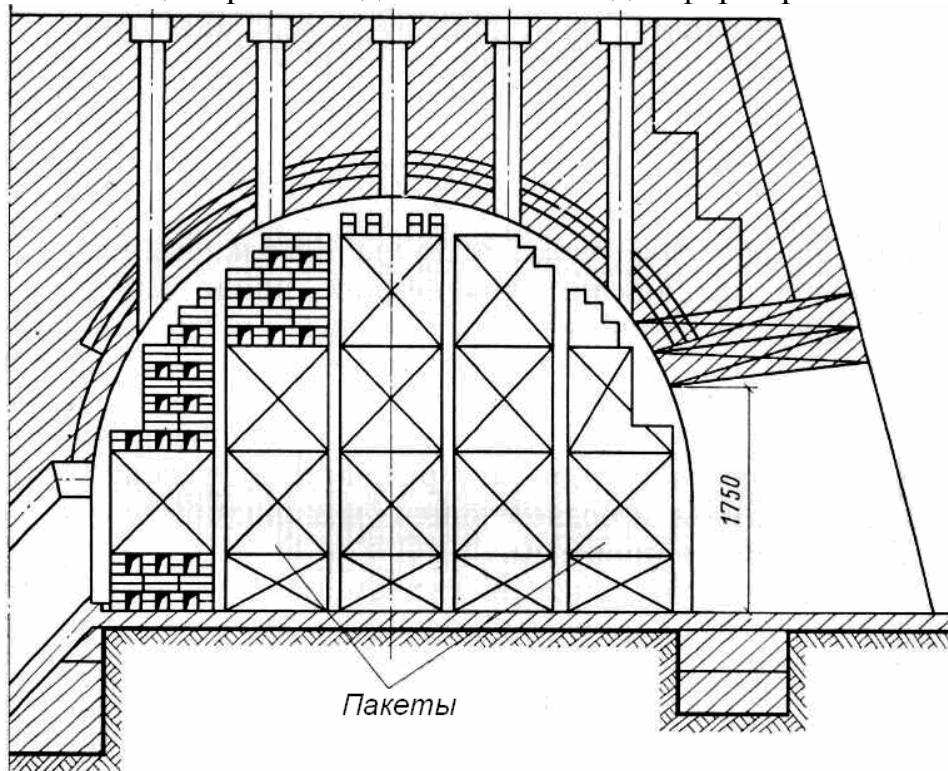


Рис. 1.3. Пакетная садка кирпича в кольцевой печи

Управление процессом обжига сводится к регулированию подачи топлива в печь, изменению положения дымовых и жаровых клапанов и поддержанию стабильности позонного режима. Все это делается с целью достижения определенного температурного режима обжига (нагрева и охлаждения кирпича). Пример температурного режима печи приведен на рис. 1.4.

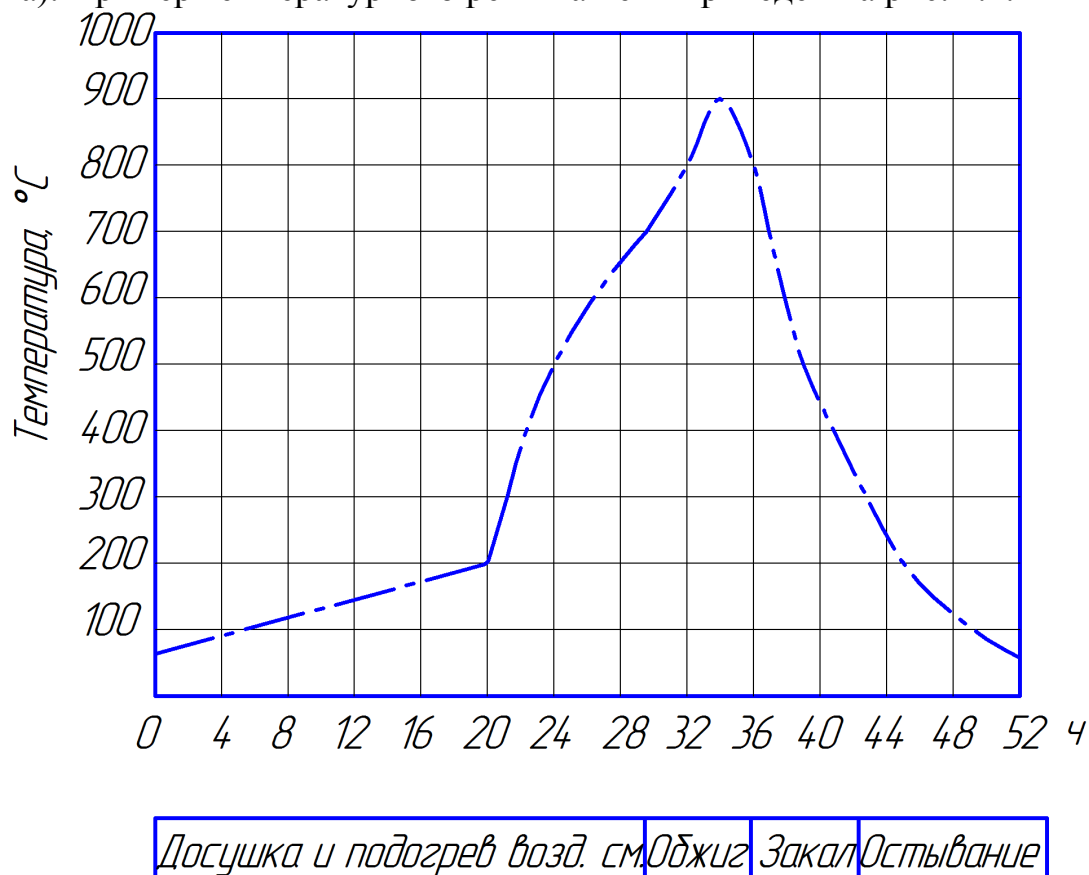


Рис. 1.4. Температурный режим кольцевой печи

Кольцевым печам присуща большая неравномерность обжига, главным образом по высоте обжигательного канала. Основные причины этого — температурное расслоение газовых потоков, свойственное горизонтальному направлению движения газов, и подсосы холодного воздуха. Действенный способ обеспечения равномерного обжига по сечению печи — запрессовка топлива в сырец. В этом случае сырец по существу превращается в много-зольный горючий брикет, и в зоне обжига горит вся садка. Рекомендуется запрессовывать в сырец до 80 % общего расхода топлива на обжиг. Выгружают штучно посаженный кирпич из кольцевых печей электропогрузчиками, предварительно уложенным вручную на поддоны. При пакетной садке выгрузка обожженного кирпича может быть механизирована теми же электропогрузчиками. Однако деформация пакетов при их обжиге затрудняет пакетную выгрузку.

Дискомфортные условия труда в кольцевых печах и трудности механизации трудоемких процессов обусловили происходящий процесс замены кольцевых печей туннельными. Однако полная замена всего парка кольцевых

печей требует значительных капиталовложений и материальных ресурсов. Поэтому разрабатываются и осуществляются технические решения по реконструкции кольцевых печей, позволяющие механизировать основные трудоемкие процессы.

Существо этих решений сводится к замене капитального свода печи плоским инвентарным перекрытием из съемных переносных или катучих панелей. При этом загружают и выгружают пакеты сырца и обожженного кирпича через верх печи козловыми кранами или кран-балками. Особенно эффективен этот метод при пакетной садке с автоматическим формированием пакета. Важнейшие показатели работы кольцевых печей — их удельные производительность и расход топлива. Показатель, характеризующий удельную производительность кольцевых печей, — съем с 1 м^3 обжигательного канала печи в месяц. Средняя его величина составляет около 1450, а на передовых заводах — до 2000 шт./ м^3 в месяц. Нормативная величина удельного расхода условного топлива 140 кг/1000 шт. Годовую производительность кольцевой печи Π_{Γ} определяют по формуле, шт./год:

$$\Pi_{\Gamma} = (Z_a/30)SV, \quad (1.1)$$

где Z_a — количество эксплуатационных дней в году; S — съем кирпича с 1 м^3 обжигательного канала в месяц; V — объем обжигательного канала, м^3 .

Туннельные печи. Идея создания туннельных печей (середина XVIII в.) появилась в связи с необходимостью преодолеть основные недостатки периодических и кольцевых печей. До настоящего времени туннельные печи остаются наиболее совершенным типом теплового оборудования для обжига всех видов формованных изделий. Рабочей камерой туннельной печи является сквозной канал 1 (рис. 1.5, а – в), целиком заполненный вагонетками 2, на которых установлены обжигаемые изделия 3. В средней части печи размещена зона обжига. В нее подают топливо, продукты горения которого просасываются вперед и омывают изделия, находящиеся в зоне подогрева. Отработанные дымовые газы выбрасываются в атмосферу дымососом 4. Вентилятор 5 нагнетает воздух в конец зоны остывания. Проходя через эту зону, воздух омывает обожженные изделия, охлаждает их и сам при этом нагревается. Нагретый воздух поступает в зону обжига, где используется для горения топлива. В зоне подогрева изделия досушиваются и подогреваются, в зоне обжига нагрев изделий продолжается до конечной температуры обжига, а в конце ее происходит некоторое время выдержка изделий при максимальной конечной температуре или, как говорят, кривая обжига имеет температурную площадку. В зоне остывания сначала (пока изделия находятся в пиропластическом состоянии) они быстро остывают. Вблизи температуры перехода обжигаемых изделий из пиропластического состояния в хрупкое и вблизи температуры модификационных превращений кремнезема интенсивность охлаждения понижается. Процесс охлаждения завершается при достижении изделиями $50\text{—}60^\circ\text{C}$.

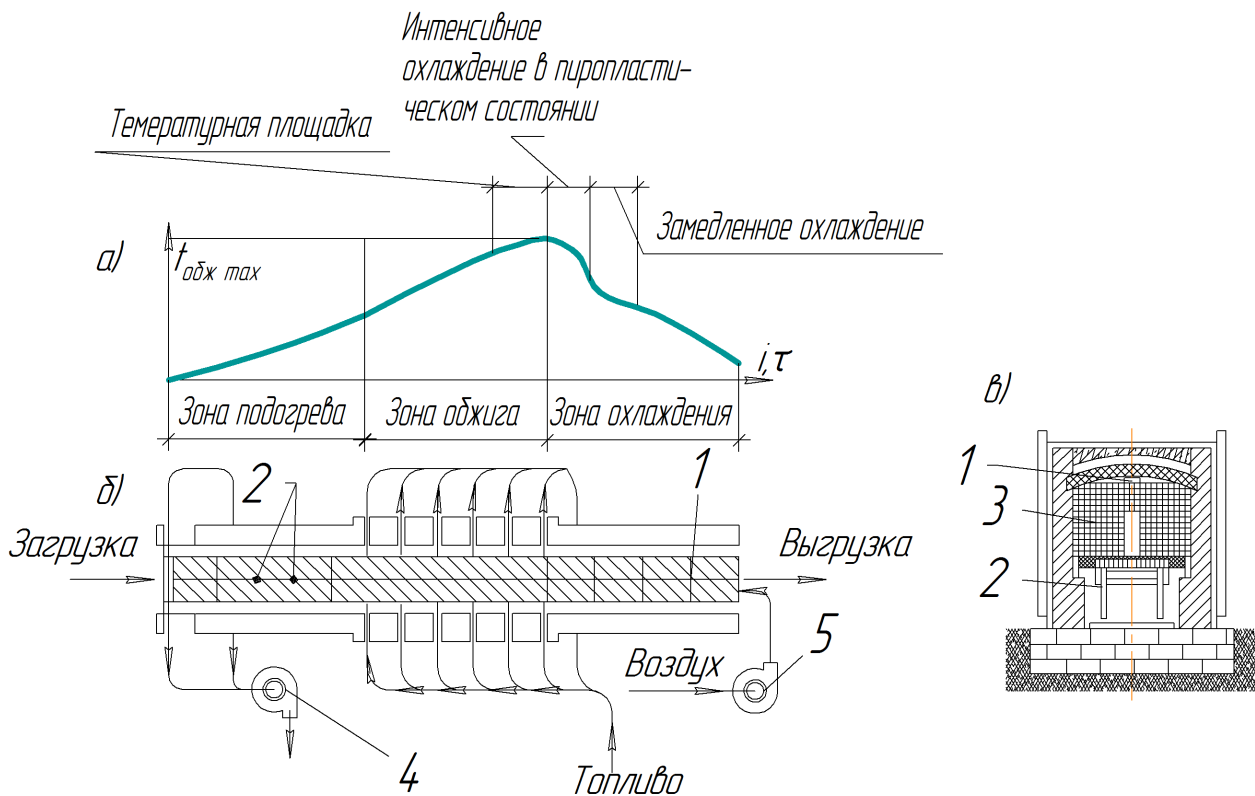


Рис. 1.5. Принципиальная схема туннельной печи:

а - график температуры обжига; б - схема печи; в - поперечный разрез туннеля; 1 – сквозной канал; 2 – вагонетки; 3 – обжигаемые изделия; 4 – дымосос; 5 - вентилятор

Нормально туннель целиком загружен вагонетками. Для загрузки очередной вагонетки ее подают к загрузочному торцу печи и заталкивают в печь механизмом – толкателем. При этом весь поезд вагонеток, находящийся в туннеле, перемещается на длину одной вагонетки и тем самым с другого конца печи выталкивается вагонетка с охлажденными изделиями. Подобное перемещение вагонеток производят непрерывно либо периодически (ритмически). Таким образом, в туннельных печах, в отличие от кольцевых, местоположение тепловых зон стабильно, а обжигаемый материал перемещается относительно этих зон. Взаимодействие обжигаемого материала с дымовыми газами и воздухом происходит по принципу противотока, что обеспечивает возможность достижения высоких температур нагрева. При сохранении основного принципа работы туннельной печи существует много их разновидностей, различающихся формой туннеля (прямолинейный, кольцевой, щелевой, многоканальный), способом перемещения материала в туннеле (вагонеточные, ленточные, роликовые, печи со скользящими подкладками, с шагающим и вращающимся подом), способом теплообмена (открытого огня и муфельные), источником теплоснабжения (пламенные и электрические печи). Весьма разнообразны аэродинамические схемы туннельных печей, т.е. схемы движения в них газов и воздуха. Простейшая — схема с одним дымососом. Более эффективной является схема с принудительным отбором воздуха из зоны

остывания специальным вентилятором, который может передавать горячий воздух в сушилку, к горелкам, либо в зону подогрева. Рециркуляция отработанных газов дает возможность несколько турбулизовать поток в зоне подогрева и снизить его температурное расслоение, а также в известной мере регулировать температурную кривую в этой зоне. Устройство тепловых завес дает возможность аэродинамически отключить зону обжига от смежных зон и создать в ней восстановительную среду, что очень важно для последних стадий обжига. Кроме того, завеса на стыке зон обжига и остывания дает возможность интенсифицировать процесс охлаждения в период пиропластического состояния материала. Более совершенная отопительно-вентиляционная схема приведена на рис.1.6.

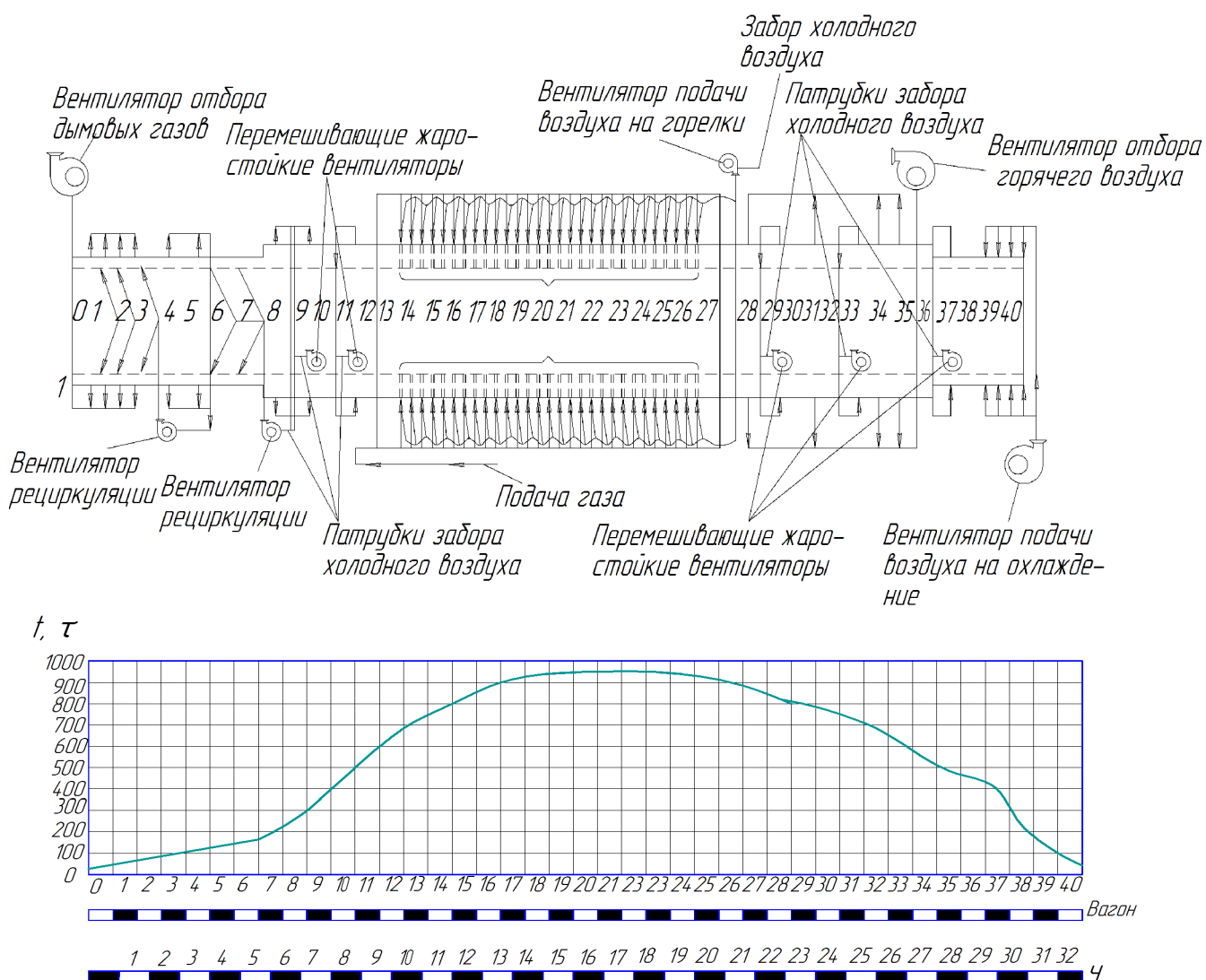


Рис.1.6. Отопительно-вентиляционная схема туннельной печи и температурный режим

Она предусматривает создание отдельных, автономно регулируемых участков в зоне подогрева, обеспечивающих тепловую обработку изделий по заданному режиму и получение окислительно-восстановительной среды в зоне

обжига. Зона подготовки разделена на три автономно регулируемые секции: низкотемпературной рециркуляции, осуществляемой обычными перемешивающими вентиляторами; высокотемпературной рециркуляции, оборудованной перемешивающими жаростойкими вентиляторами, и секцию подогрева пода вагонеток. К форсункам, установленным в конце зоны обжига, подают пар или воду. Зона охлаждения разделена на четыре секции: закала, умеренного, замедленного и интенсивного охлаждения. Подвагонеточный канал оборудован приточно-вытяжной вентиляцией для создания уравновешенного аэродинамического режима с обжигательным каналом. Обжигательный канал туннельных печей имеет довольно большой диапазон размеров, его длина достигает до 208 м, а площадь рабочего сечения, т. е. сечения, в котором размещаются обжигаемые изделия, — от 3 до 9 м². В подавляющем большинстве действующих печей обжигательный канал перекрыт арочным сводом. Однако в последние годы широкое распространение получает перекрытие канала панелями или балками из жаростойкого бетона («плоский свод») (рис.1.7), что упрощает применение пакетной садки и разгрузки кирпича.

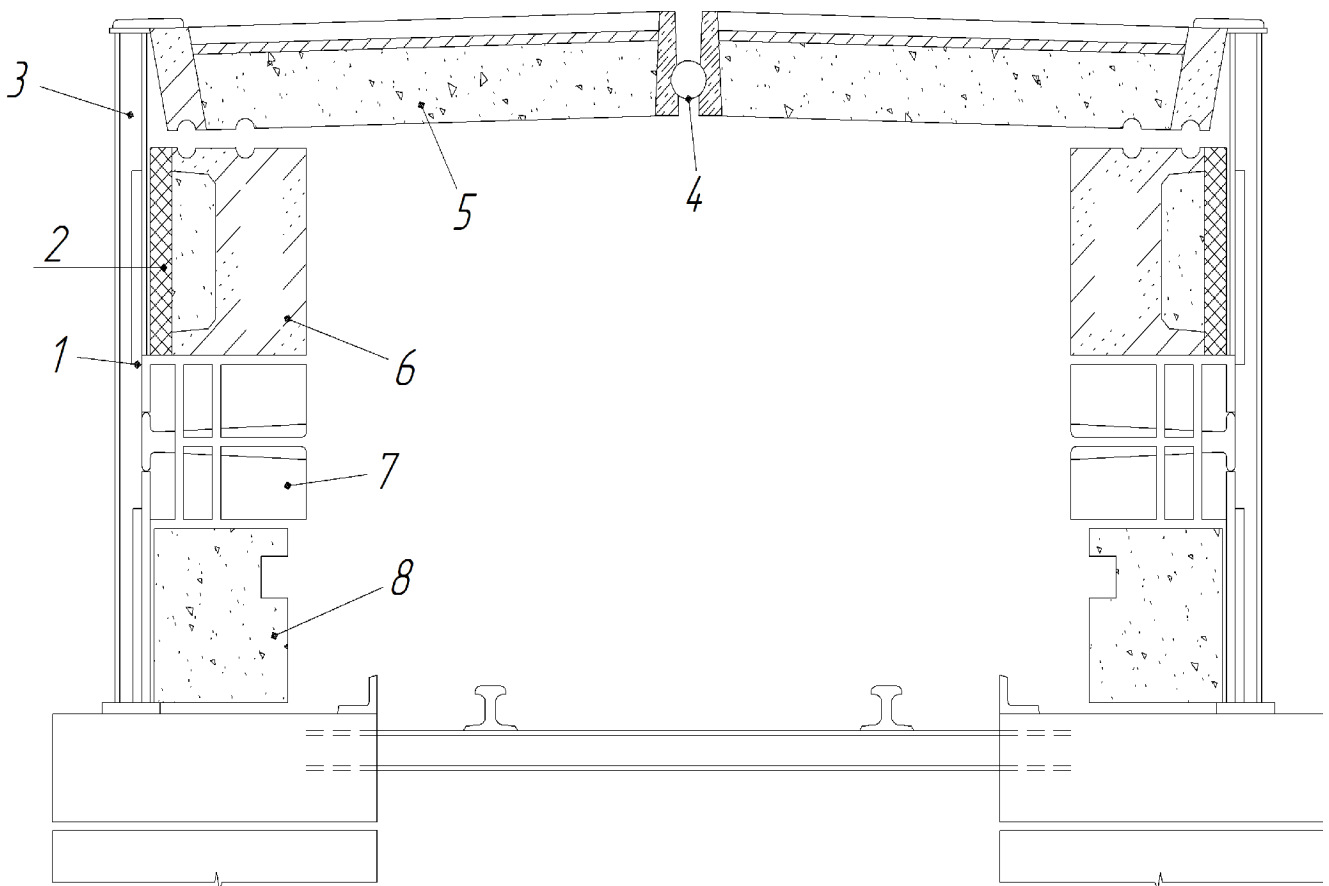


Рис. 1.7. Туннельная печь из жаростойкого бетона для обжига керамических камней и кирпича производительностью 26 млн шт. условного кирпича в год: 1 - асбестоцементный лист; 2 – минераловатные маты; 3 – металлическая стойка; 4 – шарнир из жаростойкого бетона; 5 – панель перекрытия; 6 – стеновой блок; 7 – горелочные камни; 8 – цокольный блок

Стены в действующих печах выполнены составными с футеровкой шамотным кирпичом, а их облицовка (наружный слой) — из обыкновенного керамического кирпича. Однако в настоящее время созданы проекты туннельных печей, в которых весь обжигательный канал выполнен в сборном жаростойком железобетоне (рис.1.7), что способствует возведению печей промышленными методами. Толщина стены должна обеспечивать температуру ее наружной поверхности не выше 50 °С.

