

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КВАНТОВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

**Методические указания
по курсовому и дипломному проектированию
для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая
технология неорганических веществ, материалов
и изделий» специализации 1-48 01 01 13 «Химическая
технология квантовой и твердотельной электроники»**

Минск 2007

УДК 541.1:621.382(075.8)
ББК 24.5:32.852я7
Х 46

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом университета

Составители:
А. Н. Мурашкевич, Н. В. Богомазова

Рецензент
кандидат технических наук, доцент кафедры
химической технологии вяжущих материалов БГТУ
С. В. Плышевский

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2007 г. Поз. 69.

Для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации
1-48 01 01 13 «Химическая технология квантовой и твердотельной электроники».

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Выполнение курсовых и дипломных проектов (работ) по специализации на заключительном этапе обучения призвано, с одной стороны, закрепить навыки применения полученных теоретических знаний для решения поставленной инженерно-технологической задачи, а с другой стороны, выявить способность будущих инженеров-химиков-технологов самостоятельно разрабатывать технологические маршруты с учетом новейших научно-технических достижений и уровня развития соответствующих технологий на базовых предприятиях Республики Беларусь, а также материально-технических возможностей потенциальных источников финансирования мероприятий по модернизации производства.

Тематика курсовых и дипломных проектов (работ), как правило, соответствует содержанию технологической практики, что позволяет студентам активно участвовать в решении реальных научно-производственных задач, связанных с совершенствованием современных технологий различных материалов и изделий электронной техники.

При выполнении курсовых проектов (работ) студенты развивают навыки критического анализа литературных и производственных данных, демонстрируют способность принятия обоснованных инженерных решений по технологии и оборудованию производств электронной техники, осваивают (а в ряде случаев и совершенствуют) методики проведения инженерно-технологических расчетов по заданной тематике.

Дипломный проект (работа) является заключительным этапом обучения будущих специалистов и призван подтвердить возможность присвоения выпускникам квалификации «инженер-химик-технолог». Эту работу от других отличает, прежде всего, сочетание обширности и целостности. Выполнение всех многочисленных разделов должно проводиться в тесной связи с предлагаемыми инженерно-технологическими решениями, что требует от студента глубокого понимания как физико-химических основ модернизируемого процесса, так и целого ряда технических проблем обеспечения данной технологии. Выполнение научно-исследовательской дипломной работы кроме вышеуказанных знаний предполагает живую заинтересованность студента в исследованиях, а также высокий уровень работоспособности и интеллектуального творчества.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ)

1.1. Тематика курсовых проектов (работ)

В соответствии с действующим учебным планом студенты пятого курса выполняют на выпускающей кафедре два курсовых проекта (работы) по дисциплинам «Химическая технология материалов электронной техники» и «Оборудование и основы проектирования предприятий подотрасли».

Технологический курсовой проект (работа) выполняется по дисциплине «Химическая технология материалов электронной техники». Этот курс является важнейшим для студентов соответствующей специализации. В его рамках будущие инженеры-химики-технологи изучают такие важные технологические маршруты, как производство монокристаллических материалов (на примере диэлектриков и других объектов), производство позисторных, конденсаторных, магнитных материалов и изделий на их основе, получение оптически активных материалов (люминофоров, модуляторов и др.). Соответствующие технологии могут быть предложены в качестве тем выполняемых курсовых проектов (работ).

Вместе с тем тематика данного курсового проекта (работы) максимально согласуется с технологиями, которые студенты изучают при прохождении технологической практики. Такое согласование отвечает требованиям СТП БГТУ 002-2007 и позволяет вовлечь студентов в решение (учебное или практическое) реальных задач, стоящих перед конкретными производствами на данном этапе их развития. Поэтому в ряде случаев тематика курсовых проектов (работ) затрагивает материал не только курса «Химическая технология материалов электронной техники», но и курса «Технология полупроводников», поскольку одним из основных базовых предприятий для студентов соответствующей специализации является НПО «Интеграл».

Таким образом, в качестве тем технологического курсового проекта (работы) могут быть предложены маршруты производства конденсаторов, позисторов, ферритовых магнитных изделий, лазерных материалов, материалов-модуляторов, полупроводниковых дискретных приборов, полупроводниковых интегральных схем (на биполярных или МОП-структурах).

Тематика проектов по курсу «Оборудование и основы проектирования предприятий подотрасли», как правило, тесно увязывается с заданием по технологическому курсовому проекту (работе). Курсовой проект *по оборудованию* содержит сведения, расчеты и чертежи основного (и при необходимости вспомогательного) оборудования для осуществления именно того процесса, по которому принимаются основные инженерно-технологические решения в технологическом проекте (работе).

Объектом разработки может быть основное оборудование керамического производства, производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также основное и вспомогательное оборудование для выращивания монокристаллов (садочные и методические электропечи сопротивления, индукторы, сушилки, вакуумные установки, оборудование для измельчения).

Таким образом, в качестве темы курсового проекта по оборудованию могут быть предложены:

- электрическая печь (различных типов, указания по расчету см. в подразд. 1.3.4);

- установка для химического нанесения пленок (в качестве объекта проектирования выступает трубчатая электропечь сопротивления, указания по расчету см. в подразд. 1.3.4);

- вакуумная установка для нанесения пленок (указания по расчету вакуумных систем см. в подразд. 1.3.7 и в [2, 24]);

- установка выращивания монокристаллов (предметом расчета может быть устройство для нагрева, пример расчета индуктора см. в [1], вакуумной системы – в подразд. 1.3.7 и в [2, 24]);

- установка химической обработки (очистка, травление и др., примеры расчета см. в [3]);

- литографическое оборудование (рассчитывают устройства для химической обработки согласно [3], низкотемпературные садочные электропечи согласно подразд. 1.3.4);

- установка эпитаксиального наращивания пленок (рассчитывают устройство для нагрева индукционного или резистивного типа согласно [1] и подразд. 1.3.6);

- установка ионно-лучевого или диффузионного легирования (расчет вакуумной системы см. в подразд. 1.3.7 и в [2, 24], расчет диффузионной печи – в подразд. 1.3.4).

Тему курсового проекта, как правило, предлагает руководитель,

либо она может быть выбрана студентом самостоятельно на основании материалов технологической практики.

1.2. Курсовой проект (работа) по технологии материалов и изделий электронной техники

Структура и содержание курсового проекта (работы) должны соответствовать СТП БГТУ 002-2007 и выданному заданию. Кроме того, при выполнении данного проекта (работы) целесообразно использовать опыт, полученный при выполнении курсовой работы по дисциплине «Технология полупроводников» [1] и позволяющий в данных указаниях опустить ряд пояснений, имеющих общее содержание для любых технологических разработок (проектов и работ).

Курсовой проект (работа) включает пояснительную записку и графическую часть в соответствии с заданием.

Пояснительная записка имеет следующую структуру:

- 1) титульный лист;
- 2) задание;
- 3) реферат;
- 4) содержание;
- 5) введение;
- 6) аналитический обзор литературы;
- 7) инженерные решения;
- 8) технологический раздел;
- 9) контроль качества продукции и метрологическое обеспечение технологии;
- 10) мероприятия по охране окружающей среды;
- 11) заключение;
- 12) список использованных источников;
- 13) приложения (при наличии).

Графическая часть представляет собой аппаратно-технологическую схему разработанного маршрута на листе формата А1 с экспликацией потоков и аппаратов. При оформлении схемы можно использовать рекомендации [3, 5, 6], а также принять во внимание данные приложения.

Оформление курсовых проектов (работ) производится в соответствии с требованиями СТП БГТУ 002-2007.

1.2.1. Аналитический обзор литературы

При подготовке аналитического обзора литературных сведений следует помнить, что собранные данные должны составлять научно-техническую базу для обоснования и принятия инженерных решений, предлагаемых в данном курсовом проекте. Поэтому обзор включает общие сведения об известных вариантах реализации данного технологического процесса и более подробную информацию, непосредственно связанную с инженерными решениями. Глубина поиска данных по периодическим изданиям и патентам должна составлять не менее 10 лет. Объем материалов обзора – 25–30 страниц.

Среди подразделов литературного обзора можно выделить:

– *характеристику конечного продукта* технологии (материала или изделия);

– *требования к свойствам* конкретного объекта разрабатываемого технологического процесса. В качестве такого объекта могут выступать:

а) готовое изделие (например, пьезоэлемент, позистор, конденсатор, сердечник, кремниевая пластина, лазерный кристалл);

б) составная функциональная часть определенного изделия (например, эпитаксиальная пленка, подзатворный диэлектрик, металлизация полупроводниковых приборов);

в) промежуточный технологический объект (например, сегментная маска на основе SiO₂ в виде топологического рисунка, формируемого с помощью литографических операций);

– сведения о *химическом составе* объекта технологии и тенденциях по его модификации с целью повышения качества выпускаемых изделий и снижения затрат на производство (например, за счет использования принципиально новых, менее дорогостоящих, недефицитных, менее токсичных исходных компонентов, за счет снижения расхода реагентов, а также снижения энергоемкости изделий по разрабатываемой технологии);

– характеристику основных *методов и технологий* получения заданного объекта с учетом традиционных и новых вариантов (реализованных на передовых предприятиях, а также предлагаемых учеными). Данная характеристика должна содержать описание физико-химических основ представляемых методов, вариантов их технико-технологической реализации, отличия маршрутов изготовления изделий с использованием различных методов. В заключительной части этого подраздела обязательно приводится

сравнительная характеристика (желательно в виде таблицы) представленных методов и технологических вариантов заданного производства с указанием названия, технологических параметров и показателей продукта технологии (например, для постоянных магнитов на основе ферритов указывается величина коэрцитивной силы, магнитной энергии (или энергетического произведения), остаточной индукции и других важных в конкретных случаях показателей).

1.2.2. Инженерные решения

В данном разделе кратко излагаются и обосновываются наиболее важные инженерные решения по разрабатываемой технологии. При этом поясняются цели принимаемых решений, их суть и технико-экономические эффекты, к которым эти решения приводят. При изложении следует обосновывать технологические решения по разработке предлагаемого маршрута, даже если они в определенной части совпадают с вариантом базовой технологии. Предлагаемые усовершенствования выделяются отдельным абзацем и излагаются более подробно. Объем раздела – 2–3 страницы.

1.2.3. Технологический раздел

1.2.3.1. Структура и содержание. Данный раздел является в курсовом проекте (работе) основным, поскольку именно он отражает уровень владения студентом необходимым материалом, а также позволяет судить о приобретенных навыках проведения *комплекса* инженерно-технологических расчетов, необходимых для практической реализации предлагаемых решений и достижения определенной производственной цели.

Технологический раздел включает следующие части (допускается совмещение некоторых частей в одном подразделе или разделение на различные подразделы):

- 1) характеристика сырья и исходных веществ;
- 2) физико-химические основы процессов данной технологии (или данного конкретного технологического процесса);
- 3) описание технологического маршрута производства заданного изделия;
- 4) инженерно-технологические расчеты.

Характеристика сырья и исходных веществ включает сведения о требованиях, свойствах, способах аттестации материалов,

которые поставляются на предприятие из сторонних организаций и используются в качестве основного сырья или вспомогательных исходных реагентов.

Физико-химические основы процессов разрабатываемой технологии должны содержать данные об основных закономерностях конкретных вариантов технологических процессов, которые выбраны в предлагаемой технологии. Среди таких закономерностей приводятся уравнения основных и побочных протекающих химических процессов, описания происходящих физических явлений, анализ влияния наиболее важных технологических параметров (температура, давление, концентрация растворов или расход и соотношение рабочих газов и др.) на целевые физико-химические процессы.

Описание технологического маршрута обычно включает последовательное изложение перечня всех операций, составляющих цикл изготовления данного изделия (в случае полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) приводится блок операций по формированию определенной части изделия). Операции нумеруют (номер имеет каждая операция, осуществляемая в отдельном аппарате). После названия операции обязательно указывают основные технологические параметры (температуру, давление, составы обрабатывающих сред, продолжительность операции), а также при необходимости параметры обработки (например, толщину формируемой или стравливаемой пленки, финишную дисперсность измельчаемого порошка, удельное электросопротивление промывных вод).

Методика *технологических расчетов* зависит от варианта технологии производства конкретных электронных устройств, однако в любом случае в результате проводимых расчетов необходимо:

1) определить *длительность технологического цикла* (например, продолжительность выращивания монокристалла; время обжига одного поддона заготовок; длительность формирования оксидной пленки на пластинах, одновременно загружаемых в эпитаксиальный реактор; время напыления металла на пластины одной кассеты);

2) рассчитать *материальный баланс* основного (и при необходимости вспомогательных) технологического аппарата для единичной загрузки (если расчет ведется по аппаратам и установкам непрерывного действия, то материальный баланс рассчитывают для загрузки, проходящей полный цикл обработки в данном оборудовании, например для одного поддона в туннельной печи или

для одной кассеты в установке магнетронного напыления);

3) определить *количество установок*, необходимых для выполнения заданной программы производства, и *коэффициент загрузки* этих установок;

4) оценить *тепловые эффекты* физико-химических процессов, происходящих при осуществлении целевой технологической операции (с учетом температуры процесса и количества веществ, составляющих расчетную загрузку);

5) определить *нормы расхода* основных и вспомогательных компонентов на единицу продукции, а также *потребности* в этих компонентах для выполнения заданной программы производства.

1.2.3.2. Технологические расчеты. В начале раздела с технологическими расчетами обязательно приводятся *исходные данные*, которые включают информацию о составе объекта обработки, его геометрических размерах и необходимых для расчетов физико-химических свойствах, о технологических параметрах процесса и др.

Номенклатура электронных устройств весьма обширна. Промышленное производство изделий электронной техники в Республике Беларусь осуществляется в основном по двум технологиям:

1) *интегральная планарная* технология (производство полупроводниковых дискретных приборов и интегральных схем, сенсоров, оптоэлектронных устройств и т. д.);

2) *керамическая* технология (производство магнитных ферритовых изделий, позисторов, конденсаторов, пьезоэлементов и т. д.).

Другие технологии используются чаще для получения материалов электронной техники. Такие производства реализуются в научно-производственных лабораториях, на вспомогательных производствах предприятий, а также в других научно-технических государственных и коммерческих организациях и подразделениях. Для проведения расчетов, связанных с такими технологиями, можно использовать рекомендации [4] и навыки расчета материальных балансов, приобретенные при изучении курса «Общая химическая технология».

При проведении технологических расчетов следует четко представлять особенности разрабатываемой технологии (табл. 1), а также максимально учитывать основные и побочные физико-химические процессы, происходящие в аппарате или установке.

В данных указаниях приведены два примера по расчету длительности цикла и материального баланса:

– пример 1 – для производства позисторов по керамической технологии;

– пример 2 – для операции магнетронного напыления металлических пленок в производстве полупроводниковых приборов по интегральной планарной технологии.

Таблица 1

Сравнительная характеристика интегральной планарной и керамической технологий

Интегральная планарная технология	Керамическая технология
<i>Общие особенности</i>	
1. Большое число операций в маршруте изготовления изделия (100–300) 2. Интегральное производство изделий 3. Высокий уровень автоматизации 4. Наличие технологических потоков реагентов в различных агрегатных состояниях и необходимость их очистки или утилизации	1. Сравнительно небольшое число операций в маршруте изготовления изделия (25–50) 2. Индивидуальное производство изделий 3. Значительная доля ручных операций 4. Доминирование твердофазных технологических потоков
<i>Обрабатываемый объект</i>	
Дискообразная пластина (диаметр 100–150 мм, толщина 0,4–0,6 мм)	Порошок (дисперсность 0,1–50 мкм), суспензия, заготовка, керамическое изделие
<i>Основные технологические блоки ¹</i>	
1. Химическая обработка 2. Эпитаксия 3. Окисление Si 4. Химическое осаждение пленок (SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , поликристаллический Si, СТФСС ² , НТФСС ³ , БФСС ⁴) 5. Фотолитография (или иная литография) 6. Легирование (диффузия или ионная имплантация) 7. Вакуумная обработка (напыление пленок, «сухое травление») 8. Сборка и тестирование	1. Усреднение и измельчение исходных компонентов, приготовление пресс-порошка 2. Формование заготовок изделий прессованием (или иным способом) 3. Спекание изделий ⁵ 4. Финишная обработка изделий
<i>Основные типы используемого оборудования</i>	
Газофазные реакторы, вакуумные уста-	Мельницы, атритторы, прессы,

новки, линии химической обработки, литографические установки	литьевые машины, методические и садочные печи
--	---

¹ Не включены подготовительные блоки (например, изготовление кремниевых пластин из слитков или синтез титаната бария в производстве позисторов).

² Среднетемпературное фосфоросиликатное стекло.

³ Низкотемпературное фосфоросиликатное стекло.

⁴ Борофосфоросиликатное стекло.

⁵ В ряде случаев до прессования проводится синтетический отжиг.

Если объектом курсовой работы являются другие операции интегральной планарной технологии, то можно руководствоваться следующими методическими указаниями и соображениями:

– *эпитаксия, окисление, химическое осаждение пленок* – [4];

– *фотолитография* – расчеты стадий термообработки аналогичны примеру 1;

– *диффузия* – так же, как процессы химического осаждения;

– *ионная имплантация* – аналогично другим вакуумным процессам (например, напылению пленок, пример 2).

Расчеты операций *травления, проявления, химической обработки* проводят по методике расчета ванн химической (или электрохимической) обработки, достаточно подробно рассмотренной в [3].

Расчет тепловых эффектов проводят по общей методике, известной из курса «Физическая химия» (пример 3 и подразд. 1.3.4).

Расчеты количества установок и норм расхода компонентов проводят по методике, изложенной в [4].

Пример 1. *Схема расчета длительности цикла и материального баланса процесса спекания позисторов в туннельной печи.*

1. Выбор состава керамики по результатам проведенного эксперимента или анализа литературных и заводских данных. Например, выбирается состав, мол. %: $(\text{Ba}_{0,892}\text{Ca}_{0,08}\text{Pb}_{0,028})\text{TiO}_3 + 0,1\% \text{ ВСС}$ (низкоплавкая добавка на основе эвтектической смеси $\text{BaCuO}_2 + \text{CuO}$ в пересчете

на Cu) + 0,3% Y^{+3} + 0,3% TiO_2 + 1,5% SiO_2 , который за счет введения добавки ВСС позволяет снизить температуру спекания от 1350 до 1240°C.

2. Расчет длительности цикла. В данном примере длительностью цикла фактически является время прохождения лодочки по всей длине рабочего канала печи. Это время определяется температурной кривой спекания, которая строится на основании соответствующей заводской кривой с учетом принятых инженерных решений. В нашем примере по сравнению с заводским вариантом общее время цикла спекания

уменьшается, а продолжительность отжига при максимальной температуре сохраняется (рис. 1). Уменьшения времени пребывания заготовок в печи можно достичь либо изменением цикла продвижения (толкания) лодочек, либо изменением длины печи.

3. Пересчет мольных соотношений веществ (если состав материала известен в мольных процентах, как в п. 1 данного примера) в массовые проценты компонентов в шихте с учетом стехиометрических формул основных компонентов и принятого содержания вводимых добавок (для вышеуказанного состава эти массовые соотношения, пересчитанные из мольных, приведены в табл. 2).

