

ДЕП

1972

В. ПАШКИС

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

ОНТИ • НИИП

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО УКРАИНЫ

ВИКТОР ПАШКИС

2003

Пр. 1939 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

ПЕРЕВОД С НЕМЕЦКОГО
ИНЖ. А. А. РАЕВСКОГО

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
ИНЖ. В. А. ТИХОВСКОГО

282/64
1



РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ОНТИ ГОСУДАРСТВЕННОЕ НКТП
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО УКРАИНЫ
ХАРЬКОВ 1934 КИЕВ

ELEKTRISCHE INDUSTRIEÖFEN FÜR WEITERVERARBEITUNG

von

DR. VICTOR PASCHKIS

BERATENDER INGENIEUR VBI

Ответственный редактор проф. *Н. Ф. Лега*
Техоформление *Ц. И. Подольский*

Типография Государственного научно-технического издательства Украины
Киев, ул. Воровского, 42

Уполномоч. Главлита № 1174(569).

Зак. № 400

Тираж 3000—19 лст.

ОТ АВТОРА

Конструирование электрических промышленных печей до настоящего времени, производилось главным образом на основании эмпирических данных.

Отдельные теоретические вопросы в области индукционных печей разрабатывались прежде всего Нортрупом и В. Фишером, в области дуговых печей — Рикке, и в области печей сопротивления — Роон и Стассине; кроме того, печам последнего типа посвятил ряд отдельных работ автор настоящей книги. Однако до настоящего времени не предложено метода систематического расчета электрических печей. Это вполне понятно, так как в данном случае расчетом одновременно должны быть учтены явления из области теории тепла, электротехники и химии печных строительных материалов. Помимо того конструкция печей в значительной мере зависит от технологии того процесса, для которого они предназначаются.

Предлагаемая книга имеет цель дать общий и по возможности всесторонний обзор всех моментов, так или иначе влияющих на форму, конструкцию и расчет печей. Эти соотношения в общем виде изложены в первой главе. Развитие же этих общих, основных положений в виде детального метода расчета главнейших частей печи в настоящей книге сделано только для печей сопротивления (по применяемой терминологии *печей сопротивления косвенного нагрева*). Предложенный нами метод дает возможность производить расчет электрических печей сопротивления в том же роде и с той же точностью и подробностью, как это обычно делается при расчете машин, что до настоящего времени для печей было невозможно. Содержание этой книги представляет собой оригинальную работу, которая лишь в незначительной степени основана на ранее опубликованных материалах.

В области расчета электрических печей приходится иметь дело с явлениями тепловыми, электрическими и химическими. Почти во всех работах, посвященных расчету печей, одна из этих сторон расчета оказывалась обойденной. В большинстве случаев это касалось тепловых, явлений, которые, однако, в данном случае имеют первостепенное, наиболее важное значение. Поэтому в настоящей книге именно на эту сторону и сделан главный упор не только при изложении основных положений, занимающих более половины объема книги, но и при рассмотрении типовых форм выпол-

нения печей, впервые систематически описываемых в настоящем труде.

Рассмотрение электрических промышленных печей нами ограничено таким образом: с одной стороны, исключены из рассмотрения печи, служащие для изготовления сырья и полуфабрикатов, а с другой — аппаратура.

Первую группу печей выделить было довольно легко, так как обработка металла в расплавленном состоянии и отливка четко определяют понятие металлургических и литейных печей. О главнейших задачах термоэлектрики в этом направлении имеются капитальные труды.

Под аппаратурой, по мнению автора, следует понимать те термоэлектрические приборы, которыми пользуются для нагревания не в закрытом пространстве (как, например, в печи), а полностью или частично на открытом воздухе, как, например, при сварке. Область аппаратуры чрезвычайно велика. Конструкция аппаратов в большинстве случаев еще больше приспосабливается к технологии процесса, чем при печах, и, потому, несмотря на некоторую произвольность такого выделения, от рассмотрения аппаратуры пришлось отказаться.

И, наконец, те печи, которые применяются в некоторых специальных производствах, хотя бы и в крупном масштабе (как, например, пекарные печи, печи полиграфической промышленности и т. п.), также оставлены без рассмотрения. Основания к этому те же, что и в отношении аппаратуры.

В обрабатывающей промышленности в настоящее время, за небольшими исключениями, находят применение, главным образом, *печи сопротивления косвенного нагрева* и в отдельных случаях *печи сопротивления прямого нагрева*. Индукционное нагревание до настоящего времени применяется настолько редко, что автору казалось более правильным не приводить электрическую теорию индукционных печей, к тому же чрезвычайно объемистую; описано только небольшое количество образцов индукционных печей. Но следует ожидать, что эта область в ближайшее время широко разовьется. Как уже было указано, основы расчета всех электрических промышленных печей, по нашему мнению, совершенно одинаковы, и только электрический расчет будет различен в зависимости от способа нагревания и назначения печи. Поэтому, глава «Расчет печей сопротивления» является попыткой установить общие положения, основы расчета для всех электропечей.

Большинство приведенных во второй части книги конструкций известно конструкторам электрических печей из специальной литературы. Лицам же, эксплуатирующим печи, они дадут представление о наиболее употребительных типах печей. За небольшими исключениями каждая печь, предназначенная для определенной работы, требует индивидуального проектирования, что вызывает необходимость совместной работы конструктора с технологом соответствующей области. В предлагаемой книге читатель вплотную сталкивается с учетом технологии отдельных процессов. Специалист, подходящий к вопросу технико-экономического развития печей, начиная с области их приме-

нения и кончая работами над проблемами печи, должен разбираться в вопросах печной техники. И в этом отношении ему должна прийти на помощь настоящая книга.

Читателям, для которых предмет книги совершенно нов, рекомендуется сначала ознакомиться с главой о конструкциях печей, прежде чем заняться проработкой первой части книги.

В разделе «Основы» устанавливаются важнейшие закономерности. Как уже было отмечено, полный расчет печей сопротивления публикуется в настоящей книге впервые. Автор считает необходимым предупредить, что книга эта не может служить руководством для того читателя, который, не имея никакого практического опыта в этом деле, пожелал бы конструировать электрические печи. Во многих местах расчета печей имеются ссылки на эмпирические коэффициенты, правильное применение коих зависит от опытности, которая не может быть замещена прочтением настоящей книги. Если, несмотря на невозможность полностью рассчитать печи, чисто теоретические главы расчета были развиты относительно подробно, то это сделано из тех соображений, что использование имеющегося опыта значительно облегчается изучением имеющих место физических закономерностей.

В главе «Строительные материалы» неметаллическим материалам уделено больше внимания, чем металлическим, потому что большинству конструкторов печей, выходящих из среды машиностроителей, несколько непривычно работать с керамическими материалами, свойства которых им часто менее известны, чем свойства металлов.

В виде иллюстративного материала в книге приводятся и рассматриваются только те конструкции, которые находятся в непосредственной связи с содержанием настоящей книги. При неограниченности рассматриваемой области вполне понятно, что в периодической литературе описывается большое количество печей, не представляющих ничего нового или особенно интересного с точки зрения техники. В меру необходимости автором была принята во внимание также и патентная литература, указание которой не претендует, однако, на исчерпывающую полноту.

В главах, посвященных рассмотрению основных закономерностей, часто применяются графические методы. Во многих случаях автор прибегал к помощи номограмм, а также к объединению номограмм и диаграмм. Последний метод, как кажется автору, до настоящего времени слишком мало применялся, между тем он позволяет во многих случаях сделать графики более наглядными и более удобными для работы. Таблицы в книге построены так, чтобы важнейшая часть определения размеров печи могла быть произведена с их помощью без расчета.

Одно описание и изображение внешнего вида печей, помещенных в специальной литературе, очень мало говорило бы об их конструкции. Поэтому автор счел необходимым опубликовать некоторые цифровые данные, касающиеся печей. Это встретило живой отклик со стороны большинства фирм.

Книга, касающаяся такой новой темы, как электрические промышленные печи, не может претендовать на исчерпывающую полноту. Автор полагает, что им положено только начало. Поэтому он просит всех товарищей по специальности помочь ему сообщением своих мнений и опыта, отличных от здесь изложенных.

Январь 1932 г.

Автор.

ВВЕДЕНИЕ

І. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Промышленные электропечи сопротивления и индукционные печи, которые и являются предметом настоящей книги, не охватывают собой всей обширной области электрических промышленных печей.

Классификация электропечей может быть произведена по признаку их назначения (сушка, закалка, плавление и т. д.) или по признакам теплотехническим (прямой или косвенный нагрев) или же, наконец, по способу преобразования энергии. Мы избрали последний признак для классификации, потому что от способа преобразования энергии в значительной мере зависит конструкция печи. Поэтому мы различаем дуговые печи и печи сопротивления (с жидким или твердым сопротивлением).

Последнюю категорию печей — печи сопротивления — можно, в свою очередь, разделить на две очень важных группы, в зависимости от того, применяются ли специальные нагревающие элементы (сопротивления), или же сам нагреваемый фабрикат является нагревающим элементом (сопротивлением). В первом случае мы имеем электропечи косвенного нагрева, а во втором — электропечи прямого нагрева¹.

Передача изделиям энергии в печах прямого нагрева может происходить путем индукции в том случае, если изделия представляют полностью замкнутую цепь для тока; печи же, где изделие включается в цепь первичного тока при помощи электродов, называются электродными и также относятся к печам прямого нагрева.

Индукционные печи, в свою очередь, можно подразделить на печи с железным сердечником и без такового. В результате, получается следующая классификация электрических промышленных печей (рис. 1).

А. Дуговые печи.

1. Печи прямого нагрева.
2. Печи косвенного нагрева.

В. Печи сопротивления

1. Печи прямого нагрева:

- а) печи с индуктивной связью (индукционные печи);
- а) печи с сердечником,

¹ Аналогичное подразделение можно произвести и для дуговых печей. Автор.

3) печи без сердечника.

б) Электродные печи.

2. Печи косвенного нагрева.

На рис. 1 изображены схемы электропечей различных типов, а именно:

1 — дуговая печь прямого нагрева; 2 — дуговая печь косвенного нагрева (нагрев лучеиспусканием); 3 — дуговая печь комбинированного нагрева — косвенного (за счет лучеиспускания) и прямого нагрева (ток проходит через материал от одной точки касания дуги к другой), нагревая его как сопротивление; 4 — печь сопротивления прямого нагрева с индуктивной связью (индукционная печь): α — с железным сердечником, β — без железного сердечника; 5 — печь сопротивления прямого нагрева (электродная печь); 6 — печь сопротивления косвенного нагрева (нагрев лучеиспусканием).

Вполне понятно, что возможно также и комбинирование различных способов нагрева.

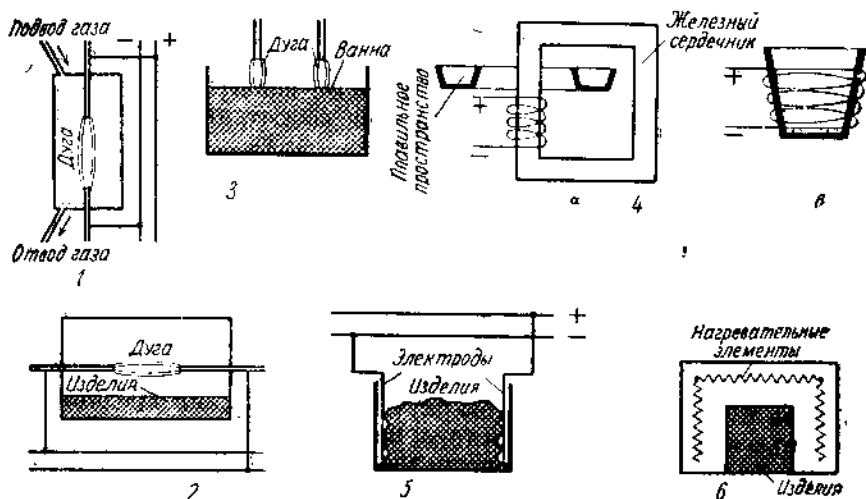


Рис. 1. Типы электропечей.

Для термической обработки дуговые печи не применяются, потому что возникающие в вольтовой дуге температуры, примерно, в 2—4 раза выше, чем это требуется технологическими процессами, а также и по той причине, что уменьшение температуры до желательного уровня было бы связано с бесполезными потерями тепла. Индукционные печи с железным сердечником в рассматриваемой нами области почти не имеют никакого значения, потому что в них изделие должно представлять собой замкнутую кольцеобразную цепь, что практически достижимо только для жидких проводников (расплавленный металл), и поэтому они для термической обработки не применяются¹. Индукционные печи без железного сердечника и электродные печи на-

¹ Исключением являются жидкие ванны (металлические, солевые и т. д.).

ходят в рассматриваемой нами области работ весьма ограниченно применение, в то время как печи сопротивления косвенного нагрева играют самую большую роль.

II. ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Вначале составим себе представление об основных частях печей. Существенной частью каждой печи является внутренняя полость — рабочее пространство печи, в котором помещается изделие, как мы будем называть материал, подлежащий нагреванию. Это рабочее пространство ограничивается внутренними стенками¹. В зависимости от максимальной рабочей температуры печи внутренние стенки могут состоять из металла или из керамических огнеупорных материалов.

Внутренние стенки печи снаружи со всех сторон окружены весьма существенной деталью электрической печи — тепловой изоляцией; вполне понятно, что высокая стоимость полученного электрическим путем тепла требует особенно тщательной тепловой изоляции. По традиции пламенных печей, в которых внутренняя часть стенки печи облицовывается шамотом, привыкли рассматривать последний как изоляцию. Однако это неверно, так как шамот очень хорошо проводит тепло, и потому электрические печи изолируют материалами, имеющими значительно худшую теплопроводность, чем шамот.

Кстати сказать, полученные при этом хорошие результаты послужили примером и для пламенных печей. Вся печь помещается, помимо того, в кожух, защищающий тепловую изоляцию от механических повреждений. Энергия подводится или через электроды, или через нагревательные элементы или же, наконец, через индукционные обмотки. Нагревательное устройство управляется регулирующими или переключающими приборами. Наконец, надо позаботиться о загрузке и разгрузке печи. В каждом отдельном случае имеются соответствующие приспособления, хотя бы в виде простой дверцы с соответствующей арматурой.