Важнейший конструктивный элемент туннельной печи — песочный затвор (рис. 1.8), изобретение которого (XIX в.) предопределило жизнеспособность туннельной печи.

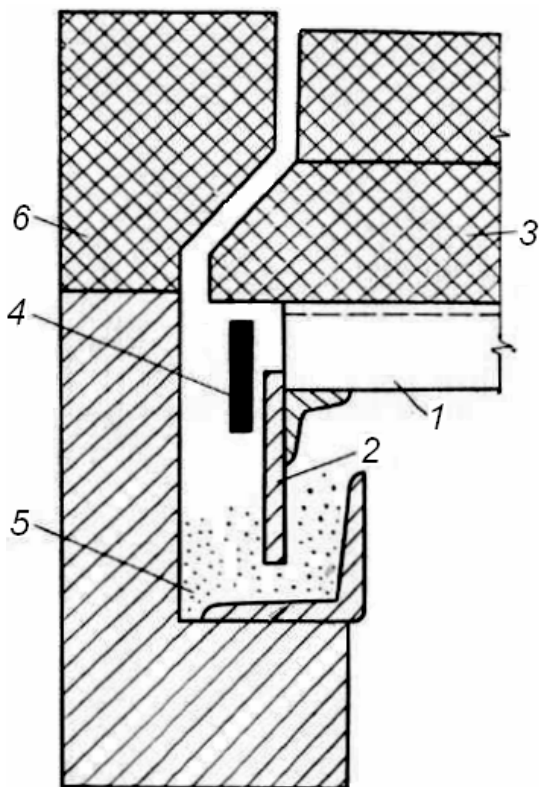


Рис. 1.8. Лабиринт с песочным затвором между стенами печи и вагонетками: 1—рама; 2— нож; 3 — футеровка вагонетки; 4 — защитная обмазка; 5 - засыпка; 6 — футеровка туннеля

Вагонетки туннельных печей футеруют жаростойким бетоном или шамотными камнями для предохранения металлических частей от воздействия высоких температур. Топливосжигающие устройства располагали обычно в боковых стенах печи, но в новых конструкциях с плоским перекрытием их располагают в перекрытии, что упрощает обслуживание печи, дает возможность строить печи большей ширины. Большинство туннельных печей работает на газе или мазуте. В этом случае предпочтительны газомазутные форсунки, обеспечивающие быстрый переход с газа на мазут и наоборот.

Удобны они и тем, что при них наиболее просто достигается восстановительная среда в печном пространстве подачей пара в мазутный канал, если печь работает на газе и наоборот.

При работе на газе эффективны скоростные горелки (рис. 1.9).

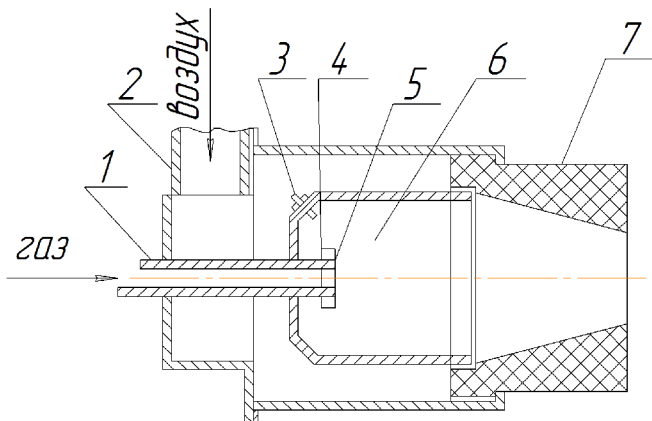


Рис. 1.9. Скоростная газовая горелка: 1 — патрубок для подачи газа; 2 — патрубок для подачи воздуха; 3 — свеча зажигания; 4 — газовое сопло; 5— стабилизатор горения; 6 — камера сгорания; 7 — огнеупорное сопло

Камера сгорания выполнена из жаропрочного металла и представляет собой перфорированный цилиндр. Воздух подводится в камеру сгорания

раздельно, рассредоточенно через перфорированные стенки камеры сгорания. Зажигается газоздушная смесь от свечи зажигания. Устойчивость работы горелки обеспечивается стабилизатором. Для обеспечения больших скоростей продуктов сгорания перфорированный цилиндр соединен с огнеупорным соплом 7. Горелка позволяет работать в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха ($\alpha=0,7—10$) и производительности по природному газу ($V_{г}=0,5—6 \text{ м}^3/\text{ч}$). Обычно максимальная температура металлической поверхности камеры сгорания при любых соотношениях «газ — воздух» не превышает $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сажуют кирпич и керамические камни на вагонетки как вручную, так и с помощью садовых автоматов. Разгрузку обожженного кирпича с вагонеток механизмируют электропогрузчиками, что особенно удобно при пакетной садке, или кранами с грейферными захватами. Для обжига стеновой керамики наибольшее распространение получили туннельные печи трех типоразмеров: длиной 105 и сечением $1,74 \times 1,75 \text{ м}$, длиной 102 м и сечением $3,1 \times 1,7 \text{ м}$ и печь «малютка» длиной 48 и сечением $2 \times 1,9 \text{ м}$. В настоящее время типовой является печь длиной обжигательного канала 120 и шириной 2,9 м. Ее производительность 26 млн. шт. кирпича в год. Но работают и более крупные печи: длиной 143 - 208 м и шириной 3,9 - 4,7 м.

Теплообмен в туннельных печах происходит конвекцией и излучением. Суммарный коэффициент теплоотдачи в продольных каналах садки может быть подсчитан по формуле:

$$a_{\text{прод}} = (0,08(wy)^{0,7} \lambda_{г}) / d^{0,3} (g\mu)^{0,7}, \quad (1.2)$$

где w, y — соответственно скорость газов, м/с, и их плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, в элементарных каналах садки; $\lambda_{г}$, — теплопроводность газов и коэффициент их динамической вязкости; d — приведенный диаметр канала, м; g — ускорение силы тяжести.

Для поперечных поверхностей $a_{\text{попер.}} = 0,5a_{\text{прод}}$. Коэффициент теплоотдачи в туннельной печи возрастает в направлении от загрузочного конца к зоне обжига, составляя на третьем метре 5,2 и на двадцать восьмом метре $35 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Продолжительность обжига изделий стеновой керамики в туннельных печах составляет 36—48 ч, съём с 1 м^3 рабочего пространства печного канала в среднем составляет 3400 шт. в месяц. Удельный расход условного топлива 160—180 $\text{кг}/1000 \text{ шт.}$

Основы расчета туннельных печей. При проектировании туннельной печи, исходя из технологических соображений, выбирают систему садки, а по ней — тип вагонетки. При этом необходимо использовать уже существующие в промышленности серийные типоразмеры печных вагонеток и лишь в случае их неприемлемости для принятой системы садки определять габариты печной вагонетки и поперечного сечения обжигательного канала.

При заданной годовой производительности печи ($\Pi_{Г}$) расчетную часовую производительность ($\Pi_{ч}$) определяют по формуле:

$$\Pi_{ч} = \Pi_{Г} / 24 Z_{р} K_{в}, \quad (1.3)$$

где $Z_{р}$ — число рабочих дней в году; $K_{в}$ — коэффициент использования рабочего времени (обычно принимают $Z_{р} = 350$, $K_{в} = 0,96$).

Требуемую вместимость печи $E_{п}$ подсчитывают по формуле:

$$E_{п} = \Pi_{ч} \tau_{ц} / [1 - (B/100)], \quad (1.4)$$

где $\tau_{ц}$ — длительность цикла; B — отходы обжига, %.

Расчетную длину рабочей части обжигательного канала подсчитывают по формуле:

$$L_{р} = (E_{п} / E_{в}) l_{в} = n_{вр} l_{в}, \quad (1.5)$$

где $E_{в}$ — вместимость вагонетки; $l_{в}$ — габаритная длина вагонетки; $n_{вр}$ — число вагонеток в рабочей части печи.

Если $n_{вр}$ получается дробным, то корректируют соответственно производительность печи или длительность цикла.

Общая длина печи (L) и общее количество вагонеток ($n_{в}$) определяют по формулам:

$$L = L_{р} + n_{вр} l_{в}; \quad n_{в} = n_{вр} + n_{вф}, \quad (1.6)$$

где $n_{вф}$ — число вагонеток в форкамерах.

Интервал времени между двумя загрузками вагонеток ($I_{з}$) составит, мин:

$$I_{з} = 60 \tau_{ц} / n_{вр}. \quad (1.7)$$

По другому методу расчета туннельных печей для обжига кирпича в качестве конструктивной характеристики печи может быть принято отношение длины L печи к гидравлическому диаметру $d_{г}$ поперечного сечения рабочей части ее канала, а в качестве энергетической характеристики $n_{з}$ — отношение полезно использованной теплоты к химической теплоте топлива:

$$X_{к} = L / d_{г}, \quad (1.8)$$

У печей с $X_{к} = 60$ $n_{з} = 65—75$ %, а у печей с $X_{к} = 26$ $n_{з} = 25—35$ %. Это предопределяет современные тенденции строительства длинных печей.

С увеличением значения $X_{к}$ уменьшается также температурный перепад по сечению печи. Рабочая скорость газов в живом сечении печи составляет 4 м/с.

Для нахождения оптимальных размеров печи может быть использована номограмма (рис. 1.10). Порядок расчета по ней следующий. Годовая производительность печи N в млн шт. условного кирпича является заданной.

Опытным путем определяют длительность цикла $\tau_{ц}$, обеспечивающую получение качественных изделий. Выбирают или разрабатывают систему садки и по ее размерному эскизу подсчитывают плотность P и живое сечение садки $f_{ж}$, пользуясь статической зависимостью,

$$f_{ж} = 90,4 - 0,23P. \quad (1.9)$$

На ординате $f_{ж}$ отмечают точку 1, а пересечение этой ординаты с соответствующей кривой $\tau_{ц}$ дает возможность получить точку 2, пересечение этой ординаты $f_{ж}$ с кривой заданной производительности N печи — точку 3. Абсцисса точки 2 (точка 4) определяет рациональную длину печи, а абсцисса точки 3 (точка 5) — площадь поперечного сечения рабочей части канала. Номограмма составлена с условием обеспечения действительной скорости газов в зоне подогрева 6 м/с.

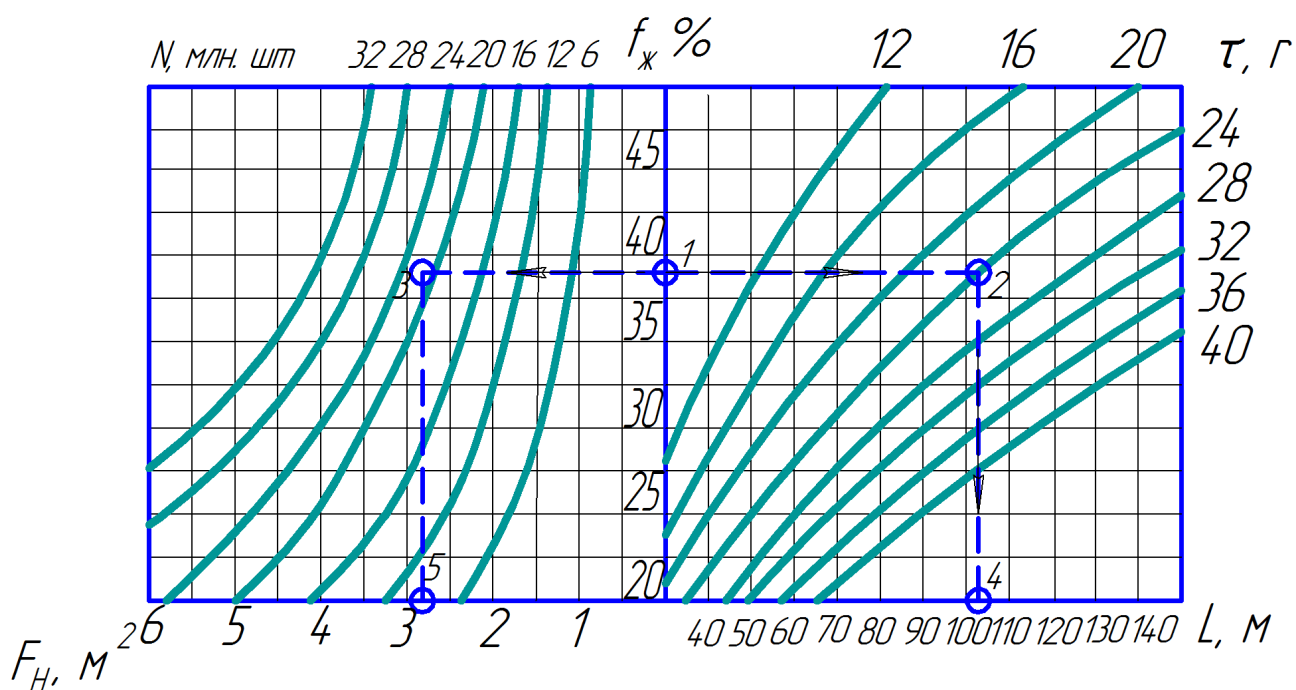


Рис. 1.10. Номограмма расчёта размеров туннельной печи для обжига изделий стеновой керамики

Щелевые печи. Щелевыми называют обычно печи, у которых ширина рабочего канала в несколько раз больше его высоты. Их применяют для однорядного обжига изделий. Они легко вписываются в качестве обжигового звена в состав автоматизированных поточных линий.

При описании туннельных печей было рассмотрено тепловое оборудование, которое принято называть печами нормального сечения или штабельного обжига. Их особенность — размещение изделий в несколько рядов по высоте и ширине печи, что и характеризует понятие штабеля.

Однако практика промышленной эксплуатации туннельных печей показала, что при индивидуальном или однорядном обжиге можно обжечь изделия в 30—40 раз быстрее, нежели при штабельной садке.

Качество продукции при обжиге единичного изделия всегда выше вследствие большой однородности температурных полей. При однорядном обжиге изделий отпадает необходимость в больших усложнениях отопительно-вентиляционной схемы печи, имеющих целью снизить неравномерность обжига, так как в этом случае температурное поле печи становится практически однородным. Автоматизация процессов загрузки сырца в печь и выгрузки обожженных изделий из печи для щелевых печей решается предельно простыми механизмами, что обеспечивает их безотказную работу.

Недостатком штабельного обжига является сложность садовых автоматов. В сочетании с резким сокращением длительности цикла однорядный обжиг дает возможность включать щелевые печи в автоматизированные поточные линии по производству различных видов керамических изделий.

Из вышесказанного следует, что щелевые печи являются наиболее перспективным тепловым оборудованием для производства керамических изделий.

Конструктивно щелевая печь (рис. 1.11) представляет собой канал, образуемый кирпичной кладкой, которая, в свою очередь, заключена в металлический кожух.

Внутри канала размещено транспортирующее устройство — роликовый или ленточно-сетчатый конвейер, на который обжигаемые плитки укладывают в один ряд по высоте. Обогрев двусторонний — сверху и снизу вмонтированными в стенах канала горелками. Современные конструкции щелевых печей — секционные. Длина секции обычно 3 м, длина всего канала до 60 м, ширина в свету до 1,3 м. Ролики приводные из жаростойких стальных или высокоглиноземистых труб диаметром 25—36 мм с толщиной стенки 2—5 мм.

По длине рабочий канал печи разделен на три технологические зоны — подогрева, обжига и охлаждения, отделенные друг от друга порогами. Кроме того, два порога размещены в зоне охлаждения и делят ее на три участка. Пороги размещены над и под роликовыми конвейерами и образуют небольшую щель для прохода плиток. Отработанные газы и нагретый воздух удаляют через несколько отверстий: в начале печи, в середине зоны подогрева или в начале зоны обжига и в каждом участке зоны охлаждения. Длина вентилируемого участка — не более 8—10 м от места отбора газов. Каждый вентилируемый участок имеет автономную систему удаления газов или воздуха, что обеспечивает высокую степень управляемости температурным режимом печи. Вентилируется также надсводное (подкожуховое) пространство через вытяжной коллектор, соединенный несколькими ответвлениями с вентилируемым пространством каждой секции. Газоразводка выполняется закольцованными участками — коллекторами, на одну или несколько секций.

В настоящее время созданы и эксплуатируются роликовые печи производительностью 0,8 и 1 млн м² плиток в год. Щелевые печи бывают одно- и двухъярусными. Печи с ленточно-сетчатыми конвейерами применяют преимущественно для обжига плиток малых размеров — максимально 120×65 мм. Сетчатые конвейеры выполняют из жаростойкой сетки. Скорость

конвейера 0,5—0,8 м/мин. Созданы два типоразмера печей с ленточно-сетчатыми конвейерами производительностью 100 и 300 тыс. м² плиток в год.

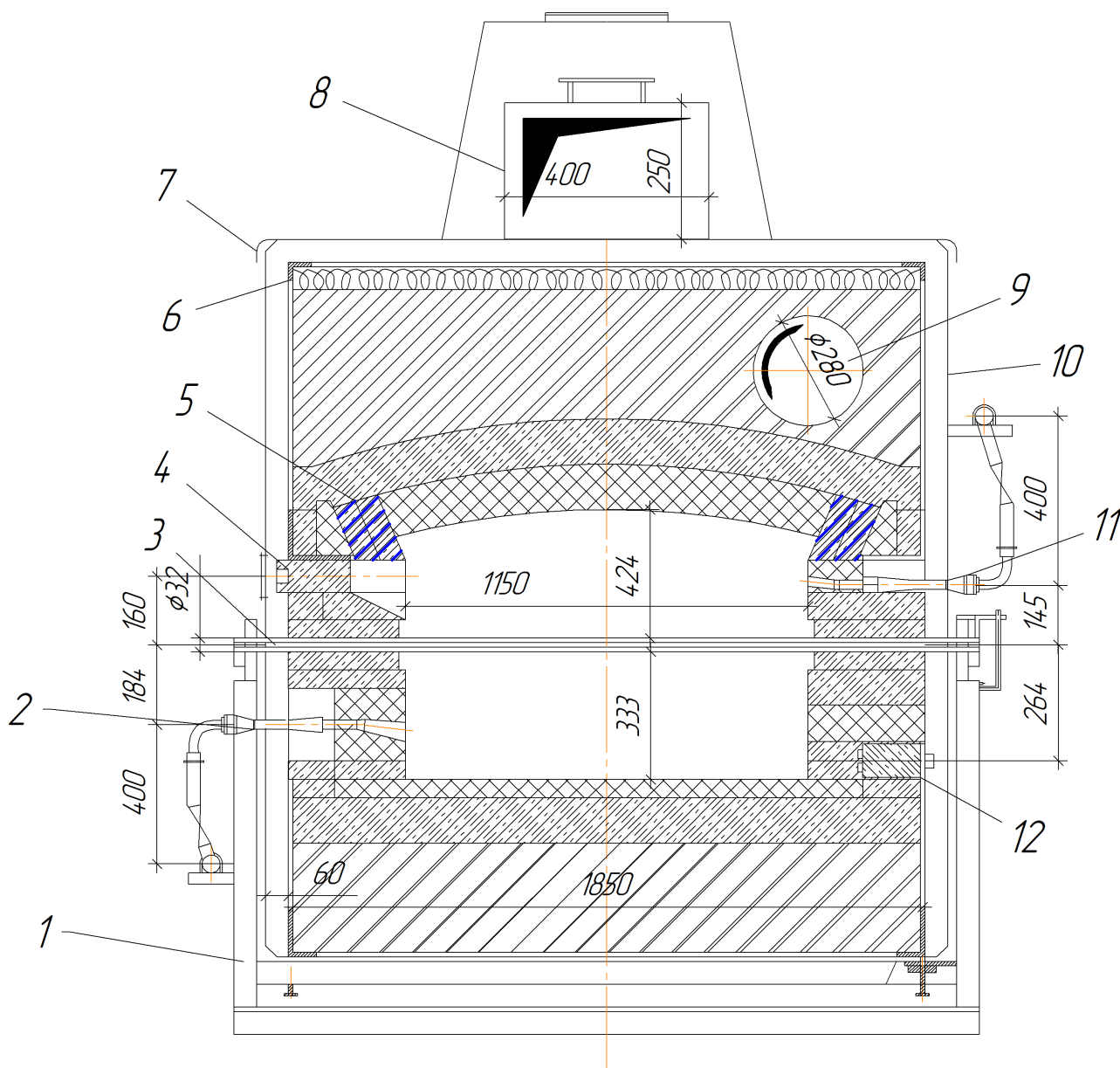


Рис. 1.11. Поперечное сечение щелевой печи: 1— рама роликового конвейера; 2 — нижняя горелка; 3 — транспортирующий ролик; 4 — смотровое отверстие; 5 — футеровка; 6 — корпус; 7 — верхнее укрытие; 8 — вентиляционный коллектор; 9 — газоход; 10 — экран; 11 — верхняя горелка; 12 — люк для очистки пода

Пример отопительно-вентиляционной схемы щелевой печи показан на рис. 1.12. Режим обжига ступенчатый и рассчитывается из условий допустимых скоростей нагрева на каждом участке температурной кривой.

В печь плитка поступает автоматически с влажностью не выше 0,2 %, поэтому начальная температура в печи составляет 400°C. На отдельных ее участках скорости нагрева и охлаждения изменяются от 45 до 90°C/мин. В зависимости от состава сырьевой смеси, назначения плиток и их толщины продолжительность обжига изменяется от 42 до 100 мин. Для обеспечения

кондиционного качества плиток газовая среда должна быть обязательно окислительной. При этом достигается коэффициент избытка воздуха 1,2—1,4.

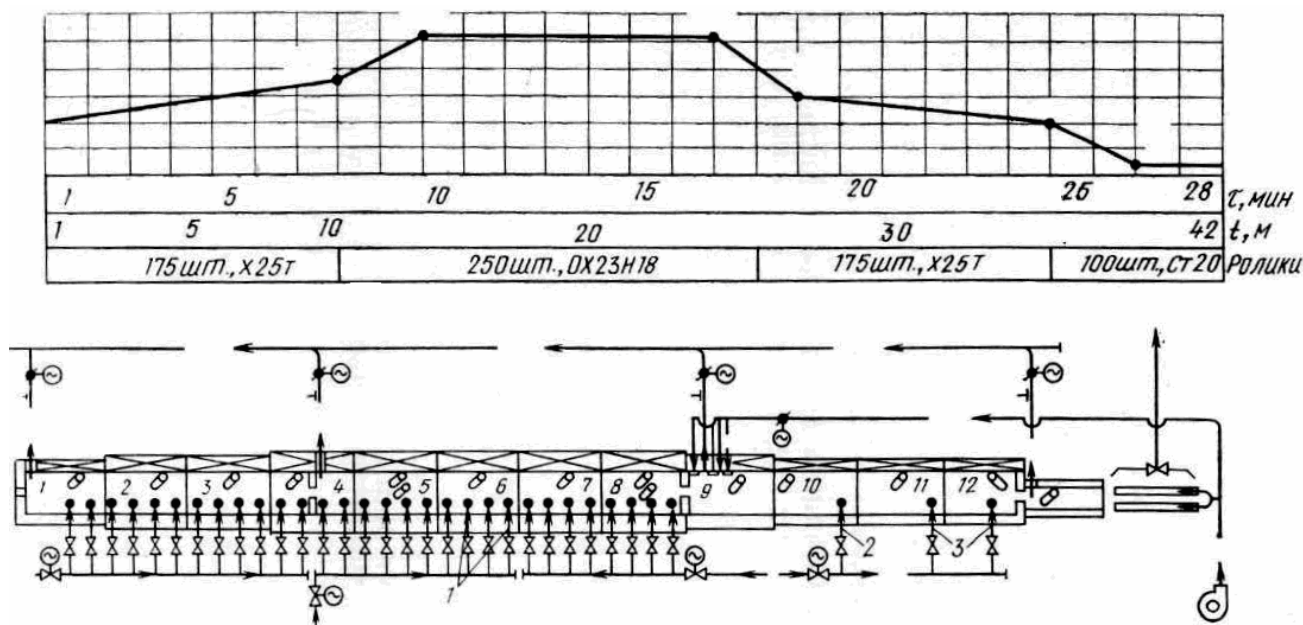


Рис. 1.12. Принципиальная отопительно-вентиляционная схема щелевой печи
1-3 – горелки (1-12 – номера секций)

Удельный расход условного топлива составляет при обжиге облицовочных глазурованных плиток 2,7, плиток для полов — 2,8, литых плиток — 3,5 кг/м². При расчете щелевых печей принимают 345 эксплуатационных дней в году. С учетом плановых и аварийных остановок годовой фонд машинного времени составляет: $\Phi_{\text{вм}} = 660—6980$ ч. Часовую производительность линии определяют по формуле, шт./ч:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi_{\text{г}} / \Phi_{\text{вм}}, \quad (1.10)$$

где $\Pi_{\text{г}}$ — заданная годовая производительность линии, м²/год.

Коэффициент выхода годной продукции принимают $n_{\text{г.п.}} = 0,92—0,96$.

Число прессуемых плиток (загружаемых в линию), шт./год:

$$\Pi_{\text{г}} = \Pi_{\text{ч}} / n_{\text{г.п.}} \quad (1.11)$$

Скорость движения конвейера, м/мин:

$$w = \Pi_{\text{г}} L / 60nlb, \quad (1.12)$$

где L — шаг плиток по длине конвейера, м; n — число плиток по ширине конвейера; l, b — соответственно длина и ширина готовой плитки.

При отоплении мазутом щелевые печи выполняют муфельными. Особенность муфельной печи — отсутствие прямого контакта печных газов с обжигаемым материалом. В муфельных печах продукты горения, поступая в муфельное пространство, накаляют стенки муфеля, которые излучением передают теплоту обжигаемому материалу. Доля теплопередачи за счет конвекции воздуха внутри рабочего канала незначительна. Муфельные печи в тепловом отношении менее экономичны, но обеспечивают более высокое качество глазурной поверхности. Созданы также щелевые печи с электрическим обогревом. В основном их применяют при отсутствии природного газа и мазута в районе расположения завода.

Глава 2. Технологический расчёт туннельной печи

2.1. Расчет химического состава шихты и готовых изделий

Примем химический состав шихты (табл.2.1) для производства керамического кирпича

Таблица 2.1

Химический состав шихты (непрокаленное состояние)

Материал	Содержание оксидов, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	п.п.п.	Σ
Состав шихты (непрокаленное состояние)	70,02	13,81	0,99	4,15	1,11	1,19	0,18	0,69	0,06	6,05	98,26

Химический состав изделий рассчитаем по их шихтовому составу, зная химический состав сырья, входящего в шихту.

Химический состав готовых изделий находят путем умножения содержания каждого оксида массы на коэффициент К, равный:

$$K = \left(\frac{100}{100 - \text{п.п.п.}} \right),$$

где п.п.п. - потери при прокаливании шихты, %.

$$K = \left(\frac{100}{100 - 6,05} \right) = 1,06,$$

Для SiO₂: 70,02 · 1,06 = 74,53 мас. % и т.д.

Таблица 2.2

Химический состав шихты (прокаленное состояние)

Материал	Содержание оксидов, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	п.п.п.	Σ
Состав готовых изделий (прокаленное состояние)	74,53	14,69	1,05	4,42	1,19	1,27	0,20	0,73	0,07	–	98,14

2.2. Расчет производительности туннельной печи

Исходные данные

Длина печи, L_1 , м	120 (116 м – рабочие позиции)
Число вагонеток, n , шт.	42 (41 ваг. – печь + 1 ваг. форкамера)
Длина вагонетки, l_B , м	2,8
Ширина вагонетки, b_B , м	2,5
Общая высота печи, H , мм	3150
Полезная высота печи, h , мм	2150
Брак при обжиге, k , %	2
Масса обожженного условного кирпича, m , кг	2,3
Влажность сырца, поступающего в печь, W , %	1,5
Размеры кирпича:	
длина, a , мм	250
ширина, b , мм	120
толщина, c , мм	65
Ёмкость печной вагонетки, G_1 , усл. шт.	2915
Длительность обжига, τ , ч	50

Определим часовую производительность печи по формуле:

$$P_{\text{ч}} = \frac{G_1 \cdot m \cdot L_1}{\tau \cdot l_B},$$

где G_1 – ёмкость одной вагонетки, т; L_1 – длина печи, м; l_B – длина вагонетки, м; τ – длительность обжига, ч.

$$P_{\text{ч}} = \frac{2915 \cdot 2,3 \cdot 120}{50 \cdot 2,8} = 5746,71 \text{ кг/ч.}$$

Определим скорость движения вагонетки:

$$v = \frac{P_{\text{ч}}}{G_1 \cdot m} = \frac{5746,71}{2915 \cdot 2,3} = 0,857 \text{ ваг./ч.}$$

Время выталкивания вагонетки из печи:

$$\tau_B = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,857} = 70 \text{ мин. .}$$

Определим плотность садки:

$$g = \frac{E_{\text{печи}}}{V_{\text{печи}}},$$

где $E_{\text{печи}}$ – ёмкость печи, т; $V_{\text{печи}}$ – объем печи, м^3 .

$$E_{\text{печи}} = G_1 \cdot n$$

где n – количество вагонеток.

$$E_{\text{печи}} = 2915 \cdot 2,3 \cdot 42 = 281589 \text{ кг,}$$

$$V_{\text{печи}} = L_1 h b_{\text{в}},$$

где L_1 – длина печи, м; h – полезная высота печи, м; $b_{\text{в}}$ – ширина вагонетки, м.

$$g = \frac{281589}{120 \cdot 2,15 \cdot 2,5} = 436,57 \text{ кг/м}^3.$$

Годовая производительность печи:

$$P_{\text{г}} = P_{\text{час}} z_{\text{ч}} \frac{100 - k}{100} K_{\text{в}} \text{ т/г},$$

где $K_{\text{в}} = 0,98$ – коэффициент использования рабочего времени;
 k – процент брака при обжиге.

Число рабочих дней в году $z_{\text{г}} = 355$ дней.

Число часов работы печи в год:

$$z_{\text{ч}} = 355 \cdot 24 = 8520 \text{ ч},$$

$$P_{\text{г}} = 5746,71 \cdot 8520 \frac{100 - 2}{100} \cdot 0,98 = 47023,11 \text{ т/год}.$$

Удельная производительность:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ч}}}{S_{\text{н}}},$$

где $S_{\text{н}}$ – площадь пода, м^2 ;

$$S_{\text{н}} = L_1 b_{\text{в}} = 120 \cdot 2,5 = 300 \text{ м}^2;$$

$$P_{\text{уд}} = \frac{5746,71}{300} = 19,15 \text{ кг/(м}^2 \text{ ч)}.$$

2.3. Расчет материального баланса процесса обжига

Рассчитываем массу обожженного кирпича с учетом брака при обжиге:

$$P = P_{\text{ч}} \frac{100}{100 - k} = \frac{5746,71 \cdot 100}{100 - 2} = 5863,99 \text{ кг/ч}.$$

Брак при обжиге составит:

$$P - P_{\text{ч}} = 5863,99 - 5746,71 = 117,30 \text{ кг/ч}.$$

Определим массу обожженных изделий с учетом потерь при прокаливании:

$$P_{\text{с}} = P \cdot \frac{100}{100 - \text{п.п.п}} = \frac{5863,99 \cdot 100}{100 - 6,05} = 6241,61 \text{ кг/ч}.$$

Потери при прокаливании составляют:

$$P_{\text{с}} - P = 6241,61 - 5863,99 = 377,62 \text{ кг/ч}.$$

Масса обожженных изделий с учетом остаточной влажности сырца:

$$P_{\text{вл}} = P_c \frac{100}{100 - W} = \frac{6241,61 \cdot 100}{100 - 1,5} = 6336,66 \text{ кг/ч.}$$

Количество испаряемой влаги составит:

$$P_w = P_{\text{вл}} - P_c = 6336,66 - 6241,61 = 95,05 \text{ кг/ч.}$$

Таблица материального баланса процесса обжига приведена в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Материальный баланс процесса обжига

Приход	кг/ч	%	Расход	кг/ч	%
Масса сырца с влажностью W=1,5%	6336,66	100,00	Масса обожженного кирпича	5746,71	90,69
			Брак при обжиге	117,30	1,85
			Потери при прокаливании	377,62	5,96
			Испаряемая из сырца влага	95,05	1,50
			Невязка	0,02	0,00
Итого	6336,66	100,00	Итого	6336,66	100,00

Глава 3. Теплотехнический расчет

3.1. Горение топлива

Расчет горения топлива проводим с целью определения необходимого для горения топлива расхода воздуха, выхода продуктов горения и их процентного содержания.

В качестве топлива применяем природный газ Ставропольского месторождения следующего состава (табл.3.1.):

Таблица 3.1

Состав сухого газа, об.%					
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂	Σ
98,0	0,3	0,1	0,3	1,2	99,9

Плотность природного газа $\rho_r = 0,683 \text{ кг/м}^3$.

Принимаем содержание влаги в газе 0,9 %. Пересчитываем состав сухого газа на влажный рабочий газ.

Пересчет ведем по формуле:

$$CH_4^p = CH_4^c \frac{100 - W^p}{100} = 98,0 \frac{100 - 0,9}{100} = 97 \%$$

Аналогично рассчитываем остальные составляющие топлива, и полученные данные сводим в табл. 3.2

Таблица 3.2

Состав влажного (рабочего) газа, об.%						
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂	W	Σ
97,0	0,297	0,099	0,099	1,189	1,5	99,99

Теплота сгорания газообразного топлива определяется как сумма произведений тепловых эффектов горения составляющих газа на их количество, выраженное в объемных процентах по формуле Д.И. Менделеева.

$$Q_H^p = 0,01(Q_{CH_4} \cdot CH_4 + Q_{C_2H_6} \cdot C_2H_6 + Q_{C_3H_8} \cdot C_3H_8) \text{ кДж/м}^3,$$

где Q_{CH_4} , $Q_{C_2H_6}$, $Q_{C_3H_8}$, $Q_{C_4H_{10}}$ - теплота сгорания углеводородов, кДж/м³;

CH₄, C₂H₆, C₃H₈ - процентное содержание в топливе, %;

$$Q_H^p = 0,01(358,2 \cdot 97 + 637,5 \cdot 0,297 + 912,50 \cdot 0,099) = 35025,08 \text{ кДж/м}^3.$$

Определим коэффициент расхода воздуха:

$$\alpha = \frac{Q_H^p + t_T C_T}{V_0 t_k C_{дг} - L_0 C_B t_B},$$

где t_T - температура топлива, °С;

C_T - объемная теплоемкость топлива, кДж/(м³·°С);

V_0 - общий объем дымовых газов, $\frac{M^3}{M^3}$;

t_k - калориметрическая температура горения, °С;

$C_{дг}$ - объемная теплоемкость дымовых газов, кДж/(м³·°С);

C_B - объемная теплоемкость воздуха, поступающего на горение, кДж/(м³·°С);

t_B - температура воздуха, поступающего на горение, °С

Принимаем $t_T = 20$ °С.

Объемная теплоемкость газообразного топлива, кДж/(м³·°С):

$$C_T = \frac{\sum C_i \cdot A_i}{100},$$

где C_i - объемная теплоемкость составляющих топлива, кДж/(м³·°С) при температуре $t_T = 20$ °С;

A_i - содержание составляющих топлива, выраженное в объемных процентах, об. %.

Теплоемкость газов в зависимости от температуры представлена в табл.3.3

Таблица 3.3

Теплоемкость газов, кДж/(м ³ °С)					
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	N ₂	W
1,5684	1,8738	1,6429	1,6199	1,2950	1,4983

$$C_T = \frac{1,5684 \cdot 97 + 1,8738 \cdot 0,297 + 1,6429 \cdot 0,099 + 1,6199 \cdot 0,099 + 1,2950 \cdot 1,189 + 1,4983 \cdot 0,9}{100} = 1,559 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{С}}$$

Теоретически необходимый для горения расход сухого воздуха, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$:

$$L_0 = 0,0476(2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8) = 0,0476(2 \cdot 97 + 3,5 \cdot 0,297 + 5 \cdot 0,099) = 9,3074 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Расход атмосферного воздуха при влагосодержании d , г/кг сухого воздуха, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$.

Принимаем $d = 10$ г/кг:

$$L'_0 = (1 + 0,0016d)L_0 = (1 + 0,0016 \cdot 10)9,3074 = 9,4564 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Общий объем дымовых газов при сжигании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, т.е. при $\alpha = 1$, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$;

$$V_0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}$$

Объем отдельных составляющих продуктов горения газообразного топлива подсчитываем по формулам:

$\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{C}_3\text{H}_8$ - процентное содержание в топливе, %.

Продукты горения

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \left(\sum m C_m H_n + \text{CO}_2 \right) \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3},$$

где CO_2 – процентное содержание CO_2 в топливе, %;

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + \text{H}_2\text{O} + 0,16 d L_0 \right) \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3},$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 (\text{N}_2 + 79 L_0) \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3},$$

где N_2 – процентное содержание N_2 в топливе, %;

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(97 + 2 \cdot 0,297 + 3 \cdot 0,099 + 0,099) = 0,9799 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(2 \cdot 97 + 3 \cdot 0,297 + 4 \cdot 0,099 + 0,9 + 0,16 \cdot 10 \cdot 9,3074) = 2,1108 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01(0,726 + 79 \cdot 9,3074) = 7,3644 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3};$$

$$V_0 = 0,9799 + 2,1108 + 7,3644 = 10,4551 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$$

Необходимая теплота подогрева воздуха, кДж/м^3 :

$$i_{\text{под}} = \frac{i_d V_0}{\eta_{\text{п}}} - Q_{\text{н}}^{\text{р}}$$

где i_d – тепло продуктов сгорания топлива для заданной действительной температуры t_d ,

$\eta_{\text{п}}$ – пирометрический коэффициент полезного действия процесса горения, учитывающий практическое значение тепловых потерь факелом при заданных условиях сжигания топлива. Принимаем $\eta_{\text{п}} = 0,8\%$.

По $i - t$ диаграмме определим $i_d = 1600 \text{ кДж/м}^3$.

$$i_{\text{под}} = \frac{1600 \cdot 10,4551}{0,8} - 35025,075 = -14114,871 \text{ кДж/м}^3.$$

Так как значение $i_{\text{под}}$ имеет отрицательный знак, то подогрева воздуха не требуется.

Если не требуется подогрева воздуха, то примем температуру воздуха $t_b = 20^\circ\text{C}$.

Для этой температуры теплоемкость воздуха равна $C_b = 1,29 \text{ кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$
Калориметрическая температура горения топлива, $^\circ\text{C}$.

$$t_k = \frac{t_d}{\eta_{\text{п}}},$$

где t_d - действительная температура горения, т.е. температура обжига изделий в печи, $^\circ\text{C}$, в нашем случае $t_d = 1040^\circ\text{C}$.

$$t_k = \frac{1040}{0,8} = 1300^\circ\text{C}.$$

Теплоемкость дымовых газов, $\text{кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$:

$$C_{\text{дг}} = \frac{C_{\text{N}_2} \cdot \text{N}_2 + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{H}_2\text{O} + C_{\text{CO}_2} \cdot \text{CO}_2}{100},$$

где C_{N_2} , $C_{\text{H}_2\text{O}}$, C_{CO_2} - теплоемкость составляющих дымовых газов, $\text{кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$, при температуре t_k ;

N_2 , H_2O , CO_2 – содержание составляющих дымовых газов, %.

Теплоемкость составляющих дымовых газов при температуре $t_k = 1300^\circ\text{C}$, $\text{кДж/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$:

$$C_{\text{N}_2}^{1300} = 1,4253,$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}}^{1300} = 1,8029,$$

$$C_{\text{CO}_2}^{1300} = 2,2899.$$

Процентный состав продуктов горения, %:

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{пр}}} 100,$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{пр}}} 100,$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{пр}}} 100,$$

$$CO_2 = \frac{0,996}{10,4551} 100 = 9,3 ,$$

$$H_2O = \frac{2,137}{10,4551} 100 = 20,19 ,$$

$$N_2 = \frac{7,46}{10,4551} 100 = 70,44 .$$

Подставляя значения в выражение для теплоемкости дымовых газов, получим:

$$C_{дг} = \frac{1,4253 \cdot 70,44 + 1,8029 \cdot 20,19 + 2,2899 \cdot 9,3}{100} = 1,2972 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Определим коэффициент расхода воздуха:

$$\alpha = \frac{35025,08 + 20 \cdot 1,559}{10,4551 \cdot 1300 \cdot 1,2972 - 9,3074 \cdot 20 \cdot 1,29} = 2,0157 .$$

Действительный расход атмосферного воздуха с учетом коэффициента расхода воздуха, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$:

$$L_\alpha = \alpha L_0 = 2,0157 \cdot 9,3074 = 18,76 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} ,$$

$$L'_\alpha = (1 + 0,0016d) L_\alpha = (1 + 0,0016 \cdot 10) 18,76 = 19,06 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} .$$

Общий объем дымовых газов при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 2,0157, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$:

$$V_0^\alpha = V_{CO_2}^\alpha + V_{H_2O}^\alpha + V_{N_2}^\alpha + V_{O_2}^\alpha .$$

Объем отдельных составляющих продуктов горения при $\alpha = 2,0157, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$:

$$V_{CO_2} = V_{CO_2}^\alpha ,$$

$$V_{H_2O}^\alpha = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2O + 0,16 d L_0 \right) ,$$

$$V_{N_2}^\alpha = 0,01 (N_2 + 79 \cdot L_\alpha) ,$$

где N_2 – процентное содержание N_2 в топливе, %;

$$V_{O_2}^\alpha = 0,21 (\alpha - 1) L_0 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} ,$$

$$V_{\text{CO}_2}^\alpha = 0,9799 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^\alpha = 0,01 (2 \cdot 0,97 + 3 \cdot 0,297 + 4 \cdot 0,099 + 0,9 + 0,16 \cdot 10 \cdot 18,7611) = 2,26 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3};$$

$$V_{\text{N}_2}^\alpha = 0,01 (1,189 + 79 \cdot 18,7611) = 14,83, \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3};$$

$$V_{\text{O}_2}^\alpha = 0,21 (2,0157 - 1) \cdot 9,3074 = 1,99 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3};$$

$$V_0^\alpha = 0,98 + 2,26 + 14,83 + 1,99 = 20,06 \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}.$$

Материальный баланс процесса горения газа на 100 м³ сведем в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Материальный баланс процесса горения газа на 100 м³

Приход	кг	%	Расход	кг	%
Природный газ:			Продукты гор.:		
CH ₄ =CH ₄ ^P · ρ _{CH₄}	69,55	3,31	CO ₂ =V _{CO₂} · 100 · ρ _{CO₂}	196,91	9,37
C ₂ H ₆ =C ₂ H ₆ ^P · ρ _{C₂H₆}	1,19	0,06	N ₂ =V _{N₂} · 100 · ρ _{N₂}	1539,98	73,31
C ₃ H ₈ =C ₃ H ₈ ^P · ρ _{C₃H₈}	0,53	0,03	H ₂ O=V _{H₂O} · 100 · ρ _{H₂O}	179,69	8,55
CO ₂ =CO ₂ ^P · ρ _{CO₂}	0,11	0,01	O ₂ =V _{O₂} · 100 · ρ _{O₂}	184,06	8,76
N ₂ =N ₂ ^P · ρ _{N₂}	0,91	0,04	Невязка	-0,81	-0,04
H ₂ O=H ₂ O · ρ _{H₂O}	0,72	0,03			
Воздух:					
N ₂ =L _α · 100 · 0,79 ρ _{N₂}	1539,36	73,31			
O ₂ =L _α · 100 · 0,21 ρ _{O₂}	467,42	22,26			
H ₂ O=0,16 d · L _α ρ _{H₂O}	20,04	0,95			
Итого:	2099,83	100,00	Итого:	2099,83	100,00

Определяем невязку:

$$\frac{2099,83 - 2100,64}{2099,83} 100 = |0,038|\%.$$

Произведем проверку по i – t диаграмме.

Рассчитываем температуру горения следующим образом. Вначале определим общую энтальпию продуктов сгорания, кДж/м³:

$$i_{\text{общ}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}{V_0^\alpha} + \frac{C_{\text{T}} t_{\text{T}}}{V_0^\alpha} + \frac{C_{\text{B}} t_{\text{B}} L_{\alpha}}{V_0^\alpha};$$

$$i_{\text{общ}} = \frac{35025,08}{20,06} + \frac{1,559 \cdot 20}{20,06} + \frac{1,29 \cdot 20 \cdot 18,76}{20,06} = 1771,66 .$$

Теплосодержание (энтальпия) с учетом потерь, кДж/м³ :

$$i'_{\text{общ}} = i_{\text{общ}} \cdot \eta_{\text{п}} = 1771,66 \cdot 0,8 = 1417,34 .$$

Действительную температуру находим по $i - t$ диаграмме:

$$t_{\text{к}} = 1300 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t = t_{\text{к}} \eta_{\text{п}} = 1300 \cdot 0,8 = 1040 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3.2. Расчет эффективной теплоемкости керамических материалов

Примем, что керамический кирпич после сушки поступает в печь из цеха с температурой $t_{\text{н}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $W_0 = 1,5 \%$.

Рассчитываем теплоемкость оксидов (табл. 3.5) при $t_{\text{н}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, содержащихся в обожженном кирпиче.

Таблица 3.5

Удельная теплоемкость оксидов при $t_{\text{н}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Оксиды	C , кДж/(кг·К)	Значение
SiO ₂ (β-кварц)	$C_{\beta\text{-SiO}_2} = 0,783 + 0,000572 (t+273)$	0,951
Al ₂ O ₃	$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1,126 + 0,000126 (t+273)$	1,163
TiO ₂	$C_{\text{TiO}_2} = 0,942 + 0,000015 (t+273)$	0,946
Fe ₂ O ₃	$C_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 0,616 + 0,000488 (t+273)$	0,759
CaO	$C_{\text{CaO}} = 0,872 + 0,000081 (t+273)$	0,896
MgO	$C_{\text{MgO}} = 1,016 + 0,000182 (t+273)$	1,069
K ₂ O	$C_{\text{K}_2\text{O}} = 0,766 + 0,000444 (t+273)$	0,896
Na ₂ O	$C_{\text{Na}_2\text{O}} = 1,040 + 0,000365 (t+273)$	1,147

Рассчитываем теплоемкость изделия после сушки, кДж/(кг·К):

$$C_{\text{с}} = \frac{0,951 \cdot 74,53 + 1,163 \cdot 14,69 + 0,946 \cdot 1,05 + 0,759 \cdot 4,42 + 0,896 \cdot 1,19}{100} + \frac{1,069 \cdot 1,27 + 0,896 \cdot 0,73 + 1,147 \cdot 0,2}{100} = 0,956 \text{ кДж / (кг · К) .}$$

Расчет теплоемкости необожженных изделий, поступающих в печь при температуре $t_{\text{н}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ с учетом остаточной влажности сырца после сушки, производим по формуле:

$$C_{\text{н}} = \frac{C_{\text{с}} (100 - W_0)}{100} + \frac{4,19 W_0}{100} ;$$

$$C_n = \frac{0,956 (100 - 1,5)}{100} + \frac{4,19 \cdot 1,5}{100} = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Рассчитаем теплоемкости при конечной температуре обжига $t_k = 1040^\circ\text{C}$ (табл. 3.6), кДж/(кг·К)

Таблица 3.6

Удельная теплоемкость оксидов при $t_k = 1040^\circ\text{C}$

Оксиды	C, кДж/(кг· К)	Значение
SiO ₂ (β-кварц)	$C_{\beta\text{-SiO}_2} = 1,006 + 0,000135 (t+273)$	1,183
Al ₂ O ₃	$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1,126 + 0,000126 (t+273)$	1,291
TiO ₂	$C_{\text{TiO}_2} = 0,942 + 0,000015 (t+273)$	0,962
Fe ₂ O ₃	$C_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 0,616 + 0,000488 (t+273)$	1,257
CaO	$C_{\text{CaO}} = 0,872 + 0,000081 (t+273)$	0,978
MgO	$C_{\text{MgO}} = 1,016 + 0,000182 (t+273)$	1,255
K ₂ O	$C_{\text{K}_2\text{O}} = 0,766 + 0,000444 (t+273)$	1,349
Na ₂ O	$C_{\text{Na}_2\text{O}} = 1,040 + 0,000365 (t+273)$	1,519

Рассчитываем теплоемкость обжигаемого керамического кирпича при конечной температуре обжига $t_k = 1040^\circ\text{C}$ по аналогичной формуле, кДж/(кг·К):

$$C_k = \frac{1,183 \cdot 74,53 + 1,291 \cdot 14,69 + 0,962 \cdot 1,05 + 1,257 \cdot 4,42 + 0,978 \cdot 1,19}{100} + \frac{1,255 \cdot 1,27 + 1,349 \cdot 0,73 + 1,519 \cdot 0,2}{100} = 1,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}.)$$

3.3. Тепловой баланс зоны подогрева и обжига

Приход теплоты.

1. Химическая теплота горения топлива, кДж/ч:

$$Q_1 = Q_n^p V,$$

где Q_n^p - низшая теплота сгорания топлива, $Q_n^p = 35025,08 \text{ кДж}/\text{м}^3$;

V – расход топлива – газа, м³/ч;

$$Q_1 = 35025,08 V \text{ кДж}/\text{ч}.$$

2. Физическое тепло топлива

$$Q_2 = c_t t_t V \text{ кДж}/\text{ч},$$

где t_t – температура топлива, $t_t = 20^\circ\text{C}$;

c_T – теплоемкость топлива при t_T , кДж/(кг·°С)

$$c_T = 1,566 \text{ кДж/(кг·°С)}$$

$$Q_2 = 1,566 \cdot 20 \text{ В} = 31,32 \text{ В кДж/ч.}$$

3. Тепло наружного воздуха, поступающего на горение; кДж/ч:

$$Q_3 = L_\alpha c_B t_B \text{ В} ,$$

где L_α – действительный расход воздуха; $L_\alpha = 18,7611 \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3}$;

t_B – температура воздуха, идущего на горение, $t_B = 20$ °С;

c_B – теплоемкость воздуха $c_B = 1,29$ кДж/(кг·°С)

$$Q_3 = 18,7611 \cdot 1,29 \cdot 20 \cdot \text{В} = 484,0354 \text{ В кДж/ч.}$$

4. Физическая теплота воздуха, подсасываемого в зоны подогрева и обжига, кДж/ч:

$$Q_4 = L_0 (\alpha_{\text{ух.г.}} - \alpha) c_B t_B \text{ В кДж/ч,}$$

где L_0 - теоретически необходимый для горения расход сухого воздуха;

$$L_0 = 9,3074 \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3} ;$$

α - коэффициент избытка воздуха, $\alpha = 2,0157$;

$\alpha_{\text{ух.г.}}$ - коэффициент избытка воздуха в составе уходящих продуктов горения топлива с учетом его подсоса. Принимаем $\alpha_{\text{ух.г.}} = 4$;

$$Q_4 = 9,3074 (4 - 2,0157) 1,29 \cdot 20 \cdot \text{В} = 476,4918 \cdot \text{В кДж/ч.}$$

5. Физическая теплота подвижного состава и необожженных изделий, кДж/ч:

$$Q_5 = Q_c + Q_B \text{ кДж/ч.}$$

Эта статья складывается из физической теплоты сырца - Q_c и физической теплоты вагонеток - Q_B , кДж/ч.

5.1 Физическая теплота сырца, кДж/ч:

$$Q_c = P c_H t_H ,$$

где P – часовая масса необожженных изделий, кг/ч;

t_H – температура поступающих в печь необожженных изделий, °С;

c_H – теплоемкость необожженных изделий при температуре t_H .

$$Q_c = 6241,61 \cdot 1 \cdot 20 = 124832,23 \text{ кДж/ч.}$$

5.2 Физическая теплота вагонеток, кДж/ч:

$$Q_B = \left(g_M C_M + \sum_{i=1}^N g_{i,\text{сл}} C_{i,\text{сл}} \right) t_H ,$$

где C_M , $C_{i,\text{сл}}$ – соответственно теплоемкость металла вагонетки и отдельных слоев её футеровки, кДж/(кг·°С)

t_n – температура поступающих в печь вагонеток, $^{\circ}\text{C}$;
 g_m – часовая масса металлической части вагонетки, кг/ч;
 $g_{i.сл}$ – часовая масса отдельного слоя футеровки, кг/ч.

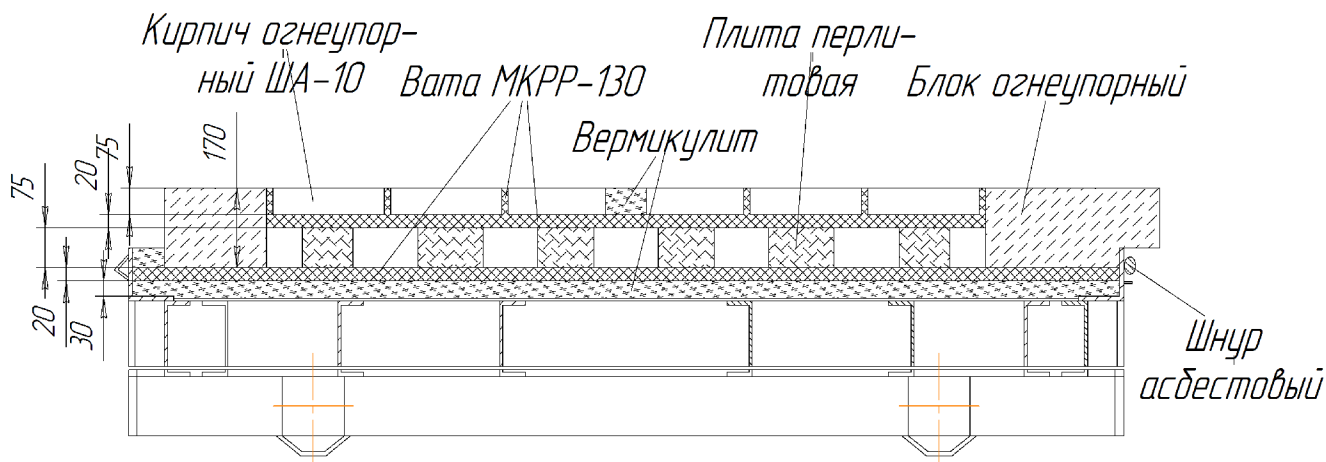


Рис.3.1 Схема футеровки вагонетки

Футеровка вагонетки (рис.3.1) состоит из 5 слоев:

Кирпич шамотный ША-10, $\rho_{ш.к} = 1,9 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость

$$C_{к.ш} = 0,725 + 0,000134t_n$$

Блок окантовочный из жаростойкого бетона на высокоглиноземистом цементе,

$\rho_{ж.б.} = 1,9 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $C_{ж.б.} = 0,837 + 0,000264 t_n$.

Плита перлитовая, плотностью $\rho_{п.п} = 0,40 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость

$$C_{п.п} = 0,92 + 0,000126t_n$$

Муллитокремнеземистая вата МКРР-130, $\rho_{м.в.} = 0,13 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость

$$C_{м.в} = 0,84 + 0,000126t_n$$

Заливка состава жидкое стекло – вермикулит, в процентном соотношении 1:1 по массе, плотностью $\rho_{в.з.} = 0,65 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $C_{в.з.} = 0,754 + 0,00015t_n$

Распределение температур по слоям:

- 1) наружный слой $t_n = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 2) внутренний слой $t_n = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теплоемкость металлической части вагонетки

$$C_m = 0,461 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C)}$$

Часовая масса металлической части вагонетки, кг/ч.

$$g_m = G \cdot V,$$

где G – масса металлической части вагонетки, кг, $G = 1300 \text{ кг}$;

V – скорость движения вагонетки, ваг/ч, $V = 0,8571 \text{ ваг/ч}$.

$$g_m = 1300 \cdot 0,8571 = 1114,28 \text{ кг/ч};$$

Определим теплоемкость первого слоя с шамотным кирпичом:

$$C_{\text{к.ш}} = 0,725 + 0,000134 \cdot 20 = 0,728 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

Определим объем данного слоя, м^3 :

$$V_{\text{ш.к}} = a_{\text{ш.к}} \cdot b_{\text{ш.к}} \cdot s_{\text{ш.к}},$$

где $a_{\text{ш.к}}$ – ширина слоя с шамотным кирпичом;

$b_{\text{ш.к}}$ – длина слоя с шамотным кирпичом;

$s_{\text{ш.к}}$ – толщина слоя с шамотным кирпичом;

$$V_{\text{ш.к}} = a_{\text{ш.к}} \cdot b_{\text{ш.к}} \cdot s_{\text{ш.к}} = 4,24 \cdot 0,075 = 0,318 \text{ м}^3.$$

Определим массу слоя с шамотным кирпичом, кг:

$$G_{\text{ш.к}} = \rho_{\text{ш.к}} \cdot V_{\text{ш.к}} = 1900 \cdot 0,318 = 604,65.$$

Определим часовую массу слоя с шамотным кирпичом, кг/ч:

$$g_{\text{ш.к}} = G_{\text{ш.к}} \cdot V = 604,65 \cdot 0,8571 = 518,27.$$

Определим теплоемкость первого слоя с жаростойким бетоном:

$$C_{\text{ж.б}} = 0,837 + 0,000264 \cdot 20 = 0,842 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

Определим объем жаропрочных блоков, м^3 :

$$V_{\text{ж.б}} = a_{\text{ж.б}} \cdot b_{\text{ж.б}} \cdot s_{\text{ж.б}} = (2,48 + 2,210)0,28 \cdot 0,17 = 0,223.$$

Определим массу жаропрочных блоков, кг:

$$G_{\text{ж.б}} = \rho_{\text{ж.б}} \cdot V_{\text{ж.б}} = 1900 \cdot 0,223 = 424,16.$$

Определим часовую массу слоя с жаростойким бетоном, кг/ч:

$$g_{\text{ж.б}} = G_{\text{ж.б}} \cdot V = 424,16 \cdot 0,8571 = 363,57 \text{ кг/ч}.$$

Определим теплоемкость второго слоя с перлитовыми плитами:

$$C_{\text{п.п}} = 0,92 + 0,000126 \cdot 40 = 0,925 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}).$$

Определим объем перлитовых плит, м^3 :

$$V_{\text{п.п}} = a_{\text{п.п}} \cdot b_{\text{п.п}} \cdot s_{\text{п.п}} = 4,24 \cdot 0,10 = 0,424.$$

Определим массу перлитовых плит, кг:

$$G_{\text{п.п}} = \rho_{\text{п.п}} \cdot V_{\text{п.п}} = 400 \cdot 0,424 = 169,6.$$

Определим часовую массу слоя с перлитовыми плитами, кг/ч:

$$g_{\text{п.п}} = G_{\text{п.п}} \cdot V = 169,6 \cdot 0,8571 = 145,37.$$

Определим теплоемкость слоя с ватой МКРР – 130:

$$C_{\text{м.в}} = 0,84 + 0,000126 \cdot 40 = 0,845 \text{ кДж}/\text{кг} \cdot ^\circ\text{C};$$

Определим объем слоя ваты МКРР - 130, м^3 :

$$V_{\text{м.в}} = a_{\text{м.в}} \cdot b_{\text{м.в}} \cdot s_{\text{м.в}} = 4,24 \cdot 0,02 = 0,0848.$$

Определим массу ваты МКРР - 130, кг:

$$G_{\text{м.в}} = \rho_{\text{м.в}} \cdot V_{\text{м.в}} = 130 \cdot 0,0848 = 11.$$

Определим часовую массу слоя с ватой МКРР - 130, кг/ч:

$$g_{\text{м.в}} = G_{\text{м.в}} \cdot V = 11 \cdot 0,8571 = 9,43.$$

Определим теплоемкость слоя вермикулита:

$$C_{\text{в.з}} = 0,754 + 0,00015 \cdot 40 = 0,76 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C});$$

Определим объем слоя вермикулита, м^3 :

$$V_{\text{в}} = a_{\text{в}} \cdot b_{\text{в}} \cdot s_{\text{в}} = 6,338 \cdot 0,07 = 0,443.$$

Определим массу вермикулита, кг:

$$G_B = \rho_B \cdot V_B = 650 \cdot 0,443 = 288,4 .$$

Определим часовую массу вермикулита, кг/ч:

$$g_B = G_B \cdot V = 288,4 \cdot 0,8571 = 247,2 .$$

Тогда теплота, которую вносят вагонетки, кДж/ч:

$$Q_B = (111428 \cdot 0,461 + 51827 \cdot 0,728 + 36357 \cdot 0,842 + 14537 \cdot 0,925 + 9,43 \cdot 0,845 + 247,2 \cdot 0,76)20 = 305394 .$$

Физическая теплота подвижного состава, кДж/ч:

$$Q_5 = Q_c + Q_B = 124832,23 + 30539,4 = 155371,63 .$$

Расход теплоты

Расход теплоты на испарение физической влаги из материала, кДж/ч:

$$Q_6 = (2500 - 4,2t_H)P_w ,$$

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

4,2 – теплоемкость воды, кДж/(кг·°С);

t_H – температура поступающих в печь необожженных изделий, °С;

P_w – количество влаги, испаряемой из материала, кг/ч.

$$Q_6 = (2500 - 4,2t_H)P_w = (2500 - 4,2 \cdot 20)95,05 = 229640,8 \text{ кДж/ч} .$$

Теплота, затрачиваемая на химические реакции при нагреве материала, кДж/ч:

$$Q_7 = (K \cdot m)10^{-4}P_c \cdot 2090 ,$$

где K – содержание в обжигаемом материале глины или каолина, мас.%;

m – содержание Al_2O_3 в глине, мас.%;

P_c – количество сухого материала, поступающего в печь, кг/ч;

2090 – теплота дегидратации глин в расчете на 1 кг содержащихся в них

Al_2O_3 , кДж/ч:

$$Q_7 = (K \cdot m)10^{-4}P_c 2090 = (100 \cdot 13,81)10^{-4} \cdot 6241,61 \cdot 2090 = 1801509,65 \text{ кДж/ч} .$$

Теплота, уносимая обжигаемыми изделиями в зону охлаждения, кДж/ч:

$$Q_8 = P c_k t_k ,$$

где P – производительность печи по обожженному материалу, кг/ч;

c_k – теплоемкость обжигаемого материала при конечной температуре обжига, кДж/(кг·К);

$t_k = 1040$ °С - конечная температура обжига.

$$Q_8 = P c_k t_k = 5863,99 \cdot 1,18 \cdot 1040 = 7196288,53 \text{ кДж/ч} .$$

Потери теплоты с уходящими продуктами горения, кДж/ч:

$$Q_9 = \{B [V_0 \cdot c_d + L_0 (\alpha_{ухг.} - 1)c_B] + V_{дег} \cdot c_{дег}\} t_{ухг} ,$$

где V_0 – объем продуктов сгорания при сжигании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха, $\frac{M^3}{M^3}$;

L_0 – расход воздуха, теоретически необходимый для горения, $\frac{M^3}{M^3}$;

$\alpha_{ух.г}$ – коэффициент избытка воздуха в составе уходящих продуктов горения;

$t_{ух.г}$ температура уходящих газов, 0C ;

c_d – теплоемкость дымовых газов, $кДж/(кг \cdot ^0C)$;

c_v – теплоемкость воздуха, $кДж/(M^3 \cdot ^0C)$;

$c_{дег}$ – теплоемкость газов, образующихся от испарения влаги и разложения карбонатов при обжиге материалов, $кДж/(кг \cdot ^0C)$;

$V'_{дег} = V'_{CO_2} + V'_{H_2O}$ – объем продуктов декарбонизации, сушки и дегидратации материалов, $\frac{M^3}{ч}$.

При полном разложении содержащихся в шихте карбонатсодержащих материалов $CaCO_3$ и $MgCO_3$ количество выделившегося CO_2 , $\frac{M^3}{ч}$:

$$V'_{CO_2} = K \cdot 10^{-4} (0,4 CaO + 0,533 MgO) P_c,$$

где CaO и MgO - содержание в шихте оксидов (прокаленное состояние), мас.%.
 P_c – количество сухого материала поступающего в печь, кг/ч.

$$V'_{CO_2} = 100 \cdot 10^{-4} (0,4 \cdot 1,19 + 0,533 \cdot 1,27) 6241,61 = 71,96 \frac{M^3}{ч}.$$

Количество водяных паров, выделяющихся при испарении гигроскопической влаги в зоне досушки обжигаемого материала, а также при дегидратации содержащихся в нем глинистых минералов, $\frac{M^3}{ч}$:

$$V'_{H_2O} = 0,435 K \cdot 10^{-4} \cdot Al_2O_3 \cdot P_c + 1,24 P_w,$$

где Al_2O_3 - содержание оксида в обожженном изделии, мас.%;

P_c – количество сухого материала поступающего в печь, кг/ч;

P_w – количество воды испаряемой из материала, кг/ч.

$$V'_{H_2O} = 0,435 \cdot 100 \cdot 10^{-4} \cdot 14,69 \cdot 6241,61 + 1,24 \cdot 95,05 = 516,71 \frac{M^3}{ч};$$

$$V_{дег} = 71,96 + 516,71 = 588,67 \frac{M^3}{ч}.$$

Расчет проводим для $t_{ух.г} = 125^0C$.

$$Q_9 = \{B[10,4551 \cdot 1,58 + 9,307 (4 - 1) 1,29] + 588,67 \cdot 1,72\} 125 = 6567,14 B + 126564,05 \frac{кДж}{ч}.$$

Потери теплоты в окружающую среду через стены и свод.

Потери теплоты в окружающую среду определяют по зонам, на которые разделяют рабочее пространство печи. Для этого печь по длине разбиваем на 8 участков (рис.3.2, табл.3.7), отличающихся определенной конструкцией стены или свода и с максимально прямолинейными отрезками кривой обжига.

Температурная кривая обжига и участки приведены на рис. 3.2.

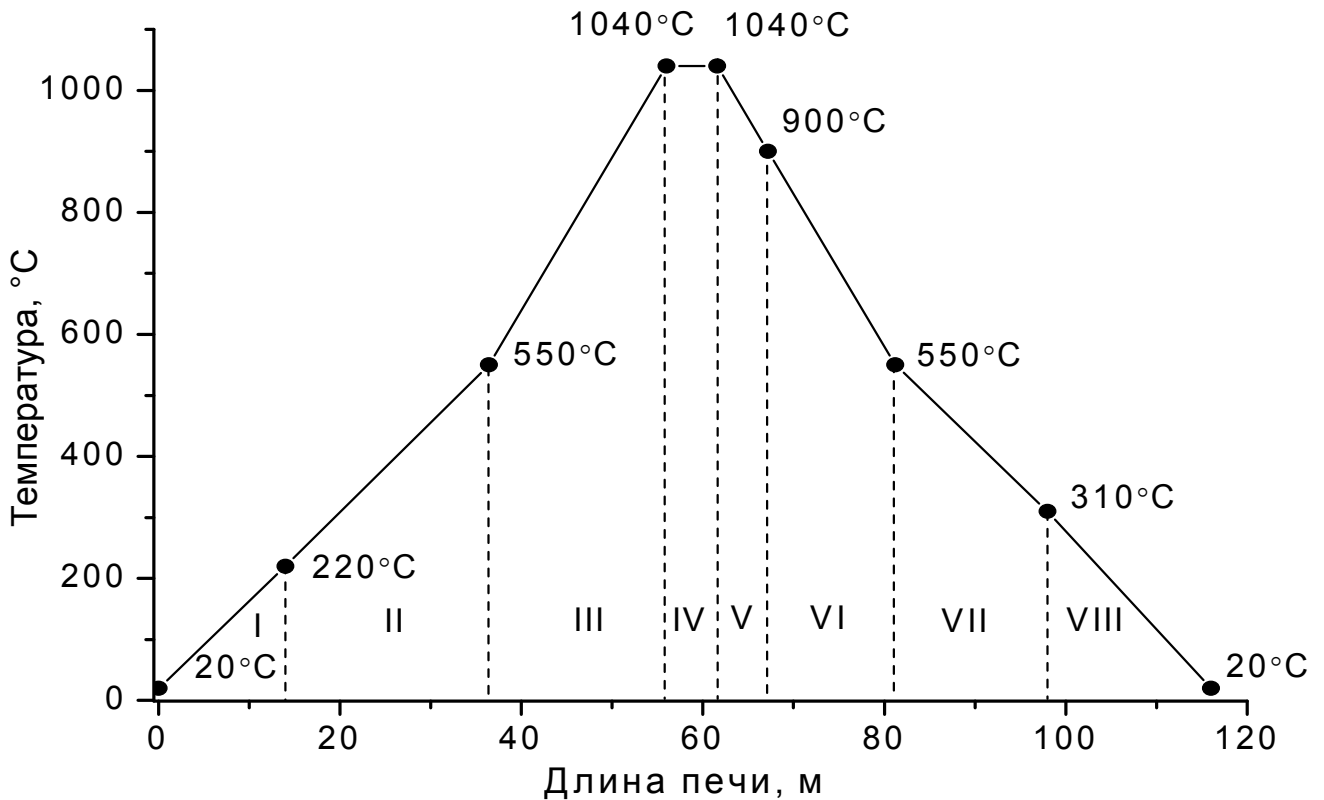


Рис.3.2. Температурная кривая обжига керамического кирпича

Таблица 3.7

Характеристика кладки печи по расчетным участкам

Характеристика участка		Зона подогрева и обжига				Зона охлаждения			
		1	2	3	4	5	6	7	8
Температура внутри печи, °С	интервал	20-220	220-550	550-1040	1040	1040-900	900-550	550-310	310-20
	средняя, $t_{кл.1}$	120	385	795	1040	970	725	430	165
Длина участка, $l_{уч.}$, м		14	22,4	19,6	5,6	5,6	14	16,8	18
Наружное сечение, $l_{уч.} \cdot h_{внеш.}$		14·3,14	22,4·3,14	19,6·3,14	5,6·3,14	5,6·3,14	14·3,14	16,8·3,14	18·3,14
Внутреннее сечение, $l_{уч.} \cdot h_{внутр.}$		14·2,14	22,4·2,14	19,6·2,14	5,6·2,14	5,6·2,14	14·2,14	16,8·2,14	18·2,14
Стена	материал/ толщина s, мм	Кер.кирп./1125	Кер.кирп./895 ШБ/230	Кер.кирп./510 ШЛ-1/385 ШБ/230	Кер.кирп./ 510 ШЛ-1/385 ШБ/230	Кер.кирп./ 510 ШЛ-1/385 ШБ/230	Кер.кирп./ 510 ШЛ-1/385 ШБ/230	Кер.кирп./895 ШБ/230	Кер.кирп./1125
Свод	материал/ толщина s, мм	ШБЕТ/50 ШВП-350/200 ПВП-280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП- 350/200 ПВП-280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП- 350/200 ПВП-280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП- 350/200 ПВП- 280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП- 350/200 ПВП- 280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП- 350/200 ПВП- 280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП- 350/200 ПВП-280/60 С/80 КБ/90	ШБЕТ/50 ШВП-350/200 ПВП-280/60 С/80 КБ/90

Определим потери теплоты через стены на 1 участке. На данном участке стена состоит из 1 слоя – керамического кирпича.

Определим коэффициент теплопроводности для этого слоя, Вт/(м·°С),
 $\lambda_{\text{кл.1}} = 0,47 + 0,0005 t_{\text{кл.1}} \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{С}.$

Определим среднюю температуру кладки на участке:

$$t_{\text{кл.1}} = \frac{220 + 20}{2} = 120 \text{ }^{\circ}\text{С}.$$

Найдем среднюю температуру этого слоя кладки:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,5 t_{\text{кл.1}} = 0,5 \cdot 120 = 60^{\circ}\text{С}.$$

Находим коэффициент теплопроводности слоя кладки исходя из его средней температуры, Вт/(м·°С):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,47 + 0,0005 \cdot 120 = 0,531 \text{ Вт/(м}\cdot^{\circ}\text{С)}.$$

Определим тепловое сопротивление слоя, м²·°С/ Вт:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{1,125}{0,531} = 2,117 \text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{С} / \text{Вт}.$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, Вт/м²,
 $\alpha_2 = 9,6:$

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{120 - 20}{2,117 + 0,10} = 45.$$

Уточняем температуру наружной поверхности по формуле:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 120 - 45 \frac{1,125}{0,531} = 24,66 \text{ }^{\circ}\text{С}.$$

Уточняем температуру слоя кладки и сравним с первоначально найденной:

$$t_{\text{ср.1}} = \frac{120 + 24,66}{2} = 72,3 \text{ }^{\circ}\text{С}, \text{ а первоначально было } 60^{\circ}\text{С}.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м²:

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2},$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м².

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш(внутр)}}.$$

Для наружной поверхности, м²:

$$F_i = 14 \cdot 3,14 = 43,96.$$

Для внутренней поверхности, м²:

$$F_i = 14 \cdot 2,14 = 29,96.$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{43,96 \cdot 29,96} = 36,29 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.1}} = 3,6 \cdot q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 45 \cdot 36,29 \cdot 2 = 11759,41.$$

Определим потери теплоты через стены на 2 участке. На данном участке, стена состоит из 2 слоёв – первого слоя шамотного кирпича марки ШБ и второго слоя керамического кирпича.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, Вт/(м·°C):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot t_{\text{ср.1}};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,47 + 0,00051 \cdot t_{\text{ср.2}}.$$

Определим среднюю температуру кладки на участке:

$$t_{\text{кл.1}} = \frac{220 + 550}{2} = 385 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Найдем среднюю температуру слоёв кладки по зависимостям:

средняя температура слоя шамота

$$t_{\text{ср.1}} = 0,8t_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 385 = 308 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

средняя температура слоя керамического кирпича

$$t_{\text{ср.2}} = 0,5t_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 308 = 154 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Находим коэффициенты теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, Вт/(м·°C):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 308 = 0,992;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,47 + 0,00051 \cdot 154 = 0,548.$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, м²·°C / Вт:

первого слоя

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,23}{0,992} = 0,232;$$

второго слоя

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,895}{0,548} = 1,633.$$

Определим удельный тепловой поток через поверхность кладки в окружающую среду, Вт/м²,

$$\alpha_2 = 10,8:$$

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{385 - 20}{(0,232 + 1,633) + 0,092} = 186,6.$$

Уточняем температуру слоев кладки по формулам, °C

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 385 - 186,6 \cdot 0,232 = 341,71;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 341,73 - 186,6 \cdot 1,633 = 37,01.$$

Уточним среднюю температуру слоёв кладки и сравним с первоначально найденной, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_{\text{ср.1}} = \frac{385 + 341,71}{2} = 363,36 \text{ } ^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 308;$$

$$t_{\text{ср.2}} = \frac{341,71 + 37,01}{2} = 189,36 \text{ } ^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 154.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м^2 :

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2},$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м^2 .

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш(внутр)}}.$$

Для наружной поверхности, м^2 :

$$F_1 = 22,4 \cdot 3,14 = 70,336.$$

Для внутренней поверхности, м^2 :

$$F_2 = 22,4 \cdot 2,14 = 47,93.$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{70,336 \cdot 47,93} = 58,06.$$

Определим потери на участке, кДж/ч :

$$Q_{\text{уч.2}} = 3,6 q_{\text{ст.1}} F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 186,6 \cdot 58,06 \cdot 2 = 78006,06.$$

Определим потери теплоты через стены на 3 участке. На данном участке стена состоит из 3 слоёв – керамического кирпича, шамотного кирпича марки ШЛ-1 и кирпича марки ШБ.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 t_{\text{ср.1}};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,605 \text{ при } 100^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,756 \text{ при } 1040^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051 t_{\text{ср.3}}.$$

Определим среднюю температуру кладки на участке, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{1050 + 550}{2} = 800.$$

Найдем среднюю температуру слоёв кладки по зависимостям, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8 T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 800 = 640;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 640 = 320;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5 T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 320 = 160.$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 640 = 1,37;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = \left[\left(\frac{0,756 - 0,605}{1050 - 100} \right) \cdot (320 - 100) \right] + 0,605 = 0,635;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051 \cdot 160 = 0,551 .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,23}{1,37} = 0,168 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,385}{0,635} = 0,6 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,510}{0,551} = 0,924 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, $\text{Вт}/\text{м}^2$, $\alpha_2 = 14$:

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{800 - 20}{(0,168 + 0,6 + 0,924) + 0,07} = 442,73 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

Уточняем температуру слоев кладки по формулам, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 800 - 442,73 \cdot 0,168 = 725,7 ;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 725,7 - 442,73 \cdot 0,6 = 460 ;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 460 - 442,73 \cdot 0,924 = 50,59 .$$

Уточним среднюю температуру слоёв кладки и сравним с первоначально найденной:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{800 + 725,7}{2} = 762,88 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 640^{\circ}\text{C} ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{725,7 + 460}{2} = 593,06 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 320^{\circ}\text{C} ;$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{460 + 50,59}{2} = 255,97 \text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 160^{\circ}\text{C} .$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м^2 :

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2},$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м^2 .

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш}} (\text{внутр}) .$$

Для наружной поверхности, м^2

$$F_i = 19,6 \cdot 3,14 = 61,54 .$$

Для внутренней поверхности, m^2 :

$$F_i = 19,6 \cdot 2,14 = 41,94 .$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{61,54 \cdot 41,94} = 50,8 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.3}} = 3,6 \cdot q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 442,37 \cdot 50,8 \cdot 2 = 161801,37 .$$

Определим потери теплоты через стены на 4 участке. На данном участке стена состоит из 3 слоёв – керамического кирпича, кирпича марки ШЛ-1 и кирпича марки ШБ.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 t_{\text{ср.1}} ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,605 \text{ при } 100^\circ C ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,756 \text{ при } 1040^\circ C ;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051 t_{\text{ср.3}} .$$

Определим среднюю температуру кладки на участке, $^\circ C$:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{1040 + 1040}{2} = 1040 .$$

Найдем среднюю температуру слоёв кладки по зависимостям, $^\circ C$:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8 T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 1040 = 832 ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 832 = 416 ;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5 T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 416 = 208 .$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, $Вт/(м \cdot K)$:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 832 = 1,5 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = \left[\left(\frac{0,756 - 0,605}{1040 - 100} \right) \cdot (416 - 100) \right] + 0,605 = 0,6 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051 \cdot 208 = 0,5 .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,23}{1,5} = 0,1 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,385}{0,6} = 0,6 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,510}{0,5} = 1,02 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, $Вт/м^2$,
 $\alpha_2 = 14$:

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1040 - 20}{(0,1 + 0,6 + 1,02) + 0,07} = 566,7 \text{ .}$$

Уточняем температуру слоев кладки по формулам, °С:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 1040 - 566,7 \cdot 0,1 = 983,3 ;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 983,3 - 566,7 \cdot 0,6 = 643,28 ;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 643,28 - 566,7 \cdot 1,02 = 76,28 \text{ .}$$

Уточним среднюю температуру слоёв кладки и сравним с первоначально найденной, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{1040 + 983,3}{2} = 1011,7 \text{ } ^\circ\text{C, а было } 832;$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{983,3 + 643,28}{2} = 813,3 \text{ } ^\circ\text{C, а было } 416;$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{643,28 + 76,28}{2} = 359,8 \text{ } ^\circ\text{C, а было } 208.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м²:

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} \text{ ,}$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м².

$$F_1 = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш(внутр)}}.$$

Для наружной поверхности, м²:

$$F_1 = 5,6 \cdot 3,14 = 17,58 \text{ .}$$

Для внутренней поверхности, м²:

$$F_1 = 5,6 \cdot 2,14 = 11,98 \text{ .}$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{17,58 \cdot 11,98} = 14,51 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.4}} = 3,6 q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 566,7 \cdot 14,51 \cdot 2 = 59204,3 \text{ .}$$

Аналогично считаем потери теплоты через свод.

Определим потери теплоты через свод на участках 1, 2, 3. На данных участках и далее на всей печи свод состоит из 5 слоёв – шамотобетона плотностью $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, плиты ШВП – 350, плиты жаростойкой ПВП - 280, плиты совелитовой, керамзитобетона $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, Вт/(м·°C):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 t_{\text{ср1}} ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,18 \text{ при } 500^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,23 \text{ при } 800^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,29 \text{ при } 1000^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,16 \div 0,20;$$

$$\lambda_{\text{кл.4}} = 0,079 + 0,000186 t_{\text{ср4}} ;$$

$$\lambda_{\text{кл.5}} = 0,14 .$$

Определим среднюю температуру свода на участках 1-3, °C:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{1040 + 20}{2} = 530 .$$

Найдем среднюю температуру слоёв свода по зависимостям, °C:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8 T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 530 = 424 ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 424 = 212;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5 T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 212 = 106;$$

$$T_{\text{ср.4}} = 0,5 T_{\text{ср.3}} = 0,5 \cdot 106 = 53,0 ;$$

$$T_{\text{ср.5}} = 0,5 T_{\text{ср.4}} = 0,5 \cdot 53,0 = 26,5 .$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, Вт/(м·°C):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 424 = 1,12 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,18 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,16 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.4}} = 0,079 + 0,000186 \cdot 53,0 = 0,088 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.5}} = 0,14 \text{ Вт/м}\cdot^{\circ}\text{C} .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, м²·°C/ Вт:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,05}{1,12} = 0,045 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,2}{0,18} = 1,11 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,06}{0,16} = 0,375 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.4}}}{\lambda_{\text{кл.4}}} = \frac{0,08}{0,088} = 0,9 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.5}}}{\lambda_{\text{кл.5}}} = \frac{0,09}{0,14} = 0,642 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, Вт/м²,
 $\alpha_2 = 13$:

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{530 - 20}{(0,045 + 1,110 + 0,375 + 0,90 + 0,642) + 0,077} = 161,9 .$$

Уточняем температуру слоев свода по формулам, °С:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 530 - 161,9 \cdot 0,045 = 522,72 ;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 522,72 - 161,9 \cdot 1,11 = 343,02 ;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 343,1 - 161,9 \cdot 0,375 = 282,31 ;$$

$$t_5 = t_4 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.4}}}{\lambda_{\text{кл.4}}} = 282,31 - 161,9 \cdot 0,9 = 136,42 ;$$

$$t_6 = t_5 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.5}}}{\lambda_{\text{кл.5}}} = 136,42 - 161,9 \cdot 0,642 = 32,35 .$$

Уточним среднюю температуру слоёв свода и сравним с первоначально найденной, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{530 + 522,72}{2} = 526,4 , \text{ а было } 424^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{522,72 + 343,02}{2} = 432,9 , \text{ а было } 212^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{343,02 + 282,31}{2} = 312,7 , \text{ а было } 106^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ср.4}} = \frac{282,31 + 136,42}{2} = 209,4 , \text{ а было } 53,0^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ср.5}} = \frac{136,42 + 32,35}{2} = 84,4 , \text{ а было } 26,5^{\circ}\text{C} .$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м²:

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} ,$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней поверхности свода.

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш (внутр)}} .$$

Для наружной поверхности, м²:

$$F_i = 56 \cdot 2,86 = 160,16 .$$

Для внутренней поверхности, м²:

$$F_i = 56 \cdot 2,4 = 134,4 .$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{160,16 \cdot 134,4} = 146,71 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участках 1-3, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.1-3}} = 3,6 q_{\text{ст.1}} F_{\text{кл}} = 3,6 \cdot 161,9 \cdot 146,71 = 85508,46 .$$

Определим потери теплоты через свод на участке 4. На данном участке и далее на всей печи свод состоит из 5 слоёв – шамотобетона $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, плиты ШВП – 350, плиты жаростойкой ПВП - 280, плиты совелитовой, керамзитобетона $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, Вт/(м·°C):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 t_{\text{ср1}} ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,18 \text{ при } 500^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,23 \text{ при } 800^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,29 \text{ при } 1000^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,16 \div 0,20 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.4}} = 0,079 + 0,000186 t_{\text{ср4}} ;$$

$$\lambda_{\text{кл.5}} = 0,14 .$$

Определим среднюю температуру свода на участке, °C:

$$T_{\text{кл.1}} = 1040 .$$

Найдем среднюю температуру слоёв свода по зависимостям, °C:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8 T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 1040 = 832 ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 832 = 416 ;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5 T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 416 = 208 ;$$

$$T_{\text{ср.4}} = 0,5 T_{\text{ср.3}} = 0,5 \cdot 208 = 104 ;$$

$$T_{\text{ср.5}} = 0,5 T_{\text{ср.4}} = 0,5 \cdot 104 = 52,0 ;$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, Вт/м·°C :

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 832 = 1,59 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,18 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,16 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.4}} = 0,079 + 0,000186 \cdot 104 = 0,098 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.5}} = 0,14 .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, м²·°C/ Вт:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,05}{1,59} = 0,031 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,2}{0,18} = 1,11 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,06}{0,16} = 0,375 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.4}}}{\lambda_{\text{кл.4}}} = \frac{0,08}{0,098} = 0,81 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.5}}}{\lambda_{\text{кл.5}}} = \frac{0,09}{0,14} = 0,642 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, Вт/м²,
 $\alpha_2 = 13$:

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1040 - 20}{(0,031 + 1,11 + 0,375 + 0,81 + 0,642) + 0,077} = 334,98 .$$

Уточняем температуру слоев свода по формулам, °С:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 1040 - 334,98 \cdot 0,031 = 1029,6;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 1029,6 - 334,98 \cdot 1,11 = 657,8;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 657,8 - 334,98 \cdot 0,375 = 532,2;$$

$$t_5 = t_4 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.4}}}{\lambda_{\text{кл.4}}} = 532,2 - 334,98 \cdot 0,81 = 260,9;$$

$$t_6 = t_5 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.5}}}{\lambda_{\text{кл.5}}} = 260,9 - 334,98 \cdot 0,642 = 45,8 .$$

Уточним среднюю температуру слоёв свода и сравним с первоначально найденной, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{1040 + 1029,6}{2} = 1034,8 , \text{ а было } 832^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{1029,6 + 657,8}{2} = 843,7 , \text{ а было } 416^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{657,8 + 532,2}{2} = 595 , \text{ а было } 208^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.4}} = \frac{532,2 + 260,9}{2} = 396,6 , \text{ а было } 104^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.5}} = \frac{260,9 + 45,8}{2} = 153,4 , \text{ а было } 52,0^{\circ}\text{C} .$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м²:

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 \cdot F_2} ,$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней поверхности свода, м².

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш (внутр)}} .$$

Для наружной поверхности, м²:

$$F_i = 5,6 \cdot 2,86 = 16,016 \text{ .}$$

Для внутренней поверхности, м²:

$$F_i = 5,6 \cdot 2,4 = 13,44 \text{ .}$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{16,016 \cdot 13,44} = 14,671 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч4}} = 3,6q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} = 3,6 \cdot 334,98 \cdot 14,671 = 17692,2.$$

$$Q_{10} = \sum Q_{\text{иссте}} + \sum Q_{\text{иссвод}} =$$

$$= 11759,4 + 78006,1 + 161801,4 + 59204,4 + 85508,5 + 17692,2 = 413972 \text{ кДж/ч}$$

Расход теплоты на подогрев футеровки вагонеток.

Аккумуляцию теплоты футеровкой вагонетки рассчитывают приблизительно по следующей формуле, кДж/ч:

$$Q_{11} = K \sum_{i=1}^n g_i c_i t'_{\text{исс}} ;$$

где $K=0,7$ – коэффициент, учитывающий прогрев футеровки до стационарного состояния;

$c_{i,\text{сл}}$ – теплоемкость отдельных слоев футеровки вагонетки, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{ср}}$ – средняя температура слоя футеровки, °С;

$g_{i,\text{сл}}$ – часовая масса отдельного слоя футеровки, кг/ч.

Температура внешней поверхности первого слоя на последней позиции зоны обжига принимается равной максимальной температуре обжига $t_k = 1040^\circ\text{C}$. Исходя из этого определим средние температуры отдельных слоев футеровки и их коэффициент теплопроводности:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8T_k = 0,8 \cdot 1040 = 832^\circ\text{C}.$$

При этой температуре

$$\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot 832 = 1,2 \text{ Вт/(м·К)};$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 832 = 416^\circ\text{C}.$$

При этой температуре

$$\lambda_2 = 0,16 \div 0,20 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 416 = 208^\circ\text{C}.$$

При этой температуре

$$\lambda_1 = 0,0198 + 0,000151 \cdot 208 = 0,05 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Исходя из определенных температур на границе слоев, их толщины s и соответствующей теплопроводности материалов λ_i , рассчитываем общее термическое сопротивление, м²·К/ Вт:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{пп}}},$$

где $\alpha_{\text{пп}} = 16,2$ - коэффициент теплоотдачи в подподовое пространство, Вт/(м²·К);

$$R = \frac{0,075}{1,2} + \frac{0,10}{0,16} + \frac{0,08}{0,05} + \frac{1}{16,2} = 2,34 \text{ м}^2 \cdot \text{К/ Вт}.$$

Далее находим действительное распределение температур следующим образом, °С:

$$t_1 = t_k - (t_k - t_{\text{пп}}) \frac{\frac{s_1}{\lambda_1}}{R} = 1040 - (1040 - 90) \frac{\frac{0,075}{1,2}}{2,34} = 1014,6 ;$$

$$t_2 = t_k - (t_k - t_{\text{пп}}) \frac{\frac{s_2}{\lambda_2}}{R} = 1040 - (1040 - 90) \cdot \frac{\frac{0,1}{0,16}}{2,34} = 786,3 ;$$

$$t_3 = t_k - (t_k - t_{\text{пп}}) \frac{\frac{s_3}{\lambda_3}}{R} = 1040 - (1040 - 90) \frac{\frac{0,08}{0,05}}{2,34} = 390,5 .$$

По найденному распределению температур находим средние температуры слоев, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{1040 + 1014,6}{2} = 1027 ;$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{786,3 + 390,5}{2} = 588,4 ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{1014,6 + 786,3}{2} = 900,3 .$$

Определим теплоемкость отдельных слоев футеровки при найденных средних температурах, кДж/кг °С;

$$C_{\text{к.ш}} = 0,725 + 0,000134 \cdot 1027 = 0,86 ;$$

$$C_{\text{п.п}} = 0,92 + 0,000126 \cdot 900,3 = 1,03 ;$$

$$C_{\text{в.з}} = 0,754 + 0,00015 \cdot 588,4 = 0,84 .$$

$$Q_{11} = 0,7(501,86 \cdot 0,86 \cdot 1027 + 140,77 \cdot 1,03 \cdot 900,3 + 239,37 \cdot 0,84 \cdot 588,4) = 484470,1 \text{ кДж/ч}$$

Потери теплоты через под в наружную среду.

Общая величина теплоотдачи равна, кДж/ч:

$$Q_{12} = 3,6 N F_{\text{в}} (t_{\text{нар.сл}} - t_{\text{пп}}) \alpha_{\text{пп}},$$

где N – общее число вагонеток в зонах подогрева и обжига, шт.;

$F_{\text{в}}$ – площадь пода одной вагонетки, м^2 ;

$t_{\text{пп}}$ – принятая ранее температура в подвагонеточном пространстве, °С;

$\alpha_{\text{пп}}$ – соответствующий коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$t_{\text{нар.сл}}$ – температура поверхности наружного слоя, т.е. полусуммы температур входящего состава и температуры поверхности наружного слоя ($t_3 = t_{\text{нар}} = 390,5$ °С) в конце зоны обжига, °С.

$$T_{\text{нар.сл}} = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{нар}}}{2} ;$$

$$T_{\text{нар.сл}} = \frac{20 + 390,5}{2} = 205,3 .$$

$$Q_{12} = 3,6 \cdot 41 \cdot 6,944 (205,3 - 90) 16,2 = 1913603,8 \text{ кДж/ч.}$$

Неучтенные потери тепла.

В отдельных случаях очень трудно с достаточной точностью рассчитать расход тепла на недожог топлива, потери тепла от утечки газов из рабочего пространства печи и т.п. Поэтому в расходные статьи теплового баланса вводятся неучтенные потери тепла, которые принимают равными 3-5% от теплоты сгорания топлива, кДж/ч:

$$Q_{13} = (0,03 \div 0,05) Q_{\text{н}}^{\text{в}} \text{ В кДж/ч;}$$

$$Q_{13} = (0,03) 35025,08 \text{ В} = 1050,7 \cdot \text{В кДж/ч.}$$

Определение часового расхода топлива.

Часовой расход топлива В определяем путем приравнивания сумм приходных статей баланса зон подогрева и обжига к сумме статей расхода. При решении полученного уравнения найдем неизвестную величину В.

$$\text{Приход: } 35025,08 \text{ В} + 31,32 \text{ В} + 484,04 \text{ В} + 476,49 \text{ В} + 155371,63.$$

$$\begin{aligned} \text{Расход: } & 229640,8 + 1801509,65 + 7196288,53 + 6567,14 \text{ В} + 413972,0 + 484470,1 + \\ & + 1913603,8 + 1050,7 \text{ В} \\ & 28399,09 \cdot \text{В} = 12010677,32. \end{aligned}$$

$$\text{В} = 422,9 \frac{\text{М}^3}{\text{ч}} .$$

Результаты расчета отдельных статей баланса сводим в табл. 3.8.

3.4.Тепловой баланс зоны охлаждения

Тепловой баланс зоны охлаждения составляем для определения расхода охлаждающего воздуха Х и теплоты, которая может быть использована на сторону.

Приход теплоты.

Основной статьей прихода теплоты в зоне охлаждения является физическая теплота обожженных изделий Q_8 и подвижного состава Q_{11} , кДж/ч:

$$Q_{14} = Q_8 + Q_{11} ;$$

$$Q_{14} = 7196288,5 + 484470,1 = 7680758,6 .$$

Таблица 3.8

Тепловой баланс зон подогрева и обжига

Приход теплоты	кДж/ч	%	Расход теплоты	кДж/ч	%
1. Химическая теплота сгорания топлива	14812106,3	96,26	1. Расход тепла на испарение физической влаги	229640,8	1,49
2. Физическая теплота топлива	13245,2	0,09	2. Расход теплоты на химические процессы	1801509,7	11,71
3. Физическая теплота воздуха для горения	204698,4	1,33	3. Теплота, уносимая обжигаемыми изделиями в зону охлаждения	7196288,5	46,77
4. Физическая теплота подсасываемого воздуха	201507,6	1,31	3. Потери тепла с уходящими газами	2903807,6	18,87
5. Физическая теплота входящего состава и садки	155371,6	1,01	4. Потери теплоты через стены и свод	413972,0	2,69
			5. Расход теплоты на подогрев футеровки вагонеток	484470,1	3,15
			6. Теплоотдача нижней поверхностью вагонетки	1913603,8	12,43
			7. Прочие потери и расходы	444341,0	2,89
			Невязка	- 704,4	0,00
Сумма	15386929,1	100	Сумма	15386929,1	100

Невязка составляет:

$$\Delta\% = \left| \frac{15386929,1 - 15387633,5}{15387633,5} \right| 100 = 0,0046\%.$$

Физическая теплота атмосферного воздуха Q_{15} , поступающего в зону охлаждения для охлаждения состава.

Так как нагревающийся в зоне охлаждения воздух может быть использован по двум направлениям (для горения и подачи на сторону), то его количество может быть выражено следующим образом:

- количество воздуха, в дальнейшем используемого на сторону – X ;
- количество воздуха в дальнейшем используемого для горения – определяем из баланса зон подогрева и обжига – $L_{\alpha} B$.

Исходя из вышесказанного:

$$Q_{15} = c_B t_B (X + L_{\alpha} B) \text{ кДж/ч,}$$

где t_B – температура воздуха, идущего на горение, $t_B = 20^{\circ}\text{C}$;

c_B – теплоемкость воздуха, $c_B = 1,29 \text{ кДж/(кг}\cdot^{\circ}\text{C)}$.

Так как из расчета горения топлива установлено, что подогрев воздуха не требуется, то величина $L_{\alpha} B$ не включается в баланс зоны охлаждения.

$$Q_{15} = 1,29 \cdot 20X = 25,8 X \text{ кДж/ч.}$$

Расход теплоты.

Потери теплоты через стенки и свод Q_{16} рассчитывают по участкам, представленным на рис.3.2, аналогично таковым в зоне подогрева и обжига.

Определим потери теплоты через стены на 5 участке. На данном участке, стена состоит из 3 слоёв – керамического кирпича, кирпича марки ШЛ-1 и кирпича марки ШБ.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114t_{\text{ср.1}};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,605 \text{ при } 100^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,756 \text{ при } 1040^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051t_{\text{ср.3}}.$$

Определим среднюю температуру кладки на участке, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{1040 + 900}{2} = 970.$$

Найдем среднюю температуру слоёв кладки по зависимостям, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 970 = 776;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 776 = 388;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 388 = 194.$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 776 = 1,53;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = \left[\left(\frac{0,756 - 0,605}{1040 - 100} \right) (388 - 100) \right] + 0,605 = 0,65;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051 \cdot 194 = 0,57 .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,23}{1,53} = 0,15 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,385}{0,65} = 0,59 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,510}{0,57} = 0,895 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, $\text{Вт}/\text{м}^2$, $\alpha_2 = 14$:

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{970 - 20}{(0,15 + 0,59 + 0,895) + 0,07} = 557,18 .$$

Уточняем температуру слоев кладки по формулам, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 970 - 557,18 \cdot 0,15 = 886,4 ;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 886,4 - 557,18 \cdot 0,59 = 557,7 ;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 557,4 - 557,18 \cdot 0,895 = 58,7 .$$

Уточним среднюю температуру слоёв кладки и сравним с первоначально найденной, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{970 + 886,4}{2} = 928,2 , \text{ а было } 776^{\circ}\text{C} ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{886,4 + 557,7}{2} = 722,05 , \text{ а было } 388^{\circ}\text{C} ;$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{557,7 + 58,7}{2} = 308,2 , \text{ а было } 194^{\circ}\text{C} .$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м^2 :

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} ,$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м^2 .

Для наружной поверхности, м^2 :

$$F_i = 5,6 \cdot 3,14 = 17,58 .$$

Для внутренней поверхности, м^2 :

$$F_i = 5,6 \cdot 2,14 = 11,98 .$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{17,58 \cdot 11,98} = 14,51 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.5}} = 3,6q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} = 3,6 \cdot 557,18 \cdot 14,51 \cdot 2 = 58209,7 .$$

Определим потери теплоты через стены на 6 участке. На данном участке, стена состоит из 3 слоёв – керамического кирпича, кирпича марки ШЛ-1 и кирпича марки ШБ.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114t_{\text{ср1}};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,605 \text{ при } 100^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,756 \text{ при } 1040^{\circ}\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051t_{\text{ср.3}}.$$

Определим среднюю температуру кладки на участке, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{900 + 550}{2} = 725 .$$

Найдем среднюю температуру слоёв кладки по зависимостям, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8 \cdot T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 725 = 580;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 580 = 290;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5 \cdot T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 290 = 145.$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114580 = 1,3 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = \left[\left(\frac{0,756 - 0,605}{1040 - 100} \right) (290 - 100) \right] + 0,605 = 0,63 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,47 + 0,00051 \cdot 145 = 0,54 .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, $\text{м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,23}{1,3} = 0,18 \text{ м}^2;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,385}{0,63} = 0,61 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,510}{0,54} = 0,94 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$\alpha_2 = 14:$$

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{725 - 20}{(0,18 + 0,61 + 0,94) + 0,07} = 392,9 \text{ .}$$

Уточняем температуру слоев кладки по формулам, °С:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 725 - 392,9 \cdot 0,18 = 655,5;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 655,5 - 392,9 \cdot 0,61 = 415,8;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 415,8 - 392,9 \cdot 0,94 = 46,5.$$

Уточним среднюю температуру слоёв кладки и сравним с первоначально найденной, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{725 + 655,5}{2} = 690,2 \text{ , а было } 580^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{655,5 + 415,8}{2} = 535,6 \text{ , а было } 290^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{415,8 + 46,5}{2} = 231,2 \text{ , а было } 145^{\circ}\text{C}.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м²:

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2},$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м².

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш (внутр)}}.$$

Для наружной поверхности, м²:

$$F_i = 14 \cdot 3,14 = 43,96 \text{ .}$$

Для внутренней поверхности, м²:

$$F_i = 14 \cdot 2,14 = 29,96 \text{ .}$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{29,96 \cdot 43,96} = 36,29 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.6}} = 3,6 \cdot q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 392,9 \cdot 36,29 \cdot 2 = 102660,1.$$

Определим потери теплоты через стены на 7 участке. На данном участке, стена состоит из 2 слоёв – керамического кирпича, кирпича марки ШБ

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 t_{\text{ср.1}};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,47 + 0,00051 \cdot t_{\text{ср.2}}.$$

Определим среднюю температуру кладки на участке, °С:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{550 + 310}{2} = 430.$$

Найдем среднюю температуру слоёв кладки по зависимостям, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 430 = 344;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 344 = 172.$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки исходя из их средней температуры, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 344 = 1,03;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,47 + 0,00051 \cdot 172 = 0,56.$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, м²·К/ Вт:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,23}{1,03} = 0,22 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,895}{0,56} = 1,60 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, Вт/м²

$$\alpha_2 = 10,8:$$

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{430 - 20}{(0,22 + 1,60) + 0,092} = 214,2 .$$

Уточняем температуру слоев кладки по формулам, °С:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 430 - 214,2 \cdot 0,22 = 382,4 ;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 382,4 - 214,2 \cdot 1,60 = 39,7 .$$

Уточним среднюю температуру слоёв кладки и сравним с первоначально найденной, °С:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{430 + 382,4}{2} = 406,2 , \text{ а было } 344^{\circ}\text{С};$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{382,4 + 39,7}{2} = 211 , \text{ а было } 172^{\circ}\text{С}.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м²:

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 \cdot F_2} ,$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м².

$$F_i = l_{\text{уч.}} \cdot h_{\text{внеш(внутр)}}$$

Для наружной поверхности, m^2 :

$$F_i = 16,8 \cdot 3,14 = 52,75 .$$

Для внутренней поверхности, m^2 :

$$F_i = 16,8 \cdot 2,14 = 35,95 .$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{52,75 \cdot 35,95} = 43,55 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч:

$$Q_{\text{уч.7}} = 3,6 q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 214,2 \cdot 43,55 \cdot 2 = 67164,6 .$$

Определим потери теплоты через стены на 8 участке. На данном участке, стена состоит из 1 слоя – керамического кирпича.

Определим коэффициент теплопроводности для этого слоя, Вт/м·К:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,47 + 0,0005 t_{\text{кл.1}} .$$

Определим среднюю температуру кладки на участке, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{310 + 20}{2} = 165 .$$

Найдем среднюю температуру этого слоя кладки, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot T_{\text{кл.1}} = 0,5 \cdot 165 = 82,5 .$$

Находим коэффициент теплопроводности слоя кладки исходя из его средней температуры, Вт/(м·К):

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,47 + 0,0005 \cdot 165 = 0,51 .$$

Определим тепловое сопротивление слоя, $m^2 \cdot K / \text{Вт}$:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{1,125}{0,51} = 2,21 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, $\text{Вт}/m^2$

$$\alpha_2 = 9,6:$$

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{165 - 20}{2,21 + 0,10} = 62,8 .$$

Уточняем температуру наружной поверхности по формуле, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 165 - 62,8 \cdot \frac{1,125}{0,51} = 26,5 .$$

Уточним температуру слоя кладки и сравним с первоначально найденной, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{165 + 26,5}{2} = 95,8 \text{ } ^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 82,5.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, m^2 :

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2},$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней кладки, м^2 .

$$F_1 = l_{\text{уч}} \cdot h_{\text{внеч(внут)}}.$$

Для наружной поверхности, м^2 :

$$F_1 = 18 \cdot 3,14 = 56,52.$$

Для внутренней поверхности, м^2 :

$$F_1 = 18 \cdot 2,14 = 38,52.$$

Тогда $F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{56,52 \cdot 38,52} = 46,66 \text{ м}^2$.

Определим потери на участке, кДж/ч :

$$Q_{\text{уч.8}} = 3,6 q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} \cdot 2 = 3,6 \cdot 62,8 \cdot 46,66 \cdot 2 = 21097,8.$$

Аналогично считаем потери теплоты через свод.

Определим потери теплоты через свод на участке 5, 6, 7 и 8. На данных участках свод печи состоит из 5 слоёв – шамотобетона $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$, плиты ШВП – 350, плиты жаростойкой ПВП – 280, плиты совелитовой, керамзитобетона $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$.

Определим коэффициенты теплопроводности для этих слоёв, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 t_{\text{ср1}};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,18 \text{ при } 500^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,23 \text{ при } 800^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,29 \text{ при } 1000^\circ\text{C};$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,16 \div 0,20;$$

$$\lambda_{\text{кл.4}} = 0,079 + 0,000186 t_{\text{ср4}};$$

$$\lambda_{\text{кл.5}} = 0,14.$$

Определим среднюю температуру свода на участке, $^\circ\text{C}$:

$$T_{\text{кл.1}} = \frac{1040 + 20}{2} = 530.$$

Найдем среднюю температуру слоёв свода по зависимостям, $^\circ\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = 0,8 T_{\text{кл.1}} = 0,8 \cdot 530 = 424;$$

$$T_{\text{ср.2}} = 0,5 T_{\text{ср.1}} = 0,5 \cdot 428 = 212;$$

$$T_{\text{ср.3}} = 0,5 T_{\text{ср.2}} = 0,5 \cdot 212 = 106;$$

$$T_{\text{ср.4}} = 0,5 T_{\text{ср.3}} = 0,5 \cdot 106 = 53;$$

$$T_{\text{ср.5}} = 0,5 T_{\text{ср.4}} = 0,5 \cdot 53 = 26,5.$$

Находим коэффициент теплопроводности слоёв кладки, исходя из их средней температуры, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$:

$$\lambda_{\text{кл.1}} = 0,641 + 0,00114 \cdot 424 = 1,12;$$

$$\lambda_{\text{кл.2}} = 0,18 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.3}} = 0,16 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.4}} = 0,079 + 0,000186 \cdot 53 = 0,09 ;$$

$$\lambda_{\text{кл.5}} = 0,14 .$$

Определим тепловое сопротивление слоёв, $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$:

$$\frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = \frac{0,05}{1,12} = 0,045 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = \frac{0,2}{0,18} = 1,11 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = \frac{0,06}{0,16} = 0,375 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.4}}}{\lambda_{\text{кл.4}}} = \frac{0,08}{0,09} = 0,9 ;$$

$$\frac{s_{\text{кл.5}}}{\lambda_{\text{кл.5}}} = \frac{0,09}{0,14} = 0,64 .$$

Определим удельный тепловой поток в окружающую среду, $\text{Вт} / \text{м}^2$

$$\alpha_2 = 13:$$

$$q_{\text{ст.1}} = \frac{t_{\text{кл.1}} - t_{\text{воз}}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{530 - 20}{(0,045 + 1,11 + 0,375 + 0,9 + 0,64) + 0,077} = 162,1 .$$

Уточняем температуру слоев свода по формулам, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_2 = t_{\text{кл.1}} - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.1}}}{\lambda_{\text{кл.1}}} = 530 - 162,1 \cdot 0,045 = 522,7 ;$$

$$t_3 = t_2 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.2}}}{\lambda_{\text{кл.2}}} = 522,7 - 162,1 \cdot 1,11 = 342,8 ;$$

$$t_4 = t_3 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.3}}}{\lambda_{\text{кл.3}}} = 342,8 - 162,1 \cdot 0,375 = 282,0 ;$$

$$t_5 = t_4 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.4}}}{\lambda_{\text{кл.4}}} = 282,0 - 162,1 \cdot 0,9 = 136,1 ;$$

$$t_6 = t_5 - q_{\text{ст.1}} \cdot \frac{s_{\text{кл.5}}}{\lambda_{\text{кл.5}}} = 136,1 - 162,1 \cdot 0,64 = 32,4 .$$

Уточним среднюю температуру слоёв свода и сравним с первоначально найденной, $^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\text{ср.1}} = \frac{530 + 522,7}{2} = 526,4 , \text{ а было } 424^{\circ}\text{C} ;$$

$$T_{\text{ср.2}} = \frac{522,7 + 342,8}{2} = 432,8 , \text{ а было } 212^{\circ}\text{C} ;$$

$$T_{\text{ср.3}} = \frac{342,8 + 282,0}{2} = 312,4, \text{ а было } 106^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.4}} = \frac{282,0 + 136,1}{2} = 209,1, \text{ а было } 53^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{ср.5}} = \frac{136,1 + 32,4}{2} = 84,3^{\circ}\text{C}, \text{ а было } 26,5^{\circ}\text{C}.$$

Определим поверхность кладки $F_{\text{кл}}$, м^2 :

$$F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2},$$

где F_1 и F_2 – поверхность внутренней и внешней поверхности свода, м^2 .

$$F_i = l_{\text{уч}} h_{\text{внеш(внутр)}}.$$

Для наружной поверхности, м^2 :

$$F_1 = 54,4 \cdot 2,86 = 155,58.$$

Для внутренней поверхности, м^2 :

$$F_2 = 54,4 \cdot 2,4 = 130,56.$$

$$\text{Тогда } F_{\text{кл}} = \sqrt{F_1 F_2} = \sqrt{155,58 \cdot 130,56} = 142,5 \text{ м}^2.$$

Определим потери на участке, кДж/ч :

$$Q_{\text{уч.5-8}} = 3,6 \cdot q_{\text{ст.1}} \cdot F_{\text{кл}} = 3,6 \cdot 162,1 \cdot 142,5 = 83157,3;$$

$$Q_{16} = \sum Q_{\text{иссте}} + \sum Q_{\text{иссвод}} =$$

$$= 58209,7 + 102660,1 + 67164,6 + 21097,8 + 83157,3 = 332289,5.$$

Потери теплоты с выходящим составом складываются из физической теплоты вспомогательной загрузки и физической теплоты вагонетки.

$$Q_{17} = P c_{\text{из}} t_{\text{из}} + g_{\text{м}} c_{\text{м}} t_{\text{м}} + \sum_{i=1}^N g_{\text{исл}} c_{\text{исл}} t_{\text{ср.в}},$$

где $t_{\text{из}}$ – температура изделий на выходе из печи, $t_{\text{из}} = 80^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{ср.в}}$ – средняя температура материала пода выходящей из печи вагонетки;

$$t_{\text{ср.в}} = 180^{\circ}\text{C};$$

$$t_{\text{м}} = 60^{\circ}\text{C} \text{ – средняя температура металлической части вагонетки.}$$

Определим теплоемкость изделия, исходя из его температуры, его состава и теплоемкости содержащихся в нем оксидов при $t_{\text{из}} = 80^{\circ}\text{C}$.

$$C_{\text{из}} = \frac{0,985 \cdot 74,53 + 1,17 \cdot 14,69 + 0,947 \cdot 1,05 + 0,788 \cdot 4,42 + 0,901 \cdot 1,19}{100} +$$

$$+ \frac{1,080 \cdot 1,27 + 0,923 \cdot 0,73 + 1,169 \cdot 0,2}{100} = 0,984 \text{ кДж/(кг К)}.$$

Определим теплоемкость материалов вагонетки при температуре $t_{\text{ср.в}} = 180^{\circ}\text{C}$ и их часовую массу;

Часовая масса металлической части вагонетки равна, кг/ч .

$$g_{\text{м}} = G V,$$

где G – масса металлической части вагонетки, кг , $G = 1300 \text{ кг}$;

V – скорость движения вагонетки, ваг/ч ;

$$g_m = 1300 \cdot 0,9 = 1114,3 \text{ кг/ч.}$$

Таблица 3.9

SiO ₂ (β-кварц)	C _{β-SiO₂}	0,783+0,000572*(t+273)	0,985	кДж/(кг К)
Al ₂ O ₃	C _{Al₂O₃}	1,126+0,000126*(t+273)	1,170	кДж/(кг К)
TiO ₂	C _{TiO₂}	0,942+0,000015*(t+273)	0,947	кДж/(кг К)
Fe ₂ O ₃	C _{Fe₂O₃}	0,616+0,000488*(t+273)	0,788	кДж/(кг К)
CaO	C _{CaO}	0,872+0,000081*(t+273)	0,901	кДж/(кг К)
MgO	C _{MgO}	1,016+0,000182*(t+273)	1,080	кДж/(кг К)
K ₂ O	C _{K₂O}	0,766+0,000444*(t+273)	0,923	кДж/(кг К)
Na ₂ O	C _{Na₂O}	1,040+0,000365*(t+273)	1,169	кДж/(кг К)

Определим теплоемкость первого слоя с шамотным кирпичом:

$$C_{к.ш} = 0,725 + 0,000134 \cdot 180 = 0,749 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Определим объем данного слоя, м³:

$$V_{ш.к} = a_{ш.к} \cdot b_{ш.к} \cdot s_{ш.к},$$

где $a_{ш.к}$ – ширина слоя с шамотным кирпичом;

$b_{ш.к}$ – длина слоя с шамотным кирпичом;

$s_{ш.к}$ – толщина слоя с шамотным кирпичом;

$$V_{ш.к} = a_{ш.к} \cdot b_{ш.к} \cdot s_{ш.к} = 4,24 \cdot 0,075 = 0,32 \text{ .}$$

Определим массу слоя с шамотным кирпичом, кг:

$$G_{ш.к} = \rho_{ш.к} \cdot V_{ш.к} = 1900 \cdot 0,32 = 604,7 \text{ .}$$

Определим часовую массу слоя с шамотным кирпичом, кг/ч:

$$g_{ш.к} = G_{ш.к} \cdot V = 604,7 \cdot 0,9 = 544,2 \text{ .}$$

Определим теплоемкость первого слоя с жаростойким бетоном:

$$C_{ж.б} = 0,837 + 0,000264 \cdot 180 = 0,884 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Определим объем жаропрочных блоков, м³:

$$V_{ж.б} = a_{ж.б} \cdot b_{ж.б} \cdot s_{ж.б} = (2,48 + 2,21) 0,28 \cdot 0,17 = 0,223 \text{ м}^3.$$

Определим массу жаропрочных блоков, кг:

$$G_{ж.б} = \rho_{ж.б} \cdot V_{ж.б} = 1900 \cdot 0,223 = 424,2 \text{ .}$$

Определим часовую массу слоя с жаростойким бетоном, кг/ч:

$$g_{ж.б} = G_{ж.б} \cdot V = 424,2 \cdot 0,9 = 381,8 \text{ .}$$

Определим теплоемкость второго слоя с перлитовыми плитами:

$$C_{п.п} = 0,92 + 0,000126 \cdot 180 = 0,942 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Определим объем перлитовых плит, м³:

$$V_{п.п} = a_{п.п} \cdot b_{п.п} \cdot s_{п.п} = 4,24 \cdot 0,10 = 0,424 \text{ .}$$

Определим массу перлитовых плит, кг:

$$G_{п.п} = \rho_{п.п} \cdot V_{п.п} = 400 \cdot 0,424 = 169,6 .$$

Определим часовую массу слоя с перлитовыми плитами, кг/ч:

$$g_{п.п} = G_{п.п} \cdot V = 169,6 \cdot 0,9 = 152,64 .$$

Определим теплоемкость слоя с ватой МКРР – 130:

$$C_{м.в} = 0,84 + 0,000126 \cdot 180 = 0,862 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Определим объем слоя ваты МКРР - 130, м³:

$$V_{м.в} = a_{м.в} \cdot v_{м.в} \cdot s_{м.в} = 4,24 \cdot 0,02 = 0,085 .$$

Определим массу ваты МКРР - 130, кг:

$$G_{м.в} = \rho_{м.в} \cdot V_{м.в} = 130 \cdot 0,085 = 11 .$$

Определим часовую массу слоя с ватой МКРР - 130, кг/ч:

$$g_{м.в} = G_{м.в} \cdot V = 11 \cdot 0,9 = 9,9 .$$

Определим теплоемкость слоя вермикулита:

$$C_{в.з} = 0,754 + 0,00015 \cdot 180 = 0,781 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Определим объем слоя вермикулита, м³:

$$V_{в} = a_{в} \cdot v_{в} \cdot s_{в} = 6,338 \cdot 0,07 = 0,443 .$$

Определим массу вермикулита, кг:

$$G_{в} = \rho_{в} \cdot V_{в} = 650 \cdot 0,443 = 287,95.$$

Определим часовую массу вермикулита, кг/ч:

$$g_{в} = G_{в} \cdot V = 287,95 \cdot 0,9 = 259,16 .$$

$$Q_{в} = \left(1114,3 \cdot 0,4606 \cdot 60 + (544,2 \cdot 0,749 + 381,8 \cdot 0,884 + 152,64 \cdot 0,942 + 9,9 \cdot 0,862 + 259,16 \cdot 0,781) 180 \right) = 228766,0 \text{ кДж/ч}$$

тогда

$$Q_{17} = P \cdot c_{из} \cdot t_{из} + Q_{в} = 5863,99 \cdot 0,984 \cdot 80 + 228766,0 = 690379,3 \text{ кДж/ч}.$$

Потери теплоты через под в наружную среду.

Общая величина теплоотдачи равна, кДж/ч:

$$Q_{18} = 3,6 N F_{в} (t_{нар.сл} - t_{пп}) \alpha_{пп},$$

где N – общее число вагонеток в зоне охлаждения, шт;

$F_{в}$ – площадь пода одной вагонетки, м²;

$t_{пп}$ – принятая ранее температура в подвагонеточном пространстве, °С;

$\alpha_{пп}$ – соответствующий коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$t_{нар.сл}$ – температура поверхности наружного слоя, т.е. полусуммы температур входящего состава и температуры поверхности наружного слоя в конце зоны обжига, °С.

$$T_{нар.сл} = \frac{t_{н} + t_{нар}}{2} \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$T_{нар.сл} = \frac{70 + 390,5}{2} = 230,25 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$Q_{18} = 3,6 \cdot 42 \cdot 6,944 (230,25 - 90) 16,2 = 2385499,8 \text{ кДж/ч}.$$

Теплота нагретого воздуха, используемого на сторону, кДж/ч

$$Q_{19} = c_{nc} \cdot t_{nc} \cdot X ,$$

где t_{nc} – температура нагретого воздуха, используемая на сторону,

$$t_{nc} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

c_{nc} – теплоемкость нагретого воздуха, $c_{nc} = 1,31 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

$$Q_{19} = 1,31 \cdot 250 \cdot X = 327,5 X .$$

Прочие (неучтенные) потери теплоты примем в размере 10% от учтенных потерь, кДж/ч:

$$Q_{20} = 0,1 (Q_{16} + Q_{17} + Q_{18} + Q_{19})$$

$$Q_{20} = 0,1 (332289,5 + 690379,3 + 2385499,8 + 327,5 X) = 340816,86 + 32,75 X .$$

Количество воздуха, используемого на сторону X, определяем из теплового баланса зоны охлаждения путем приравнивания статьи расхода и прихода теплоты:

$$(332289,5 + 690379,3 + 2385499,8 + 327,5 X) + 340816,86 + 32,75 X = 7680758,6 + 25,8 X$$

$$334,45 \cdot X = 3931773,14;$$

$$X = 11755,9 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} .$$

Составим таблицу (табл.3.10) теплового баланса зоны охлаждения.

Таблица 3.10

Тепловой баланс зоны охлаждения

Приход теплоты	кДж/ч	%	Расход теплоты	кДж/ч	%
1. Физическая теплота состава, поступающего из зоны обжига	7680758,6	96,20	1.Потери теплоты через стены и свод	332289,5	4,16
2. Физическая теплота воздуха, поступающего в зону охлаждения	303302,2	3,80	2.Потери теплоты с выходящим составом	690379,3	8,65
			3. Теплоотдача нижней поверхностью вагонеток	2385499,8	29,88
			4. Теплота нагретого воздуха, используемого на сторону	3850057,3	48,22
			5. Неучтенные потери	725822,6	9,09
			Невязка	12,3	0,00
Сумма	7984060,8	100	Сумма	7984060,8	100

Невязка составляет:

$$\Delta\% = \frac{7984060,8 - 7984048,5}{7984060,8} 100 = 1,54 \cdot 10^{-4}\%$$

Составим сводную таблицу (табл.3.11) теплового баланса для всей печи в целом. При составлении сводной таблицы аналогичные статьи расхода теплоты из обоих частных балансов (потери теплоты через стены и свод и теплоотдачи нижних поверхностей вагонеток) суммируем. Статья «Физическая теплота нагретого состава» входит в баланс зоны подогрева и обжига как расходная – Q_8 , а в баланс зоны охлаждения как приходная Q_{14} , поэтому при составлении сводного баланса она выпадает.

Таблица 3.11

Сводный тепловой баланс печи обжига

Приход теплоты	кДж/ч	%	Расход теплоты	кДж/ч	%
1. Химическая теплота сгорания топлива	14812106,3	94,40	1. Расход тепла на испарение физической влаги	229640,8	1,46
2. Физическая теплота топлива	13245,2	0,08	2. Расход теплоты на химические процессы	1801509,7	11,48
3. Физическая теплота воздуха для горения	204698,4	1,31	3. Потери теплоты с выходящим составом	690379,3	4,40
4. Физическая теплота подсасываемого воздуха	201507,6	1,28	4. Потери тепла с уходящими газами	2903807,6	18,51
5. Физическая теплота входящего состава и садки	155371,6	0,99	5. Потери теплоты через стены и свод	746261,5	4,76
6. Физическая теплота воздуха, поступающего в зону охлаждения	303302,2	1,94	6. Теплота нагретого воздуха, используемого на сторону	3850057,3	24,53
			7. Теплоотдача нижней поверхностью вагонетки	4299103,6	27,40
			8. Прочие потери и расходы	1170163,6	7,46
			Невязка	-692,1	0,00
Сумма	15690231,3	100	Сумма	15690231,3	100

Невязка составляет:

$$\Delta\% = \left| \frac{15690231,3 - 15690923,4}{15690923,4} \right| 100 = 0,0044\%.$$

3.5. Определение термического коэффициента полезного действия печи

Критерием оценки качества работы печи является коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение полезно затраченной теплоты к общему количеству теплоты, полученной в результате сжигания топлива.

К полезно затраченной теплоте следует отнести теплоту, пошедшую на нагрев садки до максимальной температуры обжига Q_n ; теплоту, затраченную на испарение физической влаги $Q_{исп}$, теплоту, затраченную на химические процессы Q_x .

$$\eta = \frac{Q_n + Q_{исп} + Q_x}{Q_{х.т}}$$

Величины $Q_{исп}$, Q_x , $Q_{х.т}$ берем из соответствующих статей теплового баланса зон подогрева и обжига, а Q_n , кДж/ч:

$$Q_n = P c_k t_k - P_c c_n t_n,$$

где P и P_c – соответственно часовая производительность печи по обожженному и сухому материалу, кг/ч;

$c_k t_k$ – энтальпия материала в конце нагрева до конечной температуры обжига, кДж/кг;

$c_n t_n$ – энтальпия материала в начале нагрева при начальной температуре, кДж/кг.

$$Q_n = 5863,99 \cdot 1,18 \cdot 1040 - 6241,6 \cdot 0,956 \cdot 20 = -7076949,1 \text{ кДж/ч.}$$

$$\eta = \frac{7076949,1 + 229640,8 + 1801509,7}{14812106,3} = 0,61.$$

Глава 4. Аэродинамические расчеты

4.1. Аэродинамический расчет

Аэродинамический расчет выполнен для определения сопротивлений на пути движения газов, воздуха и продуктов горения, что необходимо для выбора тягодутьевых устройств.

Определим разность между объемом продуктов горения и количеством израсходованного воздуха, $\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$:

$$\Delta V = V_0^\alpha - L_\alpha,$$

где L_α - действительный расход атмосферного воздуха с учетом коэффициента расхода воздуха, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$;

$$\Delta V = 20,06 - 18,76 = 1,3 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}.$$

Количество продуктов горения, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$:

$$V'_{\text{пр}} = \frac{V_0^\alpha \cdot B}{3600} = \frac{20,06 \cdot 422,9}{3600} = 2,36.$$

Количество уходящих из печи газов при α' , $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$:

$$V''_{\text{пр}} = \frac{B(L_0 \cdot \alpha' + \Delta V)}{3600} = \frac{422,9(9,31 \cdot 3 + 1,3)}{3600} = 3,43 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Количество печных газов, проходящих по рабочему пространству печи, определяем как среднее от $V'_{\text{пр}}$, $V''_{\text{пр}}$, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$:

$$V_{0.\text{ср}} = \frac{V'_{\text{пр}} + V''_{\text{пр}}}{2} = \frac{2,36 + 3,43}{2} = 2,90.$$

Количество дымовых газов поступающих в дымосос при α'' , $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$:

$$V'''_{\text{пр}} = \frac{B(L_0 \cdot \alpha'' + \Delta V) + V_{\text{дег}}}{3600} = \frac{422,9(9,31 \cdot 4 + 1,3)}{3600} = 4,53.$$

Свободное сечение для прохода газов в садке составляет примерно 40% от общего сечения туннеля, м^2 :

$$f = 0,4 H B,$$

где H – высота от пода до замка свода печи, м ;

B – ширина туннеля в свету, м .

$$f = 0,4 \cdot 2,14 \cdot 2,4 = 2,05 \text{ м}^2.$$

Средняя скорость движения газов в печи, м/с:

$$\omega_0 = \frac{V_{0, \text{ср}}}{f} = \frac{2,90}{2,05} = 1,41.$$

Находим среднюю температуру газов, °С:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{к}} + t_{\text{yx}}}{2} = \frac{1040 + 125}{2} = 582,5.$$

Сопротивление садки изделий на вагонетках туннельных печей, н/м²:

$$h_c = \xi_c \frac{\omega_0^2}{2} \rho (1 + \beta t_{\text{ср}}),$$

где ξ_c – коэффициент сопротивления садки, $\xi_c = (0,4 \div 0,5) L$, здесь L – общая длина зоны подогрева и половина зоны обжига, м, $\xi_c = 0,4 \cdot 70 = 28$

$\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ – принятая плотность дымовых газов;

$\beta = 1/273$ – принятый коэффициент объемного расширения газов;

$$h_c = 28 \frac{1,41^2}{2} 1,3 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 582,5 \right) = 113,4 \text{ н/м}^2.$$

Принимаем указанные в табл. 4.1 значения аэродинамических сопротивлений на пути движения дымовых газов, н/м²

Таблица 4.1

Аэродинамические сопротивления на пути движения дымовых газов

Наименование сопротивления	$h_{\text{пот}}, \text{ н/м}^2$
Сопротивление садки	113,4
Вход в отборные каналы	15,0
Поворот на 90° в отборном канале	3,7
Трение в отборных кирпичных каналах	0,4
Выход в сборную камеру с расширением	0,3
Вход в дымоход, сужение	2,8
Повороты на 90° к дымососу	10,0
Трение в общем дымоходе	4,5
Сопротивление поворотной заслонки	3,2
Трение в дымовой трубе	7,0
Выход газов в атмосферу	9,8
Всего	170,1

Часовой объем отработанных (дымовых) газов, $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$:

$$V = V_0 \frac{273 + 125}{273} 3600 = 2,90 \frac{273 + 125}{273} 3600 = 15220.$$

Плотность дымовых газов при $t_{\text{yx}} = 125^\circ\text{C}$, кг/м³:

$$\rho^{125} = \rho_0 \frac{273}{273 + 125} = 1,3 \frac{273}{273 + 125} = 0,89 .$$

Тогда приведенные аэродинамические потери, н/м² :

$$\sum h_{\text{пот}} = h_{\text{пот}} \frac{1,2}{\rho^{125}} = 170,1 \frac{1,2}{0,89} = 229 .$$

4.2. Подбор дымососа

Исходными данными для подбора дымососа являются:

требуемая производительность (подача) вентилятора V , $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$;

полное давление $P_{\text{пол}}$, Па, которое он должен развивать:

$$P_{\text{пол}} = \sum h_{\text{пот}} + P_{\text{дин}}$$

где $\sum h_{\text{пот}}$ - сумма всех рассчитанных аэродинамических сопротивлений, Па,

$P_{\text{дин}}$ - динамическое давление, создаваемое вентилятором, Па, нанесенное на его рабочей характеристике;

$$V = 15220 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \text{ и } \sum h_{\text{пот}} = 229 \text{ н/м}^2 .$$

По этим данным принимаем дымосос № Д-12:

- производительность $V = 17500 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$;

- полное давление, $P_{\text{пол}} = 600 \text{ н/м}^2$.

Требуемая мощность N двигателя для вентилятора с учетом 20 % запаса, кВт:

$$N = \frac{1,2 V P_{\text{пол}}}{3600 \eta_v \cdot \eta_n \cdot 1000} = \frac{1,2 \cdot 17500 \cdot 600}{3600 \cdot 0,98 \cdot 0,78 \cdot 1000} = 4,7 ,$$

где η_n – КПД передачи с помощью эластичной муфты.

Число оборотов ротора:

$$n = \frac{A}{\text{№вент}} = \frac{5800}{12} = 485 \text{ об/мин.}$$

Библиографический список

1. Роговой, М.И. Теплотехническое оборудование керамических заводов / М.И. Роговой. М.: Стройиздат, 1983.
2. Перегудов, В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и материалов / В.В.Перегудов, М.И. Роговой. М.: Стройиздат, 1983.
3. Мазуров, Д.Я. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов / Д.Я. Мазуров, М.И. Роговой, Ю.М. Волгина. М.: Стройиздат, 1966.
4. Норхатян, К.А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики / К.А. Норхатян.– М.:Госстройиздат, 1962.
5. Левченко, П.В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности/ П.В. Левченко. – М.: Перепечатка с издания 1968 г., 2007.
6. Тихи, О. Обжиг керамики / О.Тихи. – М.: Стройиздат, 1988.
7. Августиник, А.И. Керамика / А.И. Августиник. – М.: Промстройиздат, 1957.

Приложения

Таблица 1

Плотность некоторых материалов

Наименование	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Наименование	Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Антрацит	1,3—1,8	Кварцит сырой	2,66—2,67
Асбест	2,1-2,8	Мел	1,8—2,7
Бурый уголь	1,1—1,44	Мергель	2,3—2,5
Гипс кристаллический	2,17—2,31	Пемза	0,37—0,9
Глина сухая	1,25—1,52	Песок сухой	1,4-1,65
Доломит	2,1—2,95	Песок мокрый	1,95—2,05
Известняк	2,3—3,0	Торф сухой	0,1 —1,0
Каменный уголь	1,2-1,5	Шлак	2,5—3,0

Таблица 2

Средняя удельная теплоемкость некоторых твердых материалов
при 0 - 100 °С

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

Коэффициенты теплопроводности огнеупорных
и теплоизоляционных материалов

Изделия	ρ , кг/м ³	Допустимая рабочая температура, К	λ , Вт/(м · К)
Шамотные	>1900	1350 — 1500	1,04 + 0,00015 t
»	1900	1350 — 1500	0,70 + 0,00064 t
»	1300	1300	0,61 + 0,00018 t
»	1200	1300	0,35 + 0,00035 t
»	1000	1250	0,28 + 0,00023 t
»	800	1200	0,21 + 0,00043 t
Динасовые	1900	1650 — 1700	1,07 + 0,00093 t
»	1900	1650 — 1700	0,81 + 0,00076 t
»	1100	1500	0,58 + 0,00043 t
Полукислый кирпич	1800	1250 — 1400	0,85 + 0,00040 t
Керамический кирпич	1800	700	0,47 + 0,00051 t
Высокоглиноземистые	2500	1900	2,1 – 0,00062 t
»	2200	1600	1,52 – 0,00018 t
»	1330	1450	0,66 + 0,00008 t
Корундовые	2600 — 2900	1600 — 1700	2,1 + 0,00215 t
Силлиманитовые	2200 — 2600	1650	1,66 – 0,00018 t
Муллитовые	2200 — 2900	1750	2,96 – 0,00110 t
Магнезитовые	2600 — 2700	1650 — 1750	6,2 – 0,00270 t
»	2600 — 2700	1650 — 1750	4,6 – 0,00120 t
Магнезитохромитовые	2700 — 2900	1750	4,0 – 0,00082 t
Хромомагнезитовые	2900	1750	2,0 – 0,00035 t
Форстеритовые	3000	1800	3,3 – 0,00110 t
Периклазошпинельные	3000	1750	2,5 – 0,00058 t
Карборундовые	2000 — 2500	1400 — 1500	5,2 – 0,00130 t
Угольные	1350 — 1600	2000	23,2 + 0,00035 t
Диатомитовые	1100	900	0,27 + 0,00023 t
»	750	900	0,17 + 0,00035 t
Диатомовая засыпка	500	700	0,10 + 0,00028 t
Шамотная засыпка	1000	1000	0,23 + 0,00049 t
Шлаковая вата	300	700	0,065 + 0,00035 t

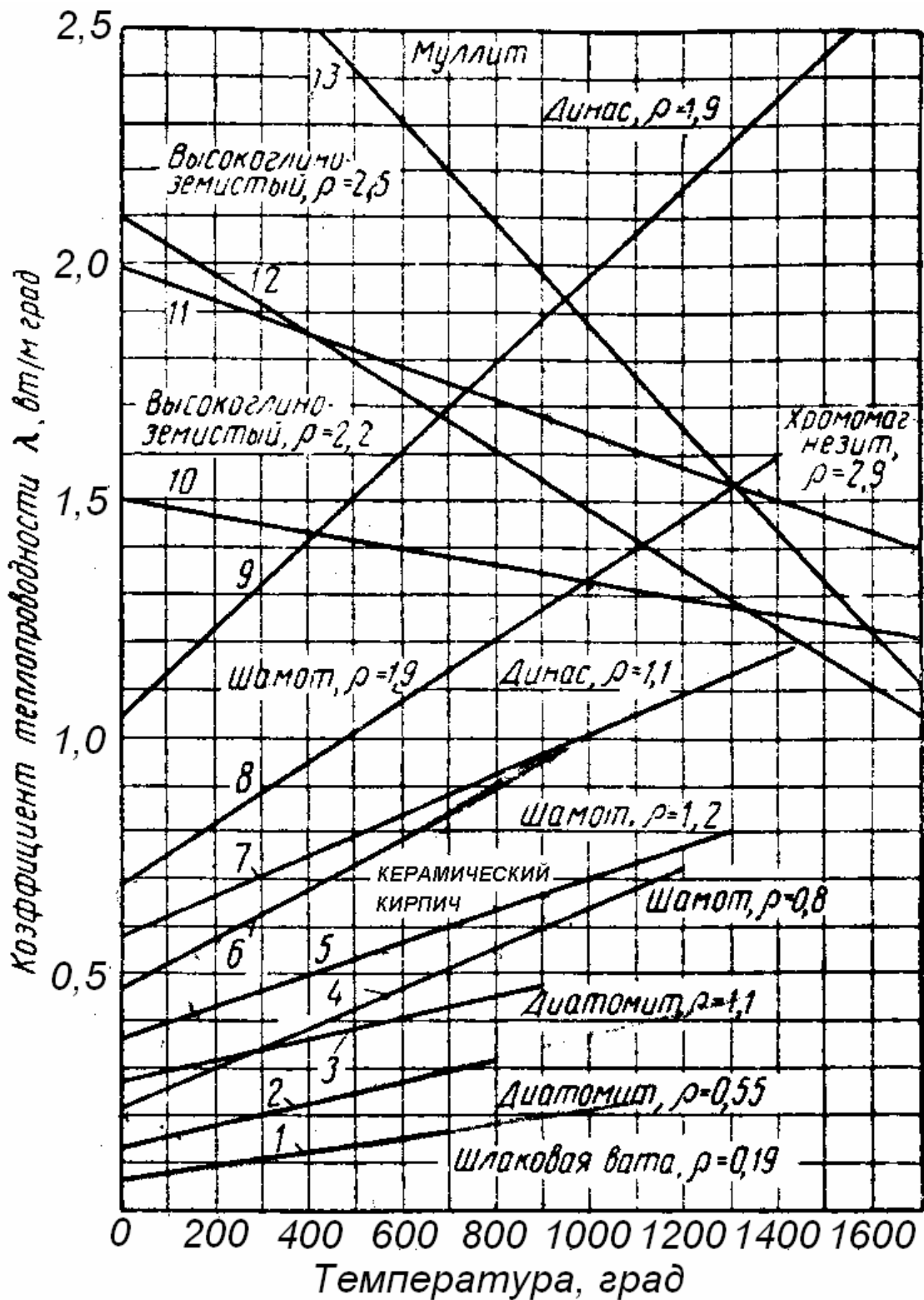


Рис.1. Коэффициент теплопроводности материалов:

1- шлаковая вата, $\rho = 0,19$; 2 – диатомит, $\rho = 0,55$; 3 – шамот, $\rho = 0,8$; 4 – диатомит, $\rho = 1,1$; 5 – шамот, $\rho = 1,2$; 6 – керамический кирпич; 7 – динас, $\rho = 1,1$; 8 – шамот, $\rho = 1,9$; 9 – динас, $\rho = 1,9$; 10 – высокоглиноземистый, $\rho = 2,2$; 11 – хромомагнетит, $\rho = 2,9$; 12 – высокоглиноземистый, $\rho = 2,5$; 13 - муллит

Таблица 4

Характеристика твердых топлив России

Наименование месторождения и район	Марка и сорт	Влага ω_p , %	Зола A^c , %	Состав горючей массы, мас. %						Теплотвор. сп. Q_H^p , кДж/кг	Максимальное содержание, %	
				$S_{\text{общ}}^r$	C^r	H^r	N^r	O^r	L^r		ω_p	A^c
Кузнецкий бассейн:												
Кемеровское	ПС, СС	9,0	16,0	0,7	86,0	5,0	2,0	6,3	26	21186	12	22
>>	ПС, Т	8,0	16,0	0,7	90,5	4,3	2,0	2,5	14	26629	11	24
Ленинское	Д	10,0	5,5	0,5	79,0	5,5	2,4	12,6	40	26378	—	—
>>	Г	8,5	11,0	0,7	83,0	5,8	2,7	7,8	39	26755	11	14
Араличевское	Т	7,0	16,0	0,7	89,0	4,1	2,0	4,2	10	26462	9	22
Карагандинский бассейн	ПЖ, ПС	7,5	27,0	1,2	85,0	5,1	1,4	7,3	28	22421	12	32
Подмосковный бассейн	Б	32,5	35,0	5,9	67,0	5,0	1,3	20,8	45	10635	37	45
Печорский бассейн:												
Воркутское	ПЖ	8,0	23,0	1,3	85,0	5,3	2,2	6,2	30	23740	16	35
Урал:												
Богословское.....	Б	29,0	20,0	0,6	70,0	4,5	1,3	23,6	45	13859	35	30
Буланашское.....	Г	11,0	24,0	1,3	80,5	5,5	1,5	11,2	40	21396	15	30
Челябинское.....	Б	17,0	32,0	2,1	72,0	5,2	1,7	19,0	43	15157	25	40
Башкирское:												
Бабаевское.....	Б	45,0	25,0	1,2	68,0	6,3	0,6	23,9	63	9965	—	—
Красноярский край:												
Канский бассейн.....	Б	33,0	16,0	1,0	72,0	5,0	1,3	20,7	48	14361	37	25
Хакасская авт. обл.:												
Минусинское.....	Д	13,0	12,0	0,7	78,0	5,5	2,2	13,6	42	23322	20	20
Иркутская область:												
Черемховское.....	Д	12,0	17,0	1,4	78,0	5,7	1,6	13,3	45	22317	16	28

Окончание табл. 4

Наименование месторождения и район	Марка и сорт	Влага ω_p , %	Зола A^c , %	Состав горючей массы, % (по весу)						Теплотвор. сп Q_H^p , кДж/кг	Максимальное содержание, %	
				$S_{\text{общ}}^r$	C^r	H^r	N^r	O^r	L^r		ω_p	A^c
Бурят-Монгольское:												
Гусино-Озерское	Б	21,0	20,0	0,9	75,0	5,0	1,0	18,1	43	17711	25	30
Читинская область:												
Тарбагатайское	Б	25,0	15,0	1,5	74,0	5,1	1,3	18,1	43	17585	30	25
Черновское	Б	33,0	11,0	0,8	75,0	5,0	1,3	17,9	42	16413	40	16
Букачачинское	Г	8,0	10,0	0,7	82,0	5,5	1,1	10,7	38	26587	12	15
Хабаровский край:												
Райчихинское	Б	40,0	12,0	0,3	70,5	4,3	1,0	23,9	43	12603	45	17
Буреинское	Г	8,0	30,0	0,4	81,0	6,0	1,5	11,1	41	20726	—	—
Приморский край:												
Липовецкое	Д	8,0	35,0	0,5	76,0	6,0	1,0	16,5	50	17711	—	—
Ворошиловское	СС	5,0	45,0	0,4	84,0	5,5	1,0	9,1	27	17124	—	—
Подгородненское . . .	Т	4,5	36,0	0,5	87,0	4,8	1,3	6,4	17	20412	—	—
Сучанское	ПЖ	7,0	23,5	0,6	85,5	5,0	1,4	7,5	29	23489	15	35
О. Северный Сахалин:												
Мгачинское	Д	7,0	9,0	0,3	80,0	6,3	1,6	11,8	47	26357	—	—
Октябрьское	К	4,0	12,0	0,5	88,0	5,1	2,0	4,4	23	29476	—	—
>>	Т	6,0	7,0	0,5	90,0	4,5	2,0	3,0	18	30733	—	—
О. Южный Сахалин . .	Г	8,0	10,0	0,4	82,5	6,0	2,0	9,1	40	27383	—	—
Другие виды:												
торф кусковой . . .		40,0	11,0	0,3	57,8	6,0	2,5	33,4	70,0	10719	53	—
торф фрезерный . .		50,0	11,0	0,3	57,8	6,0	2,5	33,4	70,1	8500	55	—
кокс (25 мм)		4,0	11,0	1,0	96,5	0,4	1,2	0,9		27802	—	—

Таблица 5

Состав искусственных газообразных топлив

Газ	Состав сухого газа, об. %								Q_H^C кДж/(н·м ³)
	CO	H ₂	CH ₄	C _m H _n	H ₂ S	CO ₂	N ₂	O ₂	
Коксовый	7,0	57,0	23,0	2,0	0,5	2,0	7,5	1,0	16748
Генераторный воздушный	33,0	1,0	0,5	—	—	0,5	65,0	—	4606
Генераторный паровоздушный:									
из антрацита, коксика	27,5	13,5	0,5	—	0,2	5,5	52,6	0,2	5150
газовых углей	26,5	13,5	2,5	0,3	0,1	5,0	51,9	0,2	5862
бурых углей	30,0	13,0	2,0	0,2	0,2	5,0	49,4	0,2	6071
торфа кускового	28,0	15,0	3,0	0,5	0,1	8,0	45,2	0,2	6490
древесины (щепа)	29,0	14,0	3,0	0,5	—	6,5	46,8	0,2	6490
Доменный газ из кокса	28,0	2,7	0,3	—	—	10,5	58,2	—	3980
Газ подземной газификации (Горловка)	17,0	16,0	1,5	—	—	10,2	55,0	0,3	4190
Газ, полученный под давлением, из бурых углей	14,3	40,0	10,0	1,0	—	33,0	1,5	0,2	10890

Таблица 6

Состав и свойства природных газов

Наименование газа (месторождение)	Состав сухого газа, об. %								Тепло- провод- ность, кДж/м ³	Плотность сухого газа, кг/м ³	Пределы взрываемости	
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S			низший	высший
Природный газ												
Ставропольский	98,0	0,3	0,1	0,1	—	0,3	1,2	—	35380	0,800	5	15
Саратовский (Елшанская)	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3	—	35720	0,765	6	15
Коми АССР	85,9	3,1	1,0	0,4	0,1	0,1	9,4	—	33370	0,804	5	15
Бугуруслановский (Поволжье)	81,7	5,0	2,0	1,2	0,6	0,4	8,5	0,6	36720	0,884	—	—
Березовский-Игримский (северный Урал)	91,6	1,6	0,8	0,4	0,2	0,6	4,7	0,1	33100	0,780	—	—

Таблица 7

Характеристика мазутов по маркам

Показатели	Марка мазута				
	20	40	60	80	100
Условная вязкость при 80 °С	2,5-5,0	5,0-8,0	8,0-	11-13	13-15,5
Температура застывания, °С	+5	+10	11,0	+20	+25
Температура вспышки в открытом тигле, °С	80	100	110	120	125
Плотность, т/м ³ :					
при 0 °С	0,961	0,992	1,010	1,058	0,962
100 °С	0,905	0,938	0,962	1,018	0,900
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К):			0,135		
при 30 °С			0,130		
70 °С					
Теплоемкость, кДж/(кг·К) при 20—100 °С			1,88-2,05		
Содержание серы, %:					
малосернистый мазут			0,5		
сернистый мазут			1,0		
высокосернистый мазут			3,5		

Таблица 8

Состав и теплотворность жидких топлив

Наименование топлива	Элементарный состав, %						Q _н ^p , кДж/кг
	C ^r	H ^r	S ^r	N ^r +O ^r	A ^p	ω ^p	
Мазут малосернистый марки:							
20	87,2	11,7	0,5	0,6	0,1	2,0	40400
40	87,4	11,2	0,5	0,9	0,2	3,0	39440
60	87,6	10,7	0,7	1,0	0,2	3,0	39020
80 и 100	87,6	10,5	0,9	1,0	0,3	4,0	38690
Мазут сернистый марки:							
10	85,2	11,6	2,5	0,7	0,1	1,0	40280
20	85,0	11,6	2,9	0,5	0,2	2,0	39610
40	85,0	11,4	3,2	0,4	0,3	3,0	38850
Смолы генераторные	72—90	7—11	0,2—1,7	2—10	1,0	5,0	33915
Солярное масло	86,5	12,8	0,4	0,3	—	—	42330
Бензин	85,0	14,9	0,05	0,05	—	—	43750

Таблица 9

Средние теплоемкости газов при разных температурах C_0^t , кДж/(м³·К)

t, °C	CO ₂	SO ₂	H ₂ S	H ₂ O	H ₂	CO	N ₂	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₄
0	1,5998	1,7334	1,5073	1,4943	1,2766	1,2992	1,2946	1,3059	1,5500	1,8268
100	1,7003	1,8130	1,5324	1,5052	1,2908	1,3017	1,2959	1,3176	1,6421	2,0621
200	1,7874	1,8883	1,5617	1,5224	1,2971	1,3072	1,2996	1,3352	1,7590	2,2828
300	1,8628	1,9553	1,5952	1,5425	1,2992	1,3168	1,3068	1,3562	1,8862	2,4955
400	1,9298	2,0181	1,6329	1,5655	1,3022	1,3289	1,3164	1,3775	2,0156	2,6860
500	2,9888	2,0684	1,6706	1,5898	1,3051	1,3428	1,3277	1,3980	2,1404	2,8635
600	2,0412	2,1144	1,7083	1,6149	1,3080	1,3574	1,3402	1,4168	2,2610	3,0259
700	2,0885	2,1521	1,7460	1,6413	1,3122	1,3721	1,3537	1,4345	2,3770	3,1700
800	2,1312	2,1814	1,7837	1,6681	1,3168	1,3863	1,3670	1,4500	2,4942	3,3082
900	2,1693	2,2149	1,8172	1,6957	1,3227	1,3997	1,3796	1,4646	2,6026	3,4317
1000	2,2036	2,2359	1,8507	1,7230	1,3289	1,4127	1,3918	1,4776	2,6994	3,5472
1100	2,2350	2,2610	1,8842	1,7502	1,3361	1,4248	1,4035	1,4893	7,7865	3,6657
1200	2,2639	2,2777	1,9093	1,7770	1,3432	1,4361	1,4144	1,5006	2,8631	3,7528
1300	2,2899	—	—	1,8029	1,3511	1,4466	1,4253	1,5107	—	—
1400	2,3137	—	—	1,8280	1,3591	1,4567	1,4349	1,5203	—	—
1500	2,3355	—	—	1,8527	1,3675	1,4659	1,4441	1,5295	—	—
1600	2,3556	—	—	1,8762	1,3754	1,4747	1,4529	1,5379	—	—
1700	2,3745	—	—	1,8996	1,3834	1,4826	1,4613	1,5463	—	—
1800	2,3916	—	—	1,9214	1,3918	1,4901	1,4688	1,5542	—	—
1900	2,4075	—	—	1,9224	1,3997	1,4973	1,4759	1,5618	—	—
2000	2,4222	—	—	1,9629	1,4077	1,5040	1,4826	1,5693	—	—
2100	2,4360	—	—	1,9825	1,4152	1,5102	1,4893	1,5760	—	—
2200	2,4486	—	—	2,0010	1,4227	1,5161	1,4952	1,5831	—	—
2300	2,4603	—	—	2,0190	1,4303	1,5216	1,5010	1,5898	—	—
2400	2,4712	—	—	2,0366	1,4374	1,5270	1,5065	1,5965	—	—
2500	2,4812	—	—	2,0529	1,4449	1,5320	1,5115	1,6028	—	—

Таблица 10

Плотность и теплота сгорания отдельных газов

Чистые газы	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Теплотворность		
		высшая Q_B , кДж/кг	низшая Q_H , кДж/кг	низшая Q_H , кДж/м ³
Водород Н ₂	0,0898	142986	20376	10760
Окись углерода СО	1,250	10110	10110	12636
Сероводород Н ₂ S	1,539	16400	15070	23150
Метан СН ₄	0,717	55690	50030	35820
Этилен С ₂ Н ₄	1,261	49775	46543	58690
Этан С ₂ Н ₆	1,356	51919	47522	63751
Пропан С ₃ Н ₈	2,020	50495	46329	91256
Бутан С ₄ Н ₁₀	2,840	49616	45848	118651
Пентан С ₅ Н ₁₂	3,218	49114	45345	145833
Гексан С ₆ Н ₁₄	3,840	48862	45178	162112
Кислород О ₂	1,429	—	—	—
Азот N ₂	1,251	—	—	—
Двуокись углерода СО ₂	1,977	—	—	—
Водяной пар Н ₂ О	0,804	—	—	—
Сернистый газ SO ₂	2,852	—	—	—

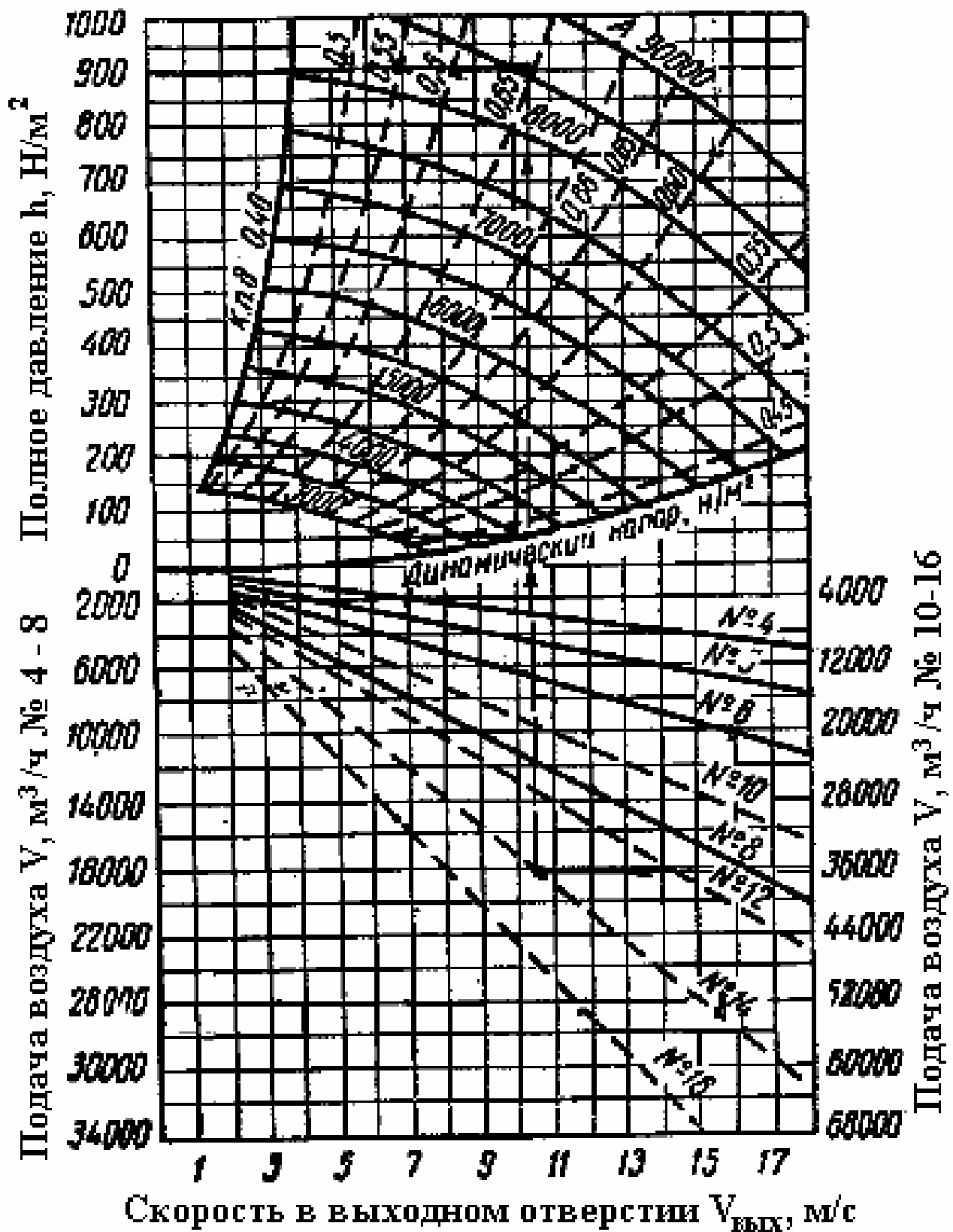


Рис. 2. Номограмма для подбора центробежного вентилятора низкого давления серии ВРН

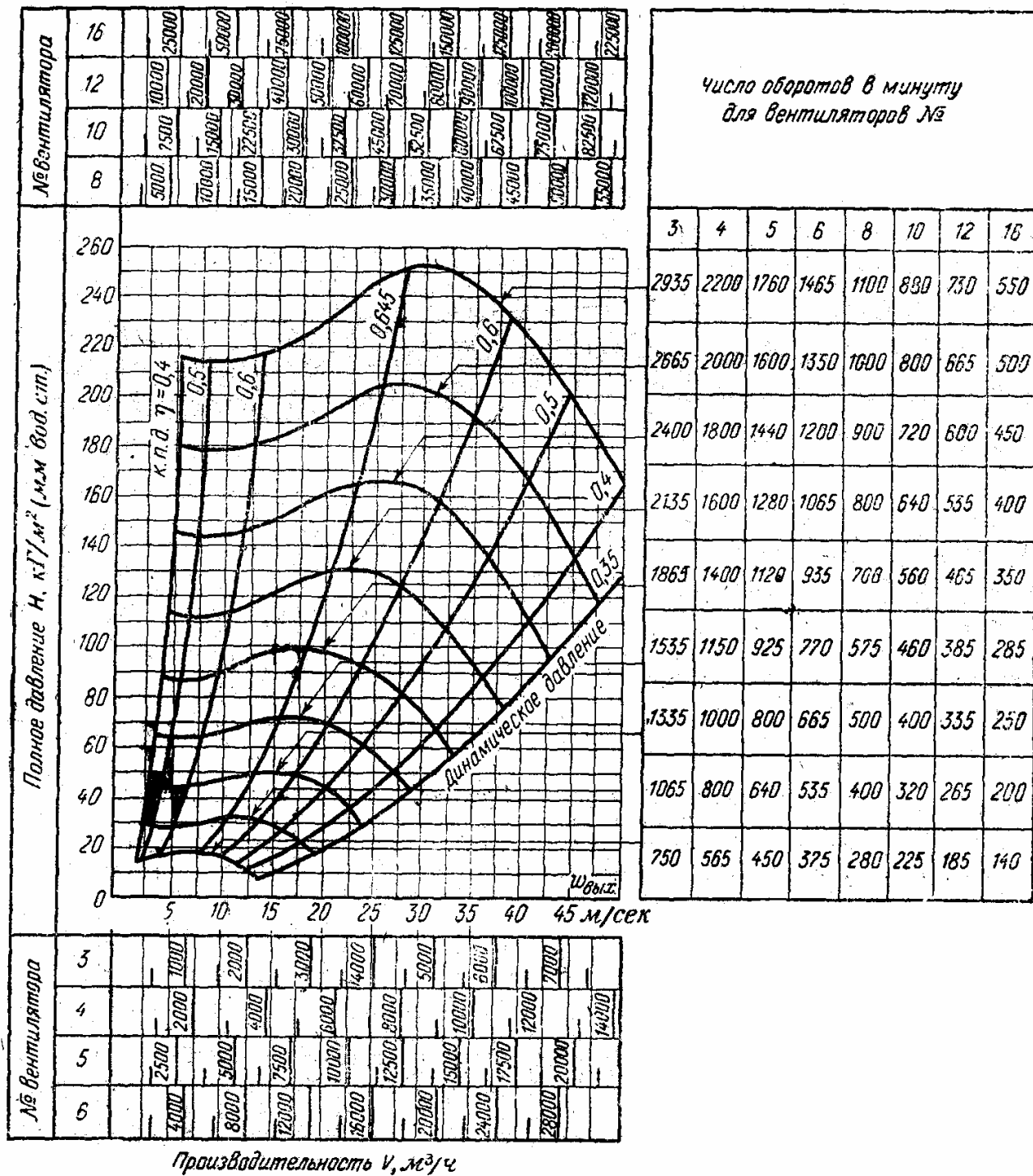


Рис. 3. Номограмма для подбора центробежных вентиляторов среднего давления СТД - 57

Таблица 11

Характеристика вентиляторов и дымососов с односторонним всасыванием

Тип	Производительность, м ³ /ч	Полное давление, н/м ²	Скорость вращения, об/мин	Мощность электродвигателя, кВт
ВД-12	17 500	960	485	5,2
	27 500	2180	730	17,5
	35 000	3795	970	41,0
Д-12	17 500	600	485	45,0
	27 500	1350	730	54,0
	35 000	2370	970	101,0
ВД-13,5	25 000	1200	485	12,5
	37 500	2730	730	42,7
	50 000	4825	970	100,0
Д-13,5	25 000	755	485	7,8
	37 500	1720	730	26,6
ВД-15,5	45 000	2305	585	42,5
	55000	3570	730	82,0
	73 000	6305	970	193,0
Д-15,5	45000	1500	585	26,3
	55000	2225	730	51,0
	66 500	3940	970	120,0
ВД-18	65 000	3100	585	94,0
	90000	3990	730	182,0
Д-18	65000	1920	585	58,3
	90 000	3020	730	113,0
ВД-20	100 000	3875	585	160,0
	125 000	5980	730	310,0
Д-20	100 000	2400	585	100,0
	125000	3730	730	192,0

Характеристика дымососов с двусторонним всасыванием газов

Тип	Производительность, $m^3/ч$	Полное давление, n/m^2	Скорость вращения, $об/мин$	Мощность электродвигателя, $кВт$
Д-13,5/2	50000	765	485	19
	59000	1080	580	32
	75000	1730	730	64
	100000	3040	970	153
Д-15,5/2	113000	2275	730	126
Д-18/2	140000	1960	580	135
	176000	3090	730	270
Д-20/2	192000	2400	580	245
	242000	3825	730	390
Д-300/400	206000	1840	485	190
	246000	2650	580	325
	310000	4170	730	645

Учебное издание

Овчинников Н.Л.,

Овчинников Л.Н.

**Тепловые процессы и агрегаты в обжиге строительных
материалов и изделий**

Учебное пособие

Редактор О.А.Соловьёва

Подписано в печать 5.02.2014. Формат 60×84 1/16. Бумага писчая.

Усл. печ.л. 5,35 Уч.-изд. л. 5,93 Тираж 50 экз. Заказ

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
химико-технологический университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры
экономики и финансов ФГБОУ ВПО «ИГХТУ»

153000, г.Иваново, Шереметевский пр., 7