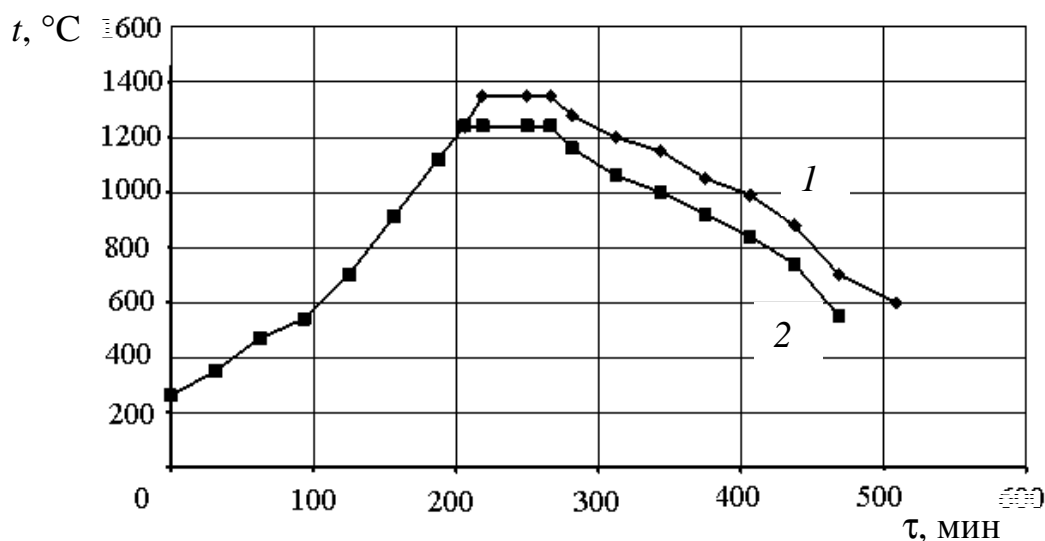


Рис. 1. Температурные кривые отжига заготовок позисторов:
1 – заводские данные; 2 – после модернизации

4. Расчет вспомогательных компонентов. В данном примере в шихту кроме основных компонентов (табл. 2) добавляется углекислый аммоний в количестве 7,5 мас. % и перед прессованием – 10%-ный водный раствор поливинилового спирта (ПВС) в количестве 7 мас. %.

Таблица 2

Основной состав исходной шихты

Исходное вещество	BaTiO ₃	CaTiO ₃	PbTiO ₃	BCC	YCl ₃	TiO ₂	SiO ₂
Содержание в шихте, мас. %	85,01	4,45	3,46	6,38	0,23	0,10	0,37

5. Определение количества исходных компонентов, необходимых для выбранной расчетной загрузки (в данном случае расчетной

загрузкой является одна лодочка с 672 цилиндрическими заготовками).

6. Определение и проверка приходных статей материального баланса. Все вышеупомянутые компоненты следует учитывать при составлении приходной части материального баланса процесса спекания. Однако на этом этапе необходимо внимательно проанализировать физико-химические превращения, происходящие с исходными компонентами на технологических операциях, предшествующих спеканию. Так, для данного примера следует учесть, что:

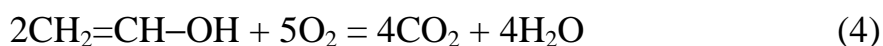
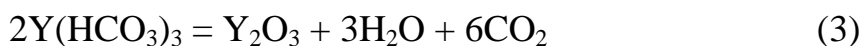
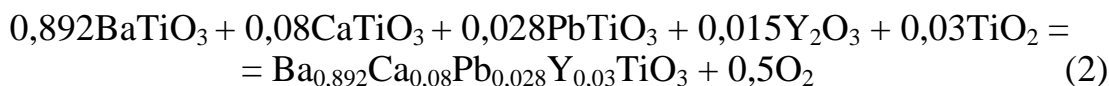
– ионы Y^{3+} в заготовках содержатся в составе гидрокарбоната в соответствии с реакцией, которая происходит при составлении шихты:



– NH_4HCO_3 в значительной части разлагается на стадии сушки исходной шихты с выделением NH_3 , CO_2 , H_2O (в примере учтено остаточное содержание NH_4HCO_3 в количестве 1% от исходно введенного);

– остаточная влажность шихты после подготовки заготовок к спеканию должна составлять около 3 мас. %.

7. Расчет и проверка *расходных статей* материального баланса. Расчет производят по уравнениям протекающих реакций образования целевого твердого раствора на основе титанатов (уравнение (2)), разложения ряда исходных и промежуточных компонентов (уравнения (3), (4)):



Уравнение (4) приведено для мономера ПВС.

8. Составление и проверка материального баланса процесса. Все расчетные данные приводятся в сводной таблице (табл. 3), которая обязательно содержит итоговую строку, отражающую соблюдение закона сохранения массы для данной комбинации компонентов и физико-химических процессов в аппарате.

Таблица 3

Сводная таблица материального баланса процесса спекания заготовок позисторов (для одной лодочки с 672 заготовками)

Приход		Расход	
Компонент	Масса, г	Компонент	Масса, г
BaTiO ₃	1661,12	Ba _{0,892} Ca _{0,08} Pb _{0,028} Y _{0,03} TiO ₃	1819,91

CaTiO ₃	86,95	SiO ₂	7,23
PbTiO ₃	67,61	BaCuO ₂ -CuO	124,67
TiO ₂	1,95	CO ₂ [*] в том числе из Y(HCO ₃) ₃ из NH ₄ HCO ₃ из ПВС	31,26
SiO ₂	7,23		2,89
BaCuO ₂ -CuO	124,67		0,97
Y(HCO ₃) ₃	5,96	H ₂ O в том числе из Y(HCO ₃) ₃ из NH ₄ HCO ₃ из ПВС	27,40
NH ₄ HCO ₃	1,74		71,38
ПВС	13,70		0,59
H ₂ O (ост. влажность)	59,18	ост. влажность	0,40
O ₂ [*]	24,91	NH ₃ [*]	11,21
<i>Итого</i>	2055,02	O ₂ [*]	59,18
		<i>Итого</i>	0,37
			0,20
			2055,02

* Для газообразных реагентов приводят объемные количества при нормальных условиях.

Пример 2. Схема расчета длительности цикла и материального баланса магнетронного напыления металлического покрытия в производстве биполярных транзисторов.

1. Выбор химического состава напыляемой металлической пленки (например, для первого уровня двухуровневой металлизации можно использовать пленку толщиной 0,55 мкм на основе Al, содержащую кроме основного компонента 1% Si, 0,15% Ti и 0,1% Cu).

2. Расчет длительности единичного цикла обработки. В данном примере рассмотрен расчет для установки непрерывного действия «Магна 2М». В этом случае единичным циклом является обработка одной кассеты с 25 пластинами, которая загружается во входной шлюз. Время единичного цикла напыления складывается из следующих составляющих:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{з}} + \tau_{\text{д.в}} + \tau_{\text{п.к}} + 24R + \tau_{\text{н.в}} + \tau_{\text{в}}, \quad (5)$$

где $\tau_{\text{з}}$ и $\tau_{\text{в}}$ – время загрузки и выгрузки кассеты с пластинами во входной и выходной шлюзы соответственно, $\tau_{\text{з}} = \tau_{\text{в}} \approx 1$ мин; $\tau_{\text{д.в}}$ – время, необходимое для достижения вакуума в рабочей камере, $\tau_{\text{д.в}} \approx 1$ мин; $\tau_{\text{п.к}}$ – время, за которое одна пластина проходит конвейер длиной l ; R – периодичность выдачи пластин с конвейера, с/шт.; $\tau_{\text{н.в}}$ – время напуска воздуха в камеру, $\tau_{\text{н.в}} \approx 1$ мин.

Время $\tau_{\text{п.к}}$ определяется исходя из длины l (для данного примера $l = 1,5$ м), скорости движения транспортера (обычно составляет величину порядка $v_{\text{тр}} = 0,1-0,2$ м/мин), а также с учетом времени подачи и съема пластин с конвейера (обычно 0,01–0,005 мин). Следует учитывать, что скорость движения транспортера зависит от скорости осаждения пленки $v_{\text{ос}}$, обеспечиваемой

магнетронами камеры напыления, от толщины напыляемой пленки $x_{пл}$ и от длины участка транспортера в пределах камеры напыления $l_{нап}$:

$$v_{тр} = \frac{v_{ос} l_{нап}}{x_{пл}}. \quad (6)$$

Периодичность выдачи пластин с конвейера R определяется временем, за которое конвейер преодолевает расстояние, равное диаметру пластины $d_{пл}$ и зазору между пластинами Δd :

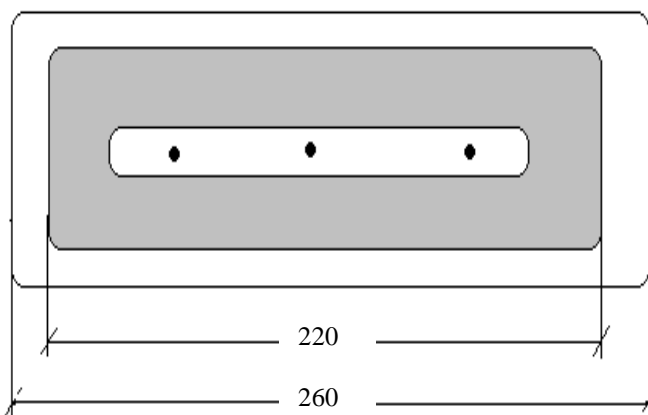
$$R = \frac{d + \Delta d}{v_{тр}}. \quad (7)$$

3. Расчет приходных статей материального баланса напыления пленки. В данном примере представлен расчет без учета дополнительных компонентов металлизационной пленки (т. е. в приближении чисто алюминиевой мишени и пленки). При учете всех компонентов следует вносить возможные поправки на отличие коэффициентов распыления разных материалов. Приходными статьями являются массы металлической мишени m_m (или нескольких мишеней в камере напыления) и кремниевых пластин $m_{плас}$ известных размеров. Количество пластин определяется исходя из длины камеры напыления $l_{нап}$ и величины $d_{пл} + \Delta d$.

4. Расчет расходных статей. Здесь приводят расчеты:

– массы осажденной пленки на соответствующее число пластин;

– массы мишени $m_{рас}$, распыленной за время осаждения пленки. При этом следует учитывать, что, во-первых, скорость распыления мишени $v_{рас}$ примерно в 1,5 раза больше, чем скорость осаждения пленки $v_{ос}$. Во-вторых, распыление происходит не со



всей поверхности мишени, а с определенной ее части, которая называется зоной эрозии (рис. 2). В-третьих, следует оценить, какая доля распыленного металла осадилась на транспортере $m_{тр}$ и на стенках камеры $m_{ст}$;

Рис. 2. Схема расположения зоны эрозии (помечена темным фоном) на мишени

– массы мишени после напыления определенного числа пленок (в данном случае четырех пленок на пластины, одновременно находящиеся в камере напыления). Желательно проводить расчет для полной загрузки единичного цикла, т. е. в данном случае для 25 пластин.

Результаты расчетов представляют таблицей материального баланса с указанием объема расчетной загрузки (табл. 4).

5. Расчет ресурса работы мишени. Здесь определяется число циклов, которые можно осуществить без замены мишени с учетом того, что мишень снимается на восстановление при выработке по массе около 40% от первоначальной или если толщина пластины в зоне эрозии уменьшается более чем в 2 раза. Далее с учетом режима работы оборудования рассчитывают календарный период работы одной мишени.

Таблица 4

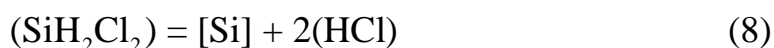
**Материальный баланс процесса напыления пленки Al
(для единичной загрузки камеры напыления)**

Приход		Расход	
Компонент	Масса, г	Компонент	Масса, г
$m_{\text{плас}}(\text{Si})$	36,58	$m_{\text{пл+мет}}(\text{Si/Al}),$	36,63
		$m_{\text{м}}(\text{Al})$	2159,85
		$m_{\text{рас}}(\text{Al})$	0,15
$m_{\text{м}}(\text{Al})$	2160,00	в том числе $m_{\text{мет}}$	0,05
		$m_{\text{тр}}(\text{Al})$	0,09
		$m_{\text{ст}}(\text{Al})$	0,01
<i>Итого</i>	2196,58	<i>Итого</i>	2196,58

Пример 3. Расчет тепловых эффектов основных физико-химических процессов газофазной эпитаксии кремния.

1. Определение химических и физических процессов, происходящих в аппарате и сопровождающихся тепловыми эффектами. При этом следует учитывать не только основные, но и побочные химические процессы, если в них участвует значительная часть компонентов (более 1 мас. % от массы всех компонентов в аппарате). Кроме того, учитывают протекание физических процессов, таких как испарение, конденсация, плавление, кристаллизация и др.

Для данного примера тепловой эффект связан в основном с протеканием реакции пиролиза дихлорсилана:



2. Расчет тепловых эффектов реакции при стандартных условиях ΔH_{298}^0 , кДж (для данного примера $\Delta H_{298}^0 = 132,26$ кДж).

3. Расчет эффектов при условиях протекания процесса. В примере реакция пиролиза протекает при атмосферном давлении и температуре 1273 К.

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT, \quad (9)$$

где ΔC_p – изменение теплоемкости системы при протекании данного процесса, Дж/К.

Для данного примера $\Delta H_{1273}^0 = 119,69$ кДж.

4. Расчет теплового эффекта для единичной загрузки в аппарате с учетом числа молей компонентов, участвующих в химических реакциях или в других процессах, сопровождающихся тепловыми эффектами. В данном примере для формирования эпитаксиальных пленок заданной толщины на 24 пластинах, находящихся в реакторе, необходимо 1,7 молей SiH_2Cl_2 .

$$\Delta H_{1273}^0 (\text{загр.}) = 119,686 \cdot 1,7 = 203,466 \text{ кДж.}$$

1.2.4. Контроль качества продукции и метрологическое обеспечение технологии

При выполнении данного раздела приводится информация о применяемых методах контроля качества исходных материалов и готовой продукции. Подробно излагаются основы и особенности использования определенных методов контроля продукта разрабатываемой технологии (или технологического блока). Желательно представлять данную информацию в виде таблицы с указанием стадии технологического маршрута, параметров контроля и их нормативных значений, а также метода и частоты контроля. В этом же разделе анализируются наиболее типичные виды брака, их причины, а также влияние принятых инженерных решений на качество выпускаемой продукции.

Возможно представление общих сведений об управлении качеством продукции, а также схемы организации метрологической службы базового предприятия, с работой которой студенты ознакомились во время прохождения практики. Кроме того, должны быть приведены данные об используемых веществах и материалах, их основные характеристики в соответствии с ГОСТ, ТУ и др. Необходимо также указать на возможность изготовления продукции

согласно международной системе стандартов качества (система стандартов МС ИСО).

1.2.5. Мероприятия по охране окружающей среды

В данном разделе необходимо представить:

– характеристику источников загрязнения окружающей среды для данного производства (или отдельного технологического блока). Их удобно классифицировать по агрегатному состоянию;

– основные способы утилизации, обезвреживания, регенерации, очистки отходов;

– анализ влияния инженерно-технологических решений, принятых в курсовом проекте, на загрязнение окружающей среды;

– предложения по внедрению мероприятий, направленных на снижение воздействия вредных экологических факторов при реализации данного производства, на повышение эффективности природоохранных мероприятий, проводимых на базовых предприятиях, на совершенствование системы организации и управления экологической работой в рамках разрабатываемых технологических процессов.

1.3. Курсовой проект по оборудованию и основам проектирования производств материалов и изделий электронной техники

Курсовой проект состоит из расчетно-пояснительной записки объемом 35–40 страниц и графической части, включающей 2–3 листа чертежей формата А1. Заданием на курсовой проект предусматривается расчет одного из основных аппаратов технологического процесса.

Расчетно-пояснительная записка включает:

- 1) титульный лист;
- 2) задание на проектирование;
- 3) содержание;
- 4) реферат;
- 5) введение;
- 6) описание технологической схемы узла или отделения;
- 7) режим работы аппаратов, оптимизация режима;
- 8) обзор конструкции аппаратов или устройств, литературно-патентный поиск и обоснование выбора типа аппарата;
- 9) расчет материальных и тепловых балансов (соответствующие

балансы процесса берут из курсового проекта по технологии) аппарата;

10) гидравлический расчет (по необходимости): сопротивление проходу жидкости, газа, определение диаметра штуцеров;

11) тепловой и энергетический расчеты: определение поверхности теплопередачи, расхода энергоносителя, мощности привода перемешивающего и других устройств, насосов, компрессора, вентилятора и т. д.;

12) механический расчет (по необходимости) основных деталей аппарата с учетом условий работы (давление, температура, концентрация), выбор основных узлов и деталей; выбор материалов и защита от коррозии;

13) подбор вспомогательного оборудования;

14) охрана труда и окружающей среды;

15) заключение;

16) список использованных источников;

17) приложения.

1.3.1. Обоснование выбора типа аппарата

Обзор известных конструкций и выбор типа аппарата (машины) проводится по материалам технологической практики, результатам литературного и патентного поиска. Необходимо изложить принцип действия аппарата и для лучшего понимания конструктивных особенностей и отличий от известных конструкций привести эскизы с пояснительными надписями.

Для каждого типа аппарата указать область предпочтительного применения, достоинства и недостатки конструкции, основные технические характеристики (производительность, материалоемкость, энергоемкость, КПД, габариты, водопотребление и др.).

Выбор типа и конструкции аппарата должен быть обоснованным, с учетом всех достоинств и недостатков. Необходимо показать, что проектируемый аппарат соответствует технологическому процессу и его использование экономически целесообразно.

Экономическую эффективность выбора аппарата можно обосновать меньшей стоимостью при одинаковой производительности других аппаратов, меньшими энергетическими затратами на единицу продукции за счет более высокого КПД или меньшего гидравлического сопротивления, меньшими затратами на обслуживание и ремонт, меньшей материалоемкостью.

При выборе оборудования обязательно следует обращать

внимание на соответствие его нормам охраны труда, техники безопасности и охраны окружающей среды. Несоблюдение указанных норм при проектировании машин или аппаратов не допустимо.

Описание конструкции аппарата необходимо дать в соответствии с чертежом общего вида с указанием позиций деталей и узлов по спецификации. Рекомендуется следующий порядок изложения: принцип действия проектируемого аппарата, основные элементы конструкции, принципиальные отличия проектируемого аппарата от серийных.

1.3.2. Технологический расчет аппарата

Цель технологического расчета аппарата заключается в определении наиболее характерной величины (поверхность теплообмена, объем), его геометрических размеров (диаметр, длина, высота и т. д.).

Исходными данными для технологического расчета служат материальные и тепловые балансы, которые необходимо взять из курсового проекта по технологии. В некоторых случаях для удобства дальнейших расчетов балансы можно пересчитать на секундную или часовую производительность (например, в методических печах сопротивления), чтобы определить потоки реагентов, теплоносителя или хладагентов.

Необходимое время пребывания реакционной смеси или изделий в аппарате определяется кинетикой процесса, заданной степенью превращения, типом аппарата и зависит от условий проведения реакции ($t, P, C, K_{\text{кор}}$).

Технологический расчет аппарата может явиться неотъемлемой частью курсового проекта по технологии, в этом случае он излагается полностью в расчетно-пояснительной записке к курсовому проекту по технологии, а в проекте по оборудованию приводят только результаты расчетов.

Тепловой расчет выполняется для тепловых агрегатов и ставит своей целью определение коэффициента и поверхности теплопередачи, расхода теплоносителя, потерь теплоты в окружающую среду или толщины тепловой изоляции.

Для проектируемого аппарата или машины подбираются конструкционные материалы с учетом их функционального назначения (несущая конструкция, теплоизоляция, материал вакуумной камеры).

Поскольку при производстве материалов и изделий электронной техники в качестве тепловых агрегатов используют преимущественно электрические печи сопротивления (ЭПС), ниже изложены рекомендации по стратегии проектирования, выбору материалов, материальному и тепловому расчету печей и нагревателей для них. Приведен также порядок расчета вакуумных систем, являющихся неотъемлемой частью установок по напылению пленок, ионной имплантации и т. д.