¹ Точнее стенками, подом и сводом. *Ред.*

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

І. РАСЧЕТ

А. ОБЩАЯ СХЕМА РАСЧЕТА

(для всех электрических промышленных электропечей)

Обозначения. В этой главе применяются следующие обозначения:

- t — время прогрева изделий,
- v — объем полезного рабочего пространства печи,
- k — постоянные величины (с индексами 1—4) — коэффициенты,
- n — число печей для освоения намеченной программы,
- Q_0 — потери холостого хода,
- E — общий расход работы (тепла) на заданную программу.

Расчет электрических печей, независимо от способа нагрева, должен, по мнению автора, основываться на ряде соображений, которые и приведены на следующих страницах.

Принятая ныне методология расчета электропечей обычно базируется на таких соображениях, что не всегда может быть найдена наиболее выгодная с экономической точки зрения печь для намеченной цели. Однако, как видно из последующего, автор учитывает условия эксплуатации, которые могут повести к тому, что при окончательном установлении размеров печи, несмотря на правильное понимание значения общепринятых соображений, им все же иногда приходится не придавать решающего значения.

В последующих главах соображения автора выражаются в виде определенных указаний по расчету печей сопротивления. Совершенно аналогичным образом можно было бы установить методологию расчета и для других категорий печей, что, однако, не входит в задачи настоящей книги.

Прежде всего мы должны выяснить основные принципы печестроения, которые часто остаются в тени, но помнить которые целесообразно при каждом расчете печи. Расчет печи должен разрешить следующие задачи:

1. Заданное количество изделий должно быть нагрето не ниже определенной минимальной температуры, причем ни одно изделие, ни в одной точке не должно быть нагрето выше другой определенной

максимальной температуры, при условии, что названные изделия поступают вполне определенной формы и размеров; нагревание должно быть закончено не позже, чем в заранее установленный промежуток времени.

Задача эта имеет бесконечное количество решений, однако она становится вполне определенной, как только мы вводим следующее (первое экономическое) задание.

2. Описанное в п. 1 нагревание должно происходить с минимальной затратой тепла.

К этому следует добавить, что обычно минимальный расход тепла тем ниже, чем больше рассматриваемый промежуток времени; количество изделий, конечно, увеличивается пропорционально времени. Так как изделия всегда поступают несколько неравномерно, то течение более или менее длительного промежутка времени количества их выравнивается. Задание (2) на практике не всегда осуществимо, если, например, ему противоречат эксплуатационные соображения.

Во многих случаях печь с наименьшим расходом тепла не является одновременно печью с минимальной стоимостью тепла. В некоторых случаях, несмотря на худшее использование печи и повышенный расход тепла, все же удается достигнуть более дешевой эксплуатации, если при проектировании вместо задания 2 будет поставлено задание 2а, (второе экономическое задание).

2а. Описанное в задании 1 нагревание должно производиться, согласно тарифа на электроэнергию, с наименьшей стоимостью тепла.

Затем, должны быть приняты во внимание капитальные затраты и наконец следует помнить, что эксплуатация, помимо стоимости тепла и амортизации затраченных средств, влечет за собою и накладные расходы, а также связана с зарплатой, так что, в конце концов, к печи придется поставить наиболее общее (третье экономическое) задание.

3. Описанное в задании 1 нагревание должно быть выполнено с минимальными общими эксплуатационными расходами.

Последнее требование, правда, нарушает ту определенность, которой мы достигаем при расчете по минимальной стоимости тепла (2а), так как для одинаковой формы и размеров печи количество загруженного в печь материала может быть принято различным, равно как и при одинаковой величине загрузки тип и размеры печи могут тоже быть различны (тип и размеры печи в свою очередь сильно влияют на зарплату, накладные расходы и даже на стоимость тепла). Поэтому единообразного решения задания 3 ожидать нельзя.

При постановке задания 1 упоминалось, что оно допускает бесконечное количество решений; так, например, изделия можно нагревать в предписанное время в одной большой или в нескольких малых печах. Приведенные выше соображения приводят к определению наиболее экономичной величины печи для заданной программы, которая в первую очередь обуславливает количество печей. Ход расчета можно уяснить себе из диаграммы, которую рекомендуется составлять при

каждом расчете печи. Схематически эта основная диаграмма изображена на рис. 2. Она показывает общий ход расчета и всегда относится к определенному типу печей (камерная, конвейерная печь и т. п.). Так как для всякой установки могут быть применены различные типы печей, то диаграмму следует вычерчивать для каждого типа отдельно: диаграмма определяет оптимальную величину данного типа печи, соответствующую наименьшим затратам, как в отношении стоимости единицы тепла, так и в смысле амортизации. После этого путем сопоставления определяется наиболее экономичный тип печи.

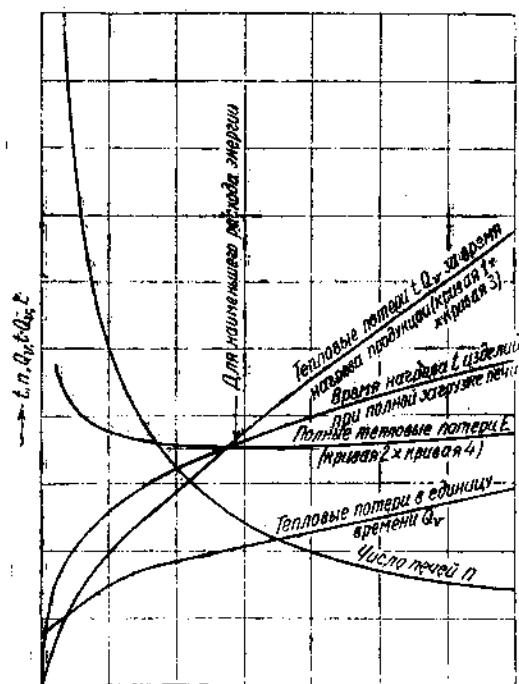


Рис. 2. Основная диаграмма для расчетов величин и числа печей (печи с наименьшим расходом тепла) при заданной суммарной производительности печей.

лий, под влиянием которой происходит прогревание всей массы изделия. В печах прямого нагрева в изделии также возникает такой перепад температуры. Так, например, в индукционных печах, как известно, большая часть энергии преобразовывается в теплоту на внешних поверхностях металла, вследствие скин-эффекта и явления индукции. Разница между температурой поверхности и внутренних частей изделия должна постепенно уменьшаться; время, необходимое для равномерного нагрева изделий во всем точках их объема до требуемой температуры, считая с момента начала нагревания, называется временем нагрева.

Время нагрева с увеличением толщины слоя загруженных изделий всегда возрастает, причем кривая эта вогнута со стороны оси абсцисс. В качестве примера такой кривой приводим уравнение $t = \sqrt[3]{v} \cdot k_1$, где t — время нагрева, v — объем полезного рабочего пространства печи (емкость ее) и k_1 — коэффициент.

На основании кривой 1 времени нагрева можно построить кривую числа печей (кривая 2). Вполне понятно, что число печей n , необходимое для выполнения определенной программы, пропорционально времени нагрева и обратно пропорционально емкости отдельной печи ($n = k_2 \cdot \frac{t}{v}$). При построении кривых времени на-

грева и числа печей следует обращать внимание на то, что при увеличении отдельных линейных размеров печи соотношения могут значительно измениться; так, например, увеличение толщины слоя нагреваемых изделий, без одновременного увеличения поверхности пода, может повлечь за собой необходимость установки большего числа печей, несмотря на большую емкость каждой отдельной печи, чем это было бы при более тонком слое. Если изделие должно по окончании нагрева находиться некоторое время в печи, как это очень часто бывает в плавильных печах, то кривая получает, разумеется, несколько иной характер.

Наконец, следует кривая потеря (кривая 3). Вследствие разности температур с наружной и внутренней стороны печной стенки, через последнюю протекает своего рода тепловой поток, который на основании законов теплопередачи, между прочим, пропорционален площади наружной поверхности печи и который мы должны отнести на счет потерь (теплоотдача в единицу времени). Из конструктивных соображений, к которым мы вернемся ниже, изделиями может быть заполнено не все внутреннее пространство печи, а только некоторая часть его, которую мы называем полезным рабочим пространством.

Так как и при бесконечно малом полезном рабочем пространстве в печи должно быть внутреннее пространство конечной величины, то кривая потеря не может проходить через нулевую точку. Тепловые потери, разумеется, возрастают с увеличением объема печи, однако они пропорциональны не полезному объему печи, а площади ее наружной поверхности¹, поэтому кривая потеря выгибается вверх от оси абсцисс. Эту кривую следует определять по точкам; в качестве примера такой кривой приведем уравнение $Q_p = (k_4 + k_3 \sqrt[3]{V^2})$, дающее кривую, подобную той, которая получается при фактически возникающих потерях (Q_p — потери в тепловых единицах за единицу времени, k_4 и k_3 — коэффициенты).

Кривая 4 показывает тепловые потери печи в течение всего времени нагрева и, следовательно, представляет собой произведение кривых 1 и 3, т. е. $t \cdot Q_p$. Она дает тепловые потери в единицах тепла.

Общие потери энергии E на заданную программу (кривая 5) получаются в виде произведения числа печей и тепловых потерь одной печи в течение всего времени нагрева (кривая 2, умноженная на

¹ О том, какую поверхность принимать в расчет в каждом отдельном случае, сказано ниже (см. стр. 54).

кривую 4). Так как, согласно основного условия построения диаграммы, для всех значений абсцисс общая программа одна и та же, а потому одинаков и полезный расход тепла, то для нахождения величины печи с минимальным расходом тепла достаточно определить тепловые потери. Тогда для избранного примера имеем уравнение:

$$E = Q_v \cdot t \cdot n = \frac{Q_v \cdot t^2}{v} \cdot k_2 = \left(\frac{k_4 + k_3 \sqrt[3]{v^2} \cdot k_1^2 \cdot k_2}{v} \right).$$

Если заменить $k_1^2 \cdot k_2$ общим коэффициентом K , то путем дифференцирования, действительного только для данного примера, получаем:

$$E_{\min} = 2K \sqrt[3]{k_3 \cdot k_4}; \quad v_{\min} = \sqrt[3]{\left(\frac{k_4}{k_3} \right)^3}.$$

Диаграмма описанной формы действительна для непрерывной работы печей. Если желают определить экономическую величину печи для работы с перерывами, то кривые 1, 3 и 4 могут найти применение без всяких изменений. Что же касается кривой числа печей (кривая 2), то она должна быть увеличена на отношение:

(время работы + время простоя); на время работы.

Диаграмма, изображенная на рис. 2, дает решение, отвечающее заданию 2.

Для удовлетворения условиям задания 2а должен быть известен тариф на электроэнергию. Зависящая от объема печи продолжительность нагрева и необходимость порою выдерживать изделие некоторое время при температуре окончательного нагрева и по окончании нагрева могут повлечь за собою такие колебания в нагрузке электростанции, что, в зависимости от величины печи, могут быть назначены весьма различные цены на электроэнергию. Если бы нанести их над той же осью абсцисс и умножить на соответствующие значения кривой 5, то получилась бы стоимость тепла (кривая стоимости тепла)¹.

Выше уже отмечено, что удовлетворение задания 3 не может быть одинаковым для всех случаев. Капитальные затраты, относящиеся к группе накладных расходов, можно учесть так же, как это было сделано для цены на энергию. На диаграмму, приведенную на рис. 2, следовало бы нанести также стоимость капитальных затрат в зависимости от величины печи, перемножить на соответствующие значения кривой 2 и полученную кривую прибавить к кривой стоимости тепла. От нанесения этой кривой пришлось отказаться, чтобы не загромождать диаграммы рис. 2. Однако со всем тем капитальные затраты представляют собою лишь некоторую долю накладных

¹ От графического изображения кривой стоимости тепла пришлось отказаться, так как ее форма может быть настолько различной в зависимости от тарифа, что всякий пример был бы совершенно произвольным.

расходов, остальная часть их колеблется в каждом отдельном случае и только частично зависит от величины печи. Отражающиеся в накладных расходах условия эксплуатации и являются причиной того, что в некоторых случаях выбор величины и числа печей не производится согласно результатам описанного здесь способа¹.

В заключение и, частично, в повторение выше сказанного нужно подчеркнуть следующее:

1. Отмеченные здесь соображения действительны для всех электрических печей, независимо от способа нагрева.

2. Эти соображения должны быть положены в основу каждого расчета печи.

3. Для сокращения работы представляется возможным производить полный расчет только для более или менее крупных проектов; расчет же отдельных точек кривой и сопоставление следует производить во всех случаях.

4. Порядок выполнения отдельных частей расчета для печей сопротивления косвенного нагрева приведен в настоящей книге на стр. от 16 до 100; для других типов печей он в некоторых частях еще не установлен. Для индукционных печей аналогичные вычисления значительно усложняются электрическими расчетами.

5. С расширением наших знаний в области конструирования электропечей возможно будет придать приведенным здесь качественным соображениям форму более строгого расчета и установить кривые основной диаграммы, действительные для всех случаев (типовые кривые).

6. Накладные расходы во многих случаях заставляют принять число и величину печей, не соответствующие данным основной диаграммы. Однако во всех случаях должен быть произведен вышеуказанный расчет, чтобы при помощи этой диаграммы можно было бы представить себе их влияние на стоимость тепла.

Расчет печи должен быть всегда основан на заданной производительности (вес, время), размерах изделий и температуре нагрева; что касается последнего фактора, то, в противоположность существующим взглядам, должна быть указана не одна температура, а некоторые пределы т. е. максимальная температура, выше которой изделие не должно быть нагрето, и минимальная, до которой изделие должно быть нагрето во всяком случае.

Порядок расчета печей следующий:

1. Время нагрева. Для нескольких размеров печей на основе известных размеров изделий определяется время нагрева при определенной разности температур в изделии (кривая 1 основной диаграммы).

¹ Замечание к п. 3 (стр. 11).

Соображения автора, что «нагревание должно быть выполнено с минимальными общими эксплуатационными расходами» верно и в условиях нашей советской экономики. Однако, последующие соображения автора по вопросу о тарифе на электроэнергию в соответствии с мощностью электрической печи к нашим условиям не всегда могут иметь место *Ред.*

2. Величина и число печей. Из определенного для различной величины печей времени нагрева и предписанной программы устанавливается зависимость между числом печей и их величиной (кривая 2 основной диаграммы).

3. Полезное тепло. Рассчитывается из времени нагрева и производительности в единицу времени (число печей).

4. Потери определяют по величине печей, принимая во внимание способ эксплуатации (суточное число часов работы), термические и электрические потери, причем следует учесть так называемую экономическую толщину стенки (кривая 3 основной диаграммы).

Расчеты по пп. 1—4 должны быть произведены для печей нескольких величин, чтобы получить данные для построения основной диаграммы. Для выбранной на основании последней величины печи рассчитываются следующие пункты 5—7.

Если в целях сокращения работы все кривые основной диаграммы полностью не вычерчиваются, то все же следует рассчитать две или три величины печей, чтобы видеть порядок минимальной величины.

5. Источник энергии. Потерями и полезной теплотой определяется средний расход энергии, необходимой на время нагревания. Отсюда после выбора внутренней схемы включения (число и род цепей тока) можно рассчитать источник энергии (сопротивления, индукционная катушка и т. д.).

6. Внешняя схема включения. Расчет и проект регулировки.

7. Расчет экономичности и эксплуатационных расходов.

Б. РАСЧЕТ ПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В настоящее время во многих случаях практики нижеописанные методы расчета смогут найти только частичное применение. Описаны они здесь потому, что понимание хода расчета при оценке на глаз, без примерных вычислений невозможно.

Пример. Болты должны быть подвергнуты обычному отжигу. Месячная программа 240 т. Болты должны быть нагреты до температуры максимум 600°, минимум 575°. Заплавляемый болтами объем на основании опыта составляет 0,055—0,060 м³/100 кг.

По этим данным сделан примерный расчет печи и соответствующих разделах главы «Расчет».

1. ВРЕМЯ НАГРЕВА

(кривая 1 основной диаграммы)

Обозначения. В этом разделе приняты следующие обозначения:

- θ_0 — температура поверхности изделия (°C);
- θ_1 — внутренняя температура в центре изделия (°C);
- $\Delta\theta$ — перепад (разность) температур изделия (°C);
- θ_p — относительный перепад температуры;
- θ_6 — температура печи (°C);
- t — время нагрева (час);

λ — теплопроводность $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м, час., } ^\circ\text{C}} \right)$,

γ — удельный вес

c — теплоемкость $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$;

α — коэффициент теплопередачи $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час.}} \right)$;

$a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ — температуропроводность $\left(\frac{\text{м}^2}{\text{час.}} \right)$;

$h = \frac{\alpha}{\lambda}$ — относительный коэффициент теплопередачи $\left(\frac{1}{\text{м}^2} \right)$;

Q — переданное количество тепла (кал. или кВтч);

T_0 — абсолютная температура поверхности изделия (абс. град.);

T_c — абсолютная температура печи (абс. град.);

F_I — площадь поверхности изделия (м^2);

F_{II} — площадь лучеиспускающей внутренней поверхности печи (м^2);

C_1 — коэффициент лучеиспускания материала изделия $\left(\frac{\text{Кал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час.} \cdot ^\circ\text{C}^4} \right)$;

C_2 — коэффициент лучеиспускания внутренней поверхности стенки печи;

C_3 — коэффициент лучеиспускания черного тела;

Ξ — переводной коэффициент для температурных степеней.

Временем нагрева изделия в печи условимся называть то время, которое необходимо, чтобы довести каждую часть объема изделия до необходимой температуры.

Нагревание изделий в печи требует нагрева ее до температуры более высокой, чем необходимая температура нагрева изделий. Чем больше указанное превышение температуры, тем скорее нагреются изделия; благодаря разности температур тепло поглощается поверхностью изделия, а с нее передается внутрь. Температура поверхности тела будет всегда выше, чем температура внутренних его слоев.

Если мы изобразим в виде кривых процесс нарастания температуры внутри и на поверхности тела любой формы, то мы получим картину, подобную приведенной на рис. 3. На этой диаграмме принято, что температура печи во время нагрева изделия остается по-

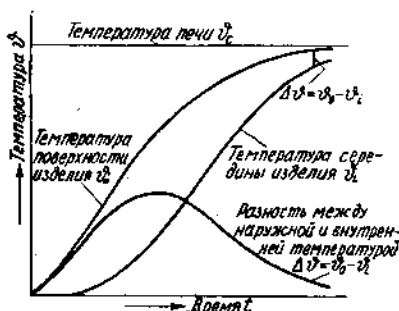


Рис. 3. Повышение температуры на поверхности и в центре изделия в функции времени (по Булле, Ж 1.)

стоянной; из диаграммы видно, что время нагрева зависит от допущенной разности температур (перепада $\Delta\theta$) в изделии по окончании нагрева; таким образом для нагрева, предписанного программой количества изделий, требуется тем больше времени, чем меньше допускаемая разность $\Delta\theta$ температур в центре и на поверхности изделия. Если разность температур $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_1$ должна быть равна нулю, т. е., если требуется, чтобы на поверхности и внутри изделия имели одну и ту же температуру, то время нагрева становится равным бесконечности.

Изучением этих закономерностей мы и должны заняться в первую очередь; исследования Крауса (К1) и Гребера (К 2, 3), позволили количественно выразить такого рода закономерности. Данные этих авторов применены для расчета печей Булле (Ж 1)¹, автором (Ж 2), и Шаком (Ж 3).

а) Время нагрева без учета температурных потерь при загрузке изделий в печь

Сначала предположим, что температура печи при загрузке не понижается и что печь все время находится в состоянии теплового равновесия. В этом случае повышение температуры изделия зависит от коэффициента теплопередачи, формы изделия и свойств его материала. Математическое выражение существующих для этого случая закономерностей весьма трудно даже для основных простейших форм изделий, для которых они только и выведены до настоящего времени, а именно: для бесконечно протяженной плиты, бесконечно длинного цилиндра, а также для шара и куба.

Из основных дифференциальных уравнений выводятся уравнения для тел различной формы, уравнения, дающие температуру внутри тела и на его поверхности в функции окружающей температуры (температуры печи) в зависимости от времени нагрева, свойств материала, размеров изделий и коэффициента теплопередачи. Все эти основные уравнения имеют следующую характерную форму

$$\vartheta_r = \vartheta_c \Phi_r \left(hR, \frac{at}{R^2} \right),$$

где ϑ_r — температура изделия в точке, находящейся на расстоянии r от его поверхности (например, наружной поверхности ϑ_o или середины изделия ϑ_i), ϑ_c — окружающая температура (температура печи), Φ_r — очень сложная функция величины hR и $\frac{at}{R^2}$, где h относительный коэффициент теплопередачи ($h = \frac{\alpha}{\lambda}$, причем α есть коэффициент теплопередачи, а λ — теплопроводность); R — характерный размер, определяющий в основном время нагрева (например, радиус шара, цилиндра, половина толщины плиты и т. д.), a — коэффициент температуропроводности ($a = \frac{\lambda}{c\gamma}$, где c есть удельная теплота, а γ — удельный вес); t — время, прошедшее от начала нагревания.

Обычно требуется, чтобы температура изделия во всех его точках не превышала определенного уровня; в идеальном случае изделие должно иметь везде одинаковую температуру; допущение некоторой разности в температурах наружных и внутренних слоев

¹ Обозначения К и Ж с цифрами представляют собою ссылки на литературу, помещенную в конце книги: К относится к указателю книг, Ж — к журнальному указателю.

служит только для того, чтобы можно было вычислить время нагрева в конечных величинах. Для этого случая могут быть сделаны следующие выводы.

Если в приведенном выше уравнении принять $r = 0$ и $r = R$, то получают температуру на поверхности и в центре изделия. Разность этих температур $\Delta\theta$ по Булле (Ж 1) называется перепадом температуры; по греберовским функциям она получается, как функции температуры печи

$$\theta_0 - \theta_i = \theta_c (\Phi_0 - \Phi_i).$$

В указанных в конце книги литературных источниках имеются диаграммы, изображающие функции Φ для различных основных форм изделий как на поверхности, так и внутри тела. Из них можно получить искомое время нагрева для определенного перепада температуры. Рис. 4, 5 взяты из работы Шака ¹. Ось абсцисс начерчена в различных масштабах. Так как температура печи в большинстве случаев не указывается, а задается только максимальная температура изделия, то вначале следует принять температуру печи более или менее произвольно ². Отсюда получается ордината, как соотношение $\frac{\theta_0}{\theta_c}$.

После этого вычисляется значение абсциссы для рассматриваемых свойств изделия, его размеров и температуры (hR). Из абсциссы и ординаты определяется параметр кривой $\frac{at}{R^2}$ (рис. 4).

По тому же параметру находится отношение $\frac{\theta_i}{\theta_c}$ (рис. 5), и, так как θ_c известна заранее, то определяется и θ_i . Если последняя величина оказывается слишком малой, значит, температура печи θ_c принята слишком высокой; тогда проверяют расчеты с более низким значением θ_c и производят его до тех пор, пока не будет найдено желаемое значение или несколько превышающее его.

Описываемый расчет может быть сокращен при помощи способа, предложенного автором (Ж 4), основанного на том, что равномерность температуры, температура печи и время нагрева вполне определенным образом связаны между собою. Введем понятие *относительного температурного перепада* ³ (рис. 6, 7, 8).

$$\theta_r = \frac{\theta_0 - \theta_i}{\theta_0} = \frac{\frac{\theta_0}{\theta_c} - \frac{\theta_i}{\theta_c}}{\frac{\theta_0}{\theta_c}}. \quad (1)$$

¹ У Шака кривые, выведенные на основании данных Гребера, относятся к процессу охлаждения; у нас они пересчитаны на нагрев.

² Температура печи принимается в зависимости от ее конструкции: для печей прямого нагрева — температура нагревающего элемента, для печей косвенного нагрева — температура стенки муфеля, при ваннах — температура ванны.

³ Относительный температурный перепад не имеет измерения; он является отвлеченным числом; это понятие аналогично известному понятию относительного времени включения, которое тоже является отвлеченным числом.

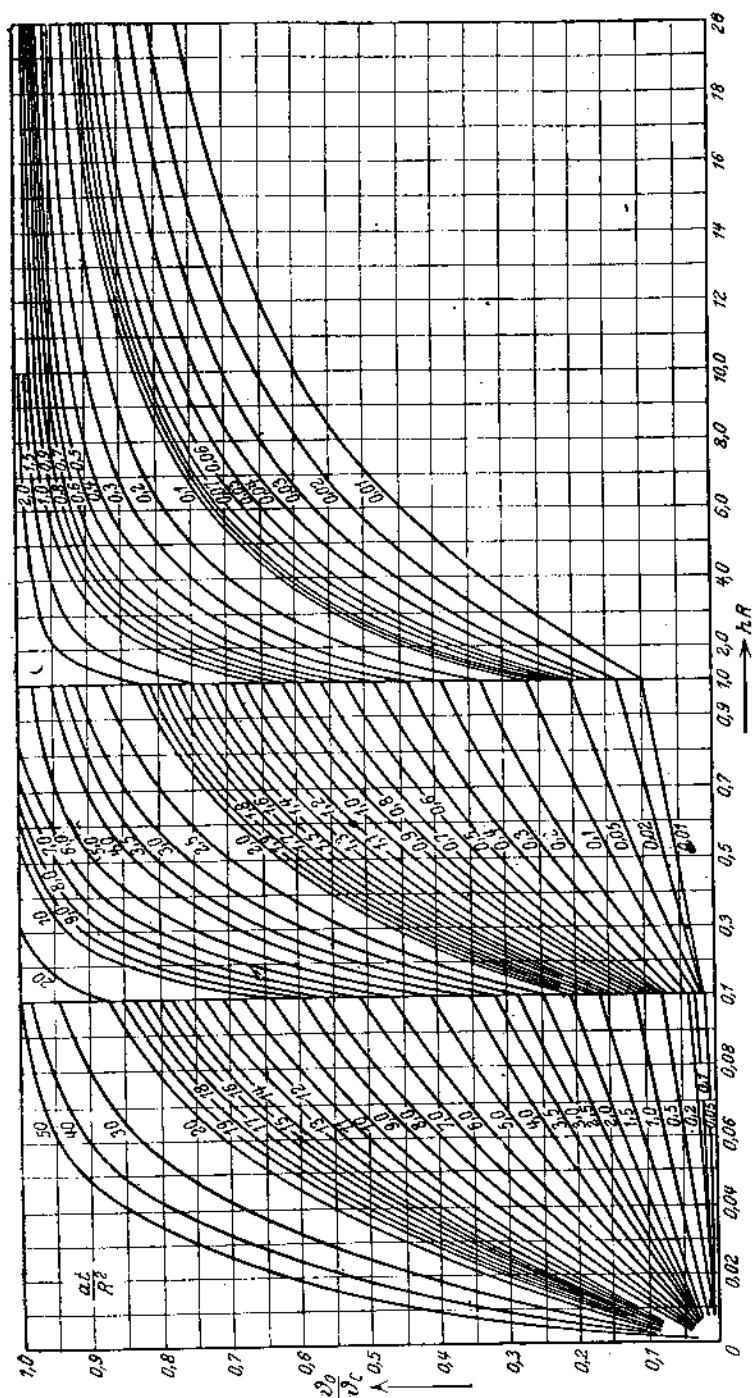


Рис. 4. Определение температуры поверхности ϑ_0 из уравнения $\frac{\vartheta_0}{\vartheta_c} = f\left(\frac{aL}{hR}, \frac{aL}{R^2}\right)$. Бесконечно протяженная плита (по Греберу и Шаку).

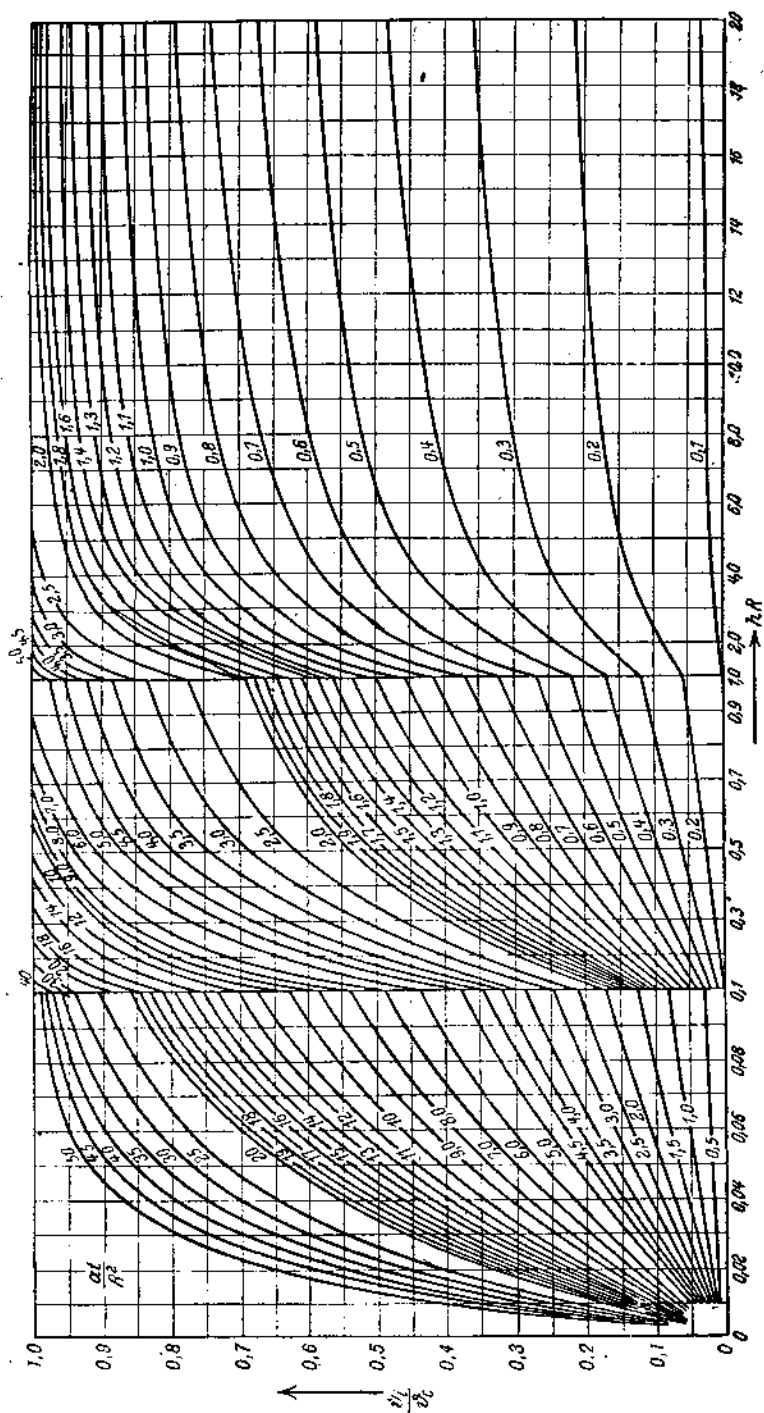


Рис. 5. Определение внутренней температуры θ_c и θ_0 при $\theta_c = f\left(\frac{\alpha l}{hR, R^2}\right)$ Бесконечно протяженная плита (по Греберу и Шаку).

В соответствии с этим ϑ_p может быть получено из выведенных Гребером функций.

На рис. 6, 7 и 8 изображено $\vartheta_p = f \left[hR, \frac{at}{R^2} \right]$.

Чтобы сделать более наглядным улучшение нагревания с повышением температуры, на рис. 6—8 в отличие от обозначений, принятых на рис. 4, 5, 9 и 10, функция времени $\frac{at}{R^2}$ отложена по оси абсцисс, а величина hR , нанесена в качестве параметра кривой. Первоначально определяется, как описано выше, ϑ_p и hR . Таким образом из рис. 6—8 (относящихся к шару, плите и цилиндру) вытекает значение $\frac{at}{R^2}$. Так как a и R известны, то этим определяется и величина t . При помощи той же величины hR и найденной величины $\frac{at}{R^2}$ из рис. 9, 4 или 10 находят отношение $\frac{\vartheta_p}{\vartheta_c}$, а отсюда и ϑ_c (так как ϑ_0 известно). Благодаря этому отпадает бывшее до сего времени неизбежным нахождение ϑ_c путем последовательного подбора. В тех редких случаях, когда во всех точках изделия требуется одинаковая температура, следует вернуться к первоначальным уравнениям Гребера. Вместо того, чтобы пользоваться величиной ϑ_i , нужно определить ϑ_p в виде функции от $\frac{at}{R^2}$ для соответствующего места, в отношении которого указана иная температура. Дальнейший же расчет проводится, также.

При нагревании изделий в жидких ваннах (свинцовые, соляные, масляные ванны) можно считать, что поверхность изделия немедленно принимает температуру ванны, а следовательно коэффициент теплопередачи $\alpha = \infty$. В таком случае вре-

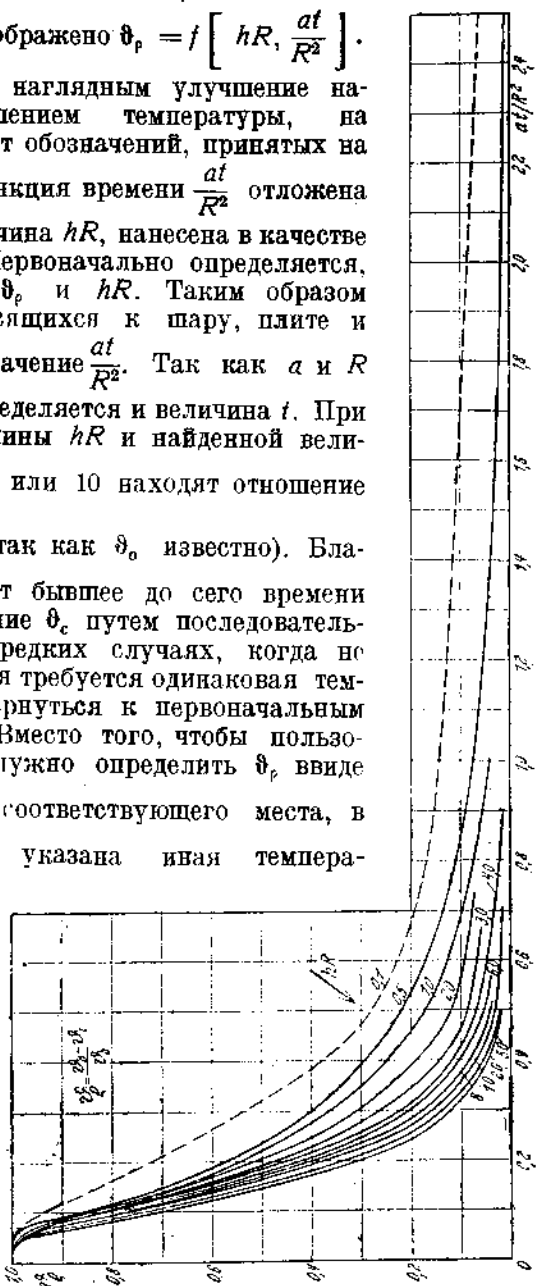


Рис. 6. Относительный температурный перепад $\vartheta_p = f \left(hR, \frac{at}{R^2} \right)$. Шар.

мья погружения, необходимое для достижения, определенной температуры сердечника изделия, получается из выражения $\frac{at}{R^2}$, изображенного на рис. 11.

При этом принято, что ванна имеет достаточный объем, чтобы загрузка изделий не слишком низко понизила ее температуру. Обозначения см. на рис. 11.

б) Время нагрева с учетом температурных потерь при загрузке изделий в печь

При загрузке печи изделиями происходит понижение ее температуры; температура в ваннах также понижается. По способу Шмидта (К 4) и Нуссбаума (Ж 5) изменение температуры в изделии может быть определено графическим путем, если в основу положить определенный температурный режим печи. Расчет, при котором в основу положена средняя температура печи между нормальной ϑ_c и температурой после загрузки ϑ'_c , не может быть проведен, потому что эта средняя температура может оказаться ниже, чем это требуется для поверхности изделия. В этом случае можно приблизительно учесть влияние падения температуры во время загрузки, добавив некоторую величину к времени нагрева. Добавлением этой величины учитывается, что в течение промежутка между двумя операциями t' в печи господствует неполная температура. Эта добавка определяется путем сравнительного расчета с полной и пониженной температурой: сперва рассматривают время t' и находят из hR^2 и $\frac{at'}{R^2}$ температу-



Рис. 7. Оглюжительный температурный перепад $\vartheta'_c = t' \left(\frac{at'}{hR^2} \right)$ Бесконечно протяженная плита.

ру поверхности изделия для конца промежутка между операциями. Эта величина ϑ'_0 относится, разумеется, к среднему значению $\frac{\vartheta_c + \vartheta'_c}{2}$. Затем она пере-

считывается на полную температуру печи, как это показано в примере. При помощи этого пересчитанного значения ϑ''_0 и известной величины hR , находят новое значение $\frac{at''}{R^2}$; разность $t' - t''$ представляет собою

искомую величину, которая должна быть прибавлена к времени нагрева, определенному без учета падения температуры во время загрузки печи.

Пример: $\vartheta'_c = 0,7 \vartheta_c$.

Из hR в $\frac{at'}{R^2}$ находим: $\frac{2\vartheta'_0}{\vartheta'_c + \vartheta_c} = 0,18$ (по одной из диаграмм 4, 9, 10).

Пересчитываем на ϑ_c

$$\frac{\vartheta''_0}{\vartheta_c} = 0,18 \frac{\vartheta'_c + \vartheta_c}{2\vartheta_c} = 0,18 \cdot \frac{1,7}{2} = 0,153.$$

Из $\frac{\vartheta''_0}{\vartheta_c}$ и hR находим $\frac{at''}{R^2}$ (по одной из тех же диаграмм). Таким образом $t' - t''$ представляет собою искомое добавление.

Из ϑ_p и hR : t (опять таки по одной из кривых рис. 4, 6, 10) находим время нагрева равное $t + t' - t''$.

Если закон изменения температуры на поверхности изделия известен, то можно применить приближенный метод расчета, предложенный Шаком (Ж 3 и Ж 6).

с) Влияние коэффициента теплопередачи и других величин, встречающихся в уравнениях, на время нагрева

Выведенные выше кривые дают возможность простого расчета в самых разнообразных случаях. Однако они не отличаются наглядностью. Из них нельзя уви-

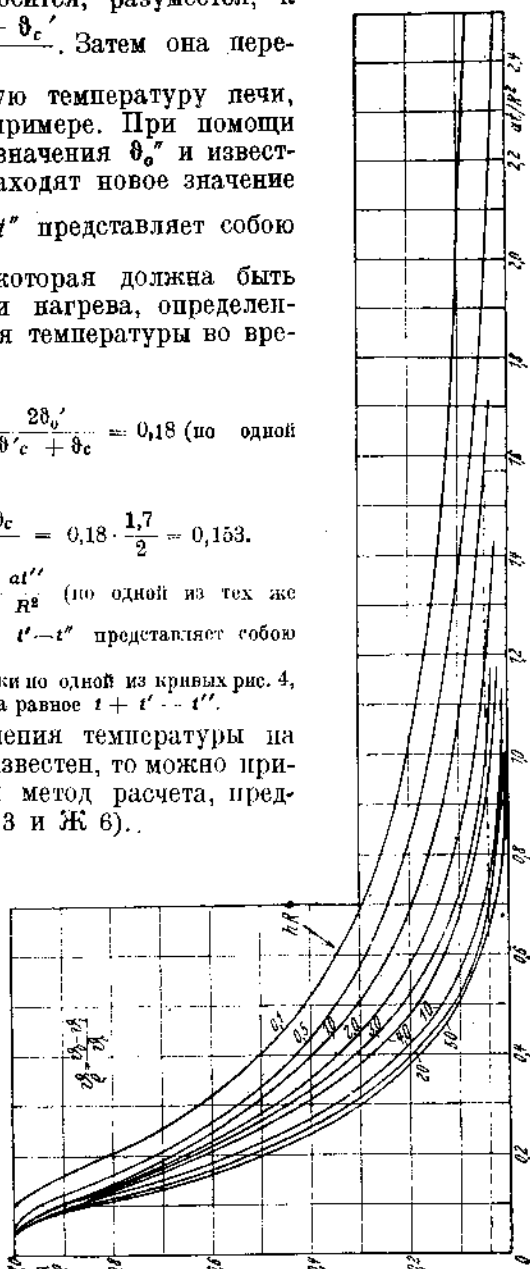


Рис. 8. Относительный температурный перенос $\frac{at}{R^2} = t \left(\frac{hR}{R^2} \right)$. Бесконечно длинный цилиндр.

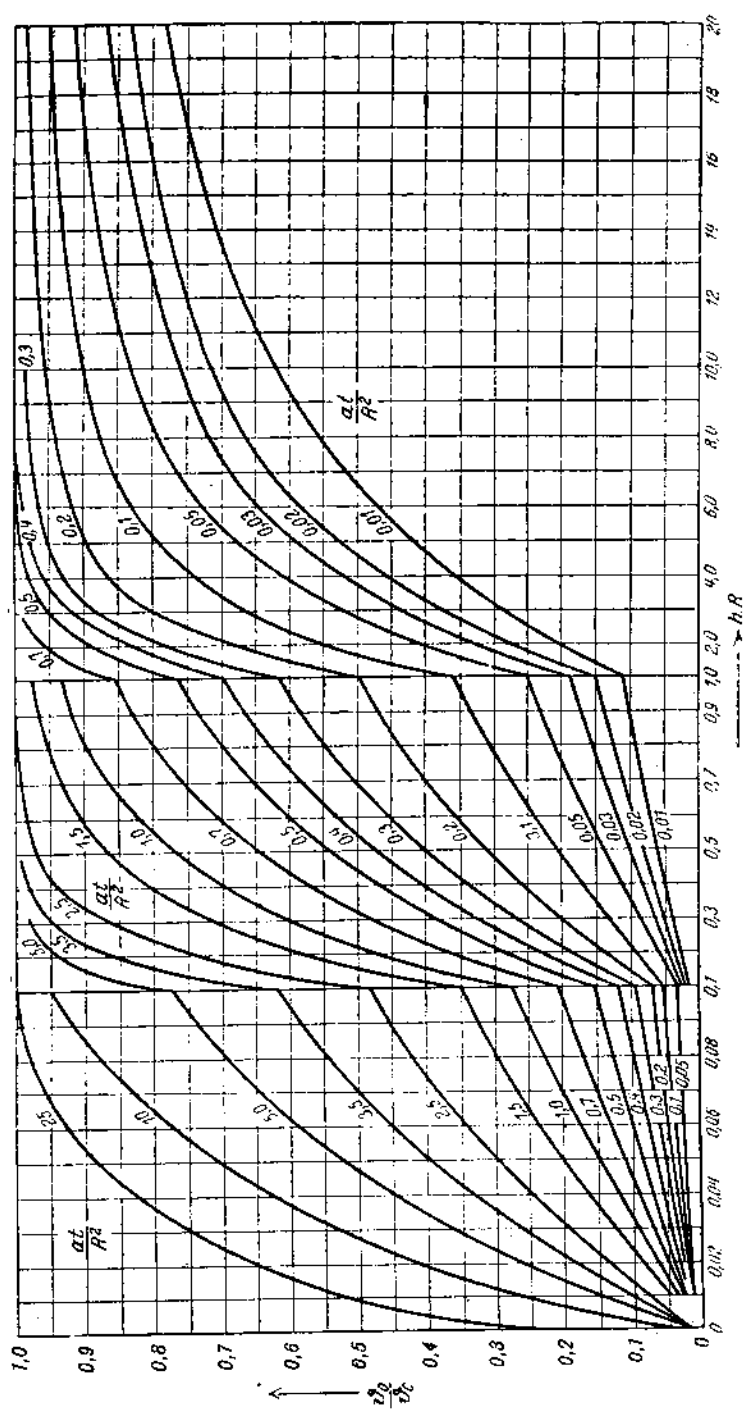


Рис. 9. Определение температуры поверхности из $\frac{q_0}{kR} = f\left(\frac{q_0}{kR}, \frac{hR}{kR}\right)$ - Швар. (По Греберу и Шаку).

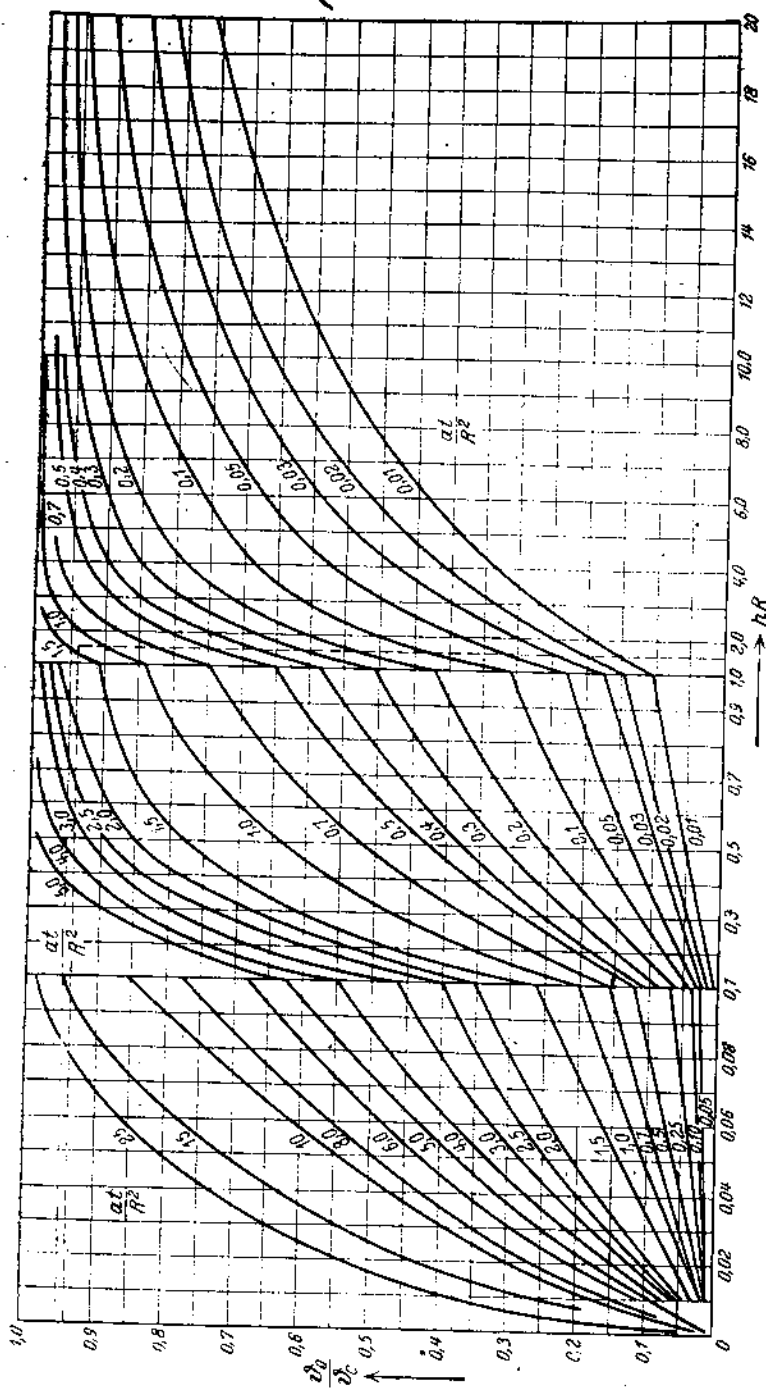


Рис. 13. Определение температуры поверхности из $\frac{\partial \theta}{\partial z} = f\left(\frac{at}{hR, R^2}\right)$. Безразмерно длинный цилиндр. (По Греберу и Шаку).

деть влияния отдельных величин, встречающихся в уравнениях. Поэтому был проделан ряд примеров (Пашкис, Ж 2) (рис. 12, 13, 14), из коих вытекает, что коэффициент теплопередачи имеет исключительно большое влияние на время нагрева, даже в изделиях относительно крупных (до 200 мм). Влияние физической

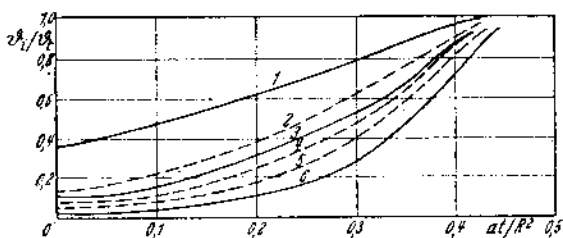


Рис. 11. Нагревание различных тел в ванне (повышение температуры сердечника при $\alpha = \infty$. (По Греберу, Вильямсону и Адамсу).

1 — бесконечно протяженная плита; 2 — бесконечно длинная квадратного сечения призма; 3 — бесконечно длинный цилиндр; 4 — куб; 5 — цилиндр длиной, равной диаметру; 6 — шар.

постоянной α , разумеется, исключается, а влияние размера изделия возможно только в небольших пределах (увеличение толщины слоя изделий в печи). С другой стороны, можно значительно повысить коэффициент теплопередачи. Шак (Ж 3) доказывает, что при больших значениях коэффициента теплопередачи время нагрева пропорционально квадрату толщины стенки изделия или диаметра.

Таблица 1

Материалы	0°		200°		400°		600°		800°		900°	
	λ	α	λ	α	λ	α	λ	α	λ	α	λ	α
Алюминий	162	0,27	137	0,22	155	0,25	205	0,32	расплавлен		—	—
Свинец	30	0,078	28	0,073	27*	0,070	расплавлен		—	—	—	—
Железо	38	0,057	36	0,040	34	0,030	31	0,024	27	0,019	25	0,018
Медь	340	0,400	320	0,36	310	0,33	300	0,31	290	0,31	280	0,30
Латунь (30% цинка)	80	0,12	94	0,13	100	0,13	47		50	0,045	51	0,046
Никель	48	0,043	47	0,042	42	0,038	расплавлен		—	—	—	—
Цинк	97	0,15	92	0,14	80	0,11	расплавлен		—	—	—	—
Олово	57	0,11	51	0,10	расплавлено		—	—	—	—	—	—
Стекло	0,6	0,0011	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Фарфор	0,9	0,0017	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значения для 300°.

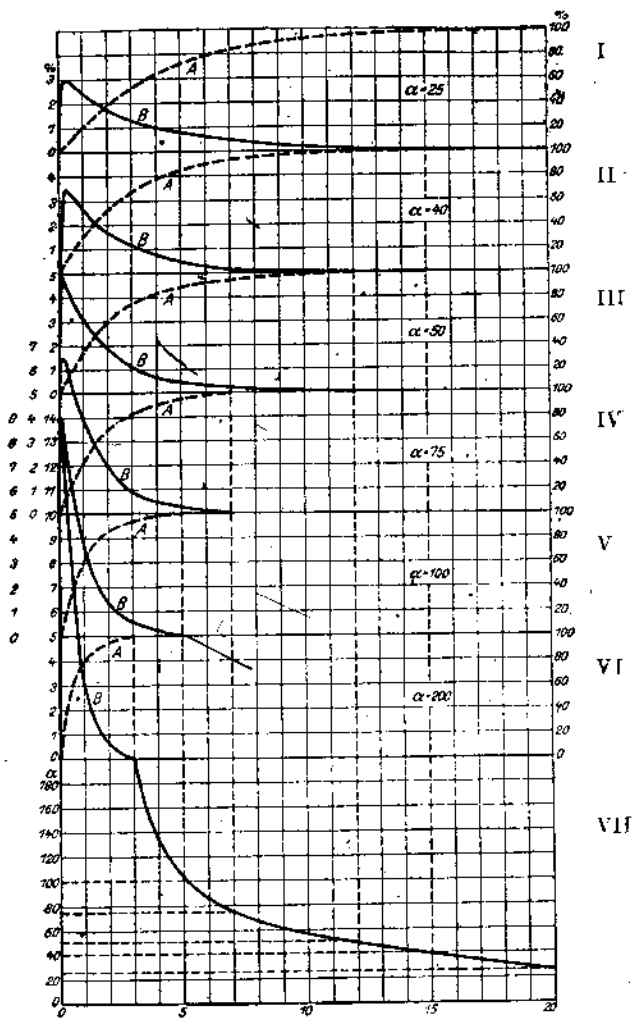


Рис. 12. Зависимость времени нагрева t от коэффициента теплопередачи α (Пашкис, Ж 2) (для экономии места рисунок выполнен таким образом, что линии B диаграмм III—VI попадают на площадь находящихся над ними диаграмм).

A —температура внутренней части плиты (θ_i) в процентах температуры печи (θ_c) в зависимости от времени t (правые шкалы диаграмм I—IV); B —разница между температурами поверхности и внутренних частей плиты ($\theta_0 - \theta_i$) в процентах температуры печи (θ_c) в зависимости от времени (t) (левые шкалы диаграмм I—IV); диаграмма VII изображает $\alpha = f(t)$; α —коэффициент теплопередачи (кал $\text{м}^2 \text{ч}, ^\circ\text{C}$).

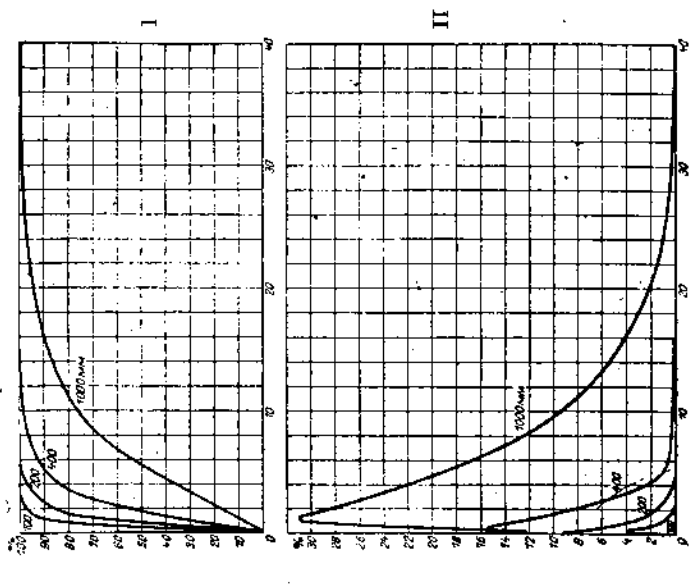


Рис. 13. Зависимость времени нагрева t от толщины плиты (Пашке, Ж 2).
 I—температура внутренней части плиты (δ_i) в процентах температуры печи (δ_o) в зависимости от времени t ;
 II—разность температур поверхности и внутренней части плиты ($\delta_o - \delta_i$) в процентах температуры печи (δ_o) в зависимости от времени t . Указания относятся к железным плитам—при коэффициенте теплопередачи $\alpha = 100$.

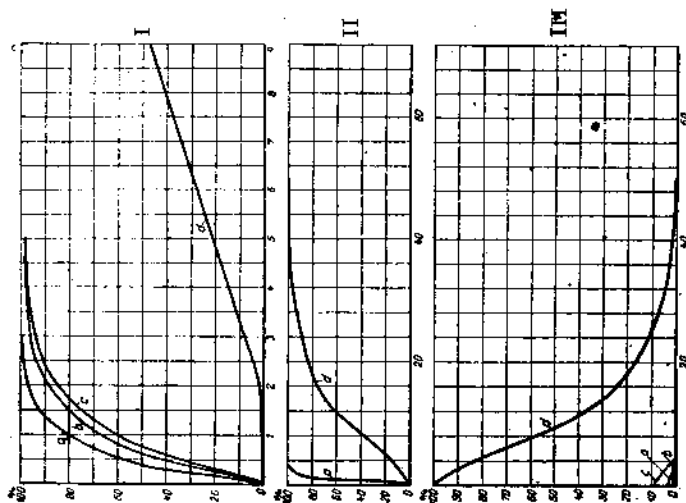


Рис. 14. Зависимость времени нагрева от материала (Пашке, Ж 2).
 a—алюминий, b—медь, c—железо, d—изоляционный кирпич, I—температура середины плиты (δ_i) в процентах температуры печи (δ_o); II—часть кривых в другом масштабе; III—разность между температурами поверхности и середины плиты ($\delta_o - \delta_i$) в процентах температуры печи (δ_o). Указания относятся к плитам толщиной $\alpha = 100$ мм при коэффициенте теплопередачи $\alpha = 100$.

Если же коэффициент теплопередачи, наоборот, очень мал, то время нагрева приблизительно пропорционально первой степени толщины стенки.

Значения теплопроводности λ и температуропроводности a необходимые, как и величина теплоемкости c (рис. 19), для расчета времени нагрева, сведены в таблицу 1 (стр. 27) для некоторых технически важных материалов. Как известно, коэффициент теплопередачи не является величиной постоянной. Однако при расчетах он принимается величиной постоянной для аналогии с законами теплопроводности и из практических удобств.

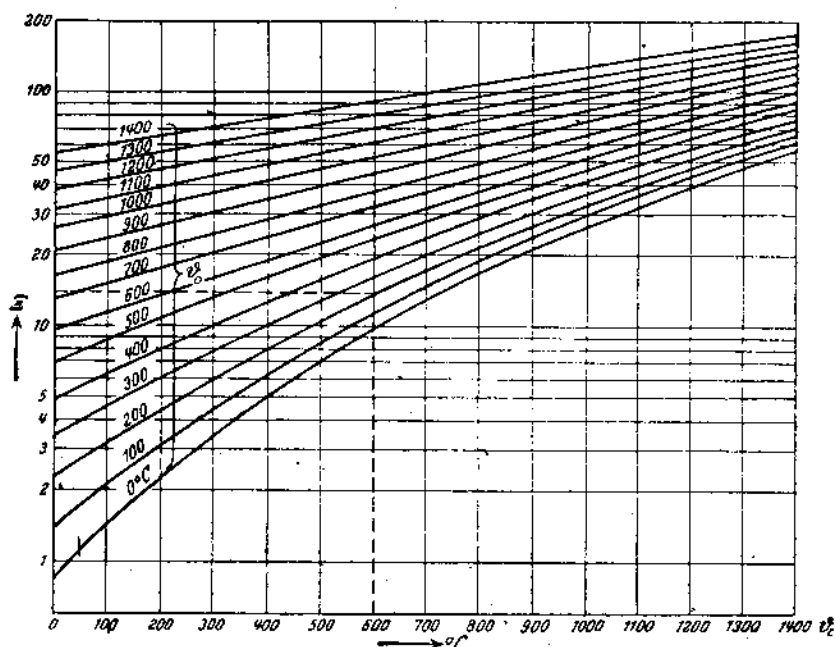


Рис. 15. Диаграмма для определения величины Ξ по θ_c (абсцисса) и θ_0 (параметр кривых).

Из трех видов теплопередачи — теплопроводность, лучеиспускание и конвекция — для всех печей, за исключением ванн, теплопроводность, как способ передачи тепла изделию, отпадает.

Лучеиспускание играет особенно важную роль при высоких температурах. Оно следует закону (ср. Гребер, К. 3, стр. 131):

$$Q = \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] F_{12} \cdot t \cdot \frac{1}{\frac{1}{C_I} + \frac{F_I}{F_{II}} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_3} \right)} \quad (2)$$

Так как лучеиспускающая поверхность печи в большинстве случаев значительно больше поверхности изделия, то в нашем случае от-

ношение $\frac{F_I}{F_{II}}$, а с ним вместе и член, заключающий в себе это отношение, становится весьма малым. Чтобы избежать сложного расчета с величинами в четвертых степенях, уравнение приведено в следующем виде:

$$Q = (\vartheta_c - \vartheta_0) E \cdot F_I \cdot t \cdot C_I. \quad (2a)$$

Из приведенной на рис. 15 диаграммы (по Греберу К 3) могут быть взяты значения E между нулем и 1400° .

Коэффициенты лучеиспускания могут быть взяты из табл. 2 (К 5, т. 1, стр. 463).

Таблица 2

Коэффициенты лучеиспускания C , отнесенные к лучеиспусканию черного тела ($C_s = 1$). Абсолютное значение ($C_s = 4,96$)

$\frac{C}{C_s}$	Материал
1,00	Черное тело
0,94	Чугун с необработанной поверхностью, сильно окисленный
0,96	Железо матовое, сильно окисленное.
0,29	Железо отлично полированное, блестящее.
0,13	Медь отлично полированная
0,17	Медь слабо полированная.
0,64	Медь катаная.
0,76	Медь с необработанной поверхностью.
0,22	Латунь матово полированная
0,21	Цинк с матовой поверхностью.
0,05	Олово
0,95	Сажа
0,93	Стекло

В закрытых печах в большинстве случаев можно принимать черное лучеиспускание так, чтобы коэффициент лучеиспускания составил 4,96.

Так как мы выше пренебрегли отношением $\frac{F_I}{F_{II}}$, то с целью упрощения расчета часто можно вводить для коэффициента лучеиспускания значение 4,0, так что коэффициент теплопередачи при чистом лучеиспускании печи будет равен $4E$. Только в исключительных случаях, когда поверхности точно определены и свойства материала (коэффициент лучеиспускания) изделий точно известны, можно применять более точный расчет (ср. Юнкер, Ж 7, стр. 84).

(Ввиду значительного интереса, представляемого работой Вагенера (Z.f. M. 1932 г., стр. 35, т. 24), о появлении которой автор настоящей книги упомянул в конце ее, сообщаем основное содержание статьи Вагенера и приводим его выводы и предложенные им формулы для определения коэффициента теплопередачи для меди и для железа.

Автор статьи указывает, что до его работы данных относительно нагрева меди, алюминия и латуни имелось так мало, что не было необходимых основ даже для приблизительных расчетов процесса нагрева цветных металлов.

Существовало мнение, что время нагрева цветных металлов — меди, латуни, алюминия — должно быть короче вследствие большей теплопроводности названных металлов по сравнению с железом. Однако при этом упускается из вида, что общий процесс нагрева складывается из двух моментов: передачи тепла на поверхность металла конвекцией и лучеиспусканием и отвода тепла внутрь за счет теплопроводности, т. е.

$$Q = \alpha F Z \left(t_o - t_r \right) = \frac{\lambda}{s} F_i Z \left(t_r - t_i \right),$$

- где F — часть наружной поверхности предмета, принимающая участие в поглощении тепла, в м^2 ;
 Z — время от начала нагрева в часах;
 t_o — температура печи $^{\circ}\text{C}$;
 t_r — температура поверхности изделия, $^{\circ}\text{C}$;
 t_i — температура внутренней части изделия, $^{\circ}\text{C}$;
 λ — коэффициент теплопроводности в калориях на 1 м^2 на 1°C в час;
 s — протяженность (длина) в направлении теплового потока в метрах;
 α — коэффициент теплопередачи в калориях на 1 м^2 на 1°C в час.

Это уравнение показывает, что кроме коэффициента теплопроводности передача тепла внутри изделия зависит также от падения температуры от поверхности к центру изделия ($t_r - t_i$), т. е. от перепада температуры. Последний лимитирует скорость нагрева в том смысле, что для каждого металла существует такая величина линейного перепада (на единицу длины), при которой величина возникающих внутренних температурных напряжений превосходит известные пределы, что может привести к образованию в материале трещин. Но в общем не теплопроводность, а теплопередача является самым узким местом при нагревании металлов и даже при максимально достигнутых в нагревательных печах коэффициентах теплопередачи; перепад температуры, необходимый для отвода тепла внутрь металла, даже в изделиях большого сечения остается в пределах, хорошо выдерживаемых металлом.

Важным фактором, определяющим протекание процесса нагрева, является коэффициент теплопередачи α . Поэтому нельзя, как иногда поступают, считать, что время нагрева каких-либо двух металлов, например, железа и меди (при прочих равных условиях) пропорционально их коэффициентам теплопроводности. В действительности же большой коэффициент теплопроводности меди и медных сплавов ведет к тому, что распределение полученного через наружную поверх-

ность тепла идет быстрее, чем в железе, и потому в меди возникают меньшие температурные перепады.

Теплопередача определяется не физическими константами нагреваемого металла, но характером его поверхности. Работа Вагенера имела своей целью определение коэффициентов теплопередачи для нежелезных металлов, которых до настоящей работы не имелось.

Величина теплопередачи определялась для алюминия и меди в печах различного типа (два типа электропечей, газовая печь Миндига и нефтяная печь) и при разных температурах. Одновременно для сравнения исследовался процесс теплопередачи для железа в тех же самых условиях.

Количество поглощенного металлом тепла за время наблюдения вычислялось по весу металла, его теплоемкости и повышению температуры. Константы, которыми автор пользовался при расчетах, приводятся в табл. 2а.

Таблица 2а

	Al	Cu	Fe
Средняя теплоемкость (0 — 600°) в Кал. на градус	0,236	0,0994	0,132
Объемный вес кг/м ³	2 700	8 500	7 750
Теплопроводность в Кал. на м, градус, час	226	335	40

Определение среднего коэффициента теплопередачи производится следующим образом: планиметрируется температурная кривая и находится средняя температура поверхности за время испытания; количество тепла, переданного металлу за то же время делится на поверхность нагрева и на разность между температурой печи и средней температурой поверхности металла.

Коэффициент теплопередачи получен при нагреве до 500° равным 25 — 30 кал. на м², °С, час. для меди и алюминия и 52,8 кал. на м², °С, час. для железа и соответственно 47,5 и 80,8 кал. при нагреве до 600°. Следовательно, коэффициент теплопередачи для меди и алюминия ниже, чем для железа. Причину разницы в теплопередаче автор видит в разном качестве поверхности металлов: медь и алюминий имели чистую блестящую поверхность после волочения, а железо имело шероховатую поверхность после прокатки. Лучистое тепло более сильно отражается блестящими поверхностями и это вызывает пониженное поглощение лучистого тепла.

Вагнер предлагает принять следующие формулы, определяющие коэффициенты теплопередачи для меди и железа:

$$\text{для железа } \alpha = 0,09 \left(\frac{T_0}{100} \right)^3 + 10 \text{ Кал. на м}^2, \text{ } ^\circ\text{С, час.}$$

$$\text{для меди и алюминия } \alpha = 0,038 \left(\frac{T_0}{100} \right)^3 + 10 \text{ Кал. на м}^2, \text{ } ^\circ\text{С, ч.}$$

при расчете на полезную (т. е. находящуюся под действием лучеиспускания) поверхность металла.

При проверке в производственных условиях эти формулы, установленные лабораторным путем, подтвердились, и таким образом могут служить для практического применения. *Доп. ред.)*

Процесс передачи тепла изделиям в печи посредством лучеиспускания не поддается сколько-нибудь значительному искусственному

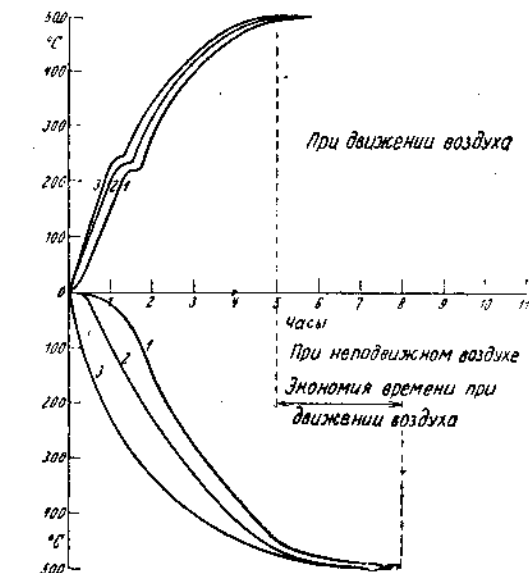


Рис. 16. Повышение температуры изделия при неподвижном воздухе и при движении воздуха.

воздействию. Правда, заявлены патенты, которые должны улучшить процесс теплопередачи путем придания особой формы или увеличения поверхностей печи, однако на практике эти опыты дали мало. Точно также едва ли возможно влиять на коэффициент лучеиспускания подбором соответствующего материала, потому что и форма печи, и материал стенок зависят также от других факторов (например, прочность, крепость и т. д.). Значительно большего успеха можно ожидать от попыток улучшения теплопередачи путем повышения конвекции. В формулах, которые можно найти по этому вопросу в ли-

тературе, мы везде встречаем скорость воздуха. Движение воздуха в значительной мере влияет на теплопередачу, как это можно видеть из рис. 16; эта диаграмма относится к цилиндрической печи с установленной мощностью 3,8 квт. и полезным диаметром 250 мм.

Три кривых рис. 16 показывают повышение температуры в изделии; температура замерялась в одних и тех же местах. Установленная мощность печи 3,8 квт, диаметр печи — 250 мм, глубина печи — 300 мм, вес загрузки — 50 кг. Применение этих закономерностей для расчетов в настоящее время наталкивается еще на значительные трудности¹. С одной стороны, даже при искусственном движении

¹ Для расчета коэффициента теплопередачи известно большое количество формул (см. Гребер К 3). Они выведены для трубопроводов, а потому их нельзя безоговорочно применять для печей, так как встречающееся в них живое сечение для воздуха, а также поверхность, обуславливающая теплопередачу, неопределимы в печи. Приблизженные формулы, даваемые Стадзем (Ж 8), неприменимы, если не соблюдаются все условия опытов, не описанные у Стадзеля даже приблизительно.

воздуха, неизвестна его скорость, так как слой изделий играет в этом случае решающую роль. Помимо того, естественное и искусственное движение воздуха могут либо складываться, либо препятствовать одно другому; часто воздух приходит в вихревое движение. Затем, значительную роль играет также температура и свойства поверхности внутренней стенки. Если воздух прогоняется сквозь слой изделий, то коэффициент передачи увеличивается не только вследствие конвекции; движущийся воздух переносит с собой тепло внутрь слоя изделий, в результате чего изменяется влияние толщины слоя изделий на их прогрев, сводясь к диаметру (размеру) отдельных предметов.

д) Практическое применение формул и диаграмм

Приведенные в предыдущих разделах диаграммы даны только для простейших геометрических форм, которые практически в изделиях не встречаются. Помимо того законы подъема температуры нарушаются, если изделие неоднородно или если между изделием и источником тепла находится раздельная стенка. Ниже вкратце будет описан метод расчета и для этих случаев.

Приемы расчета для изделий более сложной формы. До тех пор пока не произведен расчет основных уравнений Гребера (К 2,3) для тел другой, более сложной формы, чем простейшие идеальные тела, в каждом отдельном случае необходимо исследовать, какая из этих идеальных форм больше всего приближается к форме обрабатываемого изделия. Например, расчет времени нагрева цилиндра конечной длины по диаграмме для бесконечно длинного цилиндра или тот же расчет для плиты конечных размеров по диаграмме для бесконечной плиты будет надежен, т. е. к концу установленного расчетом времени нагрева действительный перепад температур в изделии $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_1$ будет меньше, чем положенный в основу расчета.

В равномерно нагревающей со всех сторон печи в основу расчета всегда следует класть минимальные размеры нагреваемого изделия (рис. 17). В направлении $a-a$ тепло раньше достигнет оси изделия, чем в направлении $b-b$. Значит, если расчет ведется на бесконечно протяженную плиту, толщиной AA' , то в действительном случае добавочный тепловой поток в обоих остальных направлениях $b-b$ и $c-c$ изменит температурный баланс, причем последний ни в коем случае не может оказаться худшим, чем в случае бесконечно протяженного тела. Если нагревание неравномерно, то расположенные против нагревающих поверхностей плоскости изделия следует

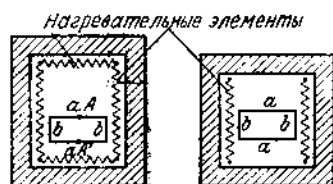


Рис. 17 и 18. Схематический разрез печей.

Определение размеров изделий, определяющих время нагрева. При расчете времени нагрева следует принимать, размер $a-a$ в условиях нагрева фиг. 17 и размер $b-b$ в условиях нагрева фиг. 18.

рассматривать, как ограничивающие поверхности бесконечно протяженного тела.

Так как печь (рис. 18) имеет только боковое нагревание, то в основу расчета времени нагрева следует класть не минимальный размер $a—a$, а максимальный $b—b$. Наоборот, можно сказать, что, считая изделие однородным, с точки зрения нагрева было бы правильнее, если бы в этой печи нагревающими поверхностями, вместо боковых стен, являлись под и свод

Если изделие вообще нельзя приравнять к телу простой формы, то следует пользоваться диаграммами для того основного тела, для которого отношение поверхности к периметру сечения подходит ближе всего к тому же отношению для изделия, предполагаемого к обработке, а в случае нужды интерполируют между двумя значениями, например, между значениями для цилиндра и плиты или цилиндра и шара.

Если изделие неоднородно (случай особенно важный для практики), расчет представляет, к сожалению, наибольшие трудности. Возьмем к примеру нагревание пакетов жести, проволочных бухт, а также изделий другого рода, например, сыпучего материала, заклепок, мелких поковок и отливок. Почти всегда промежутки между отдельными изделиями заполняет воздух. При нагревании в этом случае играет роль не только теплопроводность материала самого изделия, но также и теплопередача от одного изделия к другому. Последнее же зависит от свойств поверхности самого изделия, от величины и формы воздушных промежутков, а разновидность форм слишком велика, чтобы мыслимо было сколько-нибудь однообразное решение. При сыпучих изделиях можно, просто-напросто, определить среднюю теплопроводность, подобно тому, как это имеет место для изоляционных материалов. Этот же способ волей-неволей придется распространить и на другие материалы с большими воздушными промежутками, причем однако точность расчета будет потеряна. Для достижения точности здесь, пожалуй, придется применить определение средней теплопроводности опытным путем. Чем крупнее отдельные элементы изделий, тем больше должна быть масса, над которой должен быть произведен опыт, чтобы избежать влияния охлаждения концевых частей. Хотя этот способ и очень кропотлив, однако его следует настоятельно рекомендовать: предварительное определение средней теплопроводности вместо непосредственного опыта с определением времени нагрева облегчает в дальнейшем пересчет результатов опыта на различную толщину слоя изделий.

Теоретически возможно рассчитать эквивалентную теплопроводность для некоторых простых случаев, имеющих однако большое практическое значение, например, для пакетов жести, по толщине материала и среднему воздушному промежутку, определяемому расчетом из удельного веса, объемного веса и суммарной толщины пакета жести. Однако практическое применение этого способа расчета чрезвычайно затруднительно: с одной стороны, между отдельными листами жести возникают тепловые короткие замыкания, влияющие

на результат и находящиеся в большей или меньшей зависимости от неровностей материала; затем на правильность этих расчетов может оказать влияние слой окислов металла изделия, образующийся порой во время нагревания. В конце концов, нет никаких данных о том, равномерны ли воздушные промежутки и какова степень влияния этих неравномерностей. По этому поводу могут быть отмечены работы Вулле (Ж 1), Шака (Ж 6) и Штеблера (Ж 9).

Случай, когда между нагреваемым изделием и нагревающим телом находится промежуточная перегородка, встречается при нагревании изделий в ящиках, коробках и т. д. Температура воздушного слоя, остающегося, например, между ящиком и изделием, возрастает вместе с температурой изделия, что делает процесс нагревания весьма сложным. Таковы, например, условия при отжиге изделий в коробках¹. Опытные коэффициенты замедления нагрева в этих условиях, правда, в большинстве случаев полученные в регулируемых пламенных печах, имеются в указанных выше литературных источниках (С. Вулле, Ж 1; Штеблер Ж 9).

Пример (пачато см. стр. 16). Определить время нагрева мелких изделий (болты) с удельным объемом 0,055—0,060 м³/100 кг, причем изделия должны быть нагреты до температуры не ниже 575° и не выше 600°.

Теплопроводность слоя изделия, как указывалось выше, неизвестна. Принимая во внимание размеры обрабатываемой продукции, необходимо предварительно произвести опыты для определения средней теплопроводности. Эти опыты могут быть произведены либо обычным способом (Ж 38) для определения теплопроводности, или же путем насыпания достаточной толщины слоя болтов на большую равномерно обогреваемую плиту. Посредине плиты, в двух не слишком близко расположенных точках, определяется температура. Если плита достаточна велика, то утечкой тепла по краям слоя можно пренебречь и определить теплопроводность из плотности энергии, измеренной разности температур и расстояния между точками измерений. Наконец, можно нагревать в печи не слишком малую пробу и точно проследить изменение температуры в середине пробы. Из установленной зависимости между временем и изменением температуры можно определить теплопроводность, если известен коэффициент теплопередачи. Допустим, что теплопроводность определена предварительными опытами и в среднем составляет

$$\lambda = 4,0 \frac{\text{Кал}}{\text{м, час., } ^\circ\text{C.}}$$

Из задания имеем допустимый перепад температуры
600 — 575 = 25°С.

Тогда относительный перепад температуры составляет

$$\delta_p = 25 : 600 = 0,0416 \approx 0,042.$$

Средняя температуропроводность составляет

$$\alpha = \frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{4,0}{1740 \cdot 0,15} = 0,0154 \text{ м}^2/\text{час.},$$

где $\lambda = 4,0 \frac{\text{Кал}}{\text{м, час., } ^\circ\text{C.}}$;

γ — вес изделий в единице объема = 1 660... 1820, т. е. в среднем 1 740 кг/м³;

$c = 0,15 \frac{\text{Кал}}{\text{кг., } ^\circ\text{C.}}$

¹ При цементации, когда работа протекает как будто в таких же условиях, теплопередача происходит вследствие тесного соприкосновения между цементационным раствором и стенкой ящика.

² Лежащих на одном и том же перпендикуляре к поверхности плиты. Прим. ред.

Для определения $h = \frac{\alpha}{\lambda}$ находим α (рис. 15).

Для температуры печи 600° и средней температуры изделия 300° имеем $\Xi = 15$. Отсюда следует:

$$\alpha = 60 \text{ Кал/м}^2, ^\circ\text{С, час.; } h \approx 15 \text{ м}^{-1}.$$

Форма коробки, в которой помещаются изделия в печь, не указана; при прямоугольной форме происходит или только нагревание дна и крышки (что дает наиболее равномерный нагрев (или же нагревание крышки, дна и двух боковых стенок. Передняя и задняя стенки печи не должны отдавать тепла во избежание перегрева находящихся в печи изделий.¹

Так как время нагрева для предметов параллелепипедальной формы в настоящее время рассчитать не представляется возможным, то сравним цилиндрическую основную форму и бесконечно протяженную плиту.

Расчет произведен для слоев различной толщины. Результаты сведены в помещенную ниже таблицу, причем для примера сделан расчет цилиндра с радиусом, равным 0,1.

Линии $hR = 15 \cdot 0,1 = 1,5$ в диаграмме рис. 8 нет. Поэтому мы отыскиваем значение для $hR = 1$ и $hR = 2$.

$$\text{для } \theta_p = 0,042 \text{ в } \left\{ \begin{array}{l} hR=1 \\ hR=2 \end{array} \right\} \frac{\alpha t}{R^2} = \left\{ \begin{array}{l} 1,57 \\ 1,19 \end{array} \text{ и отсюда} \right\} t = \left\{ \begin{array}{l} 1,02 \text{ час.} \\ 0,78 \text{ час.} \end{array} \right.$$

Отсюда при $hR = 1,5$ находим

$$\frac{\alpha t}{R^2} = 1,38; t = 0,9 \text{ час.}$$

Из рис. 10 находим: для $hR = 1,5$ $\left\{ \begin{array}{l} \theta_c \\ \frac{\alpha t}{R^2} = 1,38 \end{array} \right\} \frac{\theta_c}{\theta_c} = 0,94.$

Так как θ_0 по заданию равна 600° , то температура печи $\theta_c = 635^\circ$.

Корректирование значения α становится излишним, потому что θ_c близко к принятому значению (600°).

Этим же способом определены значения времени нагрева t и соответствующих температур печи для остальных случаев; результаты сведены в таблице 3.

Таблица 3

	Цилиндр			Плита		
	R (м)	θ_c ($^\circ\text{С}$)	t (час.)	R (м)	θ_c ($^\circ\text{С}$)	t (час.)
A	0,05	675	0,28	0,05	680	0,596
B	0,10	635	0,90	0,10	640	1,810
C	0,20	620	2,54	0,20	625	5,06
D	0,30	605	5,40	0,30	610	10,66

Принимая во внимание падение температуры во время загрузки, к времени нагрева делается надбавка 0,15 часа.

Если бы эксплуатационные причины не заставляли нас выбрать одну из двух форм печи, то все дальнейшие расчеты нужно было бы проделать для печей цилиндрической и прямоугольной формы. Несмотря на большее время нагрева, в примере дальше будет рассматриваться прямоугольная форма печей, так как последняя более распространена (продолжение примера стр. 39).

¹ В случае, если на передней и задней стенках печи установлены нагревающие элементы, то тепло, излучаемое ими, должно покрывать только потери холостого хода: такого рода обогревание полезно для равномерности нагрева.

2. РАЗМЕР И КОЛИЧЕСТВО ПЕЧЕЙ

(Кривая 2 основной диаграммы)

Обозначения. В этом разделе приняты следующие обозначения:

- t — время нагрева (час.);
 n — число печей;
 q — заданная производительность (кг/час.);
 v — объем полезного рабочего пространства (м^3);
 δ — коэффициент использования объема (объем слоя изделий v_1 : объем рабочего пространства v);
 γ — вес 1 м^3 изделий (кг/дм³);
 t_B — продолжительность рабочего дня (час.);
 t_H — время от конца нагрева до выгрузки изделий из печи (зависит от условий производственного процесса) (час.);
 m — число операций (рабочих циклов) одной печи в день.

Производительность одной печи за одну операцию составляет:

$$1000 \cdot v \cdot \delta \cdot \gamma \text{ (кг)}$$

Вполне понятно, что

$$t_B \geq t_H + t. \quad (3)$$

Каждая печь проводит за день m операций, причем величина m при периодической работе печи должна выражаться целым числом и определяться из уравнения.

$$m \geq \frac{t_B}{t_H + t}. \quad (3a)$$

Таким образом, суточная производительность составляет $24q$, а число печей равно

$$n = \left\lceil \frac{24q}{1000 \cdot v \cdot \delta \cdot \gamma \cdot m \cdot \delta} \right\rceil \quad (4)$$

В приведенных уравнениях принято, что изделие не охлаждается в печи; если же это происходит, то уравнения должны быть соответствующим образом исправлены. Нельзя, разумеется, вести расчет с дробными частями печей, а необходимо исследовать, что экономичнее; меньшее полезное пространство печи или же большее. Помимо того, всегда надо принимать во внимание, желательно ли уложить часть времени операции (например, часть времени, потребного при охлаждении) в промежутки между двумя соседними операциями, что при электропечах легко достигается путем применения автоматических часов. Математическое исследование выбора величины печи при точно известной программе производства можно найти у Стассине (ЖК 10).

Пример (Продолжение со стр. 38). Определить число и величину печей для месячной производительности 240 т болтов. Удельный объем составляет 0,055—0,060 $\text{м}^3/100$ кг. Предусматривается непрерывная эксплуатация печей. Время нагрева для различной толщины слоя сведено в табл. 8.

* $v \cdot \delta$ — объем слоя изделий в (м^3), учитываемый величиной R при расчете времени нагрева.

При 25 рабочих днях в месяц ежедневная производительность составит $240 : 25 = 9,6$ т в день. При непрерывной работе печей получаем (по формуле 3а)

Толщина слоя изделий	Количество операций в день
A	32,0
B	12,2
C	4,6
D	2,2

При непрерывной круглосуточной работе можно учитывать дробные части операций, а даже при толщине *D* слоя деталей в печи нет надобности округлять до двух операций. Только при расчете недельной производительности нельзя учитывать части операций; например, при толщине *D* слоя деталей нельзя вводить в расчет $6 \times 2,2 = 13,2$ операций в неделю (при семидневной неделе), а нужно брать 13 или 14. Если работа печи начинается после дня отдыха в 6 час. утра, то 13-ая операция заканчивается в ночь перед днем отдыха в 2 часа 24 мин. ночи, а 14-ая операция — в день отдыха в 13 час. 12 мин. Если в расчет принимается 14 операций, то по окончании последней операции печь выключается автоматическими часами. Учитывая это соотношение, находим для печи:

Толщина слоя	Количество операций в день
A	32
B	12,16
C	4,67
D	2,33

Для определения нужного числа печей следует установить размеры пода. В приведенной ниже табл. 4 дана пропускная способность печей за одну операцию для толщины слоя A—D и для различных размеров площади пода и необходимое число печей (*n*).

Таблица 4

Толщина слоя изделий	Производительность за одну операцию и полезная площадь пода печи							
	0,5 м ²		1,0 м ²		2,0 м ²		3,0 м ²	
	кг	n	кг	n	кг	n	кг	n
A . . .	83	4 (3,7)	166	2 (1,8)	333	1 (0,9)	500	1 (0,6)
B . . .	166	5 (4,7)	333	3 (2,3)	667	2 (1,1)	1000	1 (0,7)
C . . .	332	7 (6,2)	665	4 (3,1)	1333	2 (1,6)	2000	1 (1,03)
D . . .	500	9 (8,2)	1000	5 (4,1)	2000	3 (2,1)	3000	2 (1,4)

Примечание. Цифры в скобках представляют собою точно расчетное количество печей для того, чтобы можно было проследить ход расчета; понятно, что дробных частей печей выполнить нельзя.

По поводу этой таблицы следует отметить следующее:

1. При одинаковой площади пода число потребных печей возрастает с увеличением толщины слоя изделий (большее время нагрева; следовательно, несмотря на увеличение емкости, необходимо больше печей, чем при более тонком слое). Поэтому целесообразно при увеличении толщины слоя изделий увеличивать также и площадь пода. Если увеличивать толщину слоя, то возникает необходимость нагревать изделия со всех сторон, и время нагрева нельзя уже рассчитывать по формуле плиты.

Поэтому выбрана толщина слоя Λ . Остается определить площадь пода. Данные таблицы 4 заслуживают особенного внимания, потому что они очень хорошо освещают все интересные нас зависимости. Увеличение толщины слоя не дает преимуществ, уменьшение же, наоборот, предпочтительно во всех случаях. Если этот способ продолжать до предела, то расчет, правда, теряет свою обоснованность, так как отдельные болты имеют теплопроводность железа; теплопроводность же, найденная экспериментальным путем, в данном случае уже не соответствует условиям нагрева.

2. Площадь пода мы всегда будем согласовывать с числом печей.

Так, например, при толщине слоя Λ , вместо полезной площади пода в 2 м следовало бы выбрать 1,8 м², в результате чего печь будет использована полностью.

(Продолжение см. стр. 44).

3. ПОЛЕЗНЫЙ РАСХОД ТЕПЛА

Обозначения. В этом разделе приняты следующие обозначения:

Q_N — полезное тепло (Кал. или квтч);

G — вес изделий (кг), для которых определяется Q_N ;

c — теплоемкость изделий $\frac{\text{Кал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

ϑ_0 — температура поверхности изделий ($^\circ\text{C}$);

ϑ_a — температура наружного пространства (начальная температура изделий ($^\circ\text{C}$);

ϑ_i — температура внутри изделий ($^\circ\text{C}$);

r — тепло испарения или плавления материала изделий $\left(\frac{\text{Кал}}{\text{кг}} \right)$.

Под полезным теплом мы подразумеваем то количество тепла, которое необходимо для нагревания изделия до требуемой технологическим процессом температуры.

Для определенного веса изделия G полезное тепло Q_N получается как произведение веса на требуемое приращение температуры и на среднюю теплоемкость материала изделий,

$$Q_N = G \cdot c (\vartheta_0 - \vartheta_a) \cdot \frac{1}{860} \text{ квтч}, \quad (5)$$

причем ϑ_a — начальная температура изделия¹. c представляет собою значение средней теплоемкости изделий между начальной температурой ϑ_a и конечной ϑ_0 .

Если в исследуемых пределах температур происходит изменение агрегатного состояния нагреваемого тела, то необходимо учесть теплоту плавления или парообразования (r); тогда выражение примет следующий вид:

$$Q_N = G \cdot c (\vartheta_0 - \vartheta_a) \cdot \frac{1}{860} + G \cdot r \cdot \frac{1}{860} \text{ квтч}. \quad (6)$$

Постоянные материалы c и r могут быть взяты из справочников.

Для наших расчетов рекомендуется представлять количество тепла Q_N в виде произведения теплосодержания одного килограмма и подлежащего нагреванию веса изделий. На диаграмме 19 изобра-

¹ В этом выражении не принят во внимание имеющийся в конце нагревания перепад температуры в изделии, что обычно допустимо. Если же необходимо учесть и этот перепад температур, то вместо $(\vartheta_0 - \vartheta_a)$ должно быть подставлено $\frac{\vartheta_0 + \vartheta_f}{2} - \vartheta_a$.

жею теплосодержание 1 кг различных металлов в зависимости от температуры; видно, что в точках плавления или преобразования (например, для никеля и железа) заметно изменяется направление кривой теплосодержания.

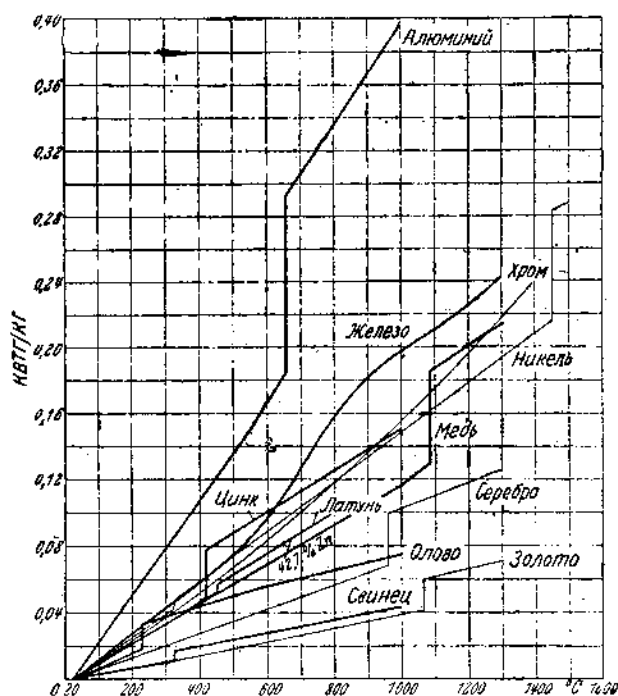


Рис. 19. Теплосодержание некоторых технически важных металлов в зависимости от температуры (в кВт/кг).

В таблице 5 сведены значения теплоемкости некоторых, технически важных материалов между 0 и 100° С. Эти значения имеют лишь, приближенный характер, так как степень утряски, загрязнения и т. п. факторы могут оказывать сильное влияние.

Таблица 5

Зола	0,20	Магnezия	0,25
Бетон	0,21	Опьяковое ма зло	0,40
Дуб	0,57	Керо ин	0,60
Сл на	0,65	Фарфор	0,22
Стекло	0,20	Каменный уголь	0,30
Глицерин	0,58	Серная кислота	0,33
Кокс	0,20		

При определении полезного тепла не следует забывать о загрузочных и укупорочных приспособлениях, которые должны нагре-

ваться вместе с изделием и рассматриваются в данном случае так же, как изделия. Из этого одного видно, насколько желательно уменьшение этого «мертвого веса». Так как вес загрузочных и укрупорочных приспособлений в большинстве случаев является вопросом прочности, то часто будет рентабельным применение для этих целей высококачественных материалов (например, жароупорные сплавы), допускающих, вследствие их высокой прочности, более легкие конструкции, а следовательно дающие меньший «мертвый вес».

Выяснив общее количество полезного тепла, переходим к определению расхода тепла в единицу времени, необходимого для получения этой полезной теплоты. При этом нельзя попросту разделить полезное количество тепла на определенное в предыдущей главе время нагрева, так как, если бы в нашем распоряжении не было тепла больше, чем это вычислено, то полученное время нагрева никогда не было бы выдержано. Это объясняется тем, что при определении продолжительности нагрева температура печи была принята во все время нагрева постоянной, в крайнем же случае очень быстро достигающей начального уровня. Чем большая пропускная способность требуется от печи, тем меньше при тех же требованиях к выравниванию температуры в изделиях та часть времени нагрева, которая подставляется для определения мощности.

Поясним изложенное примером. Допустим, что в печи нагревается железная плита в 200 мм длиной. Предположим сначала, что подведение мощности к печи в каждый момент регулируется весьма чувствительным механизмом в соответствии с происходящим в данный момент расходом тепла: в этом случае печь принудительно удерживается на уровне начальной температуры. При коэффициенте теплопередачи в $75 \text{ Кал/м}^2, ^\circ\text{C, час.}$) получились бы следующие соотношения. Если выравнивание температуры происходит на 0,55%, т. е. когда разность температуры на поверхности и внутри изделия составляет в конце нагрева 0,55% температуры печи, то мы увидим (рис. 12), что в течение первого часа надо подвести около 42% всего количества тепла; в течение второго часа — 35%, третьего часа — 15% и четвертого — 8%.

Если же выравнивание температуры происходит в пределах только 1%, то нагревание заканчивается в течение около 3 часов и участие отдельных часов в расходе тепла определяется следующим образом: в течение первого часа подведено 48% всего количества тепла; в течение второго часа — 39%, в течение третьего часа — 13%.

Если бы в расчет расхода полезного тепла за единицу времени подставлялось бы полное время нагрева, то в первом примере в течение первого часа оказалось бы подведено только 25% (вместо 42%), а во втором примере — только 33% (вместо 48%) тепла. Таким образом, печь не так скоро нагревалась бы до необходимой температуры, вследствие чего, вполне естественно, и увеличивалось бы время нагрева.

Однако, нет надобности проверять время нагрева описанным способом для каждой печи для того, чтобы определить расход полез-

ного тепла в единицу времени. Из соображений, приводимых в разделе «Нагревательные элементы» обычно установленная мощность никогда не рассчитывается настолько точно, чтобы эти расхождения во времени играли значительную роль. Обычно всегда работают с избытком тепла¹. Мы можем работать с большим избытком тепла, потому что автоматическая регулировка препятствует чрезмерному подъему температуры, несмотря на большой подвод тепла. Регулятор включает и выключает печь в определенные моменты, так что средний расход энергии уменьшается каждые четверть часа, несмотря на то, что присоединенная мощность печи остается все время одинаковой.

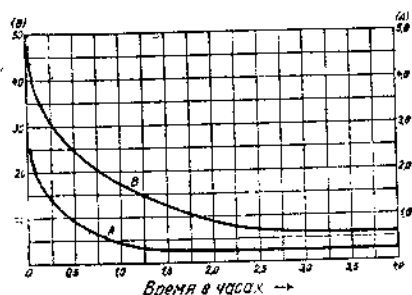


Рис. 20. Диаграмма—расход тепла для нагрева железной заготовки (Пашке, Ж 2). А—отношение времени включения к времени выключения; В—средний расход энергии (квт/ч).

На рис. 20 изображены результаты измерений, произведенных в печи с полезным объемом около

170 дм³ и присоединенной мощностью в 50 квт; в печь был вложен кусок круглого железа весом в 110 кг (это составляет 14 дм³), после того как печь достигла устойчивого состояния. Так как большой избыток тепла препятствует падению температуры, то регулятор сейчас же после загрузки начинает работать и уменьшает постепенно средний расход тока до тех пор, пока изделие полностью не прогреется, и удерживает средний расход в размерах, при которых его хватило бы на покрытие потерь холостого хода (около 7 квт, см. стр. 46).

Пример (продолжение со стр. 41). Определять полезное тепло для печи с месячной производительностью в 240 т болтов. Относительно типа печей и величины их см. стр. 40.

Собственно полезное тепло остается постоянным для печей всех величин, т. е. оно не зависит от величины печи и равняется (рис. 19):

$$9\,600 \cdot 0,095 = 910 \text{ квт/час.}$$

К полученной величине следует добавить то количество тепла, которое необходимо для нагревания «мертвого веса» — коробок, в которых болты ставятся в печь. Эти коробки, допустим, весят, из соображений механической прочности 30 кг/м² площади пода. Таким образом, полезное тепло «брутто», т. е. включая теплоту, необходимую для нагрева «мертвого веса», при толщине слоя А составляет 1092 квт (продолжение см. стр. 69).

4. ПОТЕРИ ТЕПЛА

(кривая 3 основной диаграммы)

Обозначения. В этом разделе применены следующие обозначения:

Q_0 — потери холостого хода $\left(\begin{matrix} \text{квт или} \\ \text{Кал} \\ \text{час.} \end{matrix} \right)$

F — поверхность для расчета потерь (м²);

¹ Избыток тепла равен приходу энергии минