

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

А. Н. Мурашкевич, Н. В. Богомазова, О. А. Алисиенок

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КВАНТОВОЙ И
ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

**Учебно-методическое пособие 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 техно-
логия квантовой и твердотельной электроники»**

Минск 2014

УДК 541.1:621.382(075.8)
ББК 24.5:32.852я7
М91

Рассмотрено и рекомендовано редакционно-издательским советом
Белорусского государственного технологического университета

Рецензенты

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
химической технологии вяжущих материалов учреждения
образования «Белорусский государственный
технологический университет»

А. А. Мечай

кандидат технических наук, доцент кафедры «Микро- и нанотехника»
Белорусского национального технического университета

Т. В. Колонтаева

Мурашкевич, А. Н.

М91 Химическая технология квантовой и твердотельной электроники: учеб.-метод. пособие 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» / А. Н. Мурашкевич, Н. В. Богомазова, О. А. Алисиенок. Минск: БГТУ, 2014. 115 с.

В учебно-методическом пособии изложены рекомендации по выполнению курсовых и дипломных проектов (работ) специализации. С учетом специфики и разноплановости технологий приведены примеры материальных балансов основных типовых процессов, расчета наиболее важных типов оборудования: электрических печей сопротивления и вакуумных систем. В приложении приведены данные основных технологических схем производства изделий электронной техники и необходимые для расчетов справочные данные.

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

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2014
© Мурашкевич А. Н., Богомазова Н.В.,
Алисиенок О. А., 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Выполнение курсовых и дипломных проектов (работ) по специализации 1-48 01 01 13 «Химическая технология квантовой и твердотельной электроники» на заключительном этапе обучения призвано, с одной стороны, закрепить навыки применения полученных теоретических знаний для решения поставленных инженерно-технологических задач, а с другой – выявить способности будущих инженеров-химиков-технологов самостоятельно разрабатывать технологические маршруты с учетом новейших 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 и дипломная 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 общирности 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. Настоящее учебно-методическое пособие определяет объем работы при выполнении курсовых и дипломных проектов (работ). В издании приводятся теоретические сведения и излагаются основные принципы технологических расчетов процессов и ос-

нового оборудования, используемого в производствах материалов и изделий электронной техники. Следует, однако, учитывать большой ассортимент процессов и оборудования по сравнению с другими специализациями, а также то обстоятельство, что стратегия расчетов может в каждом конкретном случае иметь свою специфику, которую нельзя уложить в одну общую схему. Поэтому для успешного выполнения проектов и работ необходимо и полезно использовать справочную литературу, а также знания, полученные при изучении общеинженерных и специальных дисциплин, а также методические рекомендации, разработанные для других специализаций и близких специальностей.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ)

1.1. Тематика курсовых проектов (работ)

В соответствии с действующими учебными планами студенты 5 курса выполняют на выпускающей кафедре два курсовых проекта (работы) по дисциплинам «Химическая технология материалов и изделий электронной техники» и «Оборудование и основы проектирования предприятий подотрасли».

Курсовая работа технологического профиля выполняется по дисциплине «Химическая технология материалов и изделий 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 для твердотельных лазеров и других объектов), производство позисторных, конденсаторных, магнитных материалов и изделий на их основе, получение оптически активных материалов (люминофоров, модуляторов и других). Соответствующие технологии могут быть предложены в качестве тем выполняемых курсовых работ.

Вместе с тем, в некоторых случаях тематика данной курсовой работы согласуется с технологиями, которые студенты изучают при выполнении программы 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 работ затрагивает материал других технологических дисциплин специализации «Химическая тех-

нология квантовой и твердотельной электроники», например, дисциплины «Технология полупроводниковых материалов и приборов», поскольку одним из основных базовых предприятий для студентов соответствующей специализации является ОАО «Интеграл». Таким образом, в качестве тем курсовой работы могут быть предложены технологические схемы производства конденсаторов [120, 22], позисторов, ферритовых магнитных изделий [21], лазерных материалов, материалов-модуляторов [23], полупроводниковых материалов и дискретных приборов, полупроводниковых интегральных схем (на биполярных или МОП-структурах) [810, 1214, 17, 39], жидкокристаллических устройств [9] и других изделий электронной техники [16, 40].

Тематика курсовых проектов по дисциплине «Оборудование и основы проектирования предприятий подотрасли», как правило, формулируется в рамках технологии, являющейся объектом технологической курсовой работы. 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 технологической курсовой работе.

Объектом разработки может быть основное оборудование керамического производства, производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, а также монокристаллов (садочные и методические электропечи сопротивления, сушилки, вакуумные установки, оборудование для измельчения и резки, оборудование для химической обработки, эпитаксиальные реакторы и другое оборудование).

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

- электрическая печь различных типов (указания по расчету см. в подразделе 1.3.4);
- установка для химического нанесения пленок (в качестве реактора в большинстве случаев выступает трубчатая электропечь сопротивления, указания по расчету см. в подразделе 1.3.4);
- вакуумная установка для нанесения пленок (см. подраздел 1.3.7 и [2]);
- установка выращивания монокристаллов (предметом расчета может быть устройство для нагрева, пример расчета индуктора см. [1]) или вакуумной системы в подразделе 1.3.7 и [2, 24];
- установка химической обработки (очистка, травление и другие, примеры расчета см. [3]);

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

– установка эпитаксиального наращивания пленок (рассчитывают устройство для нагрева индукционного или резистивного типа согласно [1] и подраздела 1.3.4);

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

Тема курсового проекта (работы), как правило, предлагается руководителем, либо может быть выбрана студентом самостоятельно в рамках программы соответствующих дисциплин или на основании материалов технологической практики.

1.2. Указания к выполнению технологической курсовой работы

1.2.1. Общие указания

Структура и содержание курсовой работы должны соответствовать **СТП БГТУ 002 – 2007** и полученному заданию. Кроме того, при выполнении данной работы целесообразно использовать опыт, полученный при выполнении курсовой работы по дисциплине «Технология полупроводниковых материалов и приборов» [4] в части указаний, имеющих общее содержание для любых технологических разработок или учебных научно-технических работ.

Курсовая работа включает пояснительную записку и графическую часть, выполняемых в соответствии с полученным 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 технологическую схему разработанного или модернизированного производства на листе формата А1 с экспликацией потоков и аппаратов. При оформлении схемы можно использовать рекомендации [1–3], а также принять во внимание приложения, приведённые в данном пособии.

Оформление курсовых работ производится в соответствии с требованиями **СТП БГТУ 002 – 2007**.

1.2.2. Аналитический обзор литературы

При составлении аналитического обзора литературных сведений следует помнить, что представляемые данные должны составлять научно-техническую базу для обоснования и принятия инженерных решений, предлагаемых в данной курсовой работе. Поэтому обзор включает сведения об известных вариантах реализации данного технологического процесса, но более подробно информацию, непосредственно связанную с инженерными решениями. Глубина поиска данных по периодическим изданиям и патентам должна составлять не менее 1015 лет. Объем материалов обзора – не менее 2530 страниц.

Среди подразделов литературного обзора можно выделить:

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

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

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

в) промежуточный технологический объект (например, сегментная маска на основе SiO_2 в виде заданного 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 компонентов, менее дорогостоящих, дефицитных, 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 технологий 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 другие показатели).

1.2.3. Инженерные решения

В данном разделе кратко излагаются и обосновываются основные инженерные решения по разрабатываемой технологии. При этом поясняются основные цели принимаемых решений, их суть и технико-экономические эффекты, к которым эти решения приводят. При изложении следует обосновывать все основные 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 данного раздела составляет 23 страницы.

1.2.4. Технологический раздел

1.2.4.1. Структура и содержание. Данный раздел является в соответствующей курсовой 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 деление на различные подразделы):

- 1) характеристика сырья и исходных веществ;
- 2) физико-химические основы процессов данной технологии (или данного конкретного технологического процесса);

3) описание технологической схемы 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 особенностях конкретных вариантов технологических процессов, которые выбраны в предлагаемой технологии. Среди таких закономерностей приводятся уравнения основных и побочных 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 показатели процессов.

Описание технологической схемы обычно включает последовательное изложение перечня всех операций, составляющих цикл изготовления данного изделия (в случае полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) приводится фрагмент технологического маршрута в виде блока операций по формированию определенной части изделия). Операции нумеруют (номер имеет каждая операция, осуществляемая в отдельном аппарате). После названия операции обязательно указываются основные технологические параметры (температура, давление, составы обрабатывающих сред, продолжительность операции), а также при необходимости параметры обработки (например, толщина формируемой или стравливаемой пленки, финишная дисперсность измельчаемого порошка, удельное электросопротивление промывных вод (для деионизованной воды) и т.п.)

Методика технологических расчетов для различных производств электронных устройств имеет некоторые различия, которые обсуждаются ниже, однако в любом случае в результате проводимых расчетов необходимо:

1) обосновать или рассчитать *единичную загрузку* соответствующего аппарата;

2) определить *длительность технологического цикла* (например, времени выращивания монокристалла, времени обжига одного поддона заготовок, времени формирования оксидной пленки на пластинах, одновременно загружаемых в эпитаксиальный реактор, времени напыления металла на пластины одной кассеты и т.д.);

3) рассчитать *материальный баланс* технологического аппарата или реактора, по которому предлагается основное инженерное решение с учетом 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;

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

5) оценить *тепловые потоки*, связанные с протеканием физико-химических процессов, для целевой технологической операции (с учетом температуры процесса и химического количества веществ, составляющих расчетную загрузку);

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

По согласованию с руководителем возможно вместо проведения технологических расчетов аппарата по указанной схеме осуществление расчетов материальных балансов основных технологических процессов данного технологического маршрута.

1.2.4.2. Указания по проведению технологических расчетов.

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 других характеристиках, необходимых для расчетов.

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 других изделий);

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

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, приобретенных в курсе «Общая химическая технология».

При проведении технологических расчетов следует четко представлять основные 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 вакуумного магнетронного напыления металлических пленок в производстве полупроводниковых приборов по *интегральной планарной* технологии. Если объектом курсовой работы являются другие операции интегральной планарной технологии, то можно руководствоваться дополнительными примерами, приведенными в разделе 2.3, а также методическими указаниями из приведенных источников:

эпитаксия, окисление кремниевых пластин, газофазное химическое осаждение пленок, диффузионное легирование, выращивание монокристаллов – [4];

Таблица 1

Сравнительная характеристика интегральной планарной и керамической технологий

Интегральная планарная технология	Керамическая технология
Общие особенности	
1. Большое число операций в маршруте изготовления изделия (100-500 операций) 2. Интегральное производство изделий 3. Высокий уровень автоматизации 4. Наличие технологических потоков реагентов в 4-х агрегатных состояниях	1. Сравнительно небольшое число операций в маршруте изготовления изделия (2550 операций) 2. Индивидуальное производство изделий 3. Значительная доля ручных операций 4. Доминирование твердофазных технологических потоков
Обрабатываемый объект	
Дискообразная пластина (диаметр 100-200 мм, толщина 0,40,7 мм)	Порошок (дисперсность 0,150 мкм), суспензия, заготовка, керамическое изделие

Основные технологические блоки*	
1. Химическая обработка 2. Эпитаксия 3. Окисление Si 4. Химическое осаждение пленок (SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , поликристаллический Si, СТФСС**, НТФСС***, БФСС****) 5. Фотолитография (или иная литография) 6. Легирование (диффузия или ионная имплантация) 7. Вакуумные процессы (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***** 4. Финишная обработка изделий
Основные типы используемого оборудования	
Газофазные реакторы, вакуумные установки, линии химической обработки, литографические установки	Мельницы, атритторы, прессы, литейные машины, методические и садочные печи

* не включены подготовительные блоки (например, изготовление кремниевых пластин из слитков или синтез титаната бария в производстве позисторов);

** среднетемпературное фосфоросиликатное стекло;

*** низкотемпературное фосфоросиликатное стекло;

**** борофосфоросиликатное;

***** в ряде случаев до прессования проводится синтетический отжиг.

фотолитография – расчеты стадий термообработки аналогичны примеру 1, расчеты операций травления, проявления, *химической обработки* проводятся по методике расчета ванн химической (или электрохимической) обработки, достаточно подробно приведенной в [3];

ионная имплантация – имеет много общего с другими вакуумными процессами (например, напылением пленок, пример 2).

Расчет тепловых потоков проводится по общей методике, известной из курса «Физическая химия» (пример 3 и раздел 1.3.3.3).

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

Пример 1. *Поэтапная схема расчета продолжительности цикла и материального баланса туннельной печи для спекания позисторов.*

1) Выбор состава керамики по результатам проведенного эксперимента или анализа литературных и заводских данных (например, выбирается состав (в мол. %): (Ba_{0,892}Ca_{0,08}Pb_{0,028})TiO₃+0,1 % ВСС (низкоплавкая добавка на основе эвтектической смеси BaCuO₂ + 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).

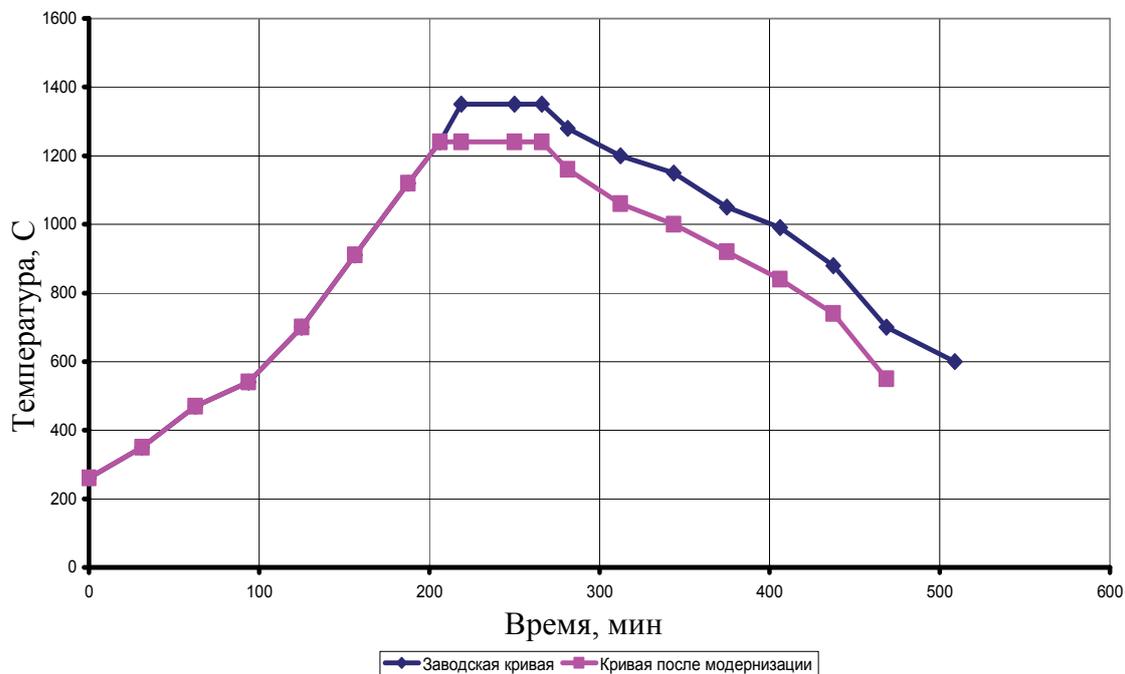


Рис. 1. Температурные кривые отжига заготовок позисторов

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 заводских данных о скоростях нагрева и охлаждения, о продолжительности отдельных этапов цикла обработки с учетом принятых инженерных решений. В нашем примере по сравнению с заводским вариантом общее время цикла спекания уменьшилось, а продолжительность отжига при максимальной температуре не изменилась (рис. 1). В общем случае, 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 %, как в пункте 1 данного примера) в массовые % компонентов в шихте с учетом стехиометрических формул основных компонентов и принятого содержания вводимых добавок (для рассматриваемого состава эти массовые соотношения, пересчитанные из мольных % по пункту 1, приведены в табл. 2)

Основной состав исходной шихты

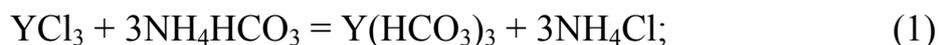
Исходное вещество, мас. % в шихте	BaTiO ₃	CaTiO ₃	PbTiO ₃	BCC	YCl ₃	TiO ₂	SiO ₂
	85,01	4,45	3,46	6,38	0,23	0,10	0,37

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. %.

5) Определение количества исходных компонентов, входящих в состав обоснованной единичной загрузки печи (в данном случае такой расчетной единичной загрузкой принята одна лодочка с 672 цилиндрическими заготовками позисторов).

6) Определение и проверка *приходных статей* материального баланса. Все вышеупомянутые исходные 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 предшествующих технологических операциях. Так, для данного примера следует учесть, что:

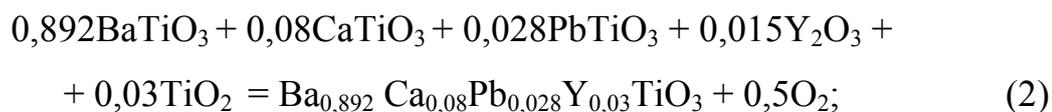
– ионы Y³⁺ в заготовках содержатся в составе гидрокарбоната в соответствии с реакцией (1), которая происходит при составлении шихты

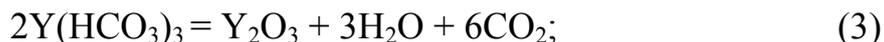


– NH₄HCO₃ в значительной части разлагается на стадии сушки исходной шихты с выделением NH₃, CO₂, H₂O (в примере учтено остаточное содержание NH₄HCO₃ в количестве 1 % от исходно введенного количества);

– остаточная влажность шихты после подготовки заготовок к спеканию составляет 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 ПВХ.

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.

Различие в балансе по приходным и расходным статьям не должно превышать 0,5%.

Пример 2. Поэтапная схема расчета продолжительности цикла и материального баланса камеры 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 продолжительности 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:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_3 + \tau_{\text{д.в}} + \tau_{\text{п.к}} + 24R + \tau_{\text{н.в}} + \tau_{\text{в}}, \quad (5)$$

где τ_3 и $\tau_{\text{в}}$ – время загрузки и выгрузки кассеты с пластинами во входной и выходной шлюзы соответственно, $\tau_3 = \tau_{\text{в}} \sim 1$ мин; $\tau_{\text{д.в}}$ – время, необходимое для достижения вакуума в рабочей камере, $\tau_{\text{д.в}} \sim 1$ мин; $\tau_{\text{н.в}}$ – время напуска воздуха в камеру, $\tau_{\text{н.в}} \sim 1$ мин; $\tau_{\text{п.к}}$ – время, за которое пластина проходит весь конвейер (для данного примера длина конвейера $l = 1,5$ м). Это время определяется исходя из длины конвейера, скорости движения транспортера (обычно составляет величину порядка $v_{\text{тр}} = 0,10,2$ м/мин), а также с учетом времени подачи и съема пластин с конвейера (обычно 0,0010,005 мин). Следует учитывать, что скорость движения транспортера зависит от скорости осаждения пленки $v_{\text{ос}}$, – обеспечиваемой магнетронами камеры

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

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	80,8	Ba _{0,892} Ca _{0,08} Pb _{0,028} Y _{0,03} TiO ₃	1819,91	88,6
CaTiO ₃	86,95	4,2	SiO ₂	7,23	0,3
PbTiO ₃	67,61	3,3	BaCuO ₂ -CuO	124,67	6,1
TiO ₂	1,95	0,1	CO ₂ * в т.ч. из Y(HCO ₃) ₃ из NH ₄ HCO ₃ из ПВС	31,26	1,5
SiO ₂	7,23	0,3		2,89	
BaCuO ₂ -CuO	124,67	6,1		0,97	
Y(HCO ₃) ₃	5,96	0,3		27,40	
NH ₄ HCO ₃	1,74	0,1	пары H ₂ O в т.ч. из Y(HCO ₃) ₃ из NH ₄ HCO ₃ из ПВС ост. влажность	71,38	3,5
ПВС	13,70	0,7		0,59	
H ₂ O (ост. влажность)	59,18	2,9		0,40	
O ₂ *	24,91	1,2		11,21	
			NH ₃ *	0,37	
			O ₂ *	0,20	
<i>Итого</i>	2055,02		<i>Итого</i>	2055,02	100

*Для газообразных реагентов при значительном присутствии приводят объемные количества при нормальных условиях.

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

R – ритм выдачи пластин с конвейера, с/шт., 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 (то есть в приближении чисто алюминиевой мишени и пленки). При учете всех компонентов следует вносить возможные поправки на отличие коэффициентов распыления различных материалов. Приходными статьями являются массы металлической мишени m_m (или нескольких мишеней в камере

напыления) и кремниевых пластин $m_{\text{плас}}$ известных размеров. Количество пластин определяется исходя из длины камеры напыления $l_{\text{нап}}$ и величины $d_{\text{пл}} + \Delta d$.

4) Расчет расходных статей. Здесь приводят расчеты:

– массы пленки $m_{\text{мет}}$, осажденной на пластины единичной загрузки;

– массы мишени $m_{\text{рас}}$, распыленной за время осаждения пленки. При этом следует учитывать, что, во-первых, скорость распыления мишени $v_{\text{рас}}$ примерно в 1,5 раза больше, чем скорость осаждения пленки $v_{\text{ос}}$. Во-вторых, распыление происходит не со всей поверхности мишени, а с определенной ее части, которая называется зоной эрозии (рис.2).

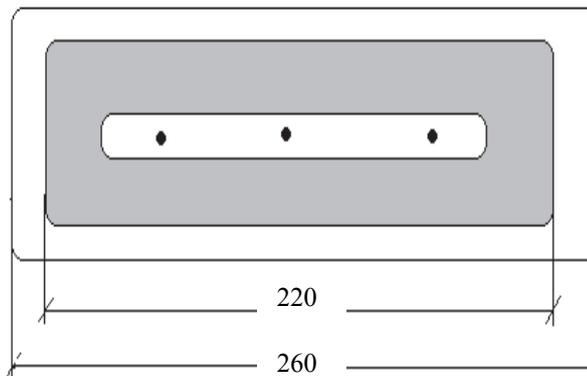


Рис. 2 Схема расположения зоны эрозии (помечена темным фоном) на мишени

В-третьих, следует оценить, какая доля распыленного металла осаждается на транспортёре $m_{\text{тр}}$ и на стенках камеры $m_{\text{ст}}$;

– массы мишени после напыления определенного числа пленок (в данном случае 4-х пленок на пластины, одновременно находящиеся в камере напыления). Желательно проводить расчет для полной загрузки единичного цикла, то есть в данном случае для 25 пластин.