1.3.3. Конструирование электропечей сопротивления

Конструируют печную камеру, учитывая следующие положения:

1. Внутренние размеры камеры печи должны соответствовать размерам загрузки (наличие свободного пространства в камере печи приводит к увеличению ее внешних размеров и тепловых потерь).

В то же время внутренние размеры камеры печи должны быть таковы, чтобы садка (изделия) не только могла разместиться в ней рационально с точки зрения оптимальных условий для теплопередачи, но и чтобы ее можно было удобно загружать и вынимать из печи.

2. Внешние габариты печи определяются ее внутренними размерами и толщиной кладки. Кладка должна обеспечить низкие температуры кожуха печи (не выше 40°C при температуре окружающего воздуха 20°C) и, следовательно, малые тепловые потери печи. Не стоит при проектировании электрических печей экономить на теплоизоляции, так как она очень быстро себя окупает.

3. Огнеупорная часть кладки, особенно в печах, в которых проводится остывание изделий или которые работают с частыми остановками, должна выполняться из возможно более легкого, допустимого по условиям прочности материала, с тем чтобы снизить аккумулированную теплоту. Ни в коем случае не следует применять излишне прочный и, следовательно, тяжелый материал.

Надо по возможности избегать тепловых коротких замыканий (металлические детали, проходящие через кладку), способных существенно повысить тепловые потери печи.

4. Расположение нагревателей в печи должно определяться как технологическими требованиями, так и возможностью их размещения в печи.

В печах, где проводят термические процессы, требующие высокой равномерности нагрева, желательно применять

расположение нагревателей на своде, в поду и на боковых стенках печной камеры, а иногда и на задней стенке и двери печи. Распределение мощности по поверхности стен печи должно учитывать местные утечки тепла (например, через дверцы) и компенсировать их.

Расположение нагревателей в печи должно соответствовать расположению в ней изделий, для того чтобы обеспечить наилучшие условия для теплообмена. При размещении в печи изделий, вытянутых в вертикальном направлении, следует нагреватели размещать, в первую очередь, на боковых стенках. При низких, плоских изделиях основная мощность нагревателей, наоборот, должна быть сосредоточена на своде и в поду.

В крупных печах следует создавать несколько тепловых зон. В длинных горизонтальных камерных печах необходимо предусматривать отдельные зоны на каждые 1,5–2,5 м длины. Создание отдельных тепловых зон соответствующим расположением нагревателей значительно улучшает управление печью и облегчает поддержание в ней равномерного распределения температуры. Следует, однако, помнить, что при увеличении количества тепловых зон одновременно возрастает стоимость электрооборудования.

1.3.4. Расчет электропечей сопротивления

При расчете методических ЭПС (непрерывного действия) расчетными материальными и тепловыми потоками являются потоки, приходящиеся на единицу времени работы печи, а при расчете садочных печей (периодического действия) – на единичную загрузку печи.

Материальный баланс заключительной стадии изготовления керамических изделий (обжига) в садочных печах составляют на основании материального баланса процесса обжига, выполненного в курсовом проекте по технологии, с учетом физико-химических превращений в материале изделий на единичную загрузку печи.

Исходными данными для расчета являются:

- масса загружаемых изделий ($M_{\text{вл}}$, кг), которая рассчитывается с учетом размеров нагревательной камеры, количества полок в ней, размеров загружаемых изделий и их свойств, числа слоев на поддонах или подставках, размеров последних;
- влажность изделий, поступающих на обжиг, W , %;
- брак при обжиге b , % (берут по данным аналогичных существующих производств);

– химический состав керамической массы в пересчете на оксиды, п. п. п. (потери при прокаливании – берут с учетом процессов разложения, термической деструкции, дегидратации), и др.

Химический состав керамических изделий рассчитывают по шихтовому составу и химическому составу исходного сырья.

Массу абсолютно сухих изделий с учетом удаления влаги M_c , кг, вычисляют по формуле

$$M_c = \frac{M_{вл}(100 - W)}{100}, \quad (10)$$

а масса испаряемой влаги при обжиге $G_{вл}$, кг, равна

$$G_{вл} = M_{вл} - M_c = \frac{M_c W}{100 - W}. \quad (11)$$

Массу обожженных изделий с учетом п. п. п. M , кг, рассчитывают следующим образом:

$$M = \frac{M_c(100 - \text{п. п. п.})}{100}. \quad (12)$$

Массу годных изделий $M_ч$, кг, определяют по формуле

$$M_ч = \frac{M(100 - b)}{100}. \quad (13)$$

Брак при обжиге составляет

$$M - M_ч = \frac{100M_ч}{100 - b} - M_ч = \frac{M_ч b}{100 - b}. \quad (14)$$

Потери массы при обжиге равны

$$M_c - M = \frac{100M}{100 - \text{п. п. п.}} - M = \frac{M \cdot \text{п. п. п.}}{100 - \text{п. п. п.}}. \quad (15)$$

Материальный баланс процесса обжига представляют по образцу табл. 5.

Таблица 5

Материальный баланс процесса обжига изделий

Приход, кг	Расход, кг
Поступает в печь $M_{вл}$	Годная продукция $M_ч$
	Брак при обжиге $\frac{M_ч b}{100 - b}$

	Потери массы при обжиге $\frac{M \cdot \text{п. п. п.}}{100 - \text{п. п. п.}}$
	Количество испаряемой влаги при обжиге $\frac{M_c W}{100 - W}$
<i>Итого</i>	<i>Итого</i>

Неувязка баланса допускается не более 0,1%.

Определяют время нагрева садки. Если часовая производительность печи задана, то время цикла $\tau_{\text{ц}}$, ч, рассчитывают по формуле

$$\tau_{\text{ц}} = P / E, \quad (16)$$

где M – масса загрузки печи, кг; E – часовая производительность печи, кг/ч, которая должна быть рассчитана с учетом производства заданного размера изделий и особенностей технологического процесса их производства.

Время цикла $\tau_{\text{ц}}$ в общем виде равно

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{пр}}, \quad (17)$$

где $\tau_{\text{нагр}}$ – время нагрева изделий; $\tau_{\text{выд}}$ – продолжительность выдержки; $\tau_{\text{пр}}$ – время простоя печи.

Время цикла не включает продолжительность остывания, так как в настоящее время эту операцию, как правило, проводят вне печи, чтобы сохранить накопленную кладкой за время нагрева теплоту.

Время простоя печи $\tau_{\text{пр}}$ складывается из времени ее загрузки и выгрузки, а иногда также из времени, необходимого на ее чистку или мелкий ремонт. Определяется оно на основе данных эксплуатации аналогичных печей, а также на основе общих соображений в зависимости от формы и количества загружаемых и выгружаемых деталей, степени механизации печи и т. п.

Время выдержки изделий в печи $\tau_{\text{выд}}$ задается технологическим процессом, в противном случае оно совмещается с последним этапом нагрева. Таким образом, определение времени нагрева позволит проверить соответствие этого времени заданной производительности печи. Если получить нужную производительность не удастся, то следует изменить загрузку печи и размеры ее камеры и заново рассчитать время нагрева. При этом следует иметь в виду, что увеличением толщины слоя изделий в направлении основного полезного теплового потока можно не повысить, а уменьшить производительность печи, так как время нагрева массивной загрузки

пропорционально квадрату ее толщины. В тех же случаях, когда часовая производительность не задана, расчет времени нагрева позволит ее определить по выражениям (16) и (17).

Для ЭПС, работающих в непрерывном режиме, производительность рассчитывают по зависимости

$$G = \frac{Lm}{\tau_{ц}}, \quad (18)$$

где L – длина печи, м; m – масса загрузки на единицу длины, кг/м.

При расчете производительности печей непрерывного действия время цикла не включает время на загрузку и разгрузку печи. В таких печах выделяют тепловые зоны и расчетные параметры относят на 1 м длины печи.

Производительность зависит от длительности цикла. Для ее повышения необходимо сокращать составляющие времени цикла, однако время цикла зачастую задают условиями технологии. Если допускается проведение нагрева и охлаждения с максимальной скоростью, то можно воспользоваться тепловым расчетом для нахождения оптимальных энергетических характеристик процесса, обеспечивающих минимальное время цикла.

Установленная мощность N_y – это потребляемая электропечью мощность, принятая с запасом, учитывающим старение нагревателей и возможное временное падение напряжения в сети:

$$N_y = kN_{\text{потр}}, \quad (19)$$

где k – коэффициент запаса мощности ($k = 1,1-1,2$ для ЭПС непрерывного действия, $k = 1,2-1,4$ для ЭПС периодического действия).

Потребляемая мощность расходуется на нагрев загрузки и вспомогательных устройств, прогрев футеровки и атмосферы печи, на компенсацию тепловых потерь.

Для печей, работающих в непрерывном режиме,

$$N_{\text{потр}} = N_{\text{загр}} + N_{\text{всп}} + N_{\text{пот}}, \quad (20)$$

где $N_{\text{загр}}$ – мощность, необходимая для нагрева загрузки и осуществления физико-химических процессов в ней; $N_{\text{всп}}$ – мощность, необходимая для нагрева вспомогательных приспособлений (лодочек, тиглей, конвейера); $N_{\text{пот}}$ – мощность, необходимая для компенсации тепловых потерь.

Если печь работает в периодическом режиме (садочная печь),

удобнее оперировать не мощностью, а количеством теплоты:

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{ак}}, \quad (21)$$

где $Q_{\text{потр}}$ – энергия, потребляемая печью за один цикл; $Q_{\text{пол}}$ – количество теплоты, необходимое для нагрева загрузки до заданной температуры и протекания физико-химических процессов в ней; $Q_{\text{всп}}$ – количество теплоты, необходимое для нагрева вспомогательных приспособлений; $Q_{\text{пот}}$ – тепловые потери; $Q_{\text{ак}}$ – количество тепла, аккумулированное футеровкой печи.

Для определения времени нагрева $\tau_{\text{нагр}}$ необходимо задаться значением удельного полезного теплового потока $q_{\text{п}}$. Чем он больше, тем меньше время нагрева, но тем хуже используется мощность печи. Полезный тепловой поток $q_{\text{п}}$, Вт/м², определяется из следующего выражения:

$$q_{\text{п}} = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right], \quad (22)$$

где $c_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплоизлучения:

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{ст}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1 \right)}, \quad (23)$$

где $\varepsilon_{\text{изд}}$ и $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты поверхности изделий и стенки печи соответственно; $F_{\text{изд}}$, $F_{\text{ст}}$ – площадь изделия и стенки соответственно.

В уравнении (23) принято, что площадь изделия $F_{\text{изд}}$ меньше или по крайней мере равна площади стенки $F_{\text{ст}}$. Последняя представляет собой поверхность стен камеры печи, на которых установлены нагреватели.

$T_{\text{печи}}$ – условная термодинамическая температура печи, средняя между температурой стен и нагревателей. Она ограничивается допустимой рабочей температурой нагревателей и должна быть по крайней мере на 50°C меньше последней. С другой стороны, она не должна намного превышать заданную температуру нагрева изделий, так как иначе изделия могут перегреваться, если их выгрузка из печи или отключение последней почему-либо запоздает. Если же применяется выдержка изделий при постоянной температуре, то температура печи (задаваемая на терморегуляторе) может превышать заданную температуру изделий лишь на 10–20°C.

Температура изделия $T_{\text{изд}}$ изменяется в процессе нагрева, и

можно выбрать то или иное ее значение для выражения (22). Если принять ее значение равным конечной температуре нагрева изделия, то печь будет работать в течение цикла нагрева без отключения, т. е. при постоянном тепловом потоке, величина которого будет мала, время нагрева велико, производительность печи минимальная. Если принять температуру изделий равной начальной, то тепловой поток будет максимальным, время нагрева минимальным, но мощность печи не будет использована, так как уже в начале нагрева начнет работать терморегулятор и печь перейдет в режим работы при постоянной температуре. Следовательно, выбор значения $T_{\text{изд}}$ в (22) должен определяться в каждом конкретном случае: насколько необходимо форсировать процесс нагрева. Для полного использования мощности печей при приемлемой скорости нагрева можно рекомендовать $T_{\text{изд}} = 0,8-0,9$ от конечной температуры нагрева изделий. Большее ее значение уместно, если температура печи существенно превосходит заданную температуру нагрева изделий, меньшее, если значения этих температур близки.

Поскольку степени черноты стен печной камеры и нагревателей близки к 0,9 и $F_{\text{ст}} / F_{\text{изд}}$ намного больше единицы, во многих случаях с достаточной для практической цели точностью можно принять

$$c_{\text{пр}} = 5,76\epsilon_{\text{изд}} = c_{\text{изд}} \quad (24)$$

В тех случаях, когда значения $F_{\text{ст}}$ и $F_{\text{изд}}$ близки друг к другу, приведенный коэффициент лучеиспускания равен

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\epsilon_{\text{изд}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{печи}}} - 1} \quad (25)$$

Поскольку изделия электронной керамики (конденсаторы, позисторы, ферритные изделия) являются малогабаритными, продолжительность их нагрева определяется по методике, рекомендуемой для тонких изделий.

Степень массивности тела может быть оценена числом Био:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} x, \quad (26)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); x – полутолщина изделия, м.

При значениях Био не более 0,25 изделия относят к тонким. При значениях Био в интервале 0,25–0,5 применяют методику оценки времени

нагрева для тонких изделий, поскольку ошибка оказывается небольшой.

Время нагрева $\tau_{\text{нагр}}$, с, изделий определяется по зависимости

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{Q}{\alpha(T_{\text{печи}} - T_{\text{изд.ср}})F_{\text{изд}}} = \frac{Gc(T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}{\alpha \cdot 0,3T_{\text{печи}}F_{\text{садки}}}, \quad (27)$$

где G – масса садки, кг (в материальном балансе $M_{\text{вл}}$); c – теплоемкость, Дж/(кг·К); $T_{\text{к}}, T_{\text{н}}$ – термодинамические температуры садки в нагретом и начальном состояниях, К; $F_{\text{садки}}$ – площадь садки, м².

С учетом того что в высокотемпературных печах (без принудительной конвекции) коэффициент теплоотдачи конвекцией сравнительно мал, можно принять его среднее значение равным 10 Вт/(м²·К).

Тогда среднее значение коэффициента теплоотдачи составит

$$\alpha = 0,03c_{\text{пр}}(T_{\text{печи}} / 100)^3 + 10. \quad (28)$$

После определения времени нагрева и производительности печи следует приступить к расчету тепловых потерь последней и составлению энергетического баланса. Выделяющаяся в нагревателях за время одного цикла теплота идет на нагрев изделий, вспомогательных устройств и покрытие тепловых потерь. Для периодических ЭПС:

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{ак}}. \quad (29)$$

Теплота, необходимая для нагрева загрузки и вспомогательных приспособлений, является полезной, а соответствующая мощность – полезной мощностью. При расчете методических печей, имеющих как минимум три тепловые зоны (нагрева, выдержки при максимальной температуре, охлаждения), расчет теплоты на нагрев загрузки осуществляют отдельно для каждой из этих зон с учетом средних температур в зонах. Теплоту $Q_{\text{пол}}$ рассчитывают исходя из термодинамики процессов, происходящих при термообработке загрузки. Если в нагреваемом материале отсутствуют химические и фазовые превращения, а поглощаемая теплота расходуется только на ее нагрев, то

$$Q_{\text{пол}} = \frac{1}{M_{\text{м}}} M \int_{T_1}^{T_2} c dT, \quad (30)$$

где $M_{\text{м}}$ – масса одного моля вещества загрузки, кг; M – масса

загрузки, кг; c – теплоемкость загрузки, Дж/(моль·К); T_1 и T_2 – начальная и конечная термодинамическая температура загрузки, К.

В случае, когда функциональная зависимость теплоемкости c от температуры не известна, можно приближенно принять

$$Q_{\text{пол}} = Mc_c(T_k - T_n); \quad (31)$$

$$c_c = 0,5(c_k + c_n), \quad (32)$$

где c_c – усредненная теплоемкость загрузки, Дж/(кг·К); c_k – теплоемкость загрузки при T_k ; c_n – теплоемкость загрузки при T_n .

Если в процессе термообработки происходят фазовые изменения в материале загрузки (плавление, испарение и т. д.), то следует учесть и теплоты, необходимые для этих процессов, тогда

$$Q_{\text{пр}} = \frac{1}{M_m} M \left(\int_{T_n}^{T_{\phi}} c_1 dT + \Delta i_{\phi} + \int_{T_{\phi}}^{T_k} c_2 dT \right), \quad (33)$$

где Δi_{ϕ} – теплота фазового превращения, Дж/(моль·К); T_{ϕ} – температура фазового превращения, К; c_1 и c_2 – теплоемкости исходной и образовавшейся фаз соответственно. Теплоты фазовых превращений рассчитают в курсовом проекте по технологии.

Теплоту, поглощаемую или выделяемую в результате химических реакций, находят по уравнению

$$Q_{\text{эф}} = \sum_i \Delta Q'_{\text{кон}i} - \sum_j \Delta Q'_{\text{ис}xj}, \quad (34)$$

где $\Delta Q'_{\text{кон}i}$ – теплота образования каждого из продуктов реакции при температуре T_k ; $\Delta Q'_{\text{ис}xj}$ – теплота образования каждого из исходных веществ при температуре T_n .

$$\Delta Q' = \frac{1}{M_m} M (\Delta i_{298}^{\circ} + \int_{298}^{T_k} c dT), \quad (35)$$

где Δi_{298}° – стандартная мольная энтальпия образования.

Для расчета соответствующих мощностей необходимо знать время нагрева загрузки τ_n до заданной температуры, тогда

$$N_{\text{п}} = Q_{\text{п}} / \tau_n. \quad (36)$$

Теплоту, необходимую для прогрева вспомогательных приспособлений (конвейер, лодочки, поддоны), рассчитывают

суммированием расхода теплоты по каждому элементу, причем для методических печей расчет ведут отдельно для каждой зоны:

$$Q_{\text{всп}} = \sum_i c_i M_i (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \quad (37)$$

где c_i – усредненная теплоемкость i -го элемента, Дж/(кг·К); M_i – масса i -го вспомогательного элемента, нагреваемого за цикл термообработки, кг $T_{\text{к}}$ и $T_{\text{н}}$ – конечная и начальная температура i -го элемента, К.

Если в печи создают специальную атмосферу подачей газа, то расход мощности на нагрев газа равен

$$N_{\text{г}} = q_{\text{г}} c_{\text{г}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \quad (38)$$

где $q_{\text{г}}$ – массовый расход газа в единицу времени, кг/с; $c_{\text{г}}$ – усредненная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); $T_{\text{к}}$ – температура газа на выходе из печи, К; $T_{\text{н}}$ – температура газа на входе в печь, К.

Для садочных печей всю теплоту, необходимую для нагрева газа, определяют по формуле

$$Q_{\text{г}} = M_{\text{г}} c_{\text{г}} (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \quad (39)$$

где $M_{\text{г}}$ – масса газа, прошедшего через печь за цикл термообработки.

В результате полезная теплота и полезная мощность составят:

$$Q_{\text{пол}} = Q_1 + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{г}}; \quad (40)$$

$$N_{\text{пол}} = N_1 + N_{\text{всп}} + N_{\text{г}}. \quad (41)$$

Тепловые потери печи в течение одного цикла складываются из тепловых потерь за отдельные периоды цикла, т. е. из потерь за время нагрева, время выдержки, время остывания и время простоя печи при загрузке и выгрузке:

$$q_{\text{потерь ср}} \tau_{\text{цикла}} = q_{\text{потерь нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{потерь выд}} \tau_{\text{выд}} + q_{\text{потерь ост}} \tau_{\text{ост}} + q_{\text{потерь пр}} \tau_{\text{пр}}. \quad (42)$$

Для печей периодического действия потери за время остывания (поскольку остывание проводят чаще всего при выключенной печи) и простоя не учитывают.