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

Таблица 4

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

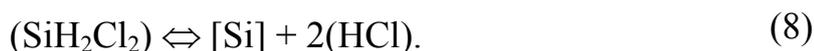
Приход			Расход		
Компонент	Масса, г	%	Компонент	Масса, г	%
1. Пластины (Si) $m_{\text{плас}}$	36,582	1,7	1. Металлизированные пластины (Si/Al) $m_{\text{плас}} + m_{\text{мет}}$	36,632	1,7
2. Мишень (Al) $m_{\text{м}}$	2160,100	98,3	2. Мишень $m_{\text{м}}$ (Al)	2159,938	98,3
			3. Осажденная пленка (Al), в т.ч.	0,112	
			$m_{\text{тр}}$ (Al)	0,093	
			$m_{\text{ст}}$ (Al)	0,019	
3. Аргон	$2,98 \cdot 10^{-3}$		4. Аргон	$2,98 \cdot 10^{-3}$	
<i>Итого</i>	2196,685	100,0	<i>Итого</i>	2196,685	100,0

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% или если толщина пластины в зоне эрозии уменьшается в 2 раза. Далее с учетом режима работы оборудования рассчитывают календарный период работы одной мишени.

Пример 3. *Поэтапная схема расчета тепловых эффектов основных физико-химических процессов 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 других.

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



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

3) Расчет тепловых эффектов при условиях протекания процесса (в примере пиролиз протекает при $P = 1$ атм и $T = 1273$ К).

$$\Delta H^0_T = \Delta H^0_{298} + \int_{298}^T \Delta C_p dT, \quad (9)$$

где ΔC_p изменение теплоемкости системы при протекании данного процесса, Дж/К. Для данного примера $\Delta H^0_{1273} = 119,69$ кДж.

4) Расчет теплового потока в аппарате для единичной загрузки с учетом числа молей компонентов, вступающих в реакции или другие процессы, сопровождающиеся тепловыми эффектами. В данном примере для формирования эпитаксиальных пленок заданной толщины на 24 пластинах, находящихся в реакторе, необходимо 1,7 молей SiH_2Cl_2 .

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

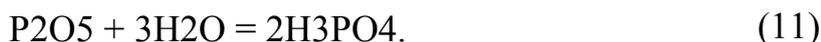
Пример 4 *Схема расчета материального баланса процесса трафаретного травления пленки фосфоросиликатного стекла (ФСС)*

Приведены пояснения и результат расчета материального баланса процесса трафаретного жидкостного травления межслойной изоляции

в виде пленки ФСС с содержанием фосфора 7 мас. % толщиной 0,9 мкм + пленки низкотемпературного оксида (НТО) толщиной 0,1 мкм на металлизированной алюминием кремниевой пластине $100 \frac{14,3КЭФ4,5/5КЭС17/1,95КДБ210}{460КДБ10(100)}$ в травителе $H_2O:NH_4F:HF:C_3H_8O_3$

(глицерин)=276:67:36:23 (моль) объемом 10 л при $T = 20^\circ C$.

Травление компонентов пленки ФСС условно можно описать уравнениями [17]



1. *Приходные* статьи материального баланса включают: 1) 50 пластин со структурой (кремниевые подложки, эпитаксиальный слой, слой алюминиевой металлизации, слой ФСС, слой НТО, топологический слой фоторезиста); 2) 2 кассеты; 3) 10 л травителя.

2. *Расходные* статьи материального баланса включают: 1) пластины со структурой (кремниевые пластины, эпитаксиальный слой, слой ФСС + НТО с вытравленными окнами, объем которых принят равным 49%) и унесенным травителем (унос порядка 0, 1 ÷ 0,05 л/м²), 2) кассеты с унесенным травителем, 3) травитель после обработки с продуктами травления $(NH_4)_2SiF_6$, H_3PO_4 , H_2O , 4) испарившуюся воду.

Материальный баланс приведен в табл. 5

Таблица 5

Материальный баланс процесса травления ФСС

Приход			Расход		
Вещество	Масса, г	%	Вещество	Масса, г	%
1) Партия пластин.	434,4220	100,0	1) Партия пластин с травителем.	433,8199	100,0
В т.ч.:			В т.ч.:		
подложка Si			подложка Si	418,0000	96,35
эпитакс. слой Si	418,0000	96,22	эпитакс. слой Si	12,9000	2,97
слой ФСС.	12,9000	2,97	слой ФСС.	0,7185	0,17
В т.ч.:	1,4006	0,32	В т.ч.:		
SiO ₂	1,1761		SiO ₂	0,6033	
P ₂ O ₅	0,2245		P ₂ O ₅	0,1152	
слой НТО SiO ₂	0,0154		слой НТО SiO ₂	0,0079	
слой Al	1,4742	0,34	слой Al	1,4742	0,34
слой фоторезиста	0,6318	0,15	слой фоторезиста	0,6318	0,15
			HF	0,0057	
			NH ₄ F	0,0196	
			C ₃ H ₈ O ₃	0,0168	
			H ₂ O	0,0454	

Вещество	Масса, г	%	Вещество	Масса, г	%
2) Кассеты	1620,000		2) Кассеты с травителем. В т.ч.:	1620,0284	0,01
			Кассеты	1620,0000	
			HF	0,0018	
			NH ₄ F	0,0064	
			C ₃ H ₈ O ₃	0,0054	
			H ₂ O	0,0148	
3) Травитель. В т.ч.:	11103,0045	100,0	3) Травитель. В т.ч.:	11103,5757	100,0
HF	717,3600	6,46	HF	716,5788	6,45
NH ₄ F	2486,0000	22,39	NH ₄ F	2485,2583	22,38
C ₃ H ₈ O ₃	2134,4800	19,22	C ₃ H ₈ O ₃	2134,4578	19,2
H ₂ O	5765,1645	51,93	H ₂ O	5765,4083	51,92
			(NH ₄) ₂ SiF ₆	1,7216	0,02
			H ₃ PO ₄	0,1509	
				0,0026	
			4) пары H ₂ O		
<i>Итого</i>	13157,4265		<i>Итого</i>	13157,4266	

1.2.5. 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 результаты 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 согласномеждународной системе стандартов качества (система стандартов МС ИСО).

1.2.6. 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 отходящих потоков;
- 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 3540 страниц и графической части, включающей 23 листа чертежей формата А1. Задаaniem 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 пе-

ремешивающего 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, более низкими энергетическими затратами на единицу продукции за счет более высокого КПД или более низкого гидравлического сопротивления, меньшими затратами на обслуживание и ремонт, более низкой 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. Рекомендуются 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 курсовой работы 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 ($t, P, C, K_{\text{скор}}$).

Технологический расчет аппарата может явиться неотъемлемой частью курсовой работы по технологии, в этом случае он излагается полностью в расчетно-пояснительной записке к курсовой работе 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 аккумулярованную теплоту. 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 предусматри-

вать отдельные зоны на каждые 1,52,5 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 курсовой работе по технологии, с учетом физико-химических превращений в материале изделий на единичную загрузку печи (см. пример 1).

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

$$M_c = \frac{M_{\text{вл}}(100 - W)}{100}, \quad (12)$$

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

$$G_{\text{вл}} = M_{\text{вл}} - M_c = \frac{M_c W}{100 - W}. \quad (13)$$

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

$$M = \frac{M_c(100 - \text{п. п. п.})}{100} \quad (14)$$

Массу годных изделий $M_{\text{ч}}$, кг, определяют по формуле

$$M_{\text{ч}} = \frac{M(100 - b)}{100} \quad (15)$$

Брак при обжиге составляет

$$M - M_{\text{ч}} = \frac{100M_{\text{ч}}}{100 - b} \quad M_{\text{ч}} = \frac{M_{\text{ч}}b}{100 - b} \quad (16)$$

Потери массы при обжиге равны

$$M_c - M = \frac{100M}{100 - \text{п. п. п.}} \quad M = \frac{M \cdot \text{п. п. п.}}{100 - \text{п. п. п.}} \quad (17)$$

Материальный баланс процесса обжига представляют по образцу табл. 6.

Таблица 6

Материальный баланс процесса обжига изделий

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

Примечание. Неувязка баланса допускается не более 0,1%.

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

$$\tau_{\text{ц}} = M / E, \quad (18)$$

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.

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

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{выд}} + \tau_{\text{пр}}, \quad (19)$$

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

Продолжительность 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.

Продолжительность 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.

Продолжительность выдержки изделий в печи τ задается технологическим процессом, в противном случае оно совмещается с последним этапом нагрева. Таким образом, определение продолжительности нагрева позволит проверить соответствие этой величины заданной производительности печи. Если получить нужную производительность не удастся, то следует изменить загрузку печи и размеры ее камеры и заново рассчитать продолжительность 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 продолжительность нагрева массивной загрузки пропорционально квадрату ее толщины. В тех же случаях, когда часовая производительность не задана, расчет продолжительности нагрева позволит ее определить по выражениям (16) и (17).

Для ЭПС, работающих в непрерывном режиме, производительность G (кг/ч) рассчитывают по зависимости

$$G = \frac{Lm}{\tau_{\text{ц}}}, \quad (20)$$

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

При расчете производительности печей непрерывного действия продолжительность цикла не включает продолжительность операций загрузки и разгрузки 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 продолжительности

цикла, однако продолжительность 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 минимальную продолжительность цикла.

Часовая производительность методической печи G (кг/ч) может быть рассчитана по формуле:

$$G_{\text{ч}} = \frac{G_{\text{год}}}{Z \cdot 24}, \quad (21)$$

где $G_{\text{год}}$ – годовая производительность печи (кг/ч, или шт/ч); Z число рабочих дней в году.

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

$$N_y = kN_{\text{потр}}, \quad (22)$$

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

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

Для печей, работающих в непрерывном режиме,

$$N_{\text{потр}} = N_{\text{загр}} + N_{\text{всп}} + N_{\text{пот}}, \quad (23)$$

где $N_{\text{загр}}$ – мощность, необходимая для нагрева садки (изделий, или порошка) 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:

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{ак}}, \quad (24)$$

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

$$q_{\text{п}} = c_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{изд}}}{100} \right)^4 \right], \quad (25)$$

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

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{F_{\text{изд}}}{F_{\text{ст}}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1 \right)}, \quad (26)$$

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 (24) 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.

Условная термодинамическая температура печи, средняя между температурой стен и нагревателей условно обозначается $T_{\text{печи}}$. 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 1020°C.

Температура изделия $T_{\text{изд}}$ изменяется в процессе нагрева, и можно выбрать то или иное ее значение для выражения (23). 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 (23) должен определяться в каждом конкретном случае: насколько необходимо форсировать процесс нагрева. Для полного использования мощности печей при приемлемой скорости нагрева можно рекомендовать $T_{\text{изд}} = 0,80,9$ 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

$$c_{\text{пр}} = 5,76\varepsilon_{\text{изд}} = c_{\text{изд}}. \quad (27)$$

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

$$c_{\text{пр}} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{изд}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{печи}}} - 1}. \quad (28)$$

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:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} x, \quad (29)$$

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 изделиям. При значениях Био в интервале 0,250,5 также применяют методику оценки времени нагрева для тонких изделий, поскольку ошибка оказывается небольшой.

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

$$\tau_{\text{нагр}} = \frac{Q}{\alpha(T_{\text{печи}} - T_{\text{изд.ср}})F_{\text{изд}}} = \frac{Gc(T_{\text{к}} - T_{\text{н}})}{\alpha \cdot 0,3T_{\text{печи}}F_{\text{садки}}}, \quad (30)$$

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 $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Тогда среднее значение коэффициента теплоотдачи составит

$$\alpha = 0,03c_{\text{пр}}(T_{\text{печи}} / 100)^3 + 10. \quad (31)$$

Продолжительность нагрева чаще всего выбирается исходя из требований по длительности технологического процесса, а рассчитанная продолжительность нагрева по вышеприведенным формулам не должно быть больше рекомендуемой технологией.

После определения продолжительности 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:

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{ак}}. \quad (32)$$

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

$$Q_{\text{пол}} = \frac{1}{M_{\text{м}}} M \int_{T_1}^{T_2} c dT, \quad (33)$$

где $M_{\text{м}}$ – масса одного моля нагреваемого вещества, кг; M – масса вещества, кг; c – теплоемкость вещества, Дж/(моль·К); T_1 и T_2 начальная и конечная термодинамическая температура вещества загрузки, К.

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

$$Q_{\text{пол}} = Mc_c(T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \quad (34)$$

$$c_c = 0,5(c_k + c_n), \quad (35)$$

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

$$Q_{\text{пр}} = \frac{1}{M_m} M \left(\int_{T_n}^{T_{\text{ф}}} c_1 dT + \Delta i_{\text{ф}} + \int_{T_{\text{ф}}}^{T_k} c_2 dT \right), \quad (36)$$

где $\Delta i_{\text{ф}}$ – теплота фазового превращения, Дж/(моль·К); $T_{\text{ф}}$ – 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

$$Q_{\text{эф}} = \sum_i \Delta Q'_{\text{кон}i} - \sum_j \Delta Q'_{\text{исх}j} = \Delta H \cdot n, \quad (37)$$

где $\Delta Q'_{\text{кон}i}$ – теплота образования каждого из продуктов реакции при температуре T_k ; $\Delta Q'_{\text{исх}j}$ – теплота образования каждого из исходных веществ при температуре T_n , ΔH – тепловой эффект реакции; n – число молей вещества загрузки.

$$\Delta Q' = \frac{1}{M_m} M (\Delta i_{298}^{\circ} + \int_{298}^{T_k} c dT), \quad (38)$$

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

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

$$N_{\text{п}} = Q_{\text{п}} / \tau_n. \quad (39)$$

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:

$$Q_{\text{всп}} = \sum_i c_i M_i (T_k - T_n), \quad (40)$$

где c_i – усредненная теплоемкость i -го элемента, Дж/(кг·К); M_i – масса i -го вспомогательного элемента, нагреваемого за цикл термообработки, кг T_k и T_n конечная и начальная температура i -го элемента, К.

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

$$N_g = q_g c_g (T_k - T_n), \quad (41)$$

где q_g – массовый расход газа в единицу времени, кг/с; c – усредненная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); T_k – температура газа на выходе из печи, К; T_n – температура газа на входе в печь, К.

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

$$Q_g = M_g c_g (T_k - T_n), \quad (42)$$

где M_g – масса газа, прошедшего через печь за цикл термообработки.

В результате полезная теплота и полезная мощность составят:

$$Q_{\text{пол}} = Q_1 + Q_{\text{всп}} + Q_g; \quad (43)$$

$$N_{\text{пол}} = N_1 + N_{\text{всп}} + N_g. \quad (44)$$

Тепловые потери печи в течение одного цикла складываются из тепловых потерь за отдельные периоды цикла, т. е. из потерь за продолжительность нагрева ($\tau_{\text{нагр}}$), продолжительность выдержки ($\tau_{\text{выд}}$), продолжительность остывания ($\tau_{\text{ост}}$) и продолжительность простоя ($\tau_{\text{пр}}$) печи при загрузке и выгрузке:

$$q_{\text{потерь ср}} \tau_{\text{цикла}} = q_{\text{потерь нагр}} \tau_{\text{нагр}} + q_{\text{потерь выд}} \tau_{\text{выд}} + q_{\text{потерь ост}} \tau_{\text{ост}} + q_{\text{потерь пр}} \tau_{\text{пр}}. \quad (45)$$

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

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:

$$N_{\phi} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{нар}} F_1^*} + \frac{\delta_1}{\lambda_1 F_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{II}} F_{\text{II}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{\text{III}} F_{\text{III}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} F_4^*}}, \quad (46)$$

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_1^* , F_4^* – площади i -х поверхностей, м²; F_j – усредненная площадь j -го слоя, м²; δ_j – толщина слоя изоляции, м.

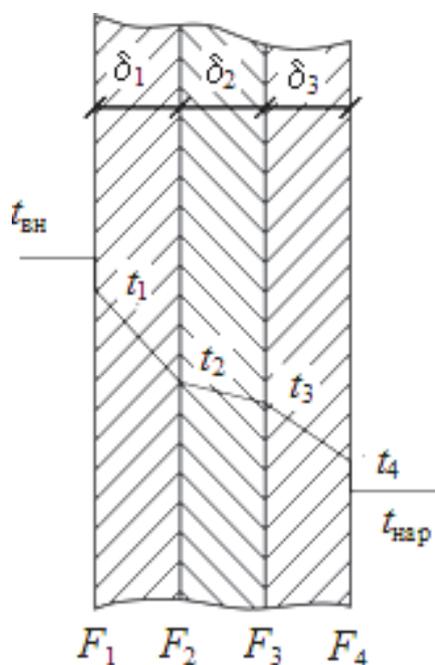


Рис. 3. Трехслойная плоская стенка: $t_{\text{вн}}$ – температура внутри печи;
 t_i – температура на i -й поверхности теплоизолирующего слоя;
 $t_{\text{нар}}$ – температура снаружи печи; δ – толщина j -го слоя теплоизоляции;
 F_i – площадь i -й поверхности теплоизолирующего слоя

Так как λ зависит от температуры материала футеровки, то в формулу (44) подставляют усредненный коэффициент, взятый для средней температуры, например для III слоя $t_{\text{III}} = \frac{t_3 + t_4}{2}$. Поверхность F_j берут как среднее квадратичное площадей поверхности j -го слоя: $F_{\text{III}} = \sqrt{F_3 F_4}$.

При расчете потерь в методической многозональной 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:

$$N_{\phi} = \frac{\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}} H_1^* d_1} + \frac{1}{2\lambda_1 H_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{\text{II}} H_{\text{II}}} \ln \frac{d_3}{d_2}} + \frac{\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\frac{1}{2\lambda_{\text{III}} H_{\text{III}}} \ln \frac{d_4}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} H_4^* d_4}}, \quad (47)$$

где d_i – диаметр i -й цилиндрической поверхности; H_1^* , H_4^* высоты i -х поверхностей, м; H_j – усредненная высота j -го слоя футеровки, м.

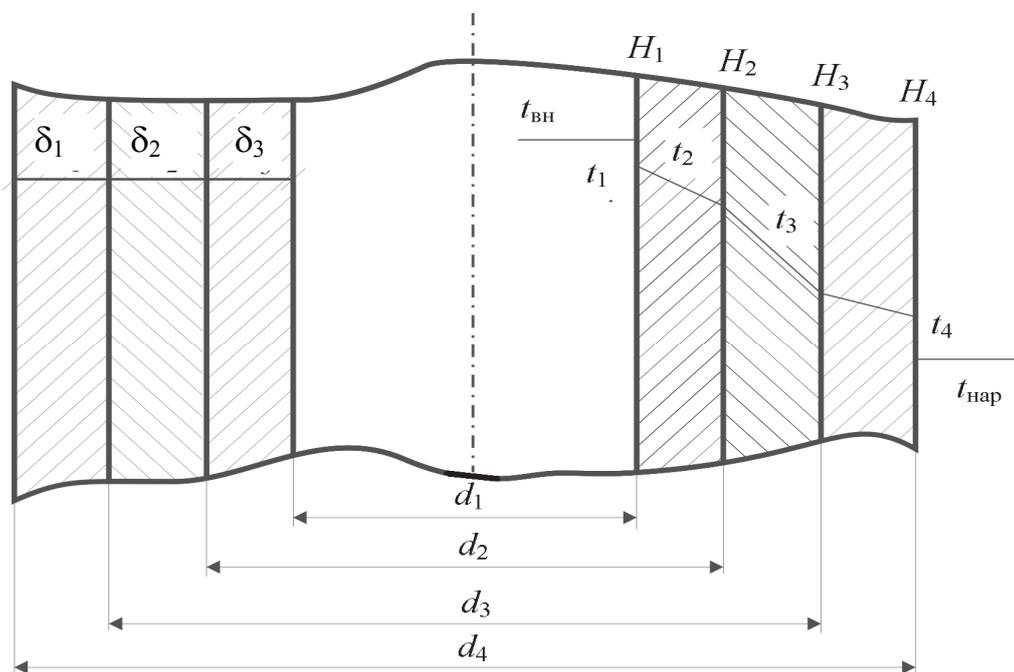


Рис. 4. Трехслойная цилиндрическая стенка

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 Вт/(м²·К);
- верхней горизонтальной поверхности 12,0 Вт/(м²·К);
- нижней горизонтальной поверхности 8,6 Вт/(м²·К).

Значение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности стены (свода) в окружающую среду Вт/(м²·К) можно рассчитать по формуле

$$\alpha_{\text{нар}} = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{излуч}} = A\sqrt{t_{\text{н}} - t_{\text{окр}}} + \frac{5,76\varepsilon_{\text{ст}}}{t_{\text{н}} - t_{\text{окр}}} \left[\left(\frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (48)$$

где A – коэффициент, учитывающий размещение футеровки. Для стен этот коэффициент принимают равным 2,6: для пода 1,6: для свода 3,3; $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степень черноты наружной поверхности футеровки; $t_{\text{окр}}$ и $T_{\text{окр}}$ – температура окружающего печь воздуха, °С и К; $t_{\text{н}}$ и $T_{\text{н}}$ – температура поверхности футеровки, °С и К; 5,76 – коэффициент излучения абсолютно-черного тела, Вт/(м²·К⁴).

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 j -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 (44) или (45) рассчитывают N_{ϕ} .

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

$$t_1 = t_{\text{вн}} \frac{N_{\phi}}{\alpha_{\text{вн}} F_1}; \quad t_1 = t_{\text{вн}} \frac{N_{\phi}}{\pi \alpha_{\text{вн}} H_1 d_1}; \quad (49)$$

$$t_2 = t_1 \frac{N_{\phi} \delta_I}{\lambda_1 F_1}; \quad t_2 = t_1 \frac{N_{\phi}}{2\pi \lambda_1 H_1} \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad (50)$$

$$t_3 = t_2 \frac{N_{\phi} \delta_{II}}{\lambda_{II} F_{II}}; \quad t_3 = t_2 \frac{N_{\phi}}{2\pi \lambda_{II} H_{II}} \ln \frac{d_3}{d_2}; \quad (51)$$

$$t_4 = t_3 \frac{N_{\phi} \delta_{III}}{\lambda_{III} F_{III}}; \quad t_4 = t_3 \frac{N_{\phi}}{2\pi \lambda_{III} H_{III}} \ln \frac{d_4}{d_3}; \quad (52)$$

$$t_{\text{нар}} = t_4 \frac{N_{\phi}}{\alpha_{\text{нар}} F_4}; \quad t_{\text{нар}} = t_4 \frac{N_{\phi}}{\pi \alpha_{\text{нар}} H_4 d_4}. \quad (53)$$

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.

При этом рекомендуется следующая последовательность расчета (на примере печи с плоской стенкой).

Рассчитывают тепловой поток через футеровку выбранных толщины и материалов при λ_0 – коэффициенте теплопроводности при нормальных условиях (20°С) для плоской стенки:

$$N_{\phi} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{\sum \frac{\delta}{\lambda_0}}, \quad (54)$$

где N_{ϕ} – тепловой поток через футеровку. Вт/м²; $t_{\text{вн}}$ – температура рабочего пространства печи, °С; δ – принятая толщина слоя футеровки, м; λ_0 – коэффициент теплопроводности отдельного слоя футеровки (λ_{01} , λ_{02} , λ_{03} и т. д.), определенный с учетом температурной зависимости и материала футеровки, Вт/(м·К).

Определяют температуру промежуточных точек (на границе слоев футеровки):

$$t_1 = t_{\text{вн}} - N_{\phi} \frac{\delta_1}{\lambda_{01}}; \quad (55)$$

$$t_2 = t_{\text{вн}} - N_{\phi} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_{01}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{02}} \right); \quad (56)$$

$$t_3 = t_{\text{вн}} - N_{\phi} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_{01}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{02}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{03}} \right); \quad (57)$$

$$t_4 = t_{\text{вн}} - N_{\phi} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_{01}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{02}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{03}} + \frac{\delta_4}{\lambda_{04}} \right). \quad (58)$$

Определяем средние температуры слоев футеровки:

$$t_{cp1} = (t_{вн1} + t_1) / 2; t_{cp2} = (t_1 + t_2) / 2; \quad (59)$$

$$t_{cp3} = (t_2 + t_3) / 2; t_{cp4} = (t_3 + t_4) / 2. \quad (60)$$

Определяем λ , соответствующий средним температурам слоев для выбранного материала футеровки с учетом температурной зависимости ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$), Вт/(м·К).

Уточняем тепловой поток через систему по формуле (54).

Уточняем температуру промежуточных точек по формулам

$$t_1 = t_{вн} - N_{\Phi} \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad (61)$$

$$t_2 = t_{вн} - N_{\Phi} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \text{ и т.д.} \quad (62)$$

Уточняем средние температуры слоев футеровки и значения коэффициента теплопроводности, отвечающие этим температурам, °С по формулам (57-58).

Определяют значения λ для уточненных средних температур футеровки.

Определяют значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{нар}$ от наружной поверхности стены (свода) в окружающую среду, Вт/(м·К) по формуле (46).

Определяют коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{\delta}{\lambda'_{cp}} + \frac{1}{\alpha_{нар}}}. \quad (63)$$

Определяют расчетную температуру внешней поверхности печи, °С:

$$t_n = t_{окр} + \frac{K}{\alpha_{нар}} (t_{вн} - t_{окр}). \quad (64)$$

Если разница между полученной и принятой к расчету температурами отличается на $\pm 5^\circ\text{C}$, следует изменить толщину слоев футеровки или выбрать другой теплоизоляционный материал и произвести повторный расчет до получения соответствующей разности температур.

Отдельно подсчитываются тепловые потери через закрытую и открытую дверцы, причем учитывается продолжительность открытого состояния последней:

$$q_{п.дв} = q_{п.откр.дв} \frac{\tau_{откр}}{\tau_{цикл}} + q_{п.закр.дв} \frac{\tau_{цикла} - \tau_{нагр}}{\tau_{цикла}}, \quad (65)$$

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 $\varepsilon = 0,8$:

$$q_{изл.отв} = \varepsilon \cdot 5,76 \left[\left(\frac{T_{печи}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F_{отв} \varphi, \quad (66)$$

где $T_{печи}$ – абсолютная термодинамическая температура рабочей камеры печи, К; T_0 – 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.

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

$$Q_{ак} = \sum_i M_i c_i (T_i - T_0), \quad (67)$$

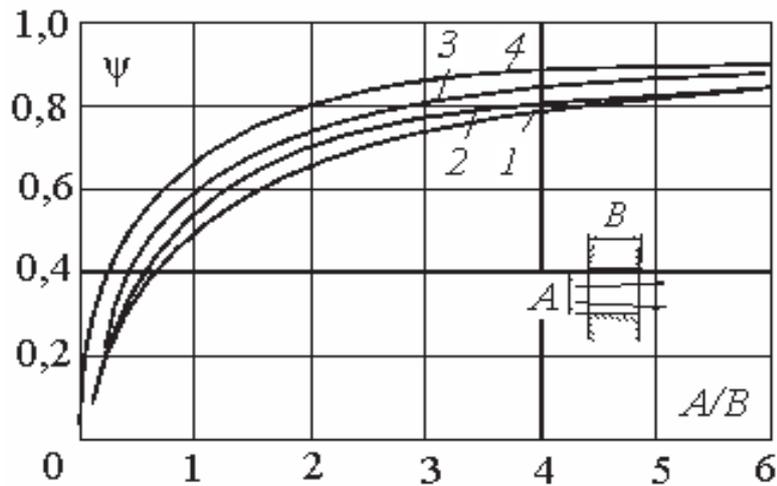


Рис. 5. Коэффициент диафрагмирования отверстий:
 1 круглое сечение; 2 квадратное; 3 прямоугольное
 (соотношение сторон 2:1); 4 длинная щель высотой A

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

$$A = \frac{Q_{\text{цикла}}}{E\tau_{\text{цикла}}}, \quad (68)$$

где E производительность печи, кг/ч.

Тепловой КПД печи рассчитывают по формуле

$$\eta_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{потерь}}\tau_{\text{цикла}}}. \quad (69)$$

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:

$$Q_{\text{нагр}} = Q_{\text{пол}} + Q_{\text{всп}} + q_{\text{потерь нагр}}\tau_{\text{нагр}} + q_{\text{потерь выд}}\tau_{\text{выд}} + q_{\text{потерь ост}}\tau_{\text{ост}} + q_{\text{потерь пр}}\tau_{\text{пр}}. \quad (70)$$

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

$$P_{\text{печи}} = K \frac{Q_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}}}, \quad (71)$$

а для методических печей

$$P_{\text{печи}} = K(N_{\text{пол}} + N_{\text{всп}} + N_{\text{пот}}), \quad (72)$$

где $K = 1,21,5$ – коэффициент запаса.

Запас мощности берется для того, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу изделиям в первый этап нагрева 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 510% 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

$$P_{\text{пол}} + P_{\text{всп}} = q_{\text{п}} F_{\text{изд}}. \quad (73)$$

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 (69).

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:

$$q_{\text{п}} \leq \Delta t \frac{2\lambda}{S}, \text{ или } q_{\text{п}} \leq \theta_{\text{ср}} S, \quad (74)$$

где S – толщина изделия;

– для цилиндра:

$$q_{\text{п}} \leq \Delta t \frac{2\lambda}{R}, \text{ или } q_{\text{п}} \leq 0,5\theta_{\text{ср}}R. \quad (75)$$

Сводный тепловой баланс электропечи сопротивления приведен в табл. 7.

Таблица 7

Сводный тепловой баланс обжига в электропечи сопротивления

Статьи прихода	кВт	%	Статьи расхода	кВт	%
1. Теплота, генерируемая нагревателями			1. На нагрев изделий (для садочной печи от начальной до максимальной температуры, а для методической печи отдельно для каждой зоны и затем суммирование)		
			2. На нагрев вспомогательных устройств (от начальной до максимальной температуры в случае садочной печи, отдельно по зонам, а затем суммирование для методической печи)		
			3. На химические процессы, если они эндотермические		
			4. На испарение физической влаги и нагрев паров воды		
			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)		
			6. Теплота, аккумулированная футеровкой печи (для печей периодического действия)		
			7. Теплота, теряемая через открытые отверстия		
			8. Неучтенные потери		
<i>Итого</i>		100	<i>Итого</i>		100

Примечание. Допускается различие в приходной и расходной части баланса не более 0,5%.

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 продолжительность работы всей печи до ремонта, поэтому увеличение срока службы нагревателей ЭПС является важной задачей, как с технической, так и с экономической точек зрения.

Одним из основных факторов, обуславливающих срок службы нагревателя, является максимальная температура, при которой он работает длительное время. Разность между температурой нагревателя и нагрузкой 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 жаропрочность способность материала сохранять длительную прочность при высоких температурах;

- иметь достаточную жаростойкость (окалиностойкость) способность материала противостоять химическому разрушению поверхности под воздействием горячего воздуха или другой газовой среды;
- 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 3040%;
- 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. 8).

Таблица 8

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

Наименование материала	Предельная рабочая температура, °С	Плотность при 0°C, кг/м ³	Удельное электросопротивление, Ом·м ($\rho = a + bt^*$)
Сталь Х25Н20 (ЭП74)	8001000	7840	$0,92 \cdot 10^{-6} + 38 \cdot 10^{-11} t$
Сталь Х23Н18	800	7800	$0,90 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot 10^{-11} t$
Нихром Х15Н60	9001050	8300	** $110 \cdot 10^{-6} + 14 \cdot 10^{-9} t$
Нихром Х20Н80	1100	8400	** $110 \cdot 10^{-6} + 8,5 \cdot 10^{-9} t$
Нихром Х20Н80Т3	1150		* $127 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-9} t$
Фехраль Х13Ю4	7001000	7400	$1,26 \cdot 10^{-6} + 6,0 \cdot 10^{-11} t$
Хромаль Х23Ю5	11501200	7270	$1,40 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-11} t$

Наименование материала	Предельная рабочая температура, °С	Плотность при 0°С, кг/м ³	Удельное электросопротивление, Ом·м ($\rho = a + bt$ *)
Хромаль Х27Ю5Т	11001300		
Сплав Х23Ю5А (ЭИ595)	1050		** $140 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-9} t$
Сплав Х27Ю5	1250	7190	$1,40 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-11} t$
Сплав Х27Ю5А (ЭИ626)	1300		** $140 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-9} t$
Глобар (силит) SiC	1400	2300	$8,00 \cdot 10^{-4} \div 19,0 \cdot 10^{-4}$
Дисилицид молибдена MoSi ₂	1650	6300	$3,2 \cdot 10^{-6} \div 4,0 \cdot 10^{-6}$
Платина	1500		** $11 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-9} t$
Платинородиевый сплав	15501600		** $11 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-9} t$
Мо	2000	10200	$0,62 \cdot 10^{-6}$
W	2500	19200	$0,8 \cdot 10^{-6}$
С	3000		$(51000) \cdot 10^{-6}$
Ниобий	1700	8600	
Тантал	2400	16600	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Хромит лантана	1750	6670	
Резистом 30	1000	7900	$1,40 \cdot 10^{-6} + 2,6 \cdot 10^{-10} t$
Резистом 60	1100	8200	$1,12 \cdot 10^{-6} + 2,0 \cdot 10^{-10} t$
Резистом 70	1250	8160	$1,08 \cdot 10^{-6} + 1,2 \cdot 10^{-10} t$
Резистом 80	1200	8350	$1,08 \cdot 10^{-6} + 6,5 \cdot 10^{-11} t$
Резистом 135	1200	7250	$1,35 \cdot 10^{-6} + 9,5 \cdot 10^{-11} t$
Резистом 140	1280	7150	$1,40 \cdot 10^{-6} + 8,4 \cdot 10^{-11} t$
Резистом 145	1350	7100	$1,45 \cdot 10^{-6} + 4,8 \cdot 10^{-11} t$

* t температура нагревателя, °С.

** Удельное электросопротивление, Ом·см.

В табл. 9 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.

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. 9 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°C, а при уменьшении диаметра нагревателя до 1 мм температура снижается на 50°C. Если диаметр нагревателя 0,20,4 мм, то максимально допустимую температуру следует принять на 100200°C ниже табличной.

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.

Таблица 9

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

Материал нагревателя	Рекомендуемая		Максимально допустимая	
	Непрерывный режим работы	Прерывистый режим работы	Непрерывный режим работы	Прерывистый режим работы
Нихром: X20H80, 20H80T, XH70Ю	1050	1000	1150	1100
Ферронихром: X15H60	950	900	1050	1000
X25H20, X23H18	850	800	1000	950
Фехраль: X13Ю4, X15Ю5	750	650	900	800
Хромаль: X23Ю5	1050	1000	1200	1150
X27Ю5Т	1150	1100	1300	1250
Ниобий			1650	
Молибден: в вакууме в защитной атмосфере			700 2200	
Вольфрам			3000	
Карборунд	1350	1300	1500	13001500
Силит	1250	1200	1300	12501300
Дисилицид молибдена	12001600		1680	15501680
Графит			3000	

В табл. 10 приведены рекомендуемые сплавы и их предельные температуры использования при работе в различных средах.

Металлические сплавы используют в качестве материала нагревателей до температур 1200-1250°C.

Таблица 10

Сплавы, рекомендуемые для работы в специальных атмосферах, °С [7]

Марка сплава	Предельные температуры использования в атмосфере, °С								
	Воздух	Вакуум, 10 ¹ ·10 ² Па	Водяной пар	Аргон	Азот	Углерод и сера- содержащие 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							

Нихром это сплавы никеля и хрома. Промышленностью выпускаются сплавы, содержащие от 15 до 27% хрома. Наиболее широко распространен сплав, содержащий 20% хрома. Нихром сочетает высокую жаростойкость (до 1250°C) и значительное электрическое сопротивление (1,051,40 (Ом·мм²)/м), температура его плавления 1370-1420°C, 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 нера-

ботоспособен. 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 2327%, алюминия 5%. Хромаль отличается высокой жаростойкостью, высокой температурой плавления (до 1510°C), большим удельным электрическим сопротивлением (1,31,47 (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 23 суток при 1100°C.

Фехраль сплав на основе системы железо хром алюминий. Температура плавления 1455°C, удельное электрическое сопротивление 1,181,34 (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. 11.

Таблица 11

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	

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.

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 510 В. Рекомендуется использовать температуру во время гибки 700-1000°C.

1.3.5.2. Конструкции металлических нагревателей. На рис. 6 приведены возможные конструкции металлических нагревателей.

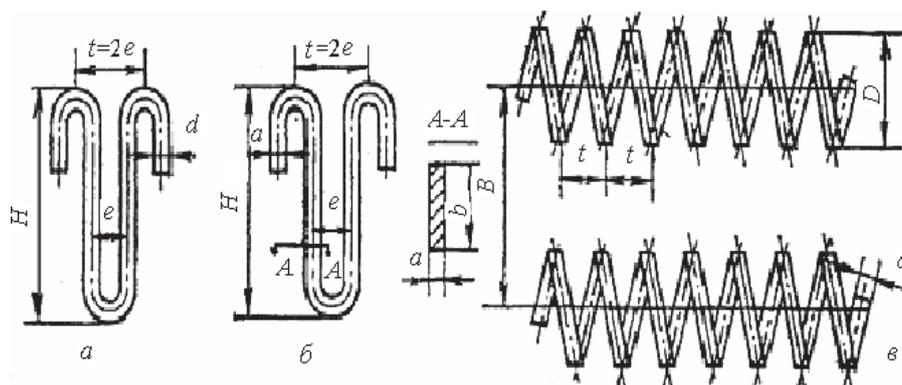


Рис. 6. Конструкции металлических нагревателей: *a* проволочный зигзагообразный; *б* ленточный зигзагообразный; *в* проволочный спиральный; *H* высота зигзага; *d* диаметр проволоки; *e* расстояние между осями зигзага; *a* и *b* ширина и высота ленты соответственно; *t* шаг спирали; *D* высота спирали; *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. 12. 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 12

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 $d = 47$ 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. 13.

Таблица 13

Максимальная высота зигзага проволочных нагревателей, мм

Способ крепления нагревателя	Диаметр проволоки d , мм			
	67	89	1011	1214
На своде: на двух крючках лежащий на двух опорах в керамических плитках	215 / 150	250 / 170	280 / 200	300 / 220
	170 / 130	200 / 160	225 / 180	245 / 200
	200 / 150			
На стенах: на штырях в керамических плитках	300 / 200	250		
	250 / 200			

Примечание. Числитель относится к проволоке CrNi; знаменатель к проволоке FeCrAl.

Подовые нагреватели могут быть изготовлены с высотой зигзага на 2030% 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. 14.

Максимальная высота зигзага ленточного нагревателя, мм

Температура нагревателя, °С	Нагреватели подвешены на крючках на стенах			Нагреватели размещены на двух опорах на полу 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 CrNi; знаменатель к ленте из сплавов FeCrAl.

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°С снижает стойкость КЭН в 23 раза. Среды с содержанием фтора, хлора, брома и сернистых соединений разрушают нагреватель.

Удельное электрическое сопротивление карборунда 8091900 (Ом·мм²)/м, плотность 22002300 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 $(56) \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$.

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 22,5 раза по сравнению с исходным, для чего в трансформаторе должны быть промежуточные ступени с коэффициентом увеличения напряжения порядка 1,11,2.

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 $1450\text{--}1680^\circ\text{C}$. 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 5001000°C и 14101460°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 23 ч) пройти интервал температур 5001000°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 70100 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 200300°C, а парами воды при 250500°C. Углекислый газ окисляет эти металлы при температуре выше 10001200°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. 15), поэтому печная установка должна быть оснащена питающим трансформатором, позволяющим регулировать напряжение нагревателя в процессе работы.

Таблица 15

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:

$$t_H = t_M^{\text{кон}} + (50 - 200)^\circ\text{C}. \quad (76)$$

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

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 $\omega_{ид}$, кВт/м²:

$$\omega_{ид} = \frac{C_o \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{\epsilon_n} + \frac{1}{\epsilon_m} - 1} \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right], \quad (77)$$

где $C_o = 5,76$; ϵ_n, ϵ_m – соответственно степень черноты нагревателя и изделия (табл. 16); T_n, T_m – термодинамическая температура соответственно нагревателя и изделия, К.

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

Таблица 16

Коэффициент степени черноты ϵ 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 динасовый	0,8			
Карборунд	0,7	Кирпич магнезитовый	0,9	Окисленное серебро	0,020,04	
Дисилицид молибдена	0,8			Кирпич керамический	0,9	Оксид алюминия плотный
Молибден	0,3	Тиглей	Окисленная сталь			0,8
Вольфрам	0,3			Неокисленная сталь	0,45	
Тантал	0,3	Плотный графит	0,9			Титан
Ниобий	0,3					
Платина	0,30,4					

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:

$$\omega = \omega_{ид} \alpha_{эф} \alpha_r \alpha_c \alpha_p, \quad (78)$$

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

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. 17).

Таблица 17

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

Система нагревателей	Коэффициент $\alpha_{эф}$
Проволочная спираль, $t/d = 2$:	
на полочке,	0,32
на трубе,	0,32
в балках.	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

Коэффициент шага α_r учитывает зависимость удельной поверхностной мощности от относительных витковых расстояний e/d , e/b , t/d для данной системы нагревателя. 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.

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

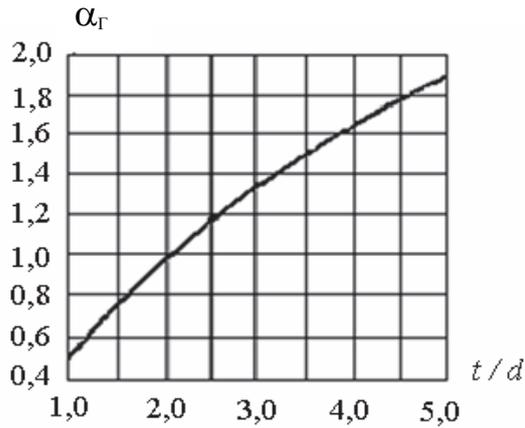


Рис. 7. Значение α_Γ для проволочно-спирального нагревателя

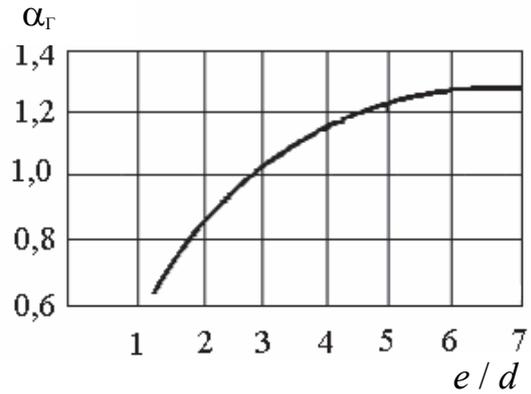


Рис. 8. Значение α_Γ для проволочно-зигзагообразного нагревателя

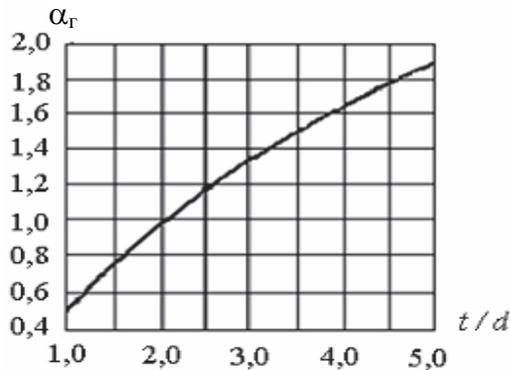


Рис. 9. Значение α_Γ для ленточного зигзагообразного нагревателя

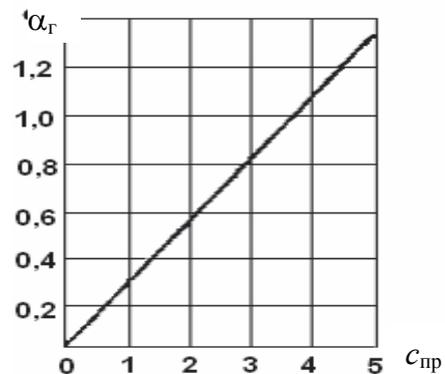


Рис. 10. Зависимость α_c от $c_{пр}$

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 $T_3 = T_H$ 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» $U_\phi = U_c / \sqrt{3}$.

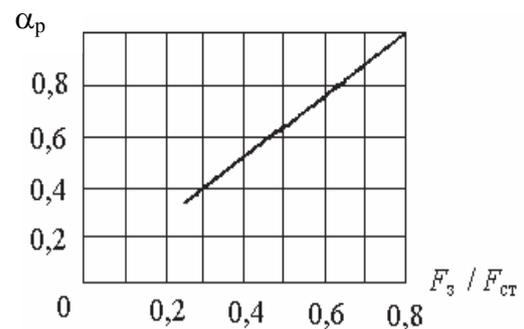


Рис. 11. Зависимость α_p от $F_3 / F_{ст}$

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 (74) рабочую температуру нагревателей, выбирают с учетом данных табл. 7 сплав, соответствующий требуемым условиям. Определяют по графикам на рис. 68 [1] или рассчитывают по формуле (77) 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. 18, причем большие значения относительной мощности стен $N_{ст.отн}$ соответствуют меньшим значениям степени черноты материала (табл. 19):

$$N_{ст.отн} = \frac{N}{F_{ст} \omega_{ид}}, \quad (79)$$

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

Таблица 18

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

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. 711 и табл. 17 находят коэффициенты α , позволяющие по формуле (78) 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:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^3 \rho N_{\phi}^2}{\pi^2 U_{\phi}^2 \omega}}; \quad (80)$$

длина l одной секции нагревателя, м:

$$l = 0,1 \sqrt[3]{\frac{2,5 N_{\phi} U_{\phi}^2}{\pi \rho \omega^2}}; \quad (81)$$

ленточный нагреватель с соотношением сторон $b / a = m$:

толщина a , м:

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^3 \rho N_{\phi}^2}{2m(m+1)U_{\phi}^2 \omega}}; \quad (82)$$

длина l одной секции нагревателя, м:

$$l = 0,1 \sqrt[3]{\frac{2,5 N_{\phi} U_{\phi}^2 m}{(m+1)^2 \rho \omega^2}}. \quad (83)$$

При использовании трехфазного тока мощность нагревателя N_{ϕ} составляет одну треть от общей мощности N . С помощью данных, приведенных в табл. 2021, 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 $\rho_{\text{усл}} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, т. е.

$$U_{\text{усл}} = U_{\text{действ}}(\rho_{\text{усл}} / \rho_{\text{действ}})^{0,5}. \quad (84)$$

Таблица 20

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

Сечение, мм ²	$e / b = 2,0$		$e / b = 0,9$	
	$l_{\text{опт}}$, М	$F_{\text{опт}}$, М ²	l_{max} , М	F_{max} , 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

* $e / b = 1,0$.

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

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

$$\omega_{\text{усл}} = \frac{\Pi}{3,54\sqrt{S}} \omega_{\text{действ}} \quad (85)$$

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 $m = 10$ $\omega_{\text{усл}} = 1,97\omega_{\text{действ}}$.

Таблица 21

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_{max} , м	F_{max} , м ²	$l_{\text{опт}}$, м	$F_{\text{опт}}$, м ²	l_{max} , м	F_{max} , м ²	$l_{\text{опт}}$, м	$F_{\text{опт}}$, м ²	l_{max} , м	F_{max} , м ²	$l_{\text{опт}}$, м	$F_{\text{опт}}$, 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				

После выбора оптимального варианта по формулам (80)(83) производят уточненный расчет геометрии нагревателей и размещение последних в рабочем пространстве печи.

Для этого можно воспользоваться практически установленными рациональными соотношениями (рис. 6 и табл. 1215):

ленточные нагреватели: $e / b \geq 0,9$, оптимальное значение $(e / b)_{\text{опт}} = 1,42,6$; высота зигзага при расположении нагревателя на стене $H = 150600$ мм, на своде и поду не более 250 мм;

проволочные зигзагообразные нагреватели: $t / d \geq 2,0$, оптимальное значение $(t / d)_{\text{опт}} = 3,24,8$.

проволочные спиральные нагреватели: $t / d \geq 2,0$, оптимальное значение $(t / d)_{\text{опт}} = 2,54,5$; $D = (68)d$ для нихрома и $D = (46)d$ для железохромалюминиевых сплавов.

1.3.6.2. Расчет карборундовых нагревателей. Карборундовые (SiC) нагреватели применяют в тех случаях, когда необходимо иметь температуру нагревателя 12501450°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.

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. 22.

Таблица 22

Характеристики карборундовых нагревателей

Назначение нагревателя	Тип нагревателя	Размеры				Площадь поверхности рабочей части, 10^{-4} м^2 .	Полное сопротивление в нагретом состоянии, Ом
		Длина рабочей части, м	Общая длина, м	Диаметр рабочей части, мм	Диаметр выводов, мм		
Промышленные	КНС-25/406	0,30	0,406	25		236	0,771,75
	КНС-25/440	0,30	1,12	25	25	236	1,11,55
	КНС-25/540	0,40	1,22	25	25	314	1,21,80
	КНС-32/711	0,56	0,711	32		564	1,12,80
	КНМВ-25/640	0,40	0,64	25	14	314	1,12,0

Назначение нагревателя	Тип нагревателя	Размеры				Площадь поверхности рабочей части, 10^{-4} м^2 .	Полное сопротивление в нагретом состоянии, Ом
		Длина рабочей части, м	Общая длина, м	Диаметр рабочей части, мм	Диаметр выводов, мм		
Лабораторные	КНМ-8×100×270	0,10	0,27	8	14	25,1	1,02,0
	КНМ-8×150×270	0,15	0,27	8	14	37,8	1,53,0
	КНМ-8×150×320	0,15	0,32	8	14	37,8	1,53,0
	КНМ-8×150×450	0,15	0,42	8	14	37,8	1,53,0
	КНМ-8×180×300	0,18	0,30	8	14	45,2	1,83,6
	КНМ-8×180×350	0,18	0,35	8	14	45,2	1,83,6
	КНМ-8×180×400	0,18	0,40	8	14	45,2	1,83,6
	КНМ-8×180×480	0,18	0,48	8	14	45,2	1,83,6
	КНМ-8×200×500	0,20	0,50	8	14	50,2	2,04,0
	КНМ-8×250×450	0,25	0,45	8	14	62,8	2,55,0
	КНМ-12×250×750	0,25	0,75	12	18	94,2	1,53,0
	КНМ-14×300×250	0,30	0,80	14	23	132,0	1,753,5
	КНЛ-12/280	0,2	0,28	12		75,4	4,49,0
	КНЛ-12/320	0,23	0,32	12		86,5	4,59,0
	КНЛ-16/320	0,23	0,32	16		115,0	4,59,0
ТН-55/40×200×75	0,2	0,35	55/40	55	327,0	1,02,6	

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 $\omega_{\text{ид}}$ определяют с использованием графиков на рис. 68 [1] и с помощью рис. 12 вычисляют ω , причём e/d задают:

$$\omega = \omega_{\text{ид}} \alpha_{\Gamma}. \quad (86)$$

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

$$\omega_p = \omega_{ид} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5, \quad (87)$$

где K_1 коэффициент эффективности излучения (принимается для карбидкремниевых нагревателей, равным 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 1,251,3); 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). Для зоны обжига туннельных печей величину K_4 принимают равной 1. K_5 выбирают в зависимости от материала плит свода. Для карбидокремниевых плит она составляет 0,60,8, для шамотных плит 0,50,6, для корундовых плит 0,6.

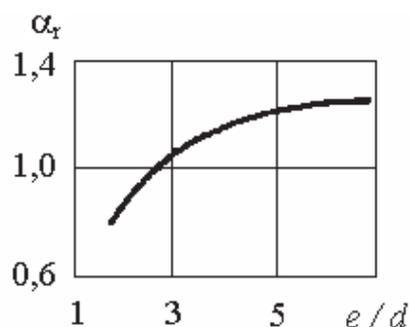


Рис. 12. Коэффициенты α_r для карборундовых нагревателей

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

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

Мощность одного нагревателя N , кВт, находят по формуле

$$N = \omega f_{раб}, \quad (88)$$

где $f_{раб}$ 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

$$U = \sqrt{10^3 NR}, \quad (89)$$

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 (87) подставляют меньшее значение сопротивления, приведенного в табл. 24. Верхний предел напряжения определяют по наивысшему значению сопротивления и увеличивают полученное значение в 2,53,0 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.

Основные характеристики нагревателей приведены в табл. 24.

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.

Расчет нагревателей из ДМ аналогичен расчету карборундовых нагревателей. Величина коэффициента α в формуле (76) имеет постоянное значение, поскольку при стандартной форме нагревателя коэффициент $\alpha_r = 1,27$ и $\alpha = \alpha_{эф} \alpha_r = 0,68 \cdot 1,27 = 0,87$.

Мощность рабочей части нагревателя из ДМ $N_{раб}$ находят по формуле (88), причем значение $f_{раб}$ берут из табл. 24.

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

Тип нагревателя	Раз-вернутая длина рабочей части, м	Поверхность рабочей части, $\times 10^{-4} \text{ м}^2$	Сопротивление двух выводов при 700°C $2R_{\text{выб}}, \text{ Ом}$	Температура, $^\circ\text{C}$					
				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
$\omega, \text{ кВт/м}^2$				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

$$N = N_{\text{раб}} \left(1 + \frac{2R_{\text{выб}}}{R_{\text{раб}}} \right), \quad (90)$$

где $R_{\text{выб}}$ сопротивление одного вывода нагревателя при температуре t , Ом; $R_{\text{раб}}$ сопротивление рабочей части при температуре t , Ом. Для стандартной формы нагревателя из ДМ с $d_{\text{раб}} = 6 \text{ мм}$, $d_{\text{выб}} = 12 \text{ мм}$, средней по длине температуре выводов 700°C мощность равна

$$N = N_{\text{раб}} \left(1 + \frac{0,75 \cdot 10^{-6} l_{\text{выб}}}{\rho_{\text{раб}} l_{\text{раб}}} \right), \quad (91)$$

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, Ом·м (рис. 13).

Полное сопротивление нагревателя R , Ом, вычисляют по формуле

$$R = 3,54 \cdot 10^4 (\rho_{\text{раб}} l_{\text{раб}} + 0,75 \cdot 10^{-6} l_{\text{выв}}). \quad (92)$$

При включении холодной печи пусковое напряжение в течение 210 мин должно постепенно увеличиваться до величины, составляющей 3035% рабочего напряжения. В момент пуска мощность печи будет превышать величину N .

1.3.7. Расчёт вакуумной системы. Расчет вакуумной системы проводится, как правило, в два этапа. На первом этапе осуществляется проектный расчет, в результате которого определяются принципиальная схема системы, типы и марки насосов, коммутирующие элементы и ориентировочные размеры трубопроводов. На втором этапе осуществляется проверочный расчет, в результате которого уточняются характеристики насосов, размеры трубопроводов и коммутирующих элементов вакуумной системы, а также определяется время, необходимое для достижения заданного уровня вакуума.

Исходными данными для расчета являются:

- характер технологического процесса, для которого проектируется вакуумная система;

- начальное остаточное давление в системе, Па;

- время достижения необходимого вакуума, мин;

- размеры вакуумной камеры или площадь, обращенная в вакуумную полость;

- материалы обрабатываемых изделий и камеры, а также их характеристики (удельное газовыделение и скорость удельного газовыделения).

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 фор-

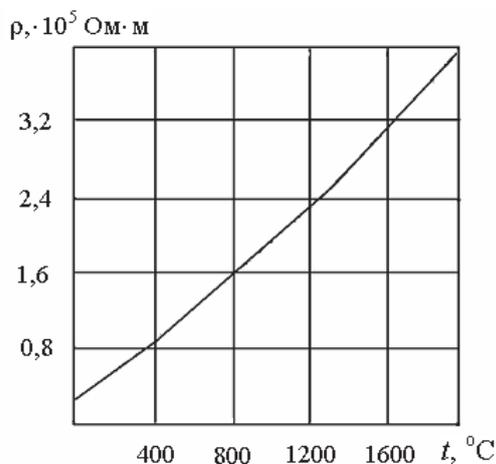


Рис. 13. Зависимость удельного электрического сопротивления рабочей части нагревателя из дисилицида молибдена от температуры

мата А4. На принципиальной схеме вакуумной системы изображаются все элементы и устройства, необходимые для осуществления заданных вакуумных процессов, контроля над их осуществлением, а также все вакуумные связи между элементами. Элементы и устройства вакуумных систем на принципиальных схемах изображаются с помощью условных графических и буквенно-цифровых обозначений в соответствии с ГОСТ 2.796-95 «ЕСКД. Обозначения условные и графические. Элементы вакуумных систем» и 2.797-81 «ЕСКД. Правила выполнения вакуумных схем».

2. Расчет газовых потоков.

Суммарный поток газа $Q_{\text{вх}}$ (Па м³/с), поступающего в вакуумную систему, имеет несколько составляющих:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{изд}} + Q_{\text{газ}} + Q_{\text{пр}} + Q_{\text{упл}}, \quad (93)$$

где $Q_{\text{изд}}$ – поток натекания из обрабатываемых изделий; $Q_{\text{газ}}$ – поток газовой выделенной со стен камеры; $Q_{\text{пр}}$ – поток, обусловленный газопроницаемостью через стенки вакуумной камеры; $Q_{\text{упл}}$ – поток натекания в систему за счет несовершенства уплотнений.

Этот суммарный поток натекания подлежит откачке при стационарном режиме работы вакуумной системы.

Поток газов, поступающих в вакуумную систему из обрабатываемых изделий $Q_{\text{изд}}$, (Па м³)/с оценивают по формуле:

$$Q_{\text{изд}} = (M q_{\text{г}} \beta_{\text{г}}) / t_0, \quad (94)$$

где M – масса обрабатываемых изделий, кг; $q_{\text{г}}$ – удельное газовыделение из материала изделия, (Па м³)/кг; $\beta_{\text{г}}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность газовыделения, обычно $\beta_{\text{г}} = 1,52$; t_0 – время вакуумной обработки изделия, с.

Поток газов, выделяющихся со стенок в вакуумную систему вследствие нестационарного диффузионного газовыделения, определяется по формуле:

$$Q_{\text{газ}} = q_{\text{г}}' S, \quad (95)$$

где $q_{\text{г}}'$ – скорость удельного газовыделения с поверхности стенок вакуумной системы, Па м³/(м²·с); S – площадь поверхности стен камеры, или площадь поверхности, обращенной в вакуумную полость, м².

Если вакуумная камера имеет стенки из различных материалов, то общее газовыделение равно сумме газовыделений с поверхности всех элементов. При проектировочном расчете вакуумной системы поток газов принимается постоянным во времени. Скорость удель-

ного газовыделения q_{Γ}' поверхностей, имеющих комнатную температуру, принимается равной значению скорости газовыделения после одного часа откачки.

Поток газа $Q_{\text{пр}}$, поступающего в вакуумную систему вследствие проницаемости через стенки вакуумной камеры, может быть оценен по формуле:

$$Q = K_0 S \frac{p_2^{1/j} - p_1^{1/j}}{h} \exp\left(-\frac{E_{\text{пр}}}{jRT}\right), \quad (96)$$

где K_0 – константа проницаемости; S – площадь поверхности и h – толщина стенки вакуумной камеры; p_1 и p_2 – давление внутри и снаружи вакуумной камеры, Па; j – количество атомов в молекуле газа; $E_{\text{пр}}$ – энергия активации газопроницаемости, Дж/моль; T – термодинамическая температура стенки; $R = 8,31$ Дж/моль К – универсальная газовая постоянная. Значения K_0 , $E_{\text{пр}}$ для различных материалов приведены в таблице 3 приложения [24].

Стационарная проницаемость газа через стенки вакуумной системы, изготовленные из различных материалов или различной толщины, рассчитывается как сумма проницаемостей через отдельные участки. Также суммируются потоки газопроницаемости отдельных газов.

Поток $Q_{\text{упл}}$ газов, поступающих в вакуумную систему через уплотнения разборных соединений, а также через неразборные соединения, которые в принципе не могут обеспечить абсолютную герметичность, можно оценить по формуле:

$$Q_{\text{упл}} = K_{\text{в}} Q_{\text{ти}} N_{\text{с}} / n_{\text{с}}, \quad (97)$$

где $Q_{\text{ти}}$ – минимальный поток газов, регистрируемый течеискателем; $K_{\text{в}}$ – вероятность наличия течи, пропускающей поток газа, меньшей чувствительности течеискателя; $N_{\text{с}}$ – число соединений вакуумной системы; $n_{\text{с}}$ – число одновременно проверяемых соединений. Минимальное значение газового потока $Q_{\text{упл}}$ соответствует испытанию на герметичность всей вакуумной системы в целом ($n_{\text{с}} = N_{\text{с}}$).

3. Выбор типа используемых насосов (начиная с высоковакуумного участка) с учетом требуемого уровня вакуума, времени его достижения и суммарного потока натекания, а также характера процесса, для которого проектируют вакуумную систему. При выборе типа насоса учитывают характер работы насоса: возможность (либо принципиальную невозможность) использования масляных насосов и т. д.

Для нахождения номинальной быстроты действия насоса используют формулу

$$S_{\text{эф}} = Q_{\text{вх}} \frac{Q_{\text{вх}}}{K_{\text{и1}} P_1 - P_{\text{пр}}}, \quad (98)$$

$$S_{\text{н}} = Q_{\text{вх}} / (K_{\text{и1}} P_1 - P_{\text{пр}}), \quad (99)$$

где $Q_{\text{вх}}$ (Па м³/с) – суммарный поток газа, $K_{\text{и1}}$ – коэффициент использования насоса на высоковакуумном участке; P_1 – остаточное давление в вакуумной камере, Па; $P_{\text{пр}}$ – предельное давление выбранного типа насоса, Па. $K_{\text{и1}}$ – выбирают исходя из типа насоса и значения $S_{\text{эф}}$, определяемого по формуле:

$$S_{\text{эф}} = Q_{\text{вх}} / P_1, \quad (100)$$

и зависимостей, приведенных на рис. 4,5,4,8 [24]. Оптимальное значение коэффициента использования насоса зависит от типа насоса и числа n элементов вакуумной системы на участке от насоса до откачиваемого объекта. С учетом полученного значения $S_{\text{н}}$ выбирают ближайший по скорости действия насос.

При последовательном соединении насосов в вакуумной системе рабочее давление механического насоса (для насосов, сжимающих газ, выбирают по максимальному выпускному давлению высоковакуумного насоса с коэффициентом запаса $\phi = 2$, а для сорбционных насосов их наибольшее рабочее давление с тем же коэффициентом запаса). Далее рассчитывают $S_{\text{н}}$ для второго насоса и выбирают ближайший по скорости действия низковакуумный насос.

Здесь же проводится оценка совместимости работы выбранных насосов путем построения рабочих характеристик насосов по номинальным скоростям откачки и анализа характера перекрывания этих характеристик. Условием совместной работы двух насосов является выполнение соотношения:

рабочее давление низковакуумного насоса должно быть меньше, чем наибольшее выпускное давление высоковакуумного насоса.

Условием запуска также может являться отсутствие двойного пересечения кривых S_Q и $S_{\text{эф1}}$ в интервале рабочих давлений на графике рабочих характеристик насосов (рис. 14).

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

Находят общую проводимость участка вакуумной системы от высоковакуумного насоса до вакуумной камеры по формуле:

$$U_{\text{о1}} = S_{\text{н1}} K_{\text{и1}} / (1 - K_{\text{и1}}), \quad (101)$$

где $S_{н1}$ и $K_{н1}$ номинальная скорость откачки и коэффициент использования выбранного высоковакуумного насоса соответственно.

В случае параллельного или последовательного соединения трубопроводов при расчете проводимости используют выражения:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i, \quad (102)$$

$$\frac{1}{U} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i} \quad (103)$$

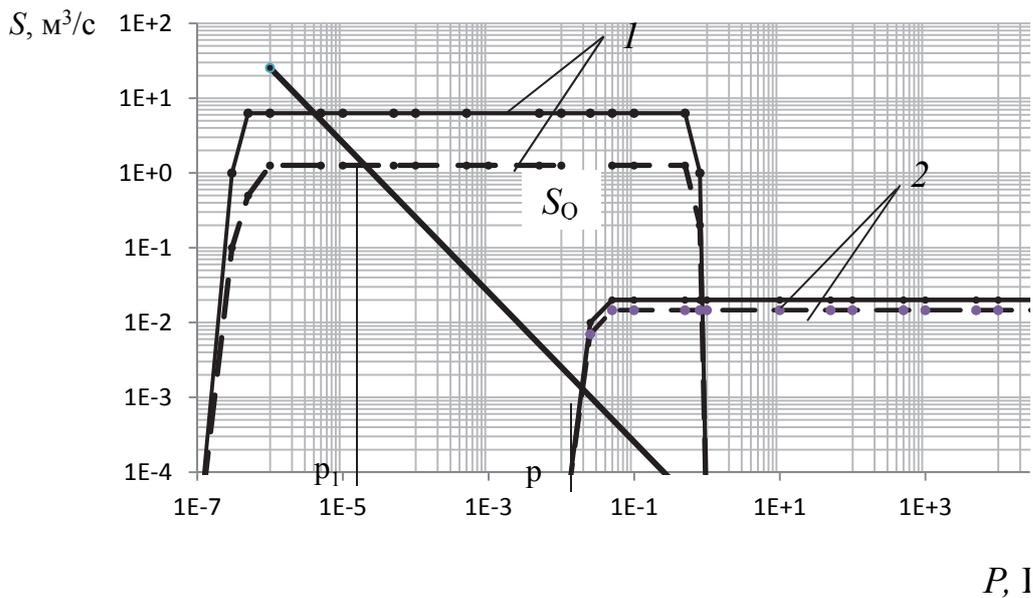


Рис. 14. Определение возможности совместной работы двух насосов при постоянном потоке натекания: 1,2 Зависимость величин $S_{н1}$, $S_{н2}$, $S_{эф1}$, $S_{эф2}$ от давления для высоковакуумного и низковакуумного насосов

Приняв, что элементы данного участка вакуумной системы имеют одинаковую проводимость и с учетом соотношения для последовательно соединенных элементов (101) определяют проводимость каждого элемента по формуле:

$$U_{oj} = U_o n, \quad (104)$$

где n число элементов.

Для расчета размеров трубопроводов (диаметра D или сторон сечения насоса a , b) используют соотношения, приведенные в табл. 4.5 [24], задаваясь значениями длины трубопроводов с учетом режима течения газов в трубопроводах.

Режим течения газов оценивают по величине критерия Кнудсена (K_n). Молекулярный режим течения имеет место при значениях $K_n > 0,33$. Вязкостный (ламинарный) режим течения имеет место при $K_n < 0,01$. Переходному режиму соответствует $0,01 < K_n < 0,33$.

В свою очередь критерий Кнудсена определяют по формуле:

$$K_n = L / d_{эф}, \quad (105)$$

где L – средняя длина свободного пробега молекул газа при определенном давлении, м Па; $d_{эф}$ – эффективный линейный размер рассматриваемого участка.

$$L = L_0 / P, \quad (106)$$

где $L_0 = 6,72 \cdot 10^{-3}$ м средняя длина свободного пробега для воздуха; P давление в камере, Па.

Эффективный линейный размер вакуумной камеры определяют по формуле:

$$d_{эф} = 4V / S, \quad (107)$$

где V – объем камеры; S – площадь сечения.

При вычислениях по формулам, приведенным в табл. 4.5 [24], линейные размеры подставляются в метрах, площади в метрах квадратных, давление в Паскалях, проводимость в метрах кубических на секунды.

В области промежуточного молекулярно-вязкостного режима течения газа проводимость трубопровода рассчитывается по полуэмпирической формуле Кнудсена:

$$U'' = 0,9U' + U, \quad (108)$$

где U' – проводимость при молекулярном течении газа; U – проводимость при вязкостном течении.

Если трубопровод диаметром D имеет изгибы под углом 90° , то при вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах течения это учитывается как удлинение на $1,33D$ при каждом изгибе. При определении проводимости трубопровода при температуре, отличной от комнатной (293К), используется температурный коэффициент. При этом U вычисляют по формуле:

$$U = U_{293} K_T, \quad (109)$$

где $K_T = \sqrt{\frac{T}{293}}$.

При расчете проводимости по определенному газу, который может преобладать в составе откачиваемых газов, также вводят поправочный коэффициент:

$$U = U_{\text{возд}} K_{\mu}, \quad (110)$$

$$K_{\mu} = \sqrt{\frac{\mu_{\text{в}}}{\mu}}, \quad (111)$$

где $\mu_{\text{в}} = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль молярная масса воздуха; μ молярная масса откачиваемого газа.

После расчета размеров трубопроводов, подбора остальных элементов (вентилей, затворов, ловушек) проводится уточнение величины проводимости участков вакуумной системы (высоко- и низковакуумного). При этом полученная в результате проводимость не должна быть меньше, чем оценочная в начале расчета по формуле (101). Если она все-таки получается меньшей заданного значения, то необходимо произвести повторный подбор элементов вакуумной системы с использованием больших размеров элементов и соответственно имеющих большую проводимость.

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

Подбор ловушек и вентиляей осуществляют исходя из рассчитанных размеров трубопроводов (диаметр ловушек и затворов должен быть максимально согласован с размерами трубопровода).

Рекомендуется выбирать следующие номинальные размеры условных проходов элементов вакуумных систем (мм): 0,1; 0,25; 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300.

Для использования в фланцевых и штуцерных соединениях и элементах трубопроводов допускается применение следующих номинальных размеров условных проходов (мм): 8; 12; 20; 32; 50; 80; 125; 200; 320; 500; 800; 1250; 2000; 3150; 5000 (ГОСТ 18626-73).

Расчет размеров форвакуумного баллона.

Объем форвакуумного баллона определяют по формуле:

$$V = Q_{\text{вх}} t_{\text{фб}} / (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}^*), \quad (112)$$

где V – объем форвакуумного баллона, м³; $t_{\text{фб}}$ промежуток времени, в течение которого отключают форвакуумный насос; P_{max} и P_{min}^* – наибольшее и наименьшее давление в форвакуумном баллоне, Па.

$$P_{\text{min}} = Q_{\text{вх}} (S_{\text{H}_2} + U) / (S_{\text{H}_2} \cdot U), \quad (113)$$

$$P_{\min} = Q_{\text{вх}} \frac{S_{\text{н2}} + U}{S_{\text{н2}} \cdot U}, \quad (114)$$

где U – проводимость трубопровода между форбаллоном и форвакуумным насосом, м³/с.

Проводимость трубопровода между форбаллоном и форвакуумным насосом определяется с учетом проводимости всех элементов: трубопроводов, ловушки и клапанов по соотношению, используемому для оценки проводимости при последовательном соединении элементов (101).

$$P_{\min}^* = 3P_{\min}, \quad (115)$$

$$P_{\max} = 0,8P_{\text{в}}, \quad (116)$$

где $P_{\text{в}}$ – выпускное давление высоковакуумного насоса, Па.

6. Расчет распределения давления по длине участков вакуумной системы.

Давление $p_{\text{ни}}$ во входном сечении i -того вакуумного насоса определяется по формуле:

$$p_{\text{ни}} = (Q_{\text{вх}} / S_{\text{ни}}) + p_{\text{при}}, \quad (117)$$

где $Q_{\text{вх}}$ – общий поток натекания, поступающий в вакуумную систему; $S_{\text{ни}}$ – номинальная скорость откачки насоса; $p_{\text{при}}$ – предельное давление насоса.

Давления в сечениях между элементами участка вакуумной системы рассчитываются в соответствии с формулой:

$$p_{\text{ik}} = (Q_{\text{вх}} / U_{\text{ki}}) + (Q_{\text{вх}} / S_{\text{ни}}) + p_{\text{при}}, \quad (118)$$

где $Q_{\text{вх}} / U_{\text{ki}}$ – повышение давления на последующих элементах i -того участка вакуумной системы.

Используя вышеприведенные соотношения и величины проводимостей элементов, оценивают перепад давления на всех элементах, рассчитывая давление на входе и выходе каждого. Полученные значения заносят в таблицу и строят график распределения давления на участках вакуумной системы (табл. 25, рис. 15).

7. Расчет времени достижения необходимого уровня вакуума в системе.

Выражение, характеризующее длительность откачки, имеет следующий вид:

$$t = \frac{V}{S_{\text{эф}}} \ln \frac{P_0 - \frac{Q_{\text{н}}}{S_{\text{эф}}}}{P - \frac{Q_{\text{н}}}{S_{\text{эф}}}}, \quad (119)$$

Проводимости и распределение давления по длине низковакуумного участка системы

Название элемента	$U, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta P, \text{ Па}$	Давление, Па	
			на входе элемента	на выходе элемента
Трубопровод №7	0,605	$4,2 \cdot 10^{-5}$	$1,131 \cdot 10^{-2}$	$1,127 \cdot 10^{-2}$
Клапан №6	0,47	$5,41 \cdot 10^{-5}$	$1,136 \cdot 10^{-2}$	$1,131 \cdot 10^{-2}$
Трубопровод №5	0,605	$4,20 \cdot 10^{-5}$	$1,140 \cdot 10^{-2}$	$1,136 \cdot 10^{-2}$
Ловушка №4	0,37	$6,87 \cdot 10^{-5}$	$1,147 \cdot 10^{-2}$	$1,140 \cdot 10^{-2}$
Трубопровод №3	0,605	$4,20 \cdot 10^{-5}$	$1,151 \cdot 10^{-2}$	$1,147 \cdot 10^{-2}$
Клапан №2	0,47	$5,41 \cdot 10^{-5}$	$1,156 \cdot 10^{-2}$	$1,151 \cdot 10^{-2}$
Трубопровод №1	0,605	$4,20 \cdot 10^{-5}$	$1,160 \cdot 10^{-2}$	$1,156 \cdot 10^{-2}$

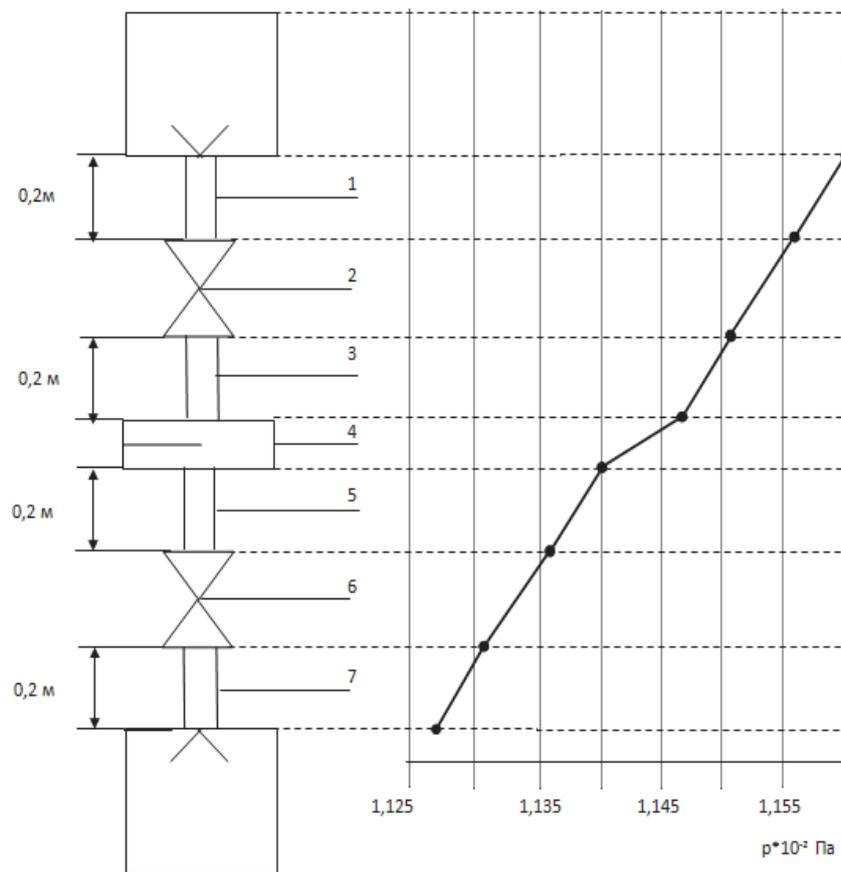


Рис. 15. Схема низковакуумного участка вакуумной системы и распределение давления по длине: 1, 3, 5, 7 трубопроводы; 2, 6 клапаны; 4 ловушка

где t – длительность откачки, с; V – объем вакуумной камеры, м^3 ; P_0 и P – давления, Па. Для низковакуумного участка P_0 и P давление снаружи камеры и максимальное выпускное давление высоковакуум-

ного насоса, взятое с коэффициентом 0,5, Па соответственно. Для высоковакуумного участка P_0 и P максимальное выпускное давление высоковакуумного насоса, взятое с коэффициентом 0,5 и остаточное давление в камере, Па.

Эффективную скорость откачки $S_{эф}$ рассчитывают по формуле:

$$S_{эф} = \frac{S_n \times U}{S_n + U}, \quad (120)$$

где S_n – номинальная скорость откачки насоса; U – проводимость соответствующего участка вакуумной системы, рассчитанная с учетом подобранных элементов. Отдельно рассчитывается время откачки на высоко- и низковакуумном участках. Значения $S_{эф}$ уточняют исходя из рассчитанных ранее значений проводимости участков.

8. Составление сводной таблицы, характеризующей данную вакуумную систему с указанием названия (и при наличии марки) подобранных элементов, их обозначения на схеме и основных характеристик.

На основании полученных расчетных данных составляют результирующую табл. 26.

Таблица 26

Результирующая таблица вакуумной системы

Наименование	Характеристики	Значения
Высоковакуумный участок		
Насос ТМН-5000	Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-7} \quad 1 \cdot 10^{-2}$
	Быстрота откачки воздуха в рабочем диапазоне давлений, $\text{м}^3/\text{с}$	6,3
	Предельное остаточное давление, Па	10^{-7}
	Наибольшее выпускное давление, Па	10^0
	Расход охлаждающей воды, $\text{дм}^3/\text{с}$	0,06
	Диаметр впускного патрубка, мм	500
	Диаметр выпускного патрубка, мм	100
Трубопровод 1×1	Диаметр условного прохода d_y , м	0,32
	Проводимость, $\text{м}^3/\text{с}$	8,79
Трубопровод 2×1	Диаметр условного прохода d_y , м	0,25
	Проводимость, $\text{м}^3/\text{с}$	9,45
Трубопровод 3×1	Диаметр условного прохода d_y , м	0,5
	Проводимость, $\text{м}^3/\text{с}$	12,21
Затвор ЗВЭ-250×1	Диаметр условного прохода d_y , м	0,25
	Проводимость, $\text{м}^3/\text{с}$	8,59
Ловушка ЛВПС-400×1	Диаметр условного прохода d_y , м	0,4
	Проводимость, $\text{м}^3/\text{с}$	5,9

Наименование	Характеристики	Значения
Низковакуумный участок		
Насос золотниковый АВЗ-20Д	Диапазон рабочих давлений, Па	$5 \cdot 10^{-2} \text{ } 1 \cdot 10^5$
	Быстрота откачки воздуха в рабочем диапазоне давлений, м ³ /с	0,02
	Предельное остаточное давление, Па	$1 \cdot 10^{-2}$
	Диаметр впускного патрубка, мм	40
Трубопровод 4×4	Диаметр условного прохода d_y , м	0,1
	Проводимость U , м ³ /с	0,605
Ловушка ЛА-100×1	Диаметр условного прохода d_y , м	0,1
	Проводимость U , м ³ /с	0,370
Клапан ВЭП-100×2	Диаметр условного прохода d_y , м	0,1
	Проводимость, м ³ /с	0,470

1.4. Графическая часть проекта

В графической части курсового проекта (работы) необходимо выполнить чертеж основного аппарата или модуля, включающего несколько типов аппаратов, и 35 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:
- условные обозначения согласно ГОСТ, ОСТ, ТУ или в соответствии с чертежом;
 - условия сварки (в сложных аппаратах дается таблица сварных швов, нормы оценки качества сварных соединений);
 - условия проверки и испытания (наливом, гидравлические испытания, пневматические и т. д.); температура и среда испытания;
 - условия поставки и монтажа;
 - футеровка;
 - 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 БГТУ 001-2010**, а также методическими указаниями, приведенными в данном издании для курсовых работ и проектов (раздел 1).

Следует четко понимать, что дипломный проект (работа) являются 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 иллюстрировать и обосновать инженерные решения, принятые дипломником при выполнении задания. Дипломный проект (работа) представляют расчетно-исследовательский материал в виде законченного, многосторонне продуманного труда.

В соответствии с СТП БГТУ 001-2010 итоговая квалификационная работа, подтверждающая квалификацию инженера-химика-технолога, может быть выполнена в одном из трех вариантов:

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

При этом *дипломные проекты* связаны с модернизацией реализованной промышленной технологии. Мероприятия по модернизации

разрабатываются на основе литературных сведений об инновационных научно-технических разработках либо на основе результатов экспериментальных исследований, проведенных в период преддипломной практики и дипломного проектирования. В последнем случае проект включает исследовательскую часть, отражающую содержание, объем и результаты проведенных экспериментов. Дипломные работы имеют научный характер. Они предполагают проведение достаточно большого объема научных исследований. Как правило, при выполнении дипломной работы студенты участвуют в научно-технических конференциях и в подготовке научных публикаций.

2.1. Тематика дипломных проектов (работ)

Тематика дипломных проектов обычно коррелирует с тематикой курсовых работ, что позволяет студенту более глубоко изучить физико-химические основы и технологические особенности соответствующих процессов. Вместе с тем, при изменении перечня базовых предприятий и организаций в период преддипломной практики либо при возникновении новых производственных задач технологического профиля тематика дипломных проектов может существенно измениться.

Тематика дипломных работ связана обычно с научными направлениями, развиваемыми на выпускающей кафедре либо в других научных структурах Республики Беларусь. В ряде случаев тематика студенческой научно-исследовательской работы на предыдущих курсах совпадает с тематикой дипломной работы, что благоприятствует продолжению обучения в магистратуре и аспирантуре.

2.2 Структура дипломных проектов (работ)

Структура и содержание пояснительной записки (табл. 27) и графического материала для трех указанных вариантов дипломов отличается. Из 8 обязательных листов графического материала 3 листа аналогичны для всех проектов (аппаратурно-технологическая схема, схема автоматизации, 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 случае выполнения *дипломного проекта* инженерные решения могут быть приняты на основании литературно-патентного поиска и должны быть обоснованы инженерно-технологическими расчетами.

Структура основной части дипломных проектов и работ

Дипломный проект	Дипломный проект с исследовательской частью	Дипломная работа
1	2	3
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, инженерные решения, описание технологической схемы, инженерно-технологические расчеты, выбор и расчет основного и вспомогательного оборудования)	2. Технологический раздел (литературно-патентная проработка, <i>исследовательская часть</i> , инженерные решения, описание технологической схемы инженерно-технологические расчеты, выбор и расчет основного оборудования)	2. Литературный обзор (анализ литературных и патентных сведений по поставленной научной задаче)
		3. Методика исследований (отдельные подразделы для каждого метода исследований)
3. Автоматизация производства	3. Автоматизация производства	4. Экспериментальный раздел (отдельные подразделы для каждой группы экспериментов, статистическая обработка экспериментальных данных)
4. Контроль качества и метрологическое обеспечение производства	4. Контроль качества и метрологическое обеспечение производства	5. Технологический раздел (инженерные решения, описание технологической схемы, инженерно-технологические расчеты, подбор основного оборудования)
5. Мероприятия по охране окружающей среды	5. Мероприятия по охране окружающей среды	6. Мероприятия по охране окружающей среды
6. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности	6. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности	7. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности
7. Экономический раздел	7. Экономический раздел	8. Экономический раздел

Графический материал, кроме указанных трех листов, включает чертежи основного и вспомогательного оборудования. Возможно дополнение графического материала иллюстрациями, отражающими важные характеристики получаемых изделий или 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 34 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 13 листа чертежей оборудования.

При выполнении *дипломной работы* в отдельных разделах представляются данные литературного анализа, методика все проведенных экспериментов, их результаты и интерпретация. На основании изложенных результатов принимаются инженерные решения по разработке технологического маршрута изготовления материала или изделия, наиболее перспективного по результатам реализованных экспериментов. Графический материал обычно включает 912 листов и представляет таблицы, графики, диаграммы, интерпретационные модели экспериментальных данных. Возможно дополнение графического материала 12 листами чертежей оборудования.

2.3. Указания по выполнению разделов пояснительной записки

2.3.1. Обоснование научной или производственной задачи

Первым разделом диплома в любом из трех вариантов является небольшой раздел по обоснованию необходимости модернизации конкретного производства или актуальности изучения определенной научной проблемы. При аргументации такого обоснования необходимо представить краткую информацию по существующему положению проблемы на соответствующем производстве либо в заданной научно-технической области. При этом основное внимание уделяется нерешенным на данный момент задачам, которые имеют целью повышение качества выпускаемой продукции, снижение энерго- и материалоемкости производства, повышение экологической безопасности для дипломных проектов или создание новых материалов, разработка новых процессов и технологий, исследование физико-химических закономерностей различных систем для дипломных работ. Следует помнить, что в данном разделе не фор-

мулируются инженерные решения, а только обосновывается постановка задачи модернизации или исследования.

2.3.2. Технологический раздел

Выполнение этого раздела осуществляется аналогично курсовым проектам и работам (раздел 1). Однако объем расчетов увеличивается. Не обходимо внимательно следить за корреляцией инновационных и базовых решений при выполнении всех видов расчетов. Здесь в дополнение к разделу 1 приводятся примеры результатов технологических расчетов для дипломных проектов (трафаретное травление Si_3N_4 , химико-механическое полирование) и для дипломных работ (осаждение TiO_2 , получение кристаллов твердых растворов).

Пример 1 (для проектов). *Поэтапная схема расчета продолжительности цикла и материального баланса установки одностороннего химико-механического полирования кремния пластин в производстве кремниевых пластин диаметром 100 мм.*

1) Расчет продолжительности единичного цикла обработки. В данном примере рассмотрен расчет для установки «Ладья 2» для случая толщины съема 30 мкм и скорости съема 1 мкм/мин. В этом случае единичным циклом является обработка 64 пластин, которые закрепляются на дюралюминиевой оправке. Время цикла полирования монокристаллических подложек кремния складывается из следующих составляющих, которые частично могут быть приняты по данным базовой технологии, частично рассчитываются с учетом принятых инженерных решений:

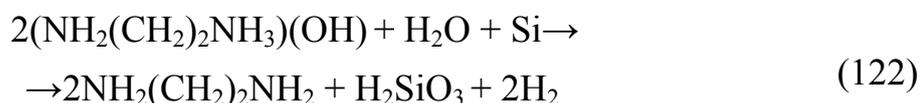
$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{загр.}} + \tau_{\text{герм.}} + \tau_{\text{прит.}} + \tau_{\text{съема}} + \tau_{\text{сниж. давл.}} + \tau_{\text{пром.}} + \tau_{\text{разг.}} + \tau_{\text{выгр.}} \quad (121)$$

где $\tau_{\text{загр.}}$ – время загрузки оправок с приклеенными пластинами в установку (при ручном монтаже принимается 4 подхода по 1,5 мин.); $\tau_{\text{герм.}}$ – время на герметизацию установки (1 мин.); $\tau_{\text{прит.}}$ – время на притир кремниевых пластин к полировальному материалу и достижение необходимого давления прижатия (1,5 мин.); $\tau_{\text{съема}}$ – время съема слоя кремния (определяют на основании толщины и скорости съема); $\tau_{\text{сниж. давл.}}$ – время снижения давления прижатия (0,5 мин.); $\tau_{\text{пром.}}$ – время промывки деионизованной водой (6 мин.); $\tau_{\text{разг.}}$ – время на разгерметизацию установки (1 мин); $\tau_{\text{выгр.}}$ – время выгрузки оправок с приклеенными пластинами (10 мин с учетом отклейки пластин от оправки).

$$\tau_{\text{ц}} = 9 + 1 + 1,5 + 30 + 0,5 + 6 + 1 + 10 = 59 \text{ (мин)}$$

2) Расчет *приходных статей* материального баланса включает определение 1) массы пластин кремния; 2) массы полировальной суспензии, содержащей воду, нанодисперсный абразивный диоксид кремния, щелочной реагент этилендиамин и стабилизирующую добавку в виде натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы Na-КМЦ в соотношении (мол. %): H₂O 100; SiO₂ 4,7; C₂H₄(NH₂)₂ 1; Na-КМЦ 0,00005; 3) массы воды на промывку после полирования.

3) Расчет *расходных статей* проводится с учетом особенностей протекания основных процессов в аппарате. В частности, удаление Si с поверхности пластины происходит по двум механизмам: механическое образование выколов (принято 40%) и химическое растворение Si (принято 60%). Механическое образование выколов происходит в процессе механического воздействия абразивных частиц SiO₂ суспензии на обрабатываемую поверхность. Химическое растворение Si происходит в соответствии с химической реакцией (122):



Кроме того, в расходе учитывается испарение воды в зоне полирования. Данные расчетов материального баланса приведены в табл 28.

Таблица 28

Материальный баланс установки химико-механического полирования кремниевых пластин

Приход		Расход	
Компонент	Масса, г	Компонент	Масса, г
1. Пластины Si	576,956	1. Пластины Si	541,989
2. Суспензия	18108,120	2. Отраб. суспензия	6343,206
В т.ч.:		В т.ч.:	
H ₂ O	15216,152	H ₂ O	5258,585
SiO ₂	2384,824	SiO ₂	834,689
C ₂ H ₄ (NH ₂) ₂	507,024	C ₂ H ₄ (NH ₂) ₂	177,458
Na-КМЦ	0,120	Na-КМЦ	0,042
		H ₂ SiO ₃	58,445
		Si (выколки)	13,987
3. H ₂ O (на промывку)	120000,0	3. Вода после промывки	120000,0
		В т. ч.:	
		H ₂ O (на пластинах)	60,0
		H ₂ O (на слив)	119940,0
		4. Газообр. продукты,	29,603
		В т.ч.:	
		H ₂ O	26,606
		H ₂	2,997

Приход		Расход	
Компонент	Масса, г	Компонент	Масса, г
		5. Суспензия (остаток)	11770,278
		В т. ч.6	
		H ₂ O	9890,499
		SiO ₂	1550,135
		C ₂ H ₄ (NH ₂) ₂	329,566
		Na-КМЦ	0,078
<i>Итого</i>	138685,07	<i>Итого</i>	138685,08

Таблица 29

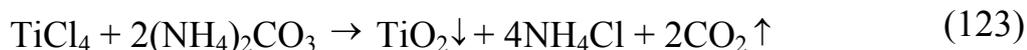
Материальный баланс стадии осаждения диоксида титана

Приход			Расход				
Компонент	Масса, кг	Мас. %	Компонент	Масса, кг	Мас. %	Объем, м ³	Об. %
1 Титансо-держательный раствор, В т.ч.:			1 Суспензия, В т.ч.:				
TiCl ₄	129134	29,38	TiO ₂	52741	5,12	-	-
C ₃ H ₈ O	309922	70,52	H ₂ O	522108	50,70	-	-
Примеси	409	0,09	(NH ₄) ₂ CO ₃	3915	0,38	-	-
			NH ₄ Cl	141082	13,70	-	-
			C ₃ H ₈ O	309922	30,10	-	-
			Примеси	540	0,05	-	-
<i>Итого</i>	439465	100	<i>Итого</i>	1030308	100	-	-
2 Раствор карбоната аммония, В т.ч.:			2 Газовая фаза, В т.ч.:				
(NH ₄) ₂ CO ₃	130493	20,00	TiCl ₄	3874	6,3	456	1,5
Примеси	131	0,02	CO ₂	58015	93,7	29535	98,5
H ₂ O	522108	79,98					
<i>Итого</i>	652732	100	<i>Итого</i>	61889	100	29991	100
<i>Итого</i>	1092197	100	<i>Итого</i>	1092197	100	29991	100

Пример 2 (для дипломных работ). Материальный баланс стадии осаждения диоксида титана в процессе получения порошка композита TiO₂ Al₂O₃

В данном примере приведен материальный баланс стадии осаждения фазы диоксида титана в результате гидролиза хлорида титана в присутствии осадителя карбоната аммония согласно уравнению (123) в многостадийном процессе получения 50 000 кг композита состава (мас. %): TiO₂ 90,3; Al₂O₃ 4,2; H₂O 4,5. В качестве исходных растворов использованы 30%-ный раствор тетрахлорида титана в изопропиловом спирте и 20-ный водный раствор карбоната аммония. Ба-

ланс рассчитан с учетом прохождения реакции гидролиза TiCl_4 на 100%, однако 3% TiCl_4 от первоначального количества удаляется в газовую фазу вследствие высокой летучести.



2.4. Автоматизация производства

При разработке дипломных проектов данный раздел начинают с описания технологического процесса как объекта управления. При этом приводится информация об основных узлах автоматизируемого оборудования, режимах и особенностях его работы, анализируются выходные и входные, а также контролируемые, регулируемые, сигнализируемые параметры и источники возмущения.

Раздел может содержать описание применяемых методов и средств автоматизации технологических процессов, схемы автоматизированных систем управления технологическим процессом, сведения о контрольно-измерительных приборах систем автоматизации, местах отбора проб для анализа и измерения параметров, необходимых для обеспечения контроля, об управлении и безопасности ведения производственного процесса, сведения о применении и разработке сквозных компьютерных технологий и систем автоматизации проектной, конструкторско-технологической подготовки производства, их взаимодействии с системами управления предприятием. Результатом выполнения раздела является разработка функциональной схемы автоматизации соответствующего процесса, а также расчет конкретных устройств автоматизации с целью обоснования их выбора для обеспечения регулирования соответствующего технологического параметра, например, температуры, давления, расхода газов или жидкости, на заданном уровне точности.

При выполнении дипломных работ раздел автоматизации обычно заменяется статистической обработкой экспериментальных данных, которая приводится в экспериментальном разделе.

2.5. Контроль качества и метрологическое обеспечение производства

Данный раздел включает информацию о методах и устройствах контроля технологических параметров процессов и выходных параметров обрабатываемых изделий или готовой продукции. При этом приводятся сведения о видах испытаний и контрольных требованиях,

излагается и анализируется оборудование, используемое для контроля и разрабатываются мероприятия по совершенствованию метрологического обеспечения производства.

2.6. Мероприятия по охране окружающей среды

Значимость раздела, связанного с охраной окружающей среды, постоянно повышается ввиду ухудшения экологической обстановки в промышленно развитых регионах. Разработка данного раздела осуществляется по следующим направлениям:

- анализ факторов и сфер загрязнения;
- анализ объектов и порядка проведения производственного экологического контроля;
- разработка мероприятий по охране окружающей среды в пределах атмосферы, гидросферы и геосферы.

При разработке конкретных мероприятий, связанных с уменьшением объема выбросов в соответствующие сферы приводятся расчеты, позволяющие количественно охарактеризовать результаты предлагаемых мероприятий и оценить их экономическую эффективность в экономическом разделе.

2.7. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности

Данный раздел выполняется в соответствии с темой дипломного проекта или работа по конкретному заданию консультанта кафедры охраны труда и безопасности жизнедеятельности. В целом раздел содержит две основные части:

1) мероприятия по охране труда, включая анализ потенциально опасных и вредных производственных факторов, пожаро- и взрывоопасности в производстве, инженерные мероприятия по обеспечению безопасности технологических процессов, мероприятия по обеспечению санитарно-гигиенических условий труда, технические решения, обеспечивающие взрыво- и пожаробезопасность помещения; инженерные расчеты, обеспечивающие подбор эффективных защитных мероприятий и устройств;

2) мероприятия по безопасности жизнедеятельности, включая анализ потенциальных источников возникновения чрезвычайных ситуаций, мероприятия, направленные на предотвращение потерь персонала от возникновения ЧС и другие сведения.

2.8. Экономический раздел

Эта часть дипломного проекта или работы является логичным завершением инженерно-технологических или научно-технических изысканий студента по заданной теме. Цель этого раздела показать и подтвердить экономическую целесообразность проведения предлагаемых мероприятий по модернизации или разработке конкретных технологических процессов. При этом необходимо по возможности максимально учесть все экономические аспекты предлагаемых решений.

Раздел дипломного проекта обычно включает:

- анализ рынков сбыта;
- расчет материальных затрат на производство с учетом предлагаемых инженерных решений;
- расчет затрат на оплату труда производственного персонала;
- расчет расходов на содержание и эксплуатацию оборудования;
- расчет полной себестоимости продукции;
- расчет прибыли, рентабельности продукции.

В заключительной части данного раздела, а также в качестве заключительной позиции графического материала приводится таблица основных технико-экономических показателей. В таблице 30 приводится пример данных для керамической технологии производства постоянных магнитов на основе феррита стронция. В примере экономический эффект предлагаемых решений связан с улучшением качества продукции и вытекающей возможностью незначительного повышения отпускной цены изделия, что дает возможность повысить рентабельность производства на 7 % не смотря на увеличение материалоемкости продукции, связанное с использованием более дорогого сырья.

Таблица 30

Основные технико-экономические показатели модернизации производства постоянных магнитов

Наименование показателя	Величина показателя	
	Базовый	Предлагаемый
1. Объем производства в натуральном выражении, шт.	50 000	50 000
2. Объем продаж (реализованной продукции), млн. руб.	525	575
3. Полная себестоимость ед. продукции, тыс. руб.	8418	8467
4. Отпускная цена, руб.	10 500	11 500
5. Прибыль от реализации, млн. руб.	14,20	54,15
6. Чистая прибыль, млн. руб.	11,29	43,07
7. Рентабельность, %	2,67	10,13
8. Увеличение чистой прибыли, млн. руб.		31,78

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Описание технологии производства керамических конденсаторов на ВЗРД «Монолит» (см. технологическую схему, рис. 1).

Конденсаторный материал взвешивают на весах (поз. 1), сушат до постоянной массы в сушильном шкафу (поз. 2), просеивают через механическое сито (поз. 3) и подают на приготовление керамического шликера в барабанную мельницу (поз. 4). Шликер готовят в две стадии. В мельницу (поз. 4) загружают частично спирты (этиловый и бутиловый), пластификатор, ПВБ. В реактор (поз. 6) загружают остальное количество растворителей и пленкообразователя и перемешивают для получения раствора. Затем суспензию керамического материала из мельницы (поз. 4) смешивают с раствором пленкообразователя в реакторе (поз. 5), который снабжен турбинной скоростной мешалкой и водяной рубашкой, до образования шликера. Шликер выдерживают 1012 ч для стабилизации и вакуумирования в специальном кубеле, проверяют его вязкость, а затем заливают в 10 литровую бутылку с фильтром и закрепляют в литьевой машине (поз. 7). В основном используется метод литья пленки через плавающую фильеру на металлическую движущуюся подложку. Керамическая пленка в литьевой машине подсушивается воздухом, нагретым до $T = 7080^{\circ}\text{C}$, а затем она вместе с подложкой сворачивается в рулон и выдерживается 11,5 суток. Отделение керамической пленки от подложки осуществляется на станке (поз. 8), затем она проходит визуальный контроль на столе с подсветкой (поз. 9). Проверяется наличие видимых дефектов: складок, инородных включений, толщина (1550 мкм). Далее из нее вырезают заготовки размером 10×12 см или 10×15 см, которые подают на линию внутренней металлизации (поз. 10), где методом трафаретной печати наносят из пасты внутренние электроды. Материал внутренних электродов: платина, палладий, сплав серебро-палладий (70/30) или (80/20) зависит от температуры спекания конденсаторного материала. Одновременно с формированием внутренних электродов в литьевой машине происходит составление керамического пакета конденсаторов, состоящего по периферии из 57 холостых слоев с двух сторон и 2535 металлизированных слоев. Соблюдается правило нанесения электродов и сборки пакета, не допускающего закорачивания отдельных металлизированных слоев. Линия металлизации состоит из печатающего устройства, транспортной ленты, прессы и сушильного транспортера. Далее пакет прессуют на гидравлическом прессе (поз. 11). Прессование осуществляют в 4 этапа: вакуумирование перед сжа-

тием; прессование малым давлением; дегазация пакета; прессование при температуре 5090°C и давлении 60170 кг/см^2 . Далее пакеты разрезают на отдельные заготовки конденсаторов на резальной машине (поз. 12). Отдельную небольшую партию заготовок пропускают по технологическому циклу до конца и затем проверяют у них электрофизические параметры. Это делается с целью оценки годности заготовок конденсаторов для дальнейших операций. Затем осуществляют мокрую голтовку заготовок конденсаторов в барабане (поз. 14), куда загружают мелющие тела, продолжительность 1535 мин. Это делается с целью придания нужной шероховатости поверхности заготовки для последующего лучшего совмещения наружной металлизации с поверхностью конденсатора. После мокрой голтовки заготовки конденсаторов проходят операцию утильного обжига в низкотемпературной печи (поз. 15) при подъеме температуры с определенной скоростью до 350400°C , выдержке при максимальной температуре 24 ч и последующем охлаждении. Общее время утильного обжига ~ 48 ч. Печь снабжена вентилятором для обеспечения равномерного удаления органических компонентов из заготовок конденсаторов. Окончательное спекание и формирование керамического монолита и контакта внутреннего электрода с керамикой осуществляется в камерной садочной печи (поз. 16). Максимальная температура спекания (11001350°C) зависит от состава конденсаторного материала. Продолжительность спекания ~ 48 ч. Перед нанесением наружных электродов на небольшую выборку заготовок конденсаторов вручную наносят наружные электроды, вжигают и проверяют электрофизические параметры с использованием измерительного комплекса (поз. 17). Затем методом трафаретной печати на торцы остальных заготовок конденсаторов наносят наружные электроды (поз. 1821). Материал наружных электродов серебро, или серебро-палладий (95/5). Вжигание наружных электродов осуществляют в туннельной печи (поз. 22) при максимальной температуре 780800°C . При выпуске конденсаторов в виде дипов (с выводами) проводят лужение (поз. 23), приварку выводов, мойку (поз. 24), проверку электрофизических параметров (поз. 25), проверяют у всех конденсаторов емкость C , $\text{tg}\delta$, пробивное напряжение и подают на упаковку (поз. 26).

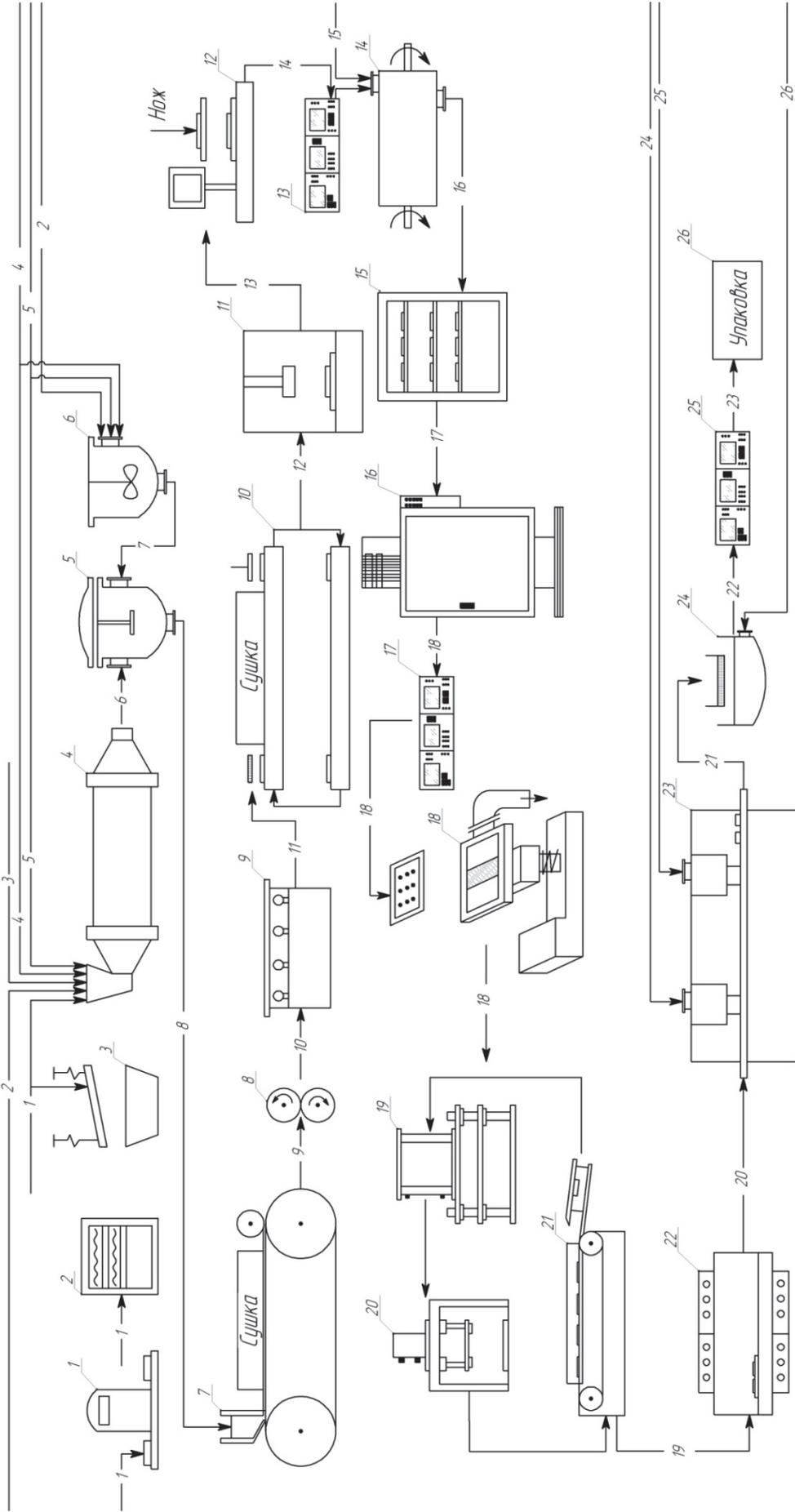


Рис. 1 Технологическая схема производства конденсатора К1017

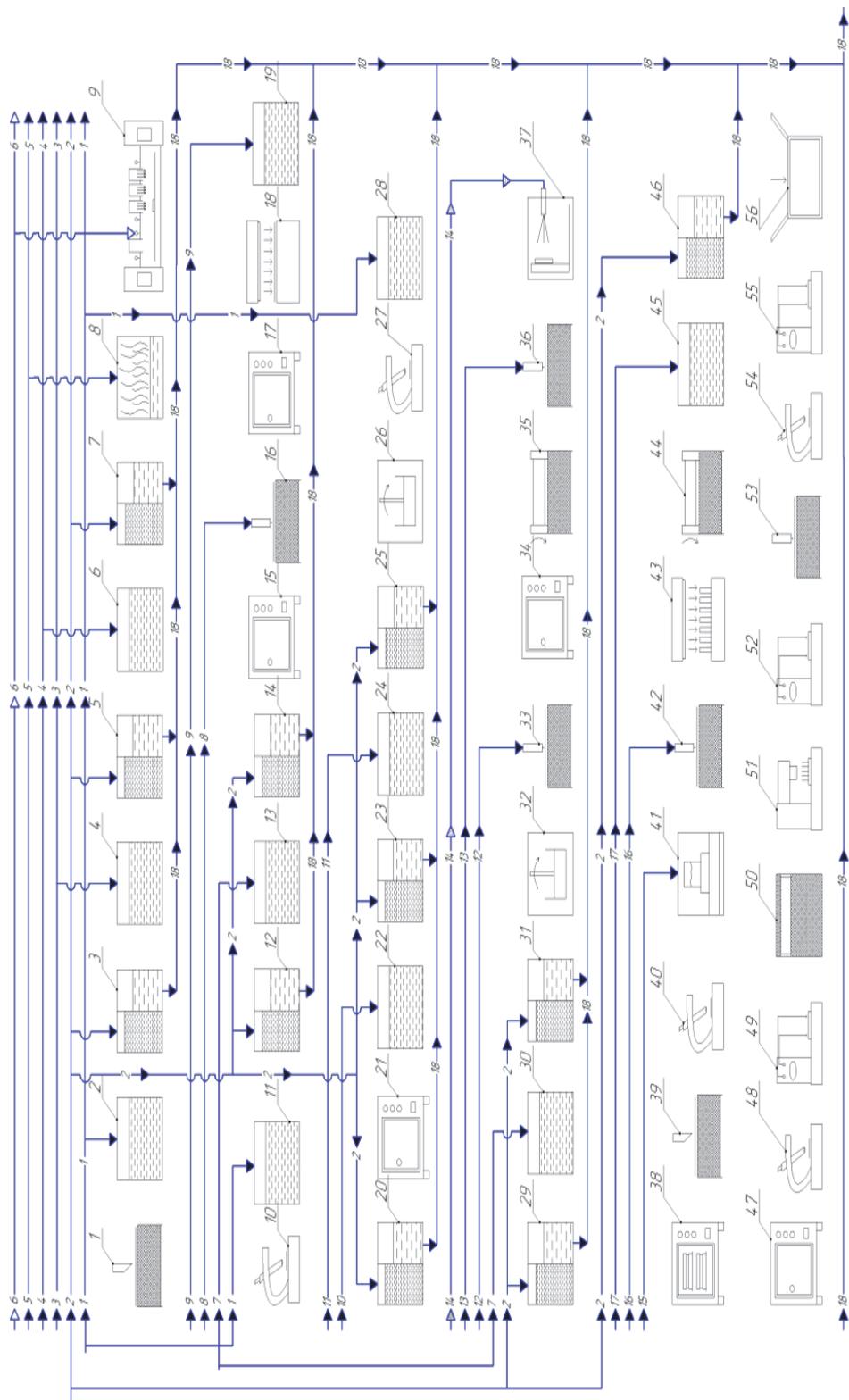


Рис. 2. Технологическая схема производства жидкокристаллических индикаторов

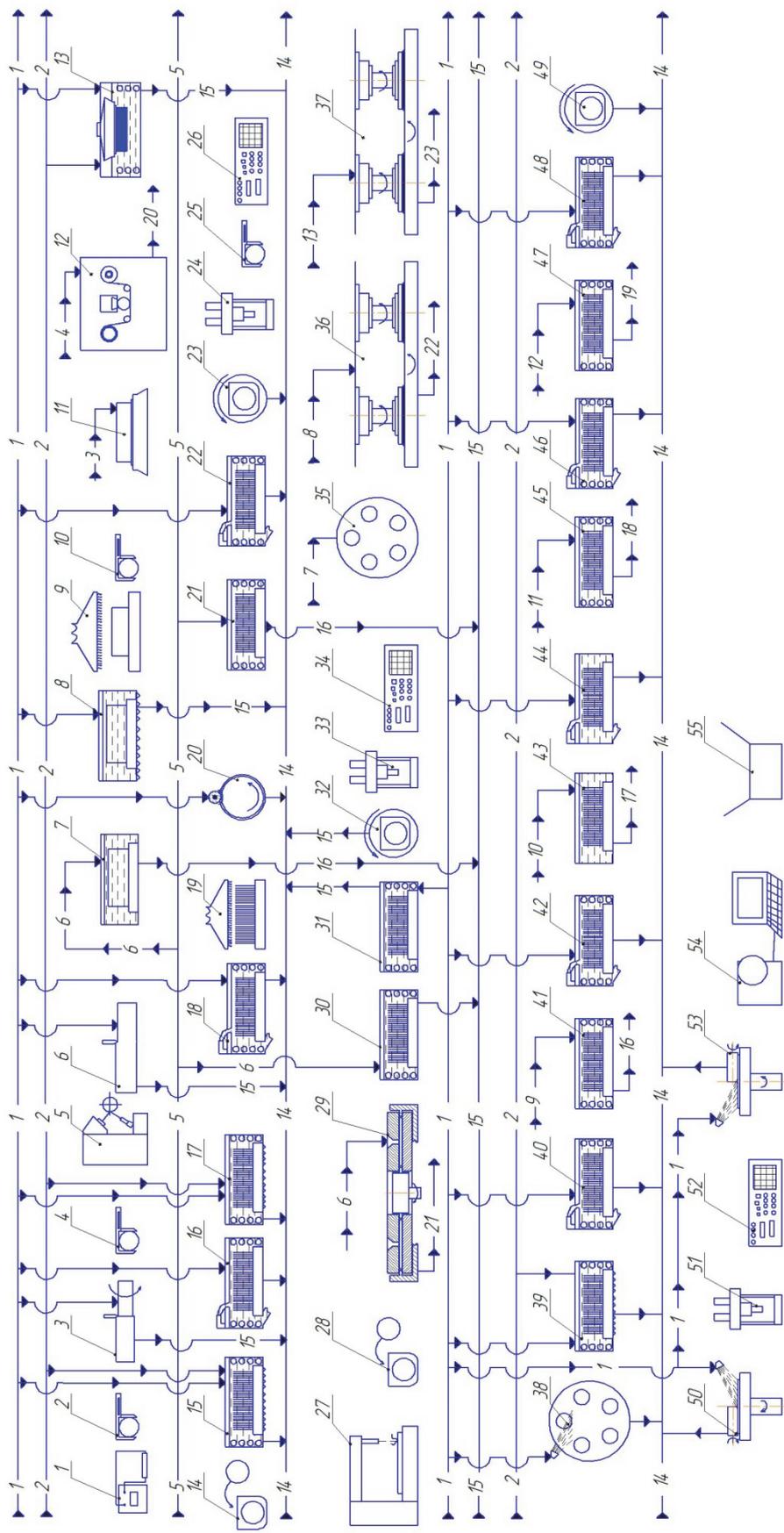


Рис. 3. Технологическая схема производства пластин монокристаллического кремния

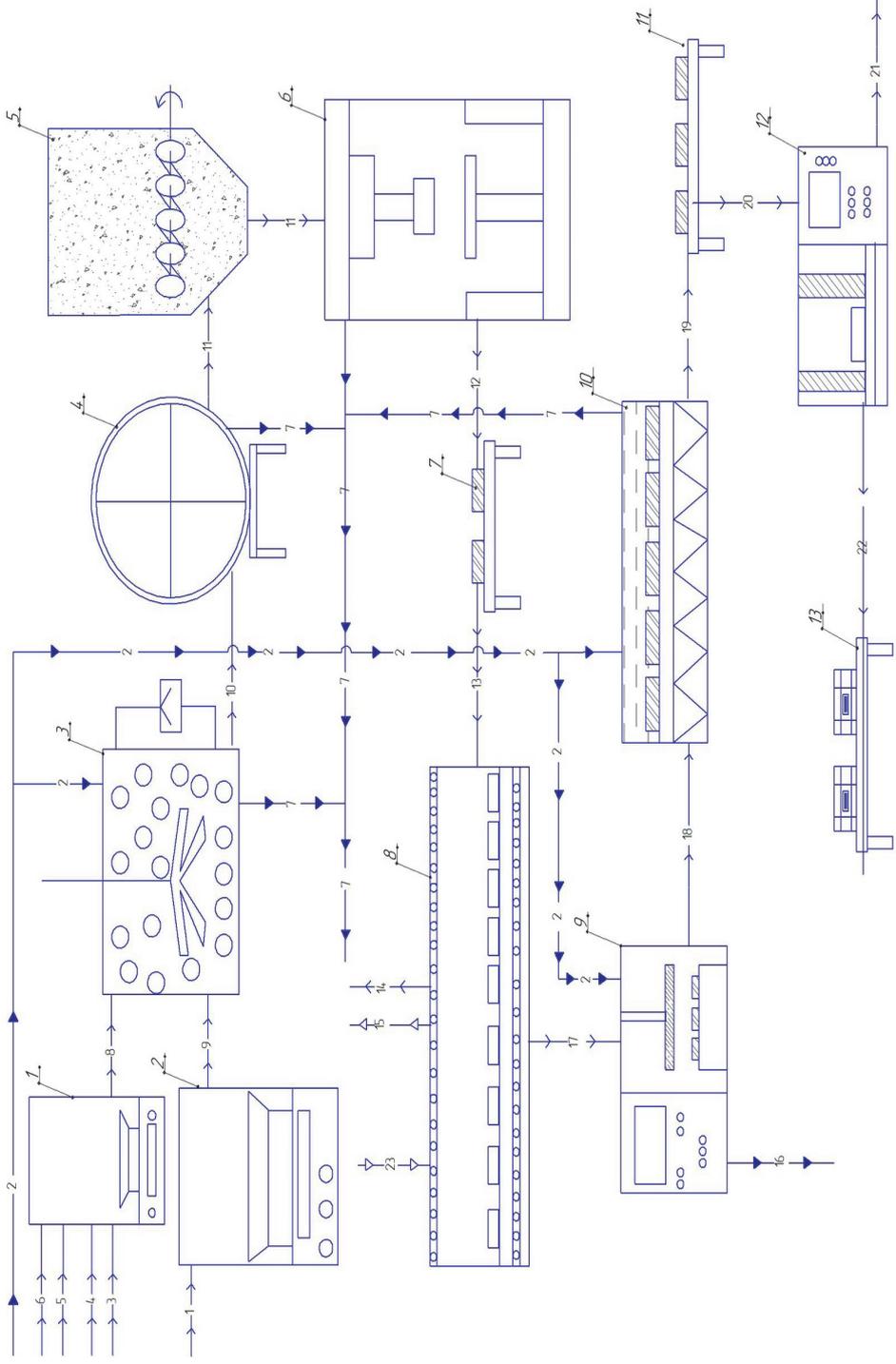


Рис. 4. Технологическая схема производства ферритных изделий

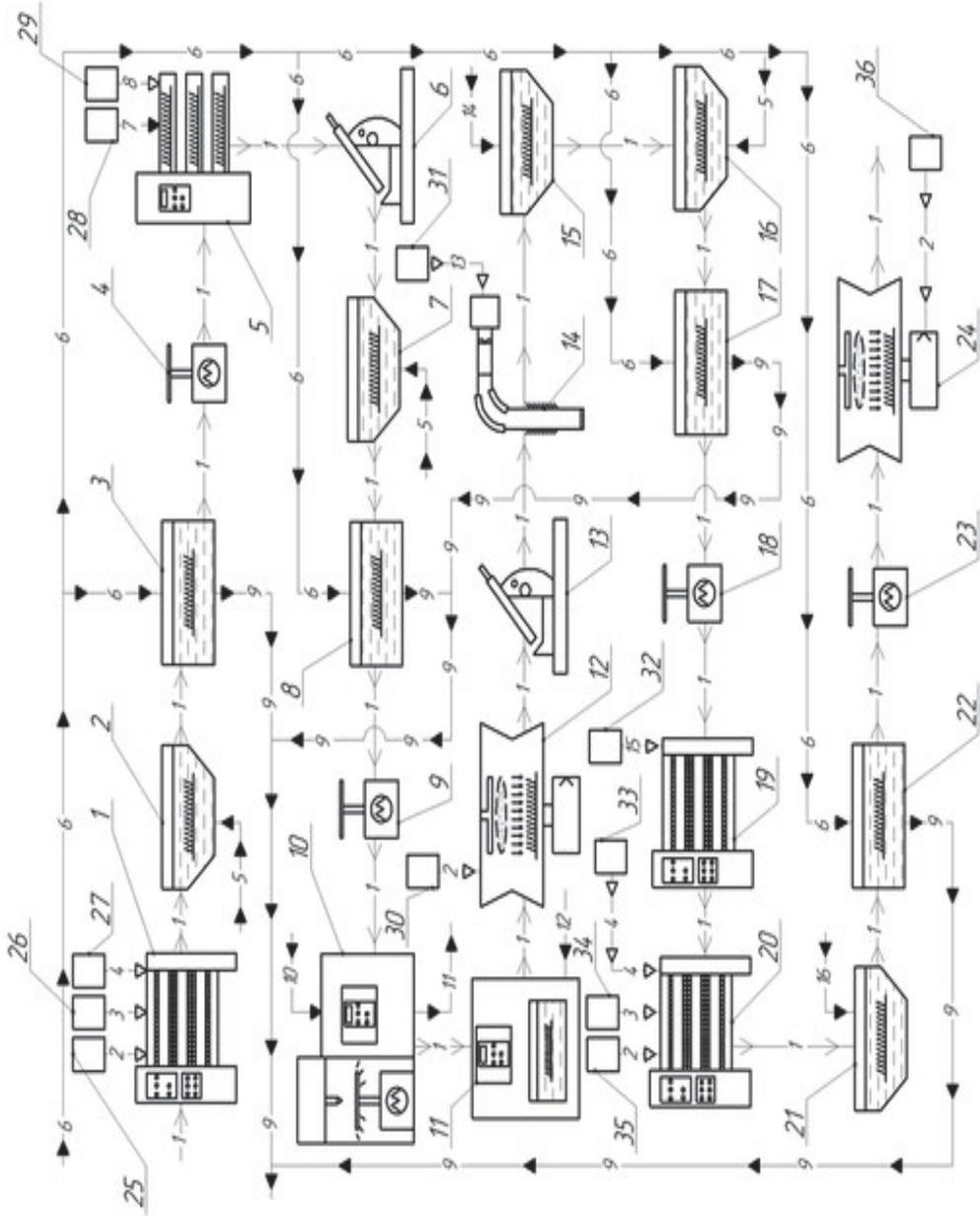


Рис. 5. Технологическая схема производства транзистора 5888Г7

Таблица 1

**Спецификация оборудования
на технологической схеме производства керамических конденсаторов К1017**

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
1	Весы	1	
2	Сушильный шкаф	1	
3	Сито	1	
4	Барабанная мельница	1	
5	Реактор с водяной рубашкой	1	
6	Реактор	1	
7	Литьевая машина	1	
8	Аппарат для отделения керамической пленки от металлической подложки	1	
9	Стол с подсветкой для проверки керамической пленки	1	
10	Линия для нанесения внутренних электродов	1	PAL3
11	Пресс гидравлический	1	
12	Машина для разрубки керамических пакетов на заготовки	1	СТМЗ
13	Измерительное оборудование	1	
14	Голтовочный барабан	1	
15	Низкотемпературная камерная печь для утильного обжига	1	
16	Высокотемпературная садочная печь	1	Noboterm
17	Измерительный комплекс	1	
18	Вибратор	1	
19, 20, 21	Линия внешней металлизации	1	
22	Туннельная печь	1	
23	Автомат лужения	1	
24	Ванна для отмывки конденсаторов	1	
25	Измерительный комплекс	1	
26	Стол упаковки конденсаторов	1	

Таблица 2

Спецификация технологических потоков на технологической схеме производства керамических конденсаторов К1017

Условное обозначение графическое	Наименование технологического потока
1	Порошок конденсаторного материала
2	Этиловый спирт
3	Дибутилсебагинат
4	Бутиловый спирт

Условное обозначение графическое	Наименование технологического потока
5	Поливинилбутираль (ПВБ)
6	Промежуточный шликер
7	Раствор ПВБ в растворителях
8	Шликер
9	Керамическая пленка на подложке
10	Керамическая пленка
11	Годная керамическая пленка
12	Керамический пакет
13	Спрессованный керамический пакет заготовок с внутренними электродами
14	Заготовки конденсаторов
15	Мелющие тела
16	Заготовки конденсаторов после голтовки
17	Заготовки конденсаторов после утильного обжига
18	Заготовки конденсаторов после спекания
19	Заготовки конденсаторов без наружных электродов
20	Заготовки конденсаторов после вжигания наружных электродов
21	Конденсаторы после лужения
22	Готовые конденсаторы
23	Годные конденсаторы
24	Состав для лужения
25	Канифоль
26	Раствор моющих

Таблица 2

**Спецификация потоков на аппаратурно-технологической схеме
производства жидкокристаллических индикаторов**

Условное обозначение Графическое	Наименование технологического потока
11	Хромовая смесь
22	Деионизованная вода
33	2% раствор NaOH
44	2% раствор лимонной кислоты
55	Изопропиловый спирт
66	Аргон
77	Перекисно-аммиачный раствор (ПАР)
88	Фоторезистивная композиция
99	0,6% раствор NaOH
1010	20 % раствор HCl

Окончание табл. 2.

Условное обозначение Графическое	Наименование технологического потока
1111	10% раствор NaOH
1212	Ориентирующее покрытие
1313	Герметик
1414	Спейсеры
1515	ЖК материал
1616	УФ-чувствительный клей
1717	Смесь моноэтаноламина с 20% раствором NaOH
1818	Слив воды

Таблица 3

Спецификация оборудования на технологической схеме производства жидкокристаллических индикаторов

Обозначение	Наименование	Количество
1	Установка для скрайбирования	2
9	Устройство магнетронного распыления	1
2-7,11-14,19,20,22-25,28-31,45,46	Ванна	22
8	Установка сушки в парах ИПС	1
10,27,40,48,54	Микроскоп	5
15,26,32	Центрифуга для сушки	3
16,33	Центрифуга	2
17,21,34,38,47	Сушильный шкаф	5
18	Установка совмещения и экспонирования	1
35	Устройство для натирания	1
36	Устройство для нанесения краевого герметика	1
37	Установка для нанесения стекловолокна	1
41	Установка для вакуумного заполнения ЖК	1
42	Установка для герметизации	1
43	Установка для УФ сушки	1
44	Установка для снятия фасок	1
49,52,55	Прибор контроля электрических параметров	3
50	Установка приклейки поляроидной пленки	1
51	Установка для приклейки выводов	1
53	Установка для маркировки	1
56	Стол для упаковки	1

Таблица 4

Спецификация оборудования на технологической схеме производства жидкокристаллических индикаторов

Обозначение	Наименование	Количество
1	Установка для скрайбирования	2
9	Устройство магнетронного распыления	1
2-7,11-14,19,20,22-25,28-31,45,46	Ванна	22
8	Установка сушки в парах ИПС	1
10,27,40,48,54	Микроскоп	5
15,26,32	Центрифуга для сушки	3
16,33	Центрифуга	2
17,21,34,38,47	Сушильный шкаф	5
18	Установка совмещения и экспонирования	1
35	Устройство для натирания	1
36	Устройство для нанесения краевого герметика	1
37	Установка для нанесения стекловолокна	1
41	Установка для вакуумного заполнения ЖК	1
42	Установка для герметизации	1
43	Установка для УФ сушки	1
44	Установка для снятия фасок	1
49,52,55	Прибор контроля электрических параметров	3
50	Установка приклейки поляроидной пленки	1
51	Установка для приклейки выводов	1
53	Установка для маркировки	1
56	Стол для упаковки	1

Таблица 5

Спецификация потоков на технологической схеме производства пластин монокристаллического кремния

Условное обозначение графическое	Наименование технологического потока
11	Деионизированная вода
22	Моющее средство «Primalux»
33	Эпоксидная смола
44	Суспензия для резки слитков
55	Раствор NaOH 20%
66	Абразивная суспензия на основе Al ₂ O ₃
77	Восковая мастика Waffix
88	Суспензия для полировки
99	Раствор для травления КАРО
1010	Раствор HF
1111	Перекисно-соляной раствор

Условное обозначение графическое	Наименование технологического потока
1212	Перекисно-аммиачный раствор
1313	Суспензия для полировки Nalko 2360
1414	Отработанная деионизированная вода
1515	Отработанный раствор травителей
1616	Отработанный раствор КАРО
1717	Отработанный раствор HF
1818	Отработанный перекисно-соляной раствор
1919	Отработанный перекисно-аммиачный раствор
2020	Отработанная суспензия для резки
2121	Отработанная шлифовальная суспензия
2222	Отработанная полировальная суспензия
2323	Отработанная суспензия Nalko 2360
2424	Полирующая смесь $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$
2525	Деионизированная вода
2626	Моющее средство Пемолукс
2727	Эпоксидная смола

Таблица 6

**Спецификация оборудования на технологической схеме производства
пластин монокристаллического кремния**

Обозначение	Наименование	Кол-во
1	Установка контроля входных параметров слитка	1
2, 4, 10, 25	Установка контроля геометрических параметров слитка	4
3	Установка шлифования связанным абразивом	1
5	Установка ориентации базового среза	1
6	Установка нанесения базового среза	1
7, 15, 21, 30, 41, 43, 45, 47	Ванна химической обработки	8
8, 16, 18, 22, 31, 40, 42, 44, 46, 48	Ванна промывки	10
9, 19	Сушильная установка	2
11	Установка для приклеивания слитка	1
12	Станок струнной резки	1
13	Ванна отпаривания	1
15, 17, 39	Устройство загрузки в кассеты	3
20	Установка снятия фаски	1
23, 32, 49	Установка сушки центрифугированием	3
24, 33, 51	Установка контроля внешнего вида	3

Окончание табл.6

Обозначение	Наименование	Кол-во
26, 34, 52	Установка сортировки по размерным группам	3
27	Установка лазерной маркировки	1
28	Позиция формирования партии пластин	1
21	Установка двухсторонней шлифовки	1
29	Установка контроля нарушенного слоя	1
35	Установка нанесения воска	1
36, 37	Установка односторонней полировки	2
29	Установка отмывки приклеиваемых блоков	1

Таблица 7

Спецификация потоков на технологической схеме производства ферритных изделий

Обозначение	Наименование	Кол-во
1	Малые весы	1
2	Большие весы	1
3	Аттритор	1
4	Барабанный фильтр	1
5	Бак накопитель	1
6	Гидравлический пресс	1
7, 11	Стеллажи для сушки изделий	1
8	Туннельная печь	1
9	Плоскошлифовальная установка	1
10	Ультразвуковая ванна	1
12	Контрольно-измерительная установка	1
13	Упаковочный стол	

Таблица 8

Спецификация потоков на технологической схеме производства транзистора 5888Г7

Обозначение	Наименование	Кол-во
1, 19, 20	Печь диффузионная	3
2, 7, 15, 16, 21	Ванна химическая	5
3, 8, 17, 22	Ванна промывки	4
4, 9, 18, 23	Центрифуга сушильная	4
5	Установка газофазного осаждения	1
6, 13	Микроскоп	2
12, 24	Установка плазмохимического травления	2
10	Установка нанесения фоторезиста	1
11	Установка проявления фоторезиста	1
2536	Баллон	12
14	Установка ионно-лучевого легирования	1

**Спецификация оборудования на технологической схеме производства
пластин монокристаллического кремния**

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
1	Установка контроля входных параметров слитка	1	
2, 4, 10, 25	Установка контроля геометрических параметров слитка	4	
3	Установка шлифования связанным абразивом	1	
5	Установка ориентации базового среза	1	
6	Установка нанесения базового среза	1	
7, 15, 21, 30, 41, 43, 45, 47	Ванна химической обработки	8	
8, 16, 18, 22, 31, 40, 42, 44, 46, 48	Ванна промывки	10	
9, 19	Сушильная установка	2	
11	Установка для приклеивания слитка	1	
12	Станок струнной резки	1	E500E-8
13	Ванна отпаривания	1	
15, 17, 39	Устройство загрузки в кассеты	3	
20	Установка снятия фаски	1	MEP-800/4600 RHO
23, 32, 49	Установка сушки центрифугированием	3	
24, 33, 51	Установка контроля внешнего вида	3	
26, 34, 52	Установка сортировки по размерным группам	3	
27	Установка лазерной маркировки	1	ЭМ-237 П2
28	Позиция формирования партии пластин	1	
21	Установка двухсторонней шлифовки	1	DSM20B-5L-11
29	Установка контроля нарушенного слоя	1	
35	Установка нанесения воска	1	POLOS
36, 37	Установка односторонней полировки	2	SpeedFam
29	Установка отмывки приклеиваемых блоков	1	СК 725.00.00
50, 53	Система гидроструйной очистки	2	DSS-200 series II
54	Установка контроля выборки пластин	1	
55	Установка упаковки пластин	1	

Таблица 10

**Спецификация оборудования на технологической схеме производства
ферроферритных изделий**

Условное обозначение		Наименование технологического потока
Буквенное	Графическое	
	11	Порошок гексаферрита стронция
	22	Вода
	33	Порошок карбоната кальция
	44	Порошок борной кислоты
	55	Порошок высокодисперсного диоксида кремния
	66	Модифицирующая добавка $BaAl_{25}Fe_{95}O_{19}$
	77	Сточные воды
	88	Смесь добавок
	99	Порошок гексаферрита стронция после взвешивания
	1010	Суспензия шихты
	1111	Паста шихты
	1212	Отпрессованные заготовки
	1313	Заготовки после сушки
	1414	Отбракованные по внешнему виду изделия
	1515	Отходящие газы
	1616	Шлифотходы
	1717	Спеченные заготовки
	1818	Отшлифованные изделия
	1919	Промытые изделия
	2020	Высушенные изделия
	2121	Бракованные изделия
	2222	Годные изделия
	2323	Воздух

Таблица 11

**Спецификация оборудования на технологической схеме производства
транзистора 5888Г**

Условное обозначение		Наименование технологического потока
Буквенное	Буквенное	
	11	Полупроводниковые пластины
	22	Кислород, O_2
	33	Водород, H_2
	44	Газообразный HCl
	55	ПАР ($H_2O + NH_4OH$)
	66	Деионизованная вода
	77	Газовая смесь ($SiH_2Cl_2 + H_2$)
	88	Аммиачно-водородная смесь

Условное обозначение		Условное обозначение
Буквенное	Буквенное	
	99	Сточные воды
	1010	Фоторезистивная композиция
	1111	Отработанный фоторезист
	1212	0,5% раствор гидроксида калия
	1313	BCl_3

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Таблица 1

Фундаментальные физико-химические константы

Атомная единица массы	$1,661 \cdot 10^{-24}$ г
Постоянная Авогадро, N_A	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Универсальная молярная газовая постоянная, R	8,314 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана, k	$1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$9,109 \cdot 10^{-27}$ г
Масса покоя протона	$1,673 \cdot 10^{-24}$ г
Электрическая постоянная, ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Постоянная Фарадея, F	96 485,33 Кл/моль
Постоянная Планка, h	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Приведенная постоянная Планка, \hbar	$1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Скорость света в вакууме, c	299 792 458 м/с
Магнитная проницаемость вакуума, μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м
Магнетон Бора, μ_B	$9,3 \cdot 10^{-24}$ А·м ²

Таблица 2

Термодинамические свойства некоторых веществ

Вещество	$\Delta_f H^\circ$, кДж/моль	S° , Дж/(моль·К)	C_p , Дж/(моль·К)	$T_{пл}$, °С
Ag (к)	0	42,58	25,4	1235
Al (к)	0	28,31	24,4	660
Al ₂ O ₃ (к)	1675	50,94	79,0	2044
AlAs	-58,70	27,49	21,3	2058
AlCl ₃ (к)	-697,4	167	91,0	192,4
AlF ₃ (к)	-1488	66,48	75,1	1291
AlN	-158,63	10,62	15,1	4840
AlP	-87,16	22,35	19,2	2770
AlSb	-33,97	32,62	23,3	1328
As (к)	0	35,1	25,1	613 (суб.)
AsH ₃ (г)	135,27	222,67	38,1	117
B (к)	0	5,87	11,1	2573
BA _s	-40,06	20,52	17,3	1343
B ₂ H ₆ (г)	194,72	233,058	56,9	-165,5

Продолжение табл.2

Вещество	$\Delta_f H^\circ$, кДж/моль	S° , Дж/(моль·К)	C_p , Дж/(моль·К)	$T_{пл}$, °С
B ₂ O ₃ (к)	-1264	55,85	66,9	480
BBr ₃ (г)	-116,77	324,22	67,8	-46
BF ₃ (г)	1137,64	254,47	50,5	-128
BN (к)	-127,13	7,4	9,85	3800
BP	-54,24	13,14	15,1	1655
Br ₂ (г)	30,92	245,54	36,0	-7,3
Br ₂ (ж)	0	152,3	75,7	-7,3
C (алм)	-1,83	2,37	6,1	3500
C (гр)	0	5,74	8,5	3700 (в)
CCl ₄ (ж)	-135,4	214,57	132,6	-22,9
Cl ₂ (г)	0	223	33,9	-34,1
Ca	0	41,6	25,9	850
CO (г)	-110,6	197,68	29,1	-205
CO ₂ (г)	-393,51	213,6	37,1	-56,6
CS ₂	115,3	237,8	75,73	-111,9
Cu (к)	0	33,3	24,4	1083
CuCl ₂ (к)	-134,7	91,6	71,9	596
CaCO ₃	-1207	92	83,5	825
CaO	-635	40	38,1	2570
F ₂	0	202,8	31,3	-219,6
Fe (к)	0	27,17	25,1	1539
FeO (к)	-265	60,79	49,9	1360
Fe ₂ O ₃ (к)	-822,7	87,5	103,9	1565 (р)
Fe ₃ O ₄ (к)	-1117,9	146,29	143,4	1540 (р)
Ga	0	40,8	26,1	302
GaAs	-38,65	32,62	23,0	1511
GaN	-80	18,02	17,27	2700
GaP	-51,05	27,49	22,0	1790
GaSb	-22,20	37,75	24,26	981
Gd ₂ O ₃	-1821	150,6	105,5	2350
Ge (к)	0	42,38	23,4	936
GeO ₂	-580,2	39,7	50,2	1086
GeCl ₂ (г)	135,9	246,37	-	74,6
GeCl ₄ (г)	-389,39	347,27	96,2	-49,5
H ₂ (г)	0	130,6	28,8	-259
H ₂ O (г)	-241,84	188,74	33,6	0
H ₂ O (ж)	-285,84	69,96	75,3	0
H ₂ O ₂ (ж)	187,9	109,57	89,3	-0,43
H ₂ S (г)	-20,15	205,64	34,2	-82,3
HBr (г)	-35,98	198,4	28,0	-86,9
HCl (г)	-92,3	186,7	29,1	-114,2
HfO ₂	-1117,5	59,3	60,3	2780
I ₂ (г)	62,24	260,58	36,9	113,6

Продолжение табл. 2

Вещество	$\Delta_f H^\circ$, кДж/моль	S° , Дж/(моль·К)	C_p , Дж/(моль·К)	$T_{пл}$, °С
I ₂ (к)	0	116,73	54,4	113,6
In	0	57,8	26,7	156,4
InAs	-27,55	37,75	23,6	1217
InBi	-0,71	56,71	24,9	383
InN	-55,92	25,42	17,85	2080
InP	-34,38	32,62	23,24	1344
InSb	-15,73	42,88	24,76	799
KOH	-424,6	81,2	68,9	380
K ₂ O	-361,5	94,1	83,7	300 (р)
K ₂ CO ₃	-1146,1	156,3	115,7	891
K ₂ WO ₄	-1580	170	-	923
Mg	0	32,7	24,9	651
MgF ₂	-1113	57,3	71,1	1263
N ₂ (г)	0	191,5	29,1	-210
Nb ₂ O ₅	-1898	137	132	1490
NH ₃ (г)	-46,19	192,5	35,1	-77,7
N ₂ O (г)	-82,1	220,02	38,6	-90,7
NO ₂ (г)	-33,5	240,32	37,2	-11,2
NH ₄ Cl	-314,4	94,6	84,1	338 (в)
NH ₄ NO ₃	-365,6	151,1	139,3	170
O ₂ (г)	0	205,03	29,4	-218,8
P (бел)	0	44,35	23,8	44,1
P ₂ O ₅ (к)	-2984	282	212	420
PH ₃	5,4	210,2	37,1	-133,8
PCl ₃ (г)	-277	311,7	71,8	-90,3
Pb (к)	0	64,9	26,4	327
PbCl ₂ (к)	-359,1	136,4	77,0	495
PbS (к)	-94,28	91,2	49,8	1077
S (кр, ром)	0	31,88	22,6	112,8
S ₂ (г)	129,1	227,7	32,5	112,8
Sb (к)	0	45,69	25,2	630,5
SbCl ₅ (к)	-437,2	295	295,0	2,8
SbH ₃	145,1	232,8	41,1	-94,0
Si (к)	0	18,72	20,0	1420
Si ₃ N ₄ (к)	-618,84	95,39	99,87	1900 (в)
SiC (к)	-104,29	16,46	26,9	2830 (р)
SiCl ₄ (г)	657,5	331,37	90,4	-68,9
SiF ₄ (г)	-1614	281,6	73,6	-86,8 ^{0,22}
SiH ₄ (г)	-113,24	204,51	42,9	-185
SiO ₂ (к)	-910,7	42,09	44,4	1610
SiBr ₄ (г)	-290,33	377,81	97,1	5,4
Sn (к)	0	51,4	27,0	232
SnO ₂ (к)	-580,8	52,34	52,7	2000

Окончание табл.2

Вещество	$\Delta_f H^\circ$, кДж/моль	S° , Дж/(моль·К)	C_p , Дж/(моль·К)	$T_{пл}$, °С
SnS (к)	-101,8	77	49,2	881
SO ₂ (г)	296,9	248,1	39,9	-75,5
SO ₃ (г)	-395,2	256,23	180	16,8
Ti (к)	0	30,6	25,0	1668
TiCl ₄ (г)	-763,2	353,2	95,4	-24,1
TiCl ₄ (ж)	-804,2	252,3	145,2	-24,1
TiO ₂	-938	50	55,5	1870
TiN	-323	30,3	37,1	2950
WO ₃	-842,7	75,9	73,9	1473
YCl ₃	-982,4	136,8	92,0	703
Y ₂ O ₃	-1904	99,2	96,0	2415
YF ₃	-1718	100	95	1155
Zn	0	41,6	25,4	419,5
ZnO	-350,5	43,7	40,3	1975

Таблица 3

Параметры удельного газовыделения конструкционных материалов

Материал	Удельное газо-выделение, Па·м ³ /кг	Скорость удельного газовыделения, Па·м ³ /(м ² ·с)	Температура, °С / (вакуумн. обр., ч)
Вольфрам	-	$1,3 \cdot 10^{-6}$	400
	0,02 - 0,04	-	2300
Латунь	-	$3,1 \cdot 10^{-5}$	400
Медь	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$(0,64-1,95) \cdot 10^{-4}$	400
		$(0,1-9,3) \cdot 10^{-9}$	400/15
	$5,25 \cdot 10^{-2}$		600
	$8,29 \cdot 10^{-2}$		800
Молибден	$7,1 \cdot 10^{-2}$		400
	$1,68 \cdot 10^{-1}$		600
	$2,43 \cdot 10^{-1}$		800
	$3,76 \cdot 10^{-1}$		1000
	0,80		1800
		$9,3 \cdot 10^{-6}$	25/1
Никель	$2,14 \cdot 10^{-1}$		400
	$4,58 \cdot 10^{-1}$		600
	$5,11 \cdot 10^{-1}$		800
	$6,58 \cdot 10^{-1}$		1000
	0,8		1200
		$8 \cdot 10^{-6}$	25/1
Алюминий		$(4-9) \cdot 10^{-6}$	25/2
Тантал		$6 \cdot 10^{-6}$	400
		$1,2 \cdot 10^{-5}$	25/1

Окончание таблицы 3

Материал	Удельное газовыделение, Па·м ³ /кг	Скорость удельного газовыделения, Па·м ³ /(м ² ·с)	Температура, °С / (вакуумн. обр., ч)
Ковар	$5 \cdot 10^{-2}$		400
	$1,47 \cdot 10^{-1}$		600
	0,384		800
	1,369		1000
Дюралюминий		$5,57 \cdot 10^{-4}$	25/1
		$1,9 \cdot 10^{-4}$	25/5
Фторопласт		$1 \cdot 10^{-4}$	25
		$7 \cdot 10^{-5}$	25/3
Полиэтилен		$4 \cdot 10^{-5}$	25/3
Тефлон		$6,6 \cdot 10^{-5}$	25/1
Плексиглаз		$1,3 \cdot 10^{-5}$	25/1
Стали			
	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	400
конструкционная		$1,3 \cdot 10^{-7}$	400
хромированная		$10^{-8} \quad 10^{-10}$	450/15
1X18H10T	$2,72 \cdot 10^{-1}$		600
	$3,57 \cdot 10^{-1}$		800
нержавеющая	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-5}$	400
Стекла			
С 49-2	$4 \cdot 10^{-1}$		450
С 87-1	$5,33 \cdot 10^{-1}$		450
С 48-1	$8,0 \cdot 10^{-1}$		600
С 48-3	$6,7 \cdot 10^{-1}$		780
П-15	$4,65 \cdot 10^{-1}$		500
Резины			
7880		$5,3 \cdot 10^{-5}$	90
9024		$2,7 \cdot 10^{-5}$	90
ИРП-1015		$2,4 \cdot 10^{-4}$	90
ИРП-1368		$4,4 \cdot 10^{-4}$	250
ИРП-2043		$2,7 \cdot 10^{-4}$	250
Вакуумная необработанная		$1,0 \cdot 10^{-2}$	25

Таблица 4

Коэффициенты, характеризующие процесс газопроницаемости материалов

Материал	Газ	j	$K_0, \text{м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{м} / (\text{Па}^{1/j} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с})$	$E_{\text{пр}}, \text{Дж/моль}$
Алюминий	Водород	2	$3,6 \cdot 10^{-2}$	$3,60 \cdot 10^5$
Железо	Водород	2	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$8,04 \cdot 10^4$
	Азот	2	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^5$
	Оксид углерода	2	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^5$
Каучук	Водород	1	$5,1 \cdot 10^{-5}$	$2,98 \cdot 10^4$
	Азот	1	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^4$
	Кислород	1	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,14 \cdot 10^4$
	Гелий	1	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$2,72 \cdot 10^4$
Кварц	Водород	1	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$3,60 \cdot 10^4$
	Гелий	1	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$2,28 \cdot 10^4$
	Азот	1	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$9,24 \cdot 10^4$
Медь	Водород	2	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,39 \cdot 10^5$
Никель	Водород	2	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^5$
Палладий	Водород	2	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,88 \cdot 10^4$
Платина	Водород	2	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^4$
Серебро	Кислород	2	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^5$
Резина 7889	Азот	1	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,60 \cdot 10^5$
Полиэтилен	Азот	1	$9,0 \cdot 10^{-13}$	
	Кислород	1	$3,0 \cdot 10^{-12}$	
	Водород	1	$8,2 \cdot 10^{-12}$	
	Гелий	1	$5,7 \cdot 10^{-12}$	
	Аргон	1	$2,7 \cdot 10^{-12}$	
Полистирол	Кислород	1	$5,1 \cdot 10^{-13}$	
	Водород	1	$1,3 \cdot 10^{-11}$	
	Гелий	1	$1,3 \cdot 10^{-11}$	
Фторпласт 4	Азот	1	$1,0 \cdot 10^{-9}$	
	Кислород	1	$1,0 \cdot 10^{-9}$	
Резины: 7880 9024 ИРП-1015 ИРП-1368 ИРП-2043	Воздух	1	$1,0 \cdot 10^{-5}$	
			$9,0 \cdot 10^{-7}$	
			$5,0 \cdot 10^{-7}$	
			$3,0 \cdot 10^{-4}$	
			$5,0 \cdot 10^{-7}$	

Таблица 5

Теплофизические свойства огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Изделие		Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Рабочая температура, °С	Теплоемкость, кДж/(кг К)
Алюмохромфосфатный газобетон	М-600	600	$0,163 + 2,8 \cdot 10^{-4}t$	1450	-
	М-400	400	$0,093 + 3,0 \cdot 10^{-4}t$	1400	-
Асбестовый картон		900	$0,16 + 1,7 \cdot 10^{-4}t$	600	0,837
Вермикулит		0,1500,25	$0,072 + 2,6 \cdot 10^{-4}t$	9001000	1,03
Вермикулитовые плиты		350400	$0,08 + 1,5 \cdot 10^{-4}t$	750	1,15
Вермикулитофосфатные изделия		400500	$0,105 + 1,8 \cdot 10^{-4}t$	1100	-
Высокоглиноземистые		2500	$2,1 - 6,2 \cdot 10^{-4}t$	1900	$0,837 + 2,6 \cdot 10^{-4}t$
		1330	$0,86 + 0,8 \cdot 10^{-4}t$	1450	
Гранулированный фосфозит		500600	$0,265 + 0,8 \cdot 10^{-4}t$	1600	-
Диатомитовые		1100	$0,27 + 2,3 \cdot 10^{-4}t$	900	0,83 - 0,92 t
		750	$0,17 + 3,5 \cdot 10^{-4}t$	900	
Диатомитовые засыпки		500	$0,1 + 2,8 \cdot 10^{-4}t$	700	1,0
Динасовые		1900	$1,07 + 9,3 \cdot 10^{-4}t$	1650-1700	$0,795 + 33,5 \cdot 10^{-4}t$
		1100	$0,58 + 4,3 \cdot 10^{-4}t$	1500	
Карбидокремниевые		20002500	$5,2 - 1,3 \cdot 10^{-3}t$	1400-1450	$0,96 + 1,4 \cdot 10^{-4}t$
Керамовермикулитовые		350	$0,085 + 2,1 \cdot 10^{-4}t$	1000	0,8
Кирпич пеношамотный		400	$0,10 + 1,45 \cdot 10^{-4}t$	1300	$0,24 + 2,0 \cdot 10^{-4}t$
Корундовые		6002900	$2,1 + 2,15 \cdot 10^{-3}t$	16001700	$0,419 + 8,8 \cdot 10^{-4}t$
Легковесный динасовый кирпич		1200	$0,47 + 2,57 \cdot 10^{-4}t$	1550	-
Магнезитовые		3002700	$4,65 - 1,7 \cdot 10^{-3}t$	16501700	$0,942 + 2,5 \cdot 10^{-4}t$
Магнезитохромитовые		7002500	$4,0 - 8,2 \cdot 10^{-4}t$	1700	-
Минераловатный войлок		600	$0,093 + 2,6 \cdot 10^{-4}t$	600	-
Минеральная вата			$0,047 + 5,8 \cdot 10^{-3}$	600	0,921
Муллитовые		2002900	$2,96 - 1,1 \cdot 10^{-3}t$	1750	$0,87 + 1,3 \cdot 10^{-4}t$
Муллитокремнеземистое волокно		130	$0,034 + 2,6 \cdot 10^{-4}t$	1150	0,94

Окончание табл. 5

Изделие	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Рабочая температура, °С	Теплоемкость, кДж/(кг К)
Периклазошпинелевые	3000	$2,5-5,8 \cdot 10^{-4}t$	1750	$0,775 + 3,0 \cdot 10^{-4}t$
Перлитовые	200250	$0,068 + 0,9 \cdot 10^{-4}t$	900	0,84
Плиты перлитоасбестокаолиновые	300400	$0,078 + 2,3 \cdot 10^{-4}t$	850	-
Полукислый кирпич	1800	$0,85 + 4,0 \cdot 10^{-4}t$	12501400	$0,88 + 2,3 \cdot 10^{-4}t$
		$0,47 + 5,1 \cdot 10^{-4}t$	700	
Псевдодиатомитовые	400	$0,0778 + 3,2 \cdot 10^{-4}t$	900	-
Совелит	230250	$0,09 + 8,7 \cdot 10^{-4}t$	500	-
Совелитовые плиты	400450	$0,079 + 1,86 \cdot 10^{-4}t$	450-500	-
Трепел в порошке	500	0,1046	900	-
Угольные	3501600	$23,2 + 3,5 \cdot 10^{-4}t$	2000	$0,837 - 1,2t$
Форстеритовые	3000	$5,3 - 1,1 \cdot 10^{-3}t$	1800	-
Фосфокерамзитобетонные	1200	$0,314 + 2,4 \cdot 10^{-4}t$	1270	-
Фосфоперлитовые	200300	$0,067 + 1,2 \cdot 10^{-4}t$	800	-
Хромомагнезитовые	2900	$2,0-8,5 \cdot 10^{-4}t$	1750	$0,754 + 1,5 \cdot 10^{-4}t$
Шамотноволокнистые плиты	350	$0,13 + 1,0 \cdot 10^{-4}t$	1200	$0,058 + 1,7 \cdot 10^{-4}t$
Шамотные	1900	$1,04 + 1,5 \cdot 10^{-4}t$	13501500	$0,837 + 2,6 \cdot 10^{-4}t$
		$0,7 + 6,4 \cdot 10^{-4}t$		
	1300	$0,61 + 1,8 \cdot 10^{-4}t$	1300	
Шамотные засыпки Шлаковая вата	1000	$0,28 + 2,3 \cdot 10^{-4}t$	1250	1,17 0,88
	800	$0,21 + 4,3 \cdot 10^{-4}t$	1200	
	1000	$0,23 + 4,9 \cdot 10^{-4}t$	1000	
	300	$0,065 + 3,5 \cdot 10^{-4}t$	700	
	200250	$0,058 + 1,6 \cdot 10^{-4}t$	750	

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: учеб. в 2 т. / под ред. В.А. Кривандина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – Т. 2: Расчеты металлургических печей / Б. С. Мастраков. – 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. – 98с.
4. Технология полупроводников: метод. указания для студентов специализации 1-48 01 01 13 «Химическая технология материалов квантовой и твердотельной электроники» / 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. Тэхналагічныя працэсы і апараты галіны: метадычныя ўказанні для студэнтаў вочнай і завочнай форм навучання спецыяльнасці Т. 11.03.00 / Дз. Р. Калішук, М. П. Саевіч; пад агул. рэд. Дз. Р. Калішук. – Мінск: БГТУ, 2001. 51 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий: в 2 ч. – СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – Ч. II. – 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 микроэлектронных устройств: справ. / З. Ю. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.
10. Киреев, В. Ю. Технология микроэлектроники. 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. – 2 кн.
13. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – 368 с.

14. 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.
15. 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.
16. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю. А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. – 446 с.
17. Химическая обработка в технологии ИМС / В. П. Василевич, А. М. Кисель, А. Б. Медведева и [др.]. – Полоцк: ПГУ, 2001. – 260с.
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.
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. / А. Д. Свенчанский. – М.: Энергия, 1975. – Ч. 1. Электрические печи сопротивления. – 384 с.
27. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справ. в 3 т. / А. С. Тимонин. Калуга: изд. 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: Выш. школа, 1981. – 254 с.
31. Standard thermodynamic properties of chemical substances – CRC PRESS LLC, 2000 – 57p.
32. Васильев, В. П. Термодинамические свойства соединений $A^{III}B^V$ / В. П. Васильев, Ж. К. Гашон // Неорган. мат. – 2006. Т. 42. № 11. С. 1293–1303.
33. Бухмиров, В. В. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен» / В. В. Бухмиров, Д. В. Ракутина, Ю. С. Солнышкова. – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2009. – 102 с.
34. Плисковский, В. Я. Конструкционные материалы и элементы вакуумных систем. / В. Я. Плисковский. – М.: «Машиностроение», 1976. – 64 с.
35. Плотников, Ю. Д. Методические указания по выполнению курсовой работы на тему «Расчет вакуумной системы». / Ю. Д. Плотников. – М.: МГИЭиМ, 2005. – 29 с.
36. Сезоненко, А. Ю. Сплавы для нагревательных элементов для электропечей сопротивления, промышленных и бытовых нагревателей замена нихромов и фехралей / А. Ю. Сезоненко // Литьё Украины. 2007. Т. 78. № 2.
37. Волков, А. И. Большой химический справочник / А. И. Волков, И. М. Жарский. – Минск.: Современная школа, 2005. – 608с.
38. Вакуумная техника: справ. / Е. С. Фролов и [др.]; под общ. ред. Е. С. Фролова. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
39. Технология изделий интегральной электроники / Л. П. Ануфриев и [др.]; под общ. ред. А. П. Достанко и Л. И. Гурского. – Минск: Амалфея, 2010. – 536 с.
40. Витязь, П. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов: учебное пособие / П. А. Витязь, Н. А. Свидунович. – Минск.: Выш. шк., 2010. – 302 с.
41. Экономическое обоснование дипломных проектов: учебн. метод. пособие для студентов заочной формы обучения специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» / сост. Л.А. Сюсюкина, Е.И. Сидорова. – Минск.: БГТУ, 2006. – 60 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ)	4
1.1. Тематика курсовых проектов	4
1.2. Указания к выполнению технологической курсовой работы	6
1.2.1. Общие указания	6
1.2.2. Аналитический обзор литературы	7
1.2.3. Инженерные решения	8
1.2.4. Технологический раздел	8
1.2.4.1. Структура и содержание	8
1.2.4.2. Указания по проведению технологических расчетов	10
1.2.5. Контроль качества продукции и метрологическое обеспечение технологии	20
1.2.6. Мероприятия по охране окружающей среды	21
1.3. Курсовой проект по оборудованию и основам проектирования производств материалов и изделий электронной техники	21
1.3.1. Обоснование выбора типа аппарата	22
1.3.2. Технологический расчет аппарата	23
1.3.3. Конструирование электропечей сопротивления	23
1.3.4. Расчет электропечей сопротивления	25
1.3.5. Конструирование нагревательных элементов	42
1.3.5.1. Рекомендации по выбору материалов	43
1.3.5.2. Конструкции металлических нагревателей	49
1.3.5.3. Конструирование не металлических нагревателей	51
1.3.5.4. Нагреватели из тугоплавких металлов	53
1.3.6. Расчет нагревательных элементов	54
1.3.6.1. Расчет металлических нагревателей	58
1.3.6.2. Расчет карборундовых нагревателей	62
1.3.6.3. Расчет нагревателей из дисилицида молибдена	65
1.3.7. Расчет вакуумной системы	67
1.4. Графическая часть проекта	77
2. ВЫПОЛНЕНИЕ ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ)	78
2.1. Тематика дипломных проектов (работ)	79
2.2. Структура дипломных проектов (работ)	79
2.3. Технологический раздел	81
2.4. Автоматизация производства	85
2.5. Контроль качества и метрологическое обеспечение производства	85

2.6. Мероприятия по охране окружающей среды	86
2.7. Мероприятия по охране труда и безопасности жизнедеятельности	86
2.8. Экономический раздел	87
Приложение I	88
Приложение II	102
Литература	111

Учебное издание

Мурашкевич Анна Николаевна
Богомазова Наталья Валентиновна
Алисиенок Ольга Александровна

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КВАНТОВОЙ И ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие

Редактор *В.В. Якушик*
Компьютерная верстка *В. В. Якушик*
Корректор *В. В. Якушик*

Издатель:

УО «Белорусский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014.

Уд. Свердлова, 13ф, 220006, г. Минск.