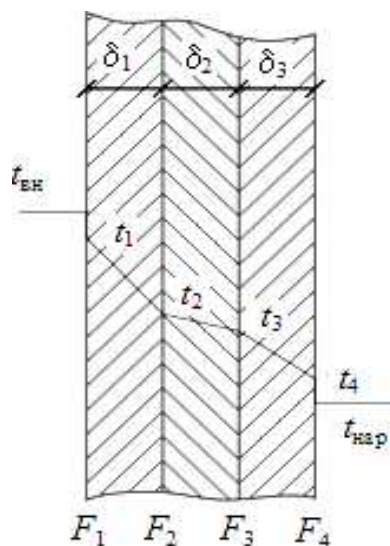


Рис. 3. Трехслойная плоская стенка: $t_{\text{вн}}$ – температура внутри печи; t_i – температура на i -й поверхности теплоизолирующего слоя; $t_{\text{нар}}$ – температура снаружи печи; δ_j – толщина j -го слоя теплоизоляции; F_i – площадь i -й поверхности

Для методических туннельных печей, работающих, как правило, в полунепрерывном режиме, время простоя и остывания также не учитывают.

Расчет тепловых потерь в режиме стационарного переноса теплоты через стены печи сводится к решению задачи теплопередачи через многослойную плоскую либо цилиндрическую поверхность.

С достаточной для инженерных расчетов точностью можно перейти от идеального случая бесконечных поверхностей к реальной стенке печи, состоящей из j слоев футеровки, образующих i поверхностей с различной площадью. Например, для трех слоев теплоизоляции (рис. 3) уравнение теплового потока, записанное для всей поверхности стенки, примет вид:

$$N_{\phi} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{нар}} F_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{II}} F_{\text{II}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{\text{III}} F_{\text{III}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} F_4}}, \quad (43)$$

где $\alpha_{\text{нар}}$ и $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициенты теплоотдачи наружного (I) и внутреннего (II) слоев соответственно, Вт/(м²·К); λ_j – коэффициент теплопроводности j -го слоя, Вт/(м·К); F_i – площадь i -й поверхности, м²;

F_j – усредненная площадь j -го слоя, м².

Так как λ зависит от температуры материала футеровки, то в формулу (43) подставляют усредненный коэффициент, взятый для средней температуры, например для III слоя $t_{\text{III}} = \frac{t_3 + t_4}{2}$. Площадь F_j берут как среднее квадратичное площадей поверхности j -го слоя: $F_{\text{III}} = \sqrt{F_3 F_4}$.

При расчете потерь в методической многозонной печи рассчитывают потери для каждой температурной зоны (с учетом особенностей футеровки пода, стен и свода) и затем складывают.

Для трехслойной цилиндрической стенки (рис. 4) величина тепловых потерь примет вид:

$$N_{\phi} = \frac{\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} H_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1 H_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{II}} H_{\text{II}}} \ln \frac{d_2}{d_1}} +$$

$$+ \frac{\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{III}}H_{\text{III}}} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}H_4d_4}}, \quad (44)$$

где d_i – диаметр i -й цилиндрической поверхности; H_i – высота i -й поверхности, м; H_j – усредненная высота j -го слоя футеровки, м.

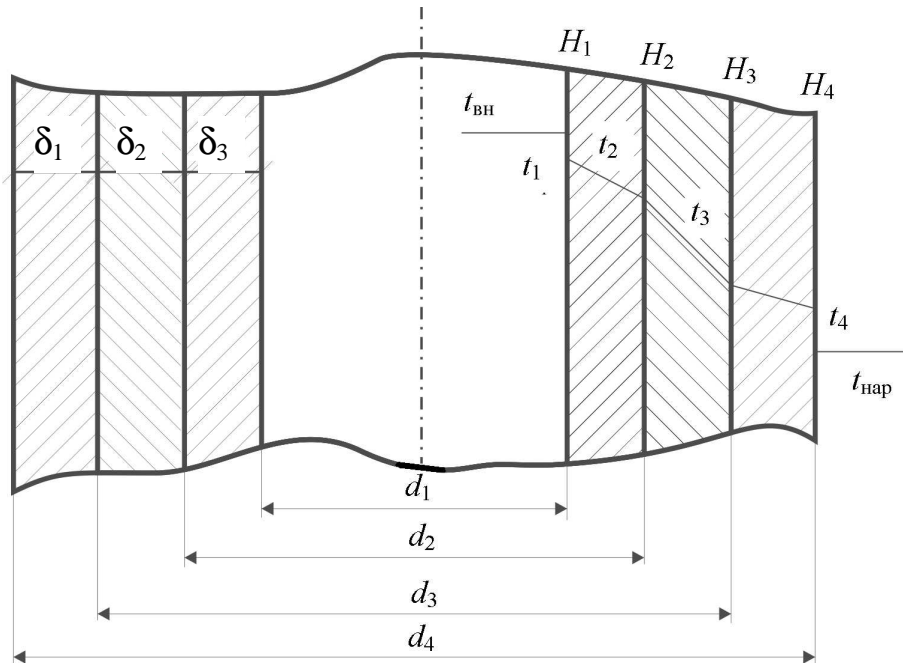


Рис. 4. Трехслойная цилиндрическая стенка

Высоту j -го слоя футеровки принимают как среднее арифметическое высот поверхностей этого слоя, например $H_{\text{III}} = \frac{H_3 + H_4}{2}$.

Теплоотдача от наружной стенки печи в окружающую среду носит сложный характер, поэтому для инженерных расчетов при условии $t_{\text{нар}} = 20^\circ\text{C}$ и температуре поверхности печи, равной 40°C , берут следующие значения коэффициента $\alpha_{\text{нар}}$ в формулах (43) и (44):

- для вертикальной поверхности – $10,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- для верхней горизонтальной поверхности – $12,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.
- для нижней горизонтальной поверхности – $8,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Расчет футеровок проводят методом последовательных приближений.

1. Задают количество слоев, их толщину и материал футеровки,

геометрические размеры печи и внутреннего пространства, температуру внутри печи (или на внутренней поверхности футеровки – t_4) и температуру снаружи.

2. Произвольно задаются значениями температур на i -х поверхностях теплоизолирующих слоев t_i .

3. Рассчитывают F_i или H_i и t_i .

4. По справочным данным на основании выбранной t_i определяют λ_i .

5. По уравнению (43) или (44) рассчитывают N_ϕ .

6. Проверяют значения температур t , решая обратную задачу по отдельным слоям футеровки:

$$t_1 = t_{\text{вн}} - \frac{N_\phi}{\alpha_{\text{вн}} F_1}; \quad t_1 = t_{\text{вн}} - \frac{N_\phi}{\pi \alpha_{\text{вн}} H_1 d_1}; \quad (45)$$

$$t_2 = t_1 - \frac{N_\phi \delta_I}{\lambda_I F_I}; \quad t_2 = t_1 - \frac{N_\phi}{\pi \lambda_I H_I \ln \frac{d_2}{d_1}}; \quad (46)$$

$$t_3 = t_2 - \frac{N_\phi \delta_{II}}{\lambda_{II} F_{II}}; \quad t_3 = t_2 - \frac{N_\phi}{\pi \lambda_{II} H_{II} \ln \frac{d_3}{d_2}}; \quad (47)$$

$$t_4 = t_3 - \frac{N_\phi \delta_{III}}{\lambda_{III} F_{III}}; \quad t_4 = t_3 - \frac{N_\phi}{\pi \lambda_{III} H_{III} \ln \frac{d_4}{d_3}}; \quad (48)$$

$$t_{\text{нар}} = t_4 - \frac{N_\phi}{\alpha_{\text{нар}} F_4}; \quad t_{\text{нар}} = t_4 - \frac{N_\phi}{\pi \alpha_{\text{нар}} H_4 d_4}. \quad (49)$$

7. Сравнивают полученные значения t_i с заданными в начале расчета (п. 2). Если эти величины совпадают с достаточной точностью, то расчет считают законченным. В случае несовпадения задают новые t_i и расчет повторяют. *При расчете методических печей, имеющих определенные размеры и слои футеровки, задача сводится к проверке температур на границе слоев, температуры поверхности печи (обеспечивает ли выбранная футеровка безопасные условия работы), оценке величины тепловых потерь с учетом возможной замены элементов футеровки.*

Отдельно подсчитываются тепловые потери через закрытую и открытую дверцы, причем учитывается время открытого состояния

последней:

$$q_{п.дв} = q_{п.откр.дв} \frac{\tau_{откр}}{\tau_{цикл}} + q_{п.закр.дв} \frac{\tau_{цикла} - \tau_{нагр}}{\tau_{цикла}}, \quad (50)$$

где $q_{п.откр.дв}$ и $q_{п.закр.дв}$ – тепловые потери через открытую и закрытую дверцы печи.

Тепловые потери через закрытую дверцу рассчитываются так же, как и потери через любую стенку, потери через открытую дверцу определяются излучением и конвекцией. Потери на излучение $q_{изл.отв}$, Вт, рассчитываются по закону Стефана – Больцмана, причем можно принять, что малые отверстия излучают, как абсолютно черные тела ($\varepsilon = 1,0$), а крупные отверстия, приближающиеся по своим размерам к внутренним габаритам печной камеры, со степенью черноты $\varepsilon = 0,8$:

$$q_{изл.отв} = \varepsilon \cdot 5,76 \left[\left(\frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_о}{100} \right)^4 \right] F_{отв} \phi, \quad (51)$$

где $T_{печи}$ – абсолютная термодинамическая температура рабочей камеры печи, К; $T_о$ – абсолютная термодинамическая температура окружающего печь воздуха, К; $F_{отв}$ – площадь окна дверцы, м²; ϕ – коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину отверстия и экранирующее действие его стен.

Значения коэффициента диафрагмирования могут быть взяты из графика (рис. 5).

В печах, которые работают непрерывно и в которых не производится остывание изделий, средние значения температур камеры печи мало отличаются от рабочей температуры. Для них тепловые потери периодов нагрева, выдержки и простоев можно считать одинаковыми и равными тепловым потерям при рабочей температуре печи. В печах с остывающими изделиями или отключающихся на длительное время (например, при односменной работе) при каждом остывании теряется часть аккумулированной кладкой теплоты, которая должна возобновляться при следующем нагреве печи. Эта теплота может быть найдена как потери кладкой печи за время остывания изделий и простоя, причем приближенно это можно сделать, учитывая потери за прошедший период как средние при температурах начала и конца остывания печи.

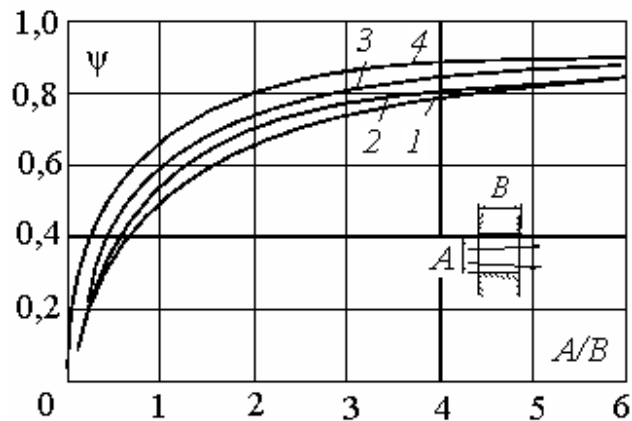


Рис. 5. Коэффициент диафрагмирования отверстий: 1 – круглое сечение; 2 – квадратное; 3 – прямоугольное (соотношение сторон 2 : 1); 4 – длинная щель высотой A

Тепло, аккумулированное печью, определяют исходя из теплоемкости и температур всех элементов конструкции печи:

$$Q_{\text{ак}} = \sum_i M_i c_i (T_i - T_0), \quad (52)$$

где M_i – масса i -го элемента конструкции, кг; c_i – средняя теплоемкость i -го элемента конструкции, Дж/(кг·К); T_i – средняя температура, до которой прогреет i -й элемент конструкции, К; T_0 – начальная температура элементов конструкции печи, К.

Расход энергии на единицу обрабатываемой в печи продукции может быть определен из выражения

$$A = \frac{Q_{\text{цикла}}}{E \tau_{\text{цикла}}}, \quad (53)$$

где E – производительность печи, кг/ч.

Тепловой КПД печи рассчитывают по формуле

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{потерь}} \tau_{\text{цикла}}}. \quad (54)$$

Количество теплоты, которое необходимо ввести в печь за период нагрева изделий, должно быть достаточным, чтобы нагреть садку и жароупорные детали, а также чтобы компенсировать тепловые потери печи за время остывания в ней изделий и ее простоя:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{потерь нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{потерь выд}} \tau_{\text{выд}} + q_{\text{потерь ост}} \tau_{\text{ост}} +$$

$$+ q_{\text{потерь пр}} \tau_{\text{пр}} \quad (55)$$

Мощность печи периодического действия $P_{\text{печи}}$, Вт, определяется по формуле

$$P_{\text{печи}} = K \frac{Q_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}}, \quad (56)$$

а для методических печей

$$P_{\text{печи}} = K(N_{\text{пол}} + N_{\text{всп}} + N_{\text{пот}}), \quad (57)$$

где $K = 1,2-1,5$ – коэффициент запаса.

Запас мощности берется для того, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу изделиям в первый этап и агрева изделий (при $q_{\text{потерь}} = \text{const}$); кроме того, этим коэффициентом предусматривается учет возможного ухудшения тепловой изоляции печи в эксплуатации, старения нагревателей, возможного снижения напряжения в цехе против номинального на 5–10% и других местных обстоятельств, учесть которые при проектировании невозможно.

Следует иметь в виду, что раздельное определение $P_{\text{пол}}$, $P_{\text{всп}}$ возможно лишь тогда, когда нагрев изделий и вспомогательных деталей не связан (например, крючки, на которых подвешены изделия, газовая атмосфера печи). Если же тепловые потоки, идущие на нагрев изделий и вспомогательных деталей, сливаются (изделия лежат на поддонах, часть теплоты проходит в изделия через поддоны), то время нагрева должно определяться для изделия и вспомогательных деталей; полезный и вспомогательный тепловые потоки будут для них общими, так же как и поверхность, воспринимающая теплоту $F_{\text{изд}}$. В этом случае

$$P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} = q_{\text{п}} F_{\text{изд}}. \quad (58)$$

Иначе рассчитывают нагрев изделий в таре или муфеле. В этих условиях определение времени нагрева расчетным путем затруднительно, и оно обычно задается на основе опытных данных, а мощность печи определяется по формуле (56).

Когда температурный перепад в изделиях в период нагрева ограничен технологическим заданием или когда задана максимальная скорость нагрева изделий θ , принятые значения удельного теплового потока $q_{\text{п}}$ должны быть проверены по выражениям:

– для пластины:

$$q_{\text{п}} \leq \Delta t \frac{2\lambda}{S}, \text{ или } q_{\text{п}} \leq \theta_{\text{ср}} S, \quad (59)$$

где S – толщина изделия;

– для цилиндра:

$$q_{\text{п}} \leq \Delta t \frac{2\lambda}{R}, \text{ или } q_{\text{п}} \leq 0,5\theta_{\text{ср}}R. \quad (60)$$

Сводный тепловой баланс электропечи сопротивления приведен в табл. 6.

Таблица 6

Сводный тепловой баланс обжига в электропечи сопротивления

Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
1. Теплота изделия, поступающего в печь			1. На нагрев изделий (для садочной печи до максимальной температуры, а для методической печи отдельно для каждой зоны и затем суммирование)		
2. Теплота, вносимая дополнительными приспособлениями, поступающими в печь			2. На нагрев вспомогательных устройств (до максимальной температуры в случае садочной печи, отдельно по зонам, а затем суммирование для методической печи)		
			3. На химические процессы		
			4. На испарение физической влаги и нагрев паров воды		
3. Теплота газов, поступающих в печь			5. Теплота, теряемая через футеровку печи (для пода, свода и стен считается отдельно, если футеровка этих элементов различна; для методических печей потери через футеровку считают для каждой функциональной зоны отдельно, а затем суммируют для расчета мощности печи)		
4. Теплота, генерируемая нагревателями			6. Теплота, теряемая через открытые отверстия		
			7. Неучтенные потери		
			<i>Итого</i>		100

Допускается неувязка баланса не более 0,1%.

1.3.5. Конструирование нагревательных элементов

В электрических печах сопротивления преобразование электрической энергии в тепловую происходит в нагревательных элементах (нагревателях). Работа нагревателя обычно происходит в тяжелых условиях, часто при предельно допустимых для материала, из которого он выполнен, температурах. Как правило,

срок службы нагревателя определяет время работы всей печи до ремонта, поэтому увеличение срока службы нагревателей ЭПС является важной задачей как с технической, так и с экономической точки зрения.

Одним из основных факторов, обуславливающих срок службы нагревателя, является максимальная температура, при которой он работает длительное время. Разность между температурой нагревателя и загрузкой зависит от условий теплопередачи.

При оптимальном выборе конструкции и правильно выполненном расчете нагревателя эта разность минимальна, что позволяет добиваться одной и той же мощности и температуры в печи, эксплуатируя нагреватель в более мягких для него режимах. «Старение» материала нагревателя в процессе работы обусловлено изменениями его физико-химических свойств. Оно может быть вызвано окислением, изменением химического состава сплава, распылением в вакууме и т. д. Часто нагреватель выходит из строя из-за местных перегревов задолго до достижения предельного состояния материала. Если температура нагревателя выбрана с запасом, то локальные перегревы не будут существенно сказываться на сроке службы нагревателя.

Расчет нагревательных элементов позволяет:

- оптимально расположить нагреватели в печи и тем самым уменьшить ее габариты и рационально использовать рабочее пространство;

- выбрать рациональную электрическую схему подключения нагревателей и питающее напряжение;

- выбрать экономически выгодную конструкцию нагревателя и его сечения, которые обеспечат минимальные капитальные затраты;

- оценить капитальные и эксплуатационные затраты при использовании нагревателей из различных материалов;

- определить срок службы выбранного нагревателя или подобрать нагреватель с заданным сроком службы.

1.3.5.1. Рекомендации по выбору материала. Материалы, предназначенные для изготовления нагревательных элементов, должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь достаточную жаростойкость (окалиностойкость) – способность материала противостоять химическому разрушению

поверхности под воздействием горячего воздуха или другой газовой среды;

- иметь достаточную жаропрочность – способность материала сохранять длительную прочность при высоких температурах;

- иметь большое удельное электрическое сопротивление ρ . Для размещения нагревателя внутри печи удобнее иметь элемент большего сечения S и меньшей длины l . Кроме того, нагреватель с большим сечением имеет более длительный срок службы, а при заданном сопротивлении нагревателя R его длина тем меньше, а сечение тем больше, чем выше удельное электрическое сопротивление;

- иметь малый температурный коэффициент сопротивления, иначе для подключения нагревателя к сети требуется трансформатор напряжения, позволяющий в начальный момент, когда нагреватель имеет небольшую температуру, а следовательно, значительно меньшее удельное электрическое сопротивление, подать на печь пониженное напряжение;

- обладать постоянством электрических свойств во времени. Материалы, стареющие со временем, увеличивают свое сопротивление. Это усложняет эксплуатацию печи, так как требуется трансформатор с большим числом диапазонов напряжений;

- обладать постоянством размеров. Приходится предусматривать при конструировании нагревателя возможность его удлинения до 30–40%;

- иметь хорошую обрабатываемость, чтобы иметь возможность изготавливать проволоку, ленту, навивать из них спирали, сваривать нагреватели между собой.

Для изготовления нагревательных элементов печей сопротивления используют разнообразные материалы, способные работать в широком диапазоне температур, вплоть до 3000°C (табл. 7). В табл. 8 представлены рекомендуемые и максимально допустимые температуры для некоторых из них. Обычно за рекомендуемую температуру работы нагревателя принимают ту температуру, при которой срок его службы составит 10 000 ч. Максимально допустимой считают температуру, при которой срок службы равен 2000 ч.

Таблица 7

Основные характеристики материалов, применяемых для изготовления нагревательных элементов [5]

Наименование материала	Предельная рабочая	Плотность при 0°C, кг/м ³	Удельное электросопротивление,
------------------------	--------------------	--------------------------------------	--------------------------------

	температура, °С		Ом·м ($\rho = a + bt$ *)
Сталь Х25Н20 (ЭП74)	800–1 000	7 840	$0,92 \cdot 10^{-6} + 38 \cdot 10^{-11} t$
Сталь Х23Н18	800	7 800	$0,90 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot 10^{-11} t$
Нихром Х15Н60	900–1 050	8 300	** $110 \cdot 10^{-6} + 14 \cdot 10^{-9} t$
Нихром Х20Н80	1 100	8 400	** $110 \cdot 10^{-6} + 8,5 \cdot 10^{-9} t$
Нихром Х20Н80Т3	1 150	–	* $127 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-9} t$
Фехраль Х13Ю4	700–1 000	7 400	$1,26 \cdot 10^{-6} + 6,0 \cdot 10^{-11} t$
Хромаль Х23Ю5	1 150–1 200	7 270	$1,40 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-11} t$
Хромаль Х27Ю5Т	1 100–1 300	–	–
Сплав Х23Ю5А (ЭИ595)	1 050	–	** $140 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-9} t$
Сплав Х27Ю5	1 250	7 190	$1,40 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-11} t$
Сплав Х27Ю5А (ЭИ626)	1 300	–	** $140 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-9} t$
Глобар (силит) SiC	1 400	2 300	$8,00 \cdot 10^{-4} \div 19,0 \cdot 10^{-4}$
Дисилицид молибдена MoSi ₂	1 650	–	$3,2 \cdot 10^{-6} \div 4,0 \cdot 10^{-6}$
Платина	1 500	–	** $11 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-9} t$
Платинородиевый сплав	1 550–1 600	–	** $11 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-9} t$
Мо	2 000	10 200	$0,0054 \cdot 10^{-6} + 4,8 \cdot 10^{-3} t$
W	2 500	19 200	$0,0053 \cdot 10^{-6} + 4,5 \cdot 10^{-3} t$
С	3 000	–	$(5-1000) \cdot 10^{-6}$
Ниобий	1 700	8 600	–
Тантал	2 200	16 600	$0,155 \cdot 10^{-7} + 38 \cdot 10^{-3} t$
Хромит лантана	1 750	6 670	–

* t – температура нагревателя, °С.

** Удельное электросопротивление, Ом·см.

Как правило, нагреватели из одного и того же материала имеют более высокую рабочую температуру либо более длительный срок службы при непрерывном режиме работы по сравнению с работой в периодическом режиме.

Следует отметить, что максимально допустимая температура работы нагревателя зависит от его диаметра (или толщины). В табл. 8 приведены значения температур для проволоки из металлических сплавов с диаметром 3 мм. При использовании нагревателей диаметром более 6 мм максимально допустимая температура может

быть увеличена на 50°С, а при уменьшении диаметра нагревателя до 1 мм температура снижается на 50°С. Если диаметр нагревателя 0,2–0,4 мм, то максимально допустимую температуру следует принять на 100–200°С ниже табличной.

Таблица 8

Рекомендуемые и максимально допустимые температуры работы нагревателей в зависимости от условий эксплуатации [7]

Материал нагревателя	Рекомендуемая температура, °С		Максимально допустимая температура, °С	
	Непрерывный режим работы	Прерывистый режим работы	Непрерывный режим работы	Прерывистый режим работы
Нихром: Х20Н80, 20Н80Т, ХН70Ю	1050	1000	1150	1100
Ферронихром: Х15Н60	950	900	1050	1000
Х25Н20, Х23Н18	850	800	1000	950
Фехраль: Х13Ю4, Х15Ю5	750	650	900	800
Хромаль: Х23Ю5	1050	1000	1200	1150
Х27Ю5Т	1150	1100	1300	1250
Ниобий	–	–	1650	–
Молибден: в вакууме	–	–	1700	–
в защитной атмосфере	–	–	2200	–
Вольфрам	–	–	3000	–
Карборунд	1350	1300	1500	1300–1500
Силит	1250	1200	1300	1250–1300
Дисилицид молибдена	1200–1600	–	1680	1550–1680
Графит	–	–	3000	–

Предельная температура эксплуатации нагревателя зависит от атмосферы, в которой он работает. Поэтому, выбирая материал для нагревателя при конструировании печи сопротивления, кроме температурного режима следует учитывать химический состав окружающей его среды.

В табл. 9 приведены рекомендуемые сплавы и их предельные температуры использования при работе в различных средах.

Таблица 9

**Сплавы, рекомендуемые для работы
в специальных атмосферах [7]**

Марка сплава	Предельные температуры использования в атмосфере, °С								
	Воздух	Вакуум, 10^1-10^{-2} Па	Водяной пар	Аргон	Азот	Углерод и серосодержащи е среды	Аммиак	Водород	Хлор, бром
X20H80-H	1200	–	1100	1200	–	–	1200	–	300
XH70Ю	1200	1150	–	–	–	–	–	1200	–
X15H60-H	1125	–	–	–	1100	–	–	–	–
X15H60Ю3А	1200	1150	–	–	–	–	–	–	–
XH60Ю3	1200	1150	–	–	–	–	–	1200	–
XH20ЮС	1100	–	–	–	–	–	–	–	–
X15Ю5	1000	–	–	–	–	–	–	–	–
X23Ю5	1200	1350	1300	130	900	1150	1100	1400	–
X23Ю5Т	1400	1350	1300	–	–	1150	1200	–	–
X27Ю5Т	1350	1350	–	1300	–	1150	–	1400	–
OX24Ю5Т-ВИ	1300	1350	–	–	–	–	–	–	–

Металлические сплавы используют в качестве материала нагревателей до температур 1200–1250°С.

Нихром – это сплавы никеля и хрома. Промышленно выпускаются сплавы, содержащие от 15 до 27% хрома. Наиболее широко распространен сплав, содержащий 20% хрома. Нихром сочетает высокую жаростойкость (до 1250°С) и значительное электрическое сопротивление (1,05–1,40 (Ом·мм²)/м), температура его плавления 1370–1420°С, плотность 8200–8400 кг/м³. Нихром достаточно пластичен в горячем и холодном состоянии, хорошо поддается сварке и обработке резанием. Полуфабрикаты из него изготавливают в основном в виде проволоки и ленты. Так как нихром имеет небольшой температурный коэффициент электрического сопротивления, то нагреватели из него не требуют изменения питающего напряжения в процессе разогрева печи и, следовательно, могут работать без специального трансформатора напряжения.

Нихром образует на поверхности защитную пленку из оксида

хрома, что позволяет использовать его для работы в окислительной атмосфере. В атмосфере галогенов, а также в щелочной среде нихром неработоспособен. Нихром не магнитен. Основной его недостаток – относительно высокая стоимость.

Ферронихром – разновидность нихрома, в котором значительная часть никеля замещена железом, что способствует удешевлению и повышению технологической пластичности сплава. Жаростойкость ферронихрома до 1200°C, электрическое сопротивление до 1,30 (Ом·мм²)/м.

Хромаль – сплав железа с хромом и алюминием. Выпускают хромаль с содержанием хрома 23–27%, алюминия 5%. Хромаль отличается высокой жаростойкостью, высокой температурой плавления (до 1510°C), большим удельным электрическим сопротивлением (1,3–1,47 (Ом·мм²)/м) и малым температурным коэффициентом электрического сопротивления. Его плотность 7200 кг/м³. Хромаль более дешевый, чем нихром. Этот сплав удовлетворительно технологичен при комнатной температуре и при высоких температурах. Он более жаростоек в воздушной, сернистой средах, но становится хрупким и непрочным после нагрева, особенно выше 1000°C. Ремонт нагревателей, работавших при температуре выше 1000°C, практически невозможен.

Хромаль магнитен, ржавеет, при температуре выше 1000°C взаимодействует с шамотной футеровкой и с оксидами железа. Для повышения срока службы нагревателей в восстановительных атмосферах их необходимо предварительно окислить работой на воздухе в течение 2–3 сут при 1100°C.

Фехраль – сплав на основе системы железо – хром – алюминий. Температура плавления 1455°C, удельное электрическое сопротивление 1,18–1,34 (Ом·мм²)/м, плотность 7300 кг/м³. Фехраль уступает по жаростойкости хромалю, однако значительно дешевле его и обладает более высокой технологической пластичностью при горячем и холодном деформировании.

Для выводов нагревателей в зависимости от температуры их работы рекомендуют материалы, представленные в табл. 10.

Можно применять для выводов те же материалы, что и для нагревателей, но это не всегда экономически выгодно. Диаметр вывода должен быть выбран так, чтобы его сечение превышало сечение самого нагревателя не менее чем в 3 раза.

Таблица 10

Сплавы, рекомендуемые для изготовления выводов нагревателей [7]

Температура, °С	Материал сплава	Рабочая атмосфера
До 700	12Х13	Воздух, N ₂ , NH ₃ , H ₂ S, углеродсодержащая
800–1200	Х25Ю5	Воздух, N ₂ , H ₂ S, углеродсодержащая
1200–1350	Х27Ю5Т	–
900–1000	20Х23Н13	Воздух, N ₂ , NH ₃
1000–1100	20Х25Н20С2	–

Нагреватели, состоящие их отдельных секций, и элементы выводов с нагревателями между собой сваривают. При этом следует учитывать, что в местах нагрева железохромоалюминиевые сплавы становятся хрупкими. В связи с этим при их транспортировке или установке в печи возможны поломки.

Гибка нагревателей должна производиться плавно, без рывков. Для увеличения пластичности хрупких сплавов нагреватели гнут с подогревом либо газовой горелкой, либо пропусканием через них электрического тока, используя напряжение 5–10 В. Рекомендуемая температура во время гибки 700–1000°С.

1.3.5.2. Конструирование металлических нагревателей.

На рис. 6 приведены возможные конструкции металлических нагревателей.

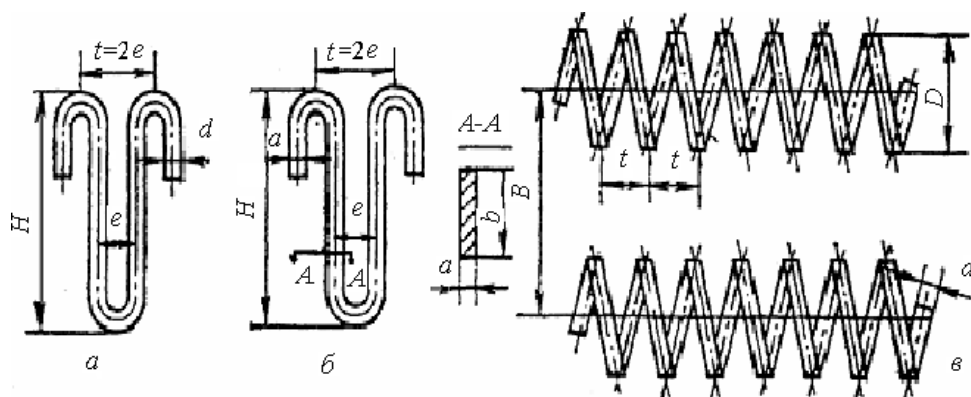


Рис. 6. Конструкции металлических нагревателей: *a* – проволочный зигзагообразный; *б* – ленточный зигзагообразный; *в* – проволочный спиральный; *H* – высота зигзага; *d* – диаметр проволоки; *e* – расстояние между осями зигзага; *a* и *b* – ширина и высота ленты соответственно; *t* – шаг спирали; *D* – высота спирали; *B* – расстояние между витками спирали

Проволочные спиральные нагреватели, как правило, располагаются на керамических полочках, в керамических плитах с пазами или на керамических трубках. При конструировании таких

нагревателей следует учесть, что отношение шага спирали t к диаметру проволоки d должно быть не менее 2. Максимальные отношения D/d приведены в табл. 11. При изготовлении спиральных нагревателей необходимо тщательно следить за равномерностью навивки, так как в местах сгущения витков будут значительные перегревы нагревателя, что ведет к снижению срока его службы.

Таблица 11

Максимальное отношение D/d для спиральных нагревателей

Температура нагревателя, °С	Хромоникелевые сплавы	Железохромоалюминиевые сплавы
1000	10	8
1100	9	7
1200	8	6
1300	–	5

Проволочные зигзагообразные нагреватели рекомендуют крепить в специальных керамических плитках (при $d = 4–7$ мм) либо подвешивать на металлических жароупорных или керамических крючках (штырях), если $d > 7$ мм.

Максимальная высота зигзага H для различных типов конструкции нагревателей приведена в табл. 12.

Таблица 12

Максимальная высота зигзага проволочных нагревателей, мм

Способ крепления нагревателя	Диаметр проволоки d , мм			
	6–7	8–9	10–11	12–14
На своде:	–	–	–	–
на двух крючках	215 / 150	250 / 170	280 / 200	300 / 220
лежащий на двух опорах	170 / 130	200 / 160	225 / 180	245 / 200
в керамических плитках	200 / 150	–	–	–
На стенах:	–	–	–	–
на штырях	300 / 200–250	–	–	–
в керамических плитках	250 / 200	–	–	–

Примечание. Числитель относится к проволоке Cr–Ni; знаменатель – к проволоке Fe–Cr–Al.

Подовые нагреватели могут быть изготовлены с высотой зигзага на 20–30% большей, чем высота нагревателей на стенах печи.

Ленточные зигзагообразные нагреватели могут крепиться, как и

проволочные зигзагообразные, либо свободно лежать на опорах на своде и на поду.

Отношение расстояния между осями зигзагообразного нагревателя e к ширине ленты a должно быть не менее 0,9. Максимальные высоты зигзага H для различных способов крепления ленты приведены в табл. 13.

Таблица 13

Максимальная высота зигзага ленточного нагревателя, мм

Температура нагревателя, °С	Нагреватели подвешены на крючках на стенах			Нагреватели размещены на двух опорах на поду или своде		
	Ширина ленты, мм					
	10	20	30	10	20	30
1100	300 / 250	400 / 370	450 / 420	240 / 180	270 / 250	320 / 300
1200	200 / 150	300 / 230	350 / 280	160 / 140	220 / 175	270 / 200
1300	- / 130	- / 200	- / 250	- / 120	- / 150	- / 170

Примечание. Числитель относится к ленте из сплавов Cr–Ni; знаменатель – к ленте из сплавов Fe–Cr–Al.

1.3.5.3. Конструирование неметаллических нагревателей.

Неметаллические нагреватели применяют при температурах нагрева выше 1250°С.

Карборундовые электронагреватели (КЭН). Карборунд – это материал на основе карбида кремния, способный работать в качестве нагревателя в окислительной среде при температуре до 1500°С. При более высоких температурах срок его службы резко снижается. Большое влияние на срок службы оказывает режим работы нагревателей. Резкие колебания температуры значительно сказываются на их долговечности. Даже медленные изменения температуры нагревателя в садочных печах существенно снижают срок его службы.

В восстановительной атмосфере срок службы нагревателей ниже, чем на воздухе. Метан, бутан, природный газ науглероживают нагреватели из карборунда, поэтому содержание этих газов в атмосфере печи не должно превышать 2%. В среде водорода нагреватели работают при температуре не выше 1300°С, при этом следует снизить их допустимую удельную поверхностную мощность. Если концентрация водорода в атмосфере менее 20% – мощность снижают на 40%, если концентрация водорода более 20% – мощность снижают на 60%.

Водяной пар при 750°C снижает стойкость КЭН в 2–3 раза. Среды с содержанием фтора, хлора, брома и сернистых соединений разрушают нагреватель.

Удельное электрическое сопротивление карборунда 809–1900 (Ом·мм²)/м, плотность 2200–2300 кг/м³. В холодном состоянии карборунд весьма хрупкий материал.

Из карбида кремния изготавливают еще один материал – силит. Он отличается от карборунда большей дисперсностью фазы SiC, из-за чего рекомендуемая и максимально допустимая температуры нагревателей из силита ниже, чем для нагревателей из карборунда.

Карборундовые и силитовые нагреватели изготавливают в виде стержней постоянного либо переменного сечения, а также в виде труб со спиральной нарезкой. Во всех печах, где применяются такие нагреватели, необходимо предусмотреть возможность их свободного удлинения при нагревании. Коэффициент термического расширения карборунда $(5-6) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Схема соединения нагревателей и тип трансформатора значительно влияют на срок их службы. Параллельное соединение нагревателей предпочтительно, так как при этом меньше сказывается разброс сопротивлений комплекта нагревателей, а в случае выхода из строя одного из нагревателей обычно можно продолжать процесс, используя остальные, в то время как при последовательном соединении цепь разрывается. Однако параллельное соединение требует более низких напряжений, и, следовательно, необходимо использовать трансформатор. Кроме того, при параллельном соединении нагревателей из-за больших токов нагрузка на подводящие кабели возрастает. Часто применяют параллельно-последовательную схему.

Для максимального использования ресурса нагревателей по мере их старения необходимо иметь возможность повышения рабочего напряжения в 2–2,5 раза по сравнению с исходным, для чего в трансформаторе должны быть промежуточные ступени с коэффициентом увеличения напряжения порядка 1,1–1,2.

Карборундовые нагреватели из-за низкого сопротивления работают при больших токах, поэтому к токоподводу следует предъявлять достаточно жесткие требования: он должен обеспечить низкое контактное сопротивление.

Дисилицид молибдена (ДМ). Нагреватели из дисилицида молибдена предназначены для работы в окислительной атмосфере

при максимально допустимой температуре 1700°C. При более высокой температуре ДМ быстро разлагается. Однако пределом их рациональной эксплуатации следует считать диапазон температур 1450–1680°C. При более низких температурах экономически выгодно использовать карборундовые или металлические нагреватели. Предварительно окисленный нагреватель может работать в водородных средах до температуры 1400°C. Нагреватели из ДМ хорошо работают в атмосфере оксида углерода, аргона, азота, углеводородов. Атмосферы, содержащие сернистые соединения и галогены, недопустимы. Дисилицид молибдена не работает при высоком вакууме.

Наилучший режим работы – когда температура нагревателей не опускается ниже 1200°C. При периодическом режиме работы происходит отслаивание защитной оксидной пленки, что приводит к уменьшению срока службы нагревателя. Опасность для нагревателей представляет длительная выдержка при температурах 500–1000°C и 1410–1460°C, так как в местах, где отсутствует пленка SiO₂, может произойти разложение MoSi₂, из которого состоит нагреватель.

Решающее влияние на срок службы нагревателей из дисилицида молибдена оказывает режим первого нагрева. Необходимо выполнить два условия:

- максимально быстро (в течение 2–3 ч) пройти интервал температур 500–1000°C;
- в течение суток выдержать нагреватель при температуре порядка 1300°C.

Эти условия необходимо выполнять при каждой замене нагревателей на новые.

Нагреватели из ДМ в основном имеют U-образную форму. Свободное расширение нагревателей такой конструкции обеспечивается при их вертикальной подвеске на своде или боковых стенах (если выводы нагревателя отогнуты на 90°). В некоторых случаях более рациональной и экономичной является горизонтальная установка нагревателей. При этом следует учитывать, что при температуре выше 1350°C они становятся пластичными и склонными к прогибу. Температура дисилицида молибдена, непосредственно соприкасающегося с поддерживающей керамикой, не должна превышать 1550°C. При более высокой температуре защитная пленка из SiO₂, покрывающая нагреватель, может склеиться с керамикой. В

литературе рекомендуется располагать горизонтальные нагреватели на подкладках в виде небольших отрезков таких же нагревателей из ДМ, размещенных на керамических полках с шагом 70–100 мм.

В процессе монтажа и эксплуатации нагревателей из дисилицида молибдена следует учитывать их чрезвычайную хрупкость в холодном состоянии.

1.3.5.4. Нагреватели из тугоплавких металлов. Для ЭПС, обжиг в которых проводят в инертных средах и под вакуумом, используют нагревательные элементы из тугоплавких металлов: вольфрама, молибдена, тантала и ниобия. Для работы в окислительной атмосфере эти нагреватели непригодны, поскольку они начинают окисляться кислородом воздуха уже при 200–300°C, а парами воды – при 250–500°C. Углекислый газ окисляет эти металлы при температуре выше 1000–1200°C. Нагреватели из Nb и Ta, W и Mo работают в среде водорода. Тантал активно поглощает азот.

Нагреватели из вольфрама весьма хрупки при комнатной температуре, поэтому их механическую обработку ведут в нагретом состоянии. При температуре 1400–1600°C происходит рекристаллизация структуры вольфрама, и он становится хрупким.

Молибден более пластичен, чем вольфрам. При толщине не более 0,5 мм его можно изгибать при комнатной температуре. Нагреватели большего диаметра перед механической обработкой следует нагревать до 200–700°C. Молибден рекристаллизуется при 950–1200°C

и становится хрупким.

Ниобий и тантал – наиболее пластичные металлы. Их можно ковать, штамповать, изгибать без нагрева. При рекристаллизации они не становятся хрупкими.

Удельное электрическое сопротивление W, Mo, Ta и Nb сильно зависит от температуры (табл. 14), поэтому печная установка должна быть оснащена питающим трансформатором, позволяющим регулировать напряжение нагревателя в процессе работы.

Таблица 14

Удельное электрическое сопротивление металлов, (Ом·мм²)/м

Металл	Температура, К							
	293	600	1000	1400	1800	2200	2600	3000
Вольфрам	0,055	0,13	0,23	0,37	0,50	0,62	0,77	0,90
Молибден	0,050	0,13	0,23	0,32	0,39	0,47	0,53	0,58

Тантал	0,15	0,29	0,43	0,55	0,68	0,82	0,93	–
Ниобий	0,15	0,29	0,42	0,53	0,64	0,75	0,85	–

1.3.6. Расчет нагревательных элементов

Исходными данными для расчета нагревателей электропечей сопротивления являются:

- мощность печи N , кВт;
- геометрические размеры печи;
- напряжение питающей сети U , В;
- начальная $t_M^{\text{нач}}$ и конечная $t_M^{\text{кон}}$ температуры нагрева материала.

Целью расчета нагревателей является определение геометрических размеров, схемы включения («звезда» или «треугольник») и расположения нагревателей в печи, обеспечивающих при выбранном материале нагревателей оптимальные условия их службы.

Расчет нагревателей производят в следующем порядке:

1. Находят рабочую температуру нагревателей по формуле

$$t_H = t_M^{\text{кон}} + 100^\circ\text{C}. \quad (61)$$

2. Выбирают материал нагревателей, используя табл. 7, а также данные [7], и определяют величину удельного электросопротивления ρ , Ом·м, при t_H .

Мощность, выделяемая с единицы поверхности нагревателя, определяет его температуру, а следовательно, работоспособность данного нагревателя в выбранных проектом условиях. Поэтому удельная поверхностная мощность ω является важнейшей расчетной величиной при проектировании нагревательных элементов.

3. Находят удельную поверхностную мощность идеального нагревателя $\omega_{\text{ид}}$, кВт/м²:

$$\omega_{\text{ид}} = \frac{C_0 \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{\varepsilon_H} + \frac{1}{\varepsilon_M} - 1} \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M}{100} \right)^4 \right], \quad (62)$$

где $C_0 = 5,76$; ε_H , ε_M – соответственно степень черноты нагревателя и изделия (табл. 15); T_H , T_M – термодинамическая температура соответственно нагревателя и изделия, К.

Для определения $\omega_{\text{ид}}$ можно использовать графики на рис. 68 [1].

4. Выбирают тип нагревателя. Реальный нагреватель, в отличие от идеального, излучает на изделие не всей своей поверхностью: часть

лучей попадает на соседние нагреватели и футеровку. Можно принять, что реальный нагреватель излучает на изделие теплоту только некоторой условной эффективной поверхностью. Тогда допустимая поверхностная мощность реального нагревателя ω будет отличаться от поверхностной мощности идеального нагревателя:

$$\omega = \omega_{ид} \alpha_{эф} \alpha_{г} \alpha_{с} \alpha_{р}, \quad (63)$$

где $\alpha_{эф}$ – коэффициент эффективности излучения данной системы нагревателя; $\alpha_{г}$ – коэффициент шага; $\alpha_{с}$ – коэффициент, учитывающий зависимость ω от приведенного коэффициента излучения $c_{пр}$; $\alpha_{р}$ – коэффициент, учитывающий влияние размеров садки.

Таблица 15

Коэффициент степени черноты Ошибка! Ошибка связи. некоторых материалов

Материалы	ϵ	Материалы	ϵ	Материалы	ϵ
<i>Нагревателей</i>		<i>Футеровки</i>		Окисленная медь	0,7
Нихром	0,8	Кирпич шамотный	0,8	Неокисленная медь	0,3
Хромель	0,8	Кирпич диносовый	0,8		
Карборунд	0,7	Кирпич магнезитовый	0,9	Окисленное серебро	0,02–0,04
Дисилицид молибдена	0,8			Оксид алюминия плотный	0,5–0,7
Молибден	0,3	Кирпич керамический	0,9	Оксид магния плотный	0,4–0,6
Вольфрам	0,3				
Тантал	0,3	<i>Тиглей</i>		Стекло	0,93
Ниобий	0,3	Окисленная сталь	0,8		
Платина	0,3–0,4	Неокисленная сталь	0,45	Титан	0,6
Плотный графит	0,9				

Коэффициент $\alpha_{эф}$ характеризует эффективность излучения системы нагревателей при минимально допустимых (по конструкционным соображениям) относительных витковых расстояниях, т. е. для наиболее плотно размещенных нагревателей (табл. 16).

Коэффициент шага $\alpha_{г}$ учитывает зависимость удельной поверхностной мощности от относительных витковых расстояний e / d , e / b , t / d для данной системы нагревателя (рис. 7–9). Для системы параллельно расположенных стержней и для изделий,

находящихся внутри спирального нагревателя, при определении α_r используют график на рис. 8 для проволочного зигзагообразного нагревателя.

Все другие геометрические соотношения мало влияют на удельную поверхностную мощность, поэтому при расчете нагревателя их не учитывают.

Таблица 16

Значения коэффициента $\alpha_{эф}$ для различных систем нагревателей

Система нагревателей	Коэффициент $\alpha_{эф}$
Проволочная спираль на полочке, $t/d = 2$	0,32
Проволочная спираль на трубе, $t/d = 2$	0,32
Проволочная спираль в балках, $t/d = 2$	0,22
Проволочный зигзаг, $e/d = 2,75$	0,68
Ленточный зигзаг, $e/d = 0,9$	0,40
Ленточный зигзаг в балках или выемных рамках, $e/d = 0,9$	0,34
Стержневые нагреватели	0,68
Изделие внутри спирального нагревателя	0,68

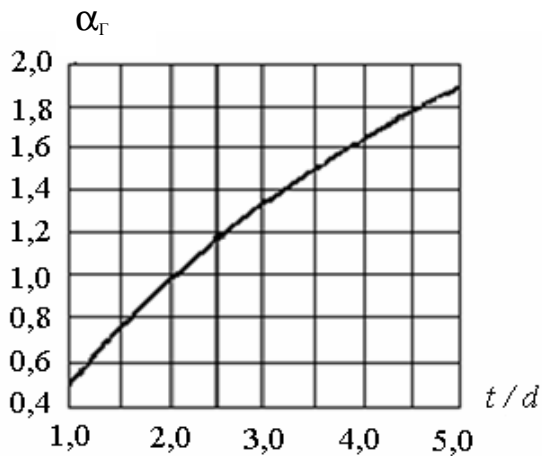


Рис. 7. Значение α_r для проволочного спирального нагревателя

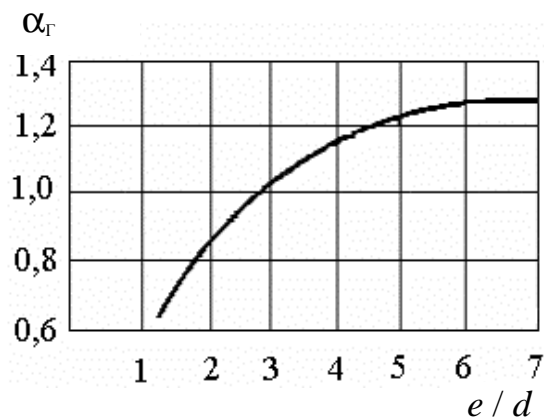


Рис. 8. Значение α_r для проволочного зигзагообразного нагревателя

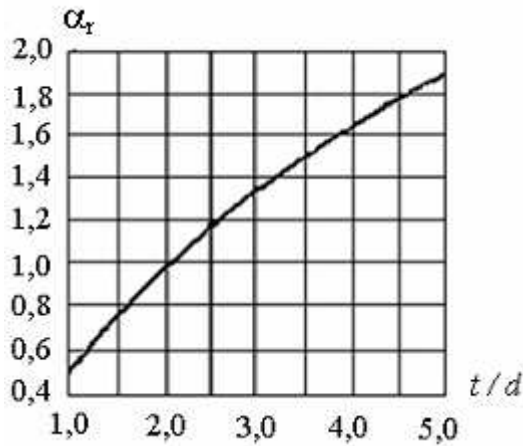


Рис. 9. Значение α_r для ленточного зигзагообразного нагревателя

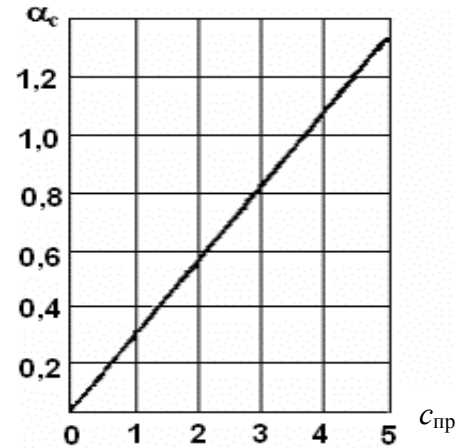


Рис. 10. Зависимость α_c от $c_{пр}$

Коэффициент α_c учитывает зависимость удельной поверхностной мощности от приведенного коэффициента излучения $c_{пр}$. Зависимость α_c от $c_{пр}$ показана на рис. 10.

Коэффициент α_p учитывает влияние размеров загрузки на величину

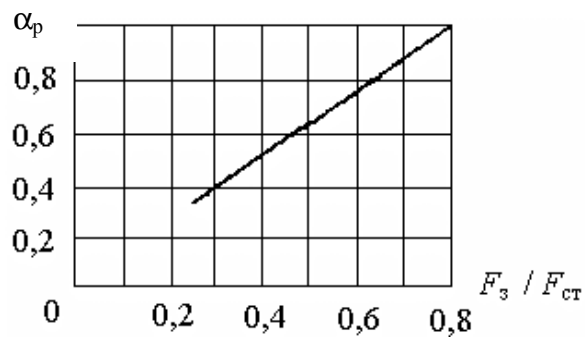


Рис. 11. Зависимость α_p от $F_3 / F_{ст}$

удельной поверхностной мощности. Значение этого коэффициента определяют как функцию отношения $F_3 / F_{ст}$ (рис. 11).

Когда $F_3 / F_{ст}$ больше 0,8, поправку, учитывающую размер загрузки, не вносят. При $F_3 / F_{ст}$ меньше 0,3 определение удельной поверхностной мощности приводит к завышению температуры нагревателя. В этом случае принимают $T_3 = T_n$ и поправку на α_p и α_c не берут.

6. Принимают схему электрического соединения нагревателей и находят величину фазового напряжения: при схеме соединения «треугольник» $U_\phi = U_c$, а при схеме соединения «звезда» $U_\phi = U_c / \sqrt{3}$.

7. Зная величины N , U_ϕ , p и ω , рассчитывают геометрические размеры нагревателей по соответствующим формулам (для

металлических нагревателей) или находят необходимое количество неметаллических стержневых нагревателей (из SiC или MoSi₂). Расчеты нагревателей этих трех групп несколько отличаются и рассмотрены отдельно.

1.3.6.1. Расчет металлических нагревателей. Определив по формуле (61) рабочую температуру нагревателей, выбирают с учетом данных табл. 7 сплав, соответствующий требуемым условиям. Определяют по графикам на рис. 68 [1] или рассчитывают по формуле (62) допустимую удельную поверхностную мощность идеального нагревателя в зависимости от степени черноты поверхности материала и конечной температуры нагреваемого изделия.

В современных электропечах сопротивления обычно используют следующие типы нагревательных элементов: проволочные зигзагообразные, проволочные спиральные и ленточные зигзагообразные.

Тип нагревателя ориентировочно выбирают по табл. 17, причем большие значения относительной мощности стен $N_{ст.отн}$ соответствуют меньшим значениям степени черноты материала (табл. 18):

$$N_{ст.отн} = \frac{N}{F_{ст} \omega_{ид}}, \quad (64)$$

где N – мощность нагревателя, приходящаяся на данную стенку, кВт; $F_{ст}$ – площадь поверхности стены (свода или пода), на которой расположены нагреватели, м².

Таблица 17

Значения коэффициента $\alpha_{эф}$ при нагреве материалов с различной степенью черноты поверхности [1]

Тип нагревателя	Степень черноты ϵ				
	0,8 (сталь окислен- ная)	0,7 (медь окислен- ная)	0,6 (латунь)	0,45 (сталь не окислен- ная)	0,3 (алю- миний)
Ленточный зигзагообразный	0,46	0,47	0,48	0,51	0,54
Плоский ленточный зигзагообразный	0,75	0,76	0,77	0,79	0,81
Проволочные спирали открытые и на трубках	0,465	0,47	0,475	0,49	0,505
Ленточный зигзаг в пазу	0,44	0,45	0,46	0,495	0,535

Проволочная спираль в пазу	0,31	0,315	0,325	0,34	0,355
Ленточный зигзаг на керамической полочке	0,41	0,425	0,435	0,47	0,50
Проволочная спираль на керамической полочке	0,33	0,40	0,41	0,44	0,47

Таблица 18

Относительная мощность стен для нагревателей различного вида

Нагреватель	$N_{ст.отн}$
Ленточный зигзагообразный	0,90–0,95
Плоский ленточный зигзагообразный	0,95–1,00
Проволочный спиральный	0,90–0,95
Ленточный зигзаг в пазу	0,70–0,75
Проволочная спираль в пазу	0,75–0,80
Ленточный зигзаг на полке	0,60–0,65
Проволочная спираль на полке	0,65–0,70
Проволочная спираль на трубке	0,95–1,00

Если полученному значению относительной мощности стен соответствуют несколько типов нагревателей, то нужно выбирать проволочный зигзагообразный нагреватель. В зависимости от выбранного типа нагревателя и условий нагрева с использованием рис. 7–11 и табл. 16 находят коэффициенты α , позволяющие по формуле (63) определить удельную поверхностную мощность ω нагревателя выбранного типа. Теперь, зная мощность печи или зоны N , кВт, напряжение питающей сети U , В, удельное сопротивление выбранного нагревателя ρ , Ом·м, геометрические размеры нагревателя находят по следующим соотношениям:

– *проволочный нагреватель*:
диаметр d , м:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^3 \rho N^2}{\pi^2 U_{\phi}^2 \omega}}; \quad (65)$$

длина l , м:

$$l = 0,1 \sqrt[3]{\frac{2,5 N U_{\phi}}{\pi \rho \omega^2}}; \quad (66)$$

– *ленточный нагреватель* с соотношением сторон $b / a = m$:
толщина a , м:

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^3 \rho N^2}{2m(m+1)U_{\phi}^2 \omega}}; \quad (67)$$

длина l , м:

$$l = 0,1 \sqrt[3]{\frac{2,5NU_{\phi}^2 m}{(m+1)^2 \rho \omega^2}}. \quad (68)$$

При использовании трехфазного тока мощность нагревателя N_{ϕ} составляет одну треть от общей мощности N . С помощью данных, приведенных в табл. 19–20, можно оценить возможность размещения нагревателя в заданной нагревательной камере печи.

Выбор оптимального варианта соединения нагревателей или его оптимальной геометрии, а также ориентировочный, ускоренный расчет нагревателей любого сечения может быть проведен по номограмме, представленной в приложении XIV [1]. Она связывает мощность, выделяемую нагревателем, напряжение, сечение, длину и удельную поверхностную мощность.

По оси z отложено условное напряжение, под которым понимаем напряжение на нагревателе, изготовленном из материала с удельным электросопротивлением $\rho_{\text{усл}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, т. е.

$$U_{\text{усл}} = U_{\text{действ}} (\rho_{\text{усл}} / \rho_{\text{действ}})^{0,5}. \quad (69)$$

За условную удельную поверхностную мощность $\omega_{\text{усл}}$ принята удельная поверхностная мощность нагревателя круглого сечения, эквивалентного по площади сечения реальному нагревателю, т. е.

$$\omega_{\text{усл}} = \frac{\Pi}{3,54\sqrt{S}} \omega_{\text{действ}}, \quad (70)$$

где Π , S – соответственно периметр и площадь сечения реального нагревателя.

Для проволочных нагревателей $\Pi / (3,54\sqrt{S}) = 1$ и $\omega_{\text{усл}} = \omega_{\text{действ}}$. Для ленточных нагревателей $\Pi / (3,54\sqrt{S}) = 2(1+m)3,54\sqrt{m}$, а при $m = 10$ $\omega_{\text{усл}} = 1,97\omega_{\text{действ}}$.

После выбора оптимального варианта по формулам (66)–(68) производят уточненный расчет геометрии нагревателей и размещение последних в рабочем пространстве печи.

Таблица 19

Максимальные и оптимальные длины и поверхности ленточного нагревателя, размещаемые на 1 м² поверхности футеровки

Сечение, мм ²	$e/b = 2,0$	$e/b = 0,9$
--------------------------	-------------	-------------

	$l_{\text{опт}}, \text{ м}$	$F_{\text{опт}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{max}}, \text{ м}$	$F_{\text{max}}, \text{ м}^2$
2,0×10	38	0,915	84,0	2,02
1,5×15	25	0,825	55,5	1,83
2,0×15	25	0,860	55,5	1,89
2,2×20	19	0,845	42,0	1,87
2,5×20	19	0,855	42,0	1,89
3,0×20	19	0,875	42,0	1,93
2,2×25	15	0,815	33,5	1,82
2,5×25	15	0,825	33,5	1,85
3,0×25	15	0,840	33,5	1,88
2,2×30	12,5	0,805	25,0 *	1,61 **
2,5×30	12,5	0,813	25,0 *	1,62 **
3,0×30	12,5	0,825	25,0 *	1,68 **
2,2×36	10,5	0,802	19,0 **	1,45 **
2,5×36	10,5	0,808	19,0 **	1,46 **
3,0×36	10,5	0,820	19,0 **	1,48 **
2,2×40	9,5	0,802	21,0	1,77
2,5×40	9,5	0,807	21,0	1,78
3,0×40	9,5	0,818	21,0	1,80

* $e / b = 1,0$.

** $e / b = 1,1$.

Таблица 20

**Максимальные и оптимальные длины и поверхности
проволочного нагревателя, размещаемые на 1 м² футеровки**

Диаметр, мм	Зигзагообразный нагреватель								Спиральный нагреватель			
	на ребристых плитках, при шаге ребер, мм				на крючках при e / d , равном				на полочках при t / d , равном			
	12,5		17		2,75		3,5		2		4	
	$l_{\text{max}}, \text{ м}$	$F_{\text{max}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{опт}}, \text{ м}$	$F_{\text{опт}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{max}}, \text{ м}$	$F_{\text{max}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{опт}}, \text{ м}$	$F_{\text{опт}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{max}}, \text{ м}$	$F_{\text{max}}, \text{ м}^2$	$l_{\text{опт}}, \text{ м}$	$F_{\text{опт}}, \text{ м}^2$
4	70	0,88	50	0,625	–	–	–	–	200	2,46	100	1,23
4,5	70	0,99	50	0,703	–	–	–	–	180	2,46	90	1,23
5	70	1,10	50	0,780	–	–	–	–	160	2,46	85	1,23
5,6	–	–	50	0,875	–	–	–	–	140	2,46	70	1,23
6,3	–	–	50	0,985	–	–	38	0,745	125	2,46	62,5	1,23
7	–	–	–	–	43	0,950	34	0,745	115	2,46	57,5	1,23
8	–	–	–	–	38	0,950	30	0,745	100	2,46	50,0	1,23
9	–	–	–	–	34	0,950	27	0,745	–	–	–	–
10	–	–	–	–	30	0,950	24	0,745	–	–	–	–
11	–	–	–	–	27	0,950	21	0,745	–	–	–	–
12	–	–	–	–	25	0,950	20	0,745	–	–	–	–
13	–	–	–	–	23	0,950	18	0,745	–	–	–	–

14	–	–	–	–	21	0,950	17	0,745	–	–	–	–
15	–	–	–	–	20	0,950	16	0,745	–	–	–	–
16	–	–	–	–	19	0,950	15	0,745	–	–	–	–
17	–	–	–	–	18	0,950	14	0,745	–	–	–	–
18	–	–	–	–	17	0,950	13,5	0,745	–	–	–	–
19	–	–	–	–	16	0,950	12,5	0,745	–	–	–	–
20	–	–	–	–	15	0,950	12	0,745	–	–	–	–

Для этого можно воспользоваться практически установленными рациональными соотношениями (рис. 6 и табл. 11–13):

– ленточные нагреватели: $e / b \geq 0,9$, оптимальное значение $(e / b)_{\text{опт}} = 1,4–2,6$; высота зигзага при расположении нагревателя на стене $H = 150–600$ мм, на своде и поду – не более 250 мм;

– проволочные зигзагообразные нагреватели: $t / d \geq 2,0$, оптимальное значение $(t / d)_{\text{опт}} = 3,2–4,8$.

– проволочные спиральные нагреватели: $t / d \geq 2,0$, оптимальное значение $(t / d)_{\text{опт}} = 2,5–4,5$; $D = (6–8)d$ для нихрома и $D = (4–6)d$ для железохромалюминиевых сплавов.

1.3.6.2. Расчет карборундовых нагревателей. Карборундовые (SiC) нагреватели применяют в тех случаях, когда необходимо иметь температуру нагревателя 1250–1450°C.

Для расчета нагревателей необходимы следующие исходные данные: установленная мощность, которая определяется тепловым расчетом печи; максимальная температура нагрева изделий; длина зоны, в которой устанавливаются нагреватели, а также сечение канала печи.

Наиболее распространенными типами карборундовых нагревателей являются цельные (тип КИМ) и составные (тип КНС) нагреватели. Основные сведения о карборундовых нагревателях приведены в табл. 21.

Таблица 21

Характеристики карборундовых нагревателей

Назначение нагревателя	Тип нагревателя	Размеры				Площадь поверхности рабочей части,	Полное сопротивление в нагретом состоянии, Ом
		Длина рабочей	Общая длина, м	Диаметр рабочей части, мм	Диаметр выводов, мм		
ы шл ен	КНС-25/406	0,30	0,406	25	–	236	0,77–1,75
	КНС-25/440	0,30	1,12	25	25	236	1,1–1,55

	КНС-25/540	0,40	1,22	25	25	314	1,2–1,80
	КНС-32/711	0,56	0,711	32	–	564	1,1–2,80
	КНМВ-25/640	0,40	0,64	25	14	314	1,1–2,0
Лабораторные	КНМ-8×100×270	0,10	0,27	8	14	25,1	1,0–2,0
	КНМ-8×150×270	0,15	0,27	8	14	37,8	1,5–3,0
	КНМ-8×150×320	0,15	0,32	8	14	37,8	1,5–3,0
	КНМ-8×150×450	0,15	0,42	8	14	37,8	1,5–3,0
	КНМ-8×180×300	0,18	0,30	8	14	45,2	1,8–3,6
	КНМ-8×180×350	0,18	0,35	8	14	45,2	1,8–3,6
	КНМ-8×180×400	0,18	0,40	8	14	45,2	1,8–3,6
	КНМ-8×180×480	0,18	0,48	8	14	45,2	1,8–3,6
	КНМ-8×200×500	0,20	0,50	8	14	50,2	2,0–4,0
	КНМ-8×250×450	0,25	0,45	8	14	62,8	2,5–5,0
	КНМ-12×250×750	0,25	0,75	12	18	94,2	1,5–3,0
	КНМ-14×300×250	0,30	0,80	14	23	132,0	1,75–3,5
	КНЛ-12/280	0,2	0,28	12	–	75,4	4,4–9,0
	КНЛ-12/320	0,23	0,32	12	–	86,5	4,5–9,0
	КНЛ-16/320	0,23	0,32	16	–	115,0	4,5–9,0
ТН-55/40×200×75	0,2	0,35	55/40	55	327,0	1,0–2,6	

Примечание. Обозначение нагревателей: КНС-25/540 – карборундовый нагреватель составной, диаметр рабочей части 25 мм, длина рабочей части и металлизированных концов 540 мм; КНМ-8×180×400 – карборундовый нагреватель из мелкозернистых масс, 8 – диаметр рабочей части; 180 – длина рабочей части, 400 – общая длина; КНМВ-25/640 – карборундовый нагреватель с приварными выводными концами, 25 – диаметр рабочей части; 640 – общая длина; КНЛ-16/320 – карборундовый нагреватель, 16 – диаметр рабочей части, 320 – общая длина.

В печи нагреватели можно располагать как вертикально, так и горизонтально.

Особенностью расчета карборундовых нагревателей является необходимость определения ступеней напряжения питающего трансформатора таким образом, чтобы при переключении ступеней напряжения в процессе «старения» нагревателя мощность печи не была больше допустимого и меньше заданного значения.

Последовательность расчета нагревателей из SiC аналогична расчету металлических нагревателей, и допустимую удельную поверхностную мощность определяют с использованием графиков на рис. 68 [1] и с

60

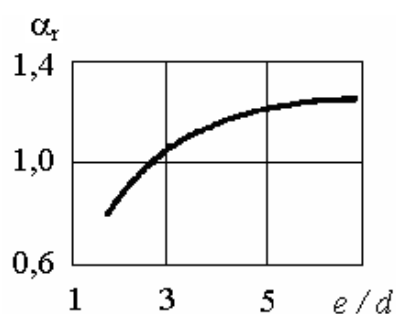


Рис. 12. Коэффициенты α_r для карборундовых нагревателей

помощью рис. 12 вычисляют ω :

$$\omega = \omega_{\text{ид}} \alpha_{\text{Г}}, \quad (71)$$

причем e/d задают.

Существует и другая методика для расчета удельной поверхностной мощности нагревателя.

Первоначально, исходя из условий излучения, определяют необходимую температуру на поверхности нагревателей $t_{\text{нагр}}$, °С, по формуле

$$t_{\text{нагр}} = 100 \sqrt[4]{\frac{860 N_{\text{уд}}}{3,8m} + \left(\frac{t_{\text{изд}} + 273}{100}\right)^4} - 273, \quad (72)$$

где $t_{\text{нагр}}$ – необходимая температура нагрева изделий, °С; $N_{\text{уд}}$ – мощность, отнесенная к 1 м² внутренней поверхности футеровки, на которой размещены нагреватели; m – коэффициент, который учитывает условия работы нагревателей, $m = 0,6-0,8$.

При условиях, что температура всех нагревателей одинаковая, величину $N_{\text{уд}}$, кВт/м², определяют по формуле

$$N_{\text{уд}} = N_n / (F_{\text{ст}} + F_{\text{св}} + F_{\text{под}} K_5), \quad (73)$$

где N_n – установленная мощность, кВт; $F_{\text{ст}}$, $F_{\text{св}}$, $F_{\text{под}}$ – площади внутренней поверхности футеровки стен, свода и пода, на которых размещаются нагреватели, м²; K_5 – коэффициент, учитывающий условия работы подовых нагревателей в зависимости от материала пода (принимается равным 0,5–0,7).

Если при расчете выяснится, что температура на нагревателях $t_{\text{нагр}}$ отличается от температуры нагрева изделий всего на 10–20°С и находится значительно ниже допустимой, то для дальнейших расчетов принимают:

$$t_{\text{нагр}} = t_{\text{изд}} + (50-100). \quad (74)$$

При этом $t_{\text{нагр}}$ должна быть ниже допустимой, которая приведена в табл. 22.

Таблица 22

Допустимая рабочая температура поверхности нагревателей

Температура в печи, °С	Окислительная атмосфера		Атмосфера Н ₂ О, дистиллированного аммиака и газов, содержащих Н ₂ и СО	
	Регулирование			
	бесперывное	позиционное	бесперывное	позиционное

1100	1375	1300	1275	1225
1200	1440	1390	1330	1290
1300	1500	1465	1360	1350
1350	1500	1495	1360	1360

Затем определяют допустимую удельную поверхностную мощность нагревателей $\omega_{ид}$, Вт/см², это значит мощность, снимаемую с единицы поверхности:

$$\omega_{ид} = 3,8 \left[\left(\frac{T_{нагр}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{изд}}{100} \right)^4 \right] / 860, \quad (75)$$

где 3,8 – приведенный коэффициент излучения, Вт/(см²·К⁻¹), при степени черноты нагревателя и изделий с учетом углового коэффициента составляет 0,8; $T_{нагр}$ – температура нагревателей, К.

Полученные данные должны быть близкими к допустимым, приведенным в табл. 23.

Расчетную удельную поверхностную мощность ω_p , Вт/см², определяют по формуле

$$\omega_p = \omega_{ид} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5, \quad (76)$$

где K_1 – коэффициент эффективности излучения (принимается для карбидкремниевых нагревателей 0,68); K_2 – коэффициент шага и размеров (определяется отношением S / d , где S – расстояние между осями нагревателей; d – диаметр рабочей части. Для предварительных расчетов (при отсутствии данных S и d) принимается равным 1,25–1,3); K_3 – коэффициент, учитывающий отношение площади двух поверхностей: той, которая отдает тепло, к той, которая его воспринимает (в печах канального типа значения K_3 близки к 1); K_4 – коэффициент, который учитывает реальный приведенный коэффициент излучения $C_{излуч}$, Вт/(м²·К⁴):

$$K_4 = C_{излуч} / 3,8. \quad (77)$$

Таблица 23

Допустимая удельная поверхностная мощность на нагревателях

Температура в печи, °С	Поверхностная мощность, Вт/см ²
1150	19,0
1200	17,0
1250	14,5
1300	11,5
1350	7,5

1385	5,0
1400	3,6

Приведенный коэффициент излучения рассчитывается по формуле

$$C_{\text{излуч}} = 75 / [1 / \epsilon_{\text{излуч}} + F_{\text{излуч}} / F (1 / \epsilon_{\text{нагр}} - 1)]. \quad (78)$$

Степень черноты поверхности нагревателей $\epsilon_{\text{нагр}}$ для окислительной среды близка к 0,8; степень черноты изделий принимается в зависимости от материала и характера поверхности изделий. Для изделий технической и художественной керамики значения $\epsilon_{\text{нагр}}$ близки к 0,7–0,8. Для зоны обжига туннельных печей при непрерывном регулировании величину K_4 принимают равной 1. K_5 выбирают в зависимости от материала плит свода. Она составляет для карбидокремниевых плит 0,6–0,7, для шамотных плит 0,5–0,6, для корундовых плит 0,6.

Расчетная поверхностная мощность ω_p не должна превышать допустимую, которая указана в табл. 23.

Мощность одного нагревателя N , кВт, находят по формуле

$$N = \omega f_{\text{раб}}, \quad (79)$$

где $f_{\text{раб}}$ – площадь наружной поверхности рабочей части нагревателя, м² (определяют по табл. 20).

Небольшой мощностью, выделяемой в токоподводах, обычно пренебрегают.

Падение напряжения на одном нагревателе U , В, равно

$$U = \sqrt{10^3 NR}, \quad (80)$$

где R – сопротивление нагревателя, Ом.

Поскольку исходное сопротивление нагревателей колеблется в широких пределах, а также сильно меняется в процессе эксплуатации, необходимо определить верхний и нижний предел изменения напряжения U . Для определения нижнего предела в формулу (80) подставляют меньшее значение сопротивления, приведенного в табл. 21. Верхний предел напряжения определяют по наивысшему значению сопротивления и увеличивают полученное значение в 2,5–3,0 раза для учета «старения» нагревателя, возможного падения напряжения питающей сети и выделения мощности в выводах нагревателей.

Зная заданную мощность печи и мощность одного нагревателя, можно найти общее число нагревателей. Затем, выбирая схему

включения нагревателей (параллельно или последовательно) и ориентируясь на напряжения, необходимые для питания одного нагревателя, определяют значение верхней и нижней ступеней трансформатора. После этого устанавливают необходимые промежуточные ступени напряжения трансформатора.

1.3.6.3. Расчет нагревателей из дисилицида молибдена.

Металлокерамические нагреватели из MoSi_2 целесообразно применять в тех случаях, когда требуется нагрев изделия до температур 1350–1550°C. Температуры нагревателя при этом достигают значений 1450–1680°C.

Электрическое сопротивление нагревателей из ДМ при комнатной температуре низко, но оно резко возрастает с повышением температуры. Вследствие этого электропечи с нагревателями из ДМ всегда снабжены понизительными трансформаторами с набором промежуточных ступеней напряжения. Наиболее распространенная форма нагревателей из ДМ U-образная. Основные характеристики этих нагревателей приведены в табл. 24.

Расчет нагревателей из ДМ аналогичен расчету карборундовых нагревателей. Величина коэффициента α в формуле (71) имеет постоянное значение, поскольку при стандартной форме нагревателя коэффициент $\alpha_T = 1,27$ и $\alpha = \alpha_{эф} \alpha_T = 0,68 \cdot 1,27 = 0,87$.

Мощность рабочей части нагревателя из ДМ $N_{раб}$ находят по формуле (79), причем значение $f_{раб}$ берут из табл. 24.

Таблица 24

Допустимые мощности N , удельные поверхностные мощности ω и напряжения U различных типоразмеров нагревателей из ДМ

Тип нагревателя	Развернутая длина рабочей части, м	Поверхность рабочей части, $\cdot 10^{-4} \text{ м}^2$	Сопротивление двух выводов при 700°C $2R_{выв}, \text{ Ом}$	Температура, °C					
				1400		1500		1600	
				$N, \text{ кВт}$	$U, \text{ В}$	$N, \text{ кВт}$	$U, \text{ В}$	$N, \text{ кВт}$	$U, \text{ В}$
ДМ-180/250	0,39	72,4	0,0068	1,26	8,5	1,06	7,95	0,606	6,00
ДМ-180/400			0,0108	1,35	9,1	1,135	8,5	0,650	6,45
ДМ-250/250	0,53	99,4	0,0068	1,67	11,2	1,41	10,5	0,805	8,00
ДМ-250/400			0,0108	1,76	11,8	1,49	11,1	0,89	8,60
ДМ-315/250	0,66	124,2	0,0068	2,05	13,7	1,74	12,9	0,99	9,80

ДМ-315/400			0,0108	2,14	14,3	1,81	13,4	1,03	10,4
ДМ-315/500			0,0135	2,20	14,7	1,86	13,8	1,06	10,5
ДМ-400/250	0,83	156,0	0,0068	2,54	17,0	2,16	16,0	1,23	12,1
ЦМ-400/400			0,0108	2,64	17,6	2,23	16,6	1,27	12,5
ДМ-400/500			0,0135	2,70	18,0	2,28	16,9	1,30	12,8
ДМ-500/250	1,03	194,0	0,0068	3,13	20,9	2,64	19,6	1,51	15,0
ДМ-500/400			0,0108	3,22	21,5	2,72	20,2	1,55	15,3
ДМ-500/500			0,0135	3,29	22,0	2,77	20,5	1,58	16,6
ДМ-630/250	1,29	243,0	0,0068	3,87	26,0	3,28	24,4	1,88	18,5
ДМ-630-400			0,0108	3,96	26,5	3,35	24,8	1,93	19,0
ЦМ-630/500			0,0135	4,01	27,0	3,40	25,2	1,95	19,2
ЦМ-800/700	1,63	307,0	0,0200	5,15	34,5	4,36	33,2	2,48	24,5
ω , кВт/м ²				153		130		74	

Примечание. ДМ-315/250 означает: длина рабочей части 315 мм, длина вывода 250 мм.

Полную мощность нагревателя N , кВт, с учетом мощности, выделяемой в выводах, находим по формуле

$$N = N_{\text{раб}} \left(1 + \frac{2R_{\text{выв}}}{R_{\text{раб}}} \right), \quad (81)$$

где $R_{\text{выв}}$ – сопротивление одного вывода нагревателя при температуре t , Ом; $R_{\text{раб}}$ – сопротивление рабочей части при температуре t , Ом.

$\rho, \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

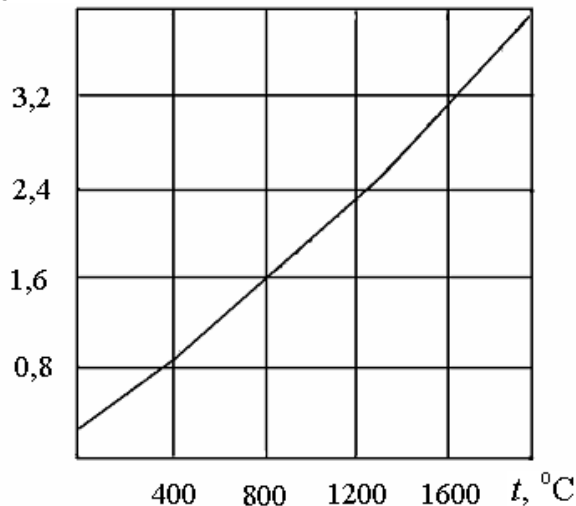


Рис. 13. Зависимость удельного электрического сопротивления рабочей части нагревателя из дисилицида молибдена от температуры

Для стандартной формы нагревателя из ДМ с $d_{\text{раб}} = 6 \text{ мм}$, $d_{\text{выв}} = 12 \text{ мм}$, средней по длине температуре выводов 700°C мощность равна

$$N = N_{\text{раб}} \left(1 + \frac{0,75 \cdot 10^{-6} l_{\text{выв}}}{\rho_{\text{раб}} l_{\text{раб}}} \right), \quad (82)$$

где $l_{\text{выв}}$ и $l_{\text{раб}}$ – соответственно длина одного вывода и развернутая длина рабочей части

нагревателя, м; $\rho_{\text{раб}}$ – удельное электрическое сопротивление рабочей части нагревателя при температуре t , Ом·м (рис. 13).

Полное сопротивление нагревателя R , Ом, вычисляют по формуле

$$R = 3,54 \cdot 10^4 (\rho_{\text{раб}} l_{\text{раб}} + 0,75 l_{\text{выв}}). \quad (83)$$

При включении холодной печи пусковое напряжение в течение 2–10 мин должно постепенно увеличиваться до величины, составляющей 30–35% рабочего напряжения. В момент пуска мощность печи будет превышать величину N .

1.3.7. Расчет вакуумной системы

Исходными данными для расчета являются:

- остаточное давление в системе;
- время достижения необходимого вакуума;
- размеры камеры или площадь, обращенная в вакуумную полость;
- материалы обрабатываемых изделий и конструкций камеры, а также их характеристики.

Расчет включает следующие этапы.

1. Выбор схемы вакуумной системы исходя из требуемого уровня вакуума данного процесса с определением количества ступеней откачки. Выбранная схема представляется графически на листе формата А4.

2. Расчет газовых потоков.

3. Выбор типа используемых насосов (начиная с высоковакуумного) с учетом требуемого уровня вакуума, времени его достижения и суммарного потока натекания. Здесь же проводится оценка совместимости работы выбранных насосов путем построения рабочих характеристик насосов по номинальным скоростям откачки и анализа характера перекрывания этих характеристик.

4. Расчет проводимости трубопроводов с учетом определенного режима течения газов, определение конструктивных размеров трубопроводов.

5. Подбор и расчет других необходимых элементов вакуумной системы, таких как ловушки, вентили, форвакуумный баллон и др.

6. Расчет распределения давления по длине участков вакуумной системы.

7. Составление сводной таблицы, характеризующей данную вакуумную систему с указанием названия (и при наличии марки)

подобранных элементов, их обозначения на схеме и основных характеристик.

1.4. Графическая часть проекта

В графической части курсового проекта (работы) необходимо выполнить чертеж основного аппарата или модуля, включающего несколько типов аппаратов, и 3–5 разрезов или отдельных узлов общим объемом 2 листа формата А4.

На чертеже располагают общий вид аппарата в разрезе, таблицу штуцеров, техническую характеристику аппарата, технические требования. На этом же листе могут быть размещены некоторые узлы и виды аппарата.

Техническая характеристика включает следующие данные:

- 1) наименование и назначение аппарата;
- 2) наименование рабочей среды;
- 3) значение рабочего давления P , МПа; питающее напряжение U , В;
- 4) мощность N , кВт;
- 5) значение расчетного давления P , МПа;
- 6) значение максимальной рабочей температуры;
- 7) пожаро- и взрывоопасность среды и ее коррозионная активность;
- 8) марки материалов основных элементов аппарата;
- 9) прибавки на коррозию и эрозию, мм;
- 10) коэффициенты прочности сварных соединений;
- 11) характеристика аппарата: объем V , м³; поверхность S , м²; мощность привода N , кВт; скорость вращения, рад/с; масса пустого аппарата M , кг; максимальная масса аппарата в рабочих условиях и при гидроиспытаниях M , кг.

Технические требования должны содержать следующие данные:

- 1) условные обозначения согласно ГОСТ, ОСТ, ТУ или в соответствии с чертежом;
- 2) условия сварки (в сложных аппаратах дается таблица сварных швов, нормы оценки качества сварных соединений);
- 3) условия проверки и испытания (наливом, гидравлические испытания, пневматические и т. д.); температура и среда испытания;
- 4) условия поставки и монтажа;
- 5) футеровка;

б) изоляция или покраска.

На втором листе помещают наиболее важные и сложные узлы. Детали выполняют на отдельных чертежах нужного формата. Каждый чертеж должен иметь основную надпись.

На проектируемый аппарат составляют спецификацию, которую выполняют на листах формата А4 и подшивают в расчетно-пояснительную записку как приложение.

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ)

При выполнении и оформлении дипломных проектов (работ) следует руководствоваться СТП 001-2002, а также методическими указаниями, приведенными в данном издании для курсовых работ и проектов (раздел 1).

Следует четко понимать, что дипломный проект (работа) является основной и *единой* квалификационной работой, которую студенты выполняют на заключительном этапе обучения. Все отдельные части проектов (работ) должны быть логично связаны между собой. Они призваны максимально обосновать и проиллюстрировать инженерные решения, принятые дипломником при выполнении задания. Дипломный проект (работа) представляет расчетно-исследовательский материал в виде законченного многосторонне продуманного труда.

В соответствии с СТП 001-2002 диплом может быть выполнен в виде работы одного из трех видов:

- дипломный проект;
- дипломный проект с исследовательской частью;
- дипломная работа.

Содержание основной части пояснительной записки (табл. 25) и графического материала для трех указанных вариантов отличается, что должно быть отражено в дипломном проекте (работе). Из 8 обязательных листов графического материала 3 листа аналогичны для всех проектов (аппаратурно-технологическая схема, таблица технико-экономических показателей). Остальные листы графического материала должны содержать информацию и чертежи, непосредственно связанные с принятыми инженерными решениями и проведенными инженерно-технологическими расчетами. В приложении приведены примеры оформления технологической схемы, спецификации оборудования и потоков на них.

В случае выполнения *дипломного проекта* инженерные решения могут быть приняты на основании литературно-патентного поиска и должны быть обоснованы инженерно-технологическими расчетами. Графический материал кроме указанных трех листов включает чертежи основного и вспомогательного оборудования. Возможно дополнение графического материала иллюстрациями, отражающими важные характеристики получаемых изделий и материалов, или научно-техническое обоснование принятых инженерных решений, или этапы формирования структуры изделия (эволюция структуры для полупроводниковых приборов и схем), или физико-химические

процессы, составляющие основы разработанной технологии, или другие сведения по дипломному проекту. Следует иметь в виду, что количество чертежей оборудования при любых вариантах дополнительных иллюстраций должно составлять не менее 3–4 листов формата А1.

При выполнении *дипломного проекта с исследовательской частью* кроме литературных сведений приводят результаты экспериментов, которые подтверждают целесообразность предлагаемых инженерных решений. Графическая часть содержит результаты проведенных экспериментов, а также 1–3 листа чертежей оборудования.

При выполнении *дипломной работы* на основании проведенных исследований принимаются инженерные решения по разработке технологического маршрута изготовления материала или изделия, наиболее перспективного по результатам реализованных экспериментов. Графический материал обычно включает 9–12 листов и представляет таблицы, графики, диаграммы, интерпретационные модели экспериментальных данных. Возможно дополнение графического материала 1–2 листами чертежей оборудования.

Таблица 25

Структура основной части дипломных проектов (работ)

Дипломный проект	Дипломный проект с исследовательской частью	Дипломная работа
1. Обоснование необходимости модернизации базовой технологии или реконструкции базового производства	1. Обоснование необходимости модернизации базовой технологии или реконструкции базового производства	1. Обоснование целей и содержания научных исследований
2. Технологический раздел (литературно-патентная проработка заданной темы с изложением физико-химических основ процесса, инженерные решения, инженерно-технологические расчеты, выбор и расчет основного и вспомогательного	2. Технологический раздел (литературно-патентная проработка, исследовательский подраздел, включающий методику исследований, результаты и выводы по ним в связи с темой дипломного проекта, инженерные решения, инженерно-технологические расчеты,	2. Литературный обзор (анализ литературных и патентных сведений по поставленной научной задаче)

оборудования, описание технологической схемы)	выбор и расчет основного оборудования, описание технологической схемы)	
3. Автоматизация производства	3. Автоматизация производства	3. Методика исследований (отдельные подразделы для каждого метода исследований)
4. Контроль качества и метрологическое обеспечение производства	4. Контроль качества и метрологическое обеспечение производства	4. Экспериментальный раздел (отдельные подразделы для каждой группы экспериментов, например: по исследованию структуры материала, его механических, электрофизических, химических свойств и др.)
5. Мероприятия по охране окружающей среды	5. Мероприятия по охране окружающей среды	5. Статистическая обработка экспериментальных результатов и/или автоматизация исследований
6. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности	6. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности	6. Технологический раздел (инженерные решения, инженерно-технологические расчеты, подбор основного оборудования, описание технологической схемы)
7. Экономический раздел	7. Экономический раздел	7. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности
–	–	8. Экономический раздел

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Обозначения технологических потоков на технологических схемах

Условное обозначение		Наименование технологического потока
буквенное	графическое	
–	–1–1–	Кислород
–	–2–2–	Аргон
–	–3–3–	Хромовая смесь
–	–4–4–	Деионизованная вода
–	–5–5–	Воздух
–	–6–6–	Щавелевая кислота
–	–7–7–	Слив воды
–	–8–8–	0,5%-ный гидроксид натрия
–	–9–9–	Перекисно-аммиачный раствор
–	–10–10–	Соляная кислота
–	–11–11–	10%-ный гидроксид натрия
–	–12–12–	Фоторезист
–	–13–13–	Ориентирующее покрытие
–	–14–14–	Спейсеры
–	–15–15–	Герметик
–	–16–16–	ЖК-материал
–	–17–17–	УФ-чувствительный клей
–	–18–18–	Раствор моноэтаноламина
–	–19–19–	Откачиваемый воздух

Таблица 2

Примеры обозначения оборудования на технологических схемах

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
1	Установка для скрайбирования	1	
2–5, 10–13, 18–19, 23–26, 29–32, 35–38, 50–51	Ванны	24	
6, 14, 20, 27, 33, 39	Центрифуга для сушки	6	
7	Установка магнетронного распыления	1	
8, 22, 34, 46	Микроскоп	4	
9, 55	Прибор контроля электрических параметров	2	
15, 40	Центрифуга	2	
16, 41, 45, 52, 21	Сушильный шкаф	5	
17	Установка контактного размножения	1	
28	Установка для снятия фасок	1	
42	Установка для натирания	1	
43	Установка для нанесения стекловолокна	1	
44	Установка для нанесения краевого герметика	1	
47	Установка для вакуумного заполнения	1	
48	Установка для герметизации	1	
49	Установка для УФ-сушки	1	
53	Световые испытания	1	
54	Установка для приклейки выводов	1	
56	Установка для приклейки поляроидной пленки	1	
57	Установка для маркировки	1	
58	Стол для упаковки	1	
H1, H2	Вакуумный насос	2	

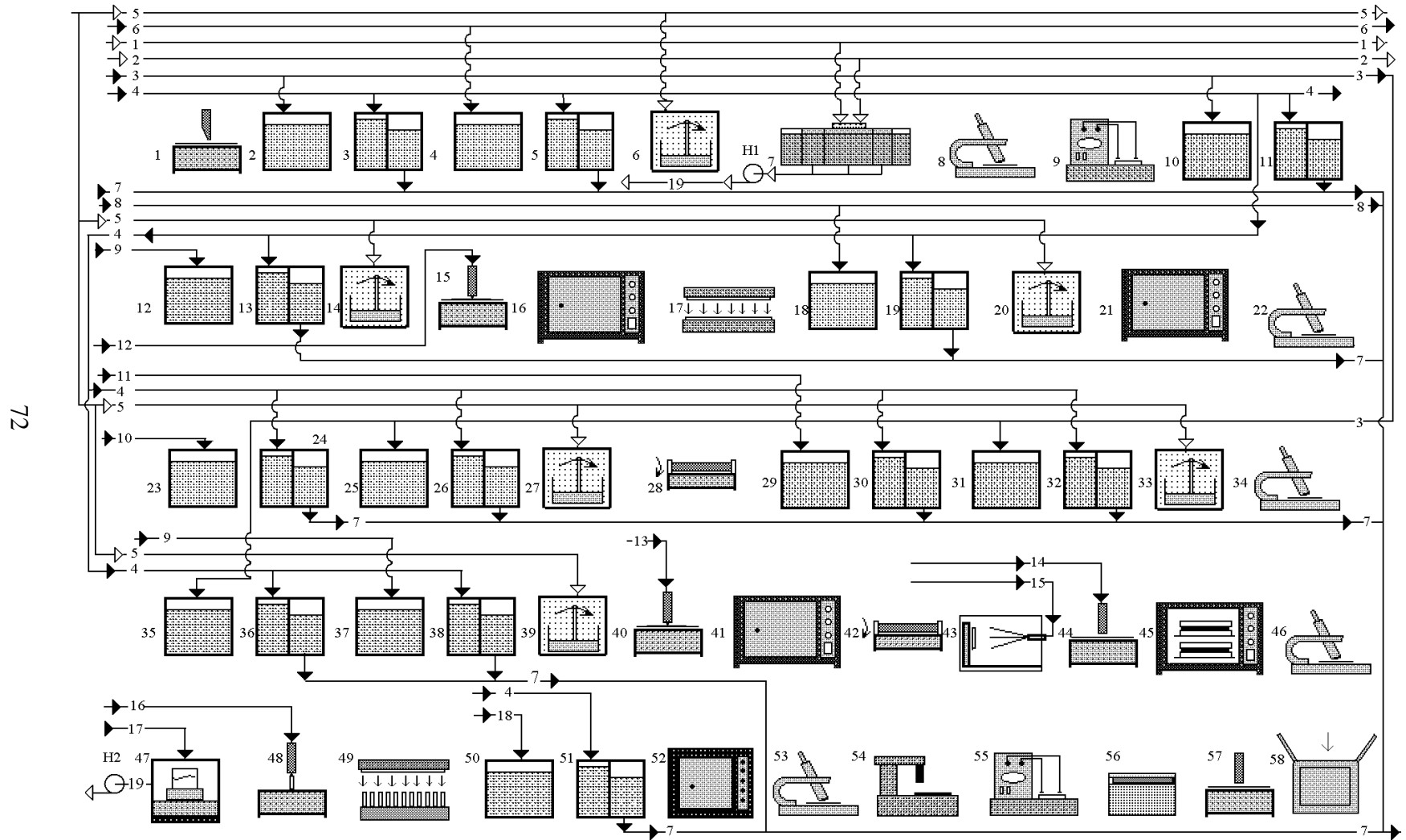


Рисунок. Аппаратурно-технологическая схема производства жидкокристаллических индикаторов

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: учеб.: в 2 т. / под ред. В. А. Кривандина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Т. 2: Мاستрюков, Б. С. Расчеты металлургических печей / Б. С. Мастрюков. – М.: Металлургия, 1986. – 376 с.
2. Розанов, Л. Н. Вакуумная техника: учеб. / Л. Н. Розанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.
3. Смоляг, Н. Л. Технология электрохимических производств: учеб.-метод. пособие / Н. Л. Смоляг. – Минск: БГТУ, 2007. – 98 с.
4. Технология полупроводников: метод. указания для студентов специализации 1-48 01 01 13 «Химическая технология материалов квантовой и твердотельной электроники» / сост. Н. В. Богомазова, И. М. Жарский. – Минск: БГТУ, 2007. – 46 с.
5. Мурашкевич, А. Н. Оборудование производств материалов и изделий электронной техники: учеб. пособие / А. Н. Мурашкевич, И. М. Жарский. – Минск: БГТУ, 2005. – 242 с.
6. Калішук, Дз. Р. Тэхналагічныя працэсы і апараты галіны: метадычныя ўказанні / Дз. Р. Калішук, М. П. Саевіч; пад агул. рэд. Дз. Р. Калішука. – Мінск: БДТУ, 2001. – 51 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий: в XI ч. – Ч. II. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – 916 с.
8. Пичугин, И. Г. Технология полупроводниковых приборов: учеб. пособие / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М.: Высшая школа, 1984. – 288 с.
9. Готра, З. Ю. Технология микрoeлектронных устройств: справ. / З. Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
10. Киреев, В. Ю. Технология микрoeлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы / В. Ю. Киреев, А. А. Столяров. – М.: Техносфера, 2006. – 192 с.
11. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учеб. / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
12. Технология СБИС: в 2 кн. / под ред. Зи С. – М.: Мир, 1986.
13. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – 368 с.
14. Горлов, М. И. Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий / М. И.

Горлов,

В. А. Емельянов, Д. Л. Ануфриев. – Минск: Бел. наука, 2006. – 367 с.

15. Турцевич, А. С. Пленки поликристаллического кремния в технологии производства интегральных схем и полупроводниковых приборов / А. С. Турцевич, Л. П. Ануфриев. – Минск: Бел. наука, 2006. – 232 с.

16. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю. А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 446 с.

17. Химическая обработка в технологии ИМС / В. П. Василевич [и др.]. – Полоцк: ПГУ, 2001. – 260 с.

18. Поляков, А. А. Технология керамических радиоэлектронных материалов / А. А. Поляков. – М.: Радио и связь, 1989. – 200 с.

19. Окадзаки, К. Технология керамических диэлектриков / К. Окадзаки. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.

20. Рез, И. С. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике / И. С. Рез, Ю. М. Поплавко. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.

21. Технология производства материалов магнитоэлектроники / под ред. Л. М. Летюка. – М.: Металлургия, 1994. – 415 с.

22. Ротенберг, Б. А. Керамические конденсаторные диэлектрики / Б. А. Ротенберг. – СПб.: Гириконд, 2000. – 246 с.

23. Блистанов, А. А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики: учеб. пособие / А. А. Блистанов. – М.: МИСИС, 2000. – 432 с.

24. Поплавский, В. В. Техника высокого вакуума: учеб. пособие / В. В. Поплавский. – Минск: БГТУ, 2001. – 363 с.

25. Левицкий, И. А. Расчет тепловых процессов, установок и агрегатов керамического производства: учеб. пособие / И. А. Левицкий. – Минск: БГТУ, 2003. – 163 с.

26. Свенчанский, А. Д. Электрические промышленные печи: учеб.: в 2 ч. Ч. 1: Электрические печи сопротивления / А. Д. Свенчанский. – М.: Энергия, 1975. – 384 с.

27. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справ.: в 3 т. / А. С. Тимонин. – Калуга: из-во Н.Б. Бочкаревой, 2002. – Т. 1: 852 с.; Т. 2: 968 с.; Т. 3: 1028 с.

28. Блинов, И. Г. Оборудование полупроводникового производства: учеб. пособие / И. Г. Блинов, Л. В. Кожитов. – М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.

29. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – М.: Химия, 1977. – 362 с.

30. Тетеревков, А. И. Оборудование заводов неорганических веществ и основы проектирования: учеб. пособие / А. И. Тетеревков, В. В. Печковский. – Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 254 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ).....	4
1.1. Тематика курсовых проектов (работ).....	4
1.2. Курсовой проект (работа) по технологии материалов и изделий электронной техники.....	6
1.2.1. Аналитический обзор литературы.....	8
1.2.2. Инженерные решения.....	8
1.2.3. Технологический раздел.....	10
1.2.3.1. Структура и содержание.....	
1.2.3.2. Технологические расчеты.....	18
1.2.4. Контроль качества продукции и метрологическое обеспечение технологии.....	18
1.2.5. Мероприятия по охране окружающей среды.....	19
1.3. Курсовой проект по оборудованию и основам проектирования производств материалов и изделий электронной техники.....	20
1.3.1. Обоснование выбора типа аппарата.....	20
1.3.2. Технологический расчет аппарата.....	21
1.3.3. Конструирование электропечей сопротивления.....	23
1.3.4. Расчет электропечей сопротивления.....	38
1.3.5. Конструирование нагревательных элементов.....	39
1.3.5.1. Рекомендации по выбору материала.....	44
1.3.5.2. Конструирование металлических нагревателей	46
1.3.5.3. Конструирование неметаллических Нагревателей.....	49
.....	50
1.3.5.4. Нагреватели из тугоплавких металлов.....	53
1.3.6. Расчет нагревательных элементов.....	57
1.3.6.1. Расчет металлических нагревателей.....	62
1.3.6.2. Расчет карборундовых нагревателей.....	64
1.3.6.3. Расчет нагревателей из дисилицида молибдена	65
1.3.7. Расчет вакуумной системы.....	67
1.4. Графическая часть проекта.....	70
2. ВЫПОЛНЕНИЕ ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ).....	73

Приложение.....
Литература.....

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КВАНТОВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Составители: **Мурашкевич** Анна Николаевна
Богомазова Наталья Валентиновна

Редактор И. О. Гордейчик

Подписано в печать 23.11.2007. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 4,7. Уч.-изд. л. 4,8.
Тираж 75 экз. Заказ

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».

220006. Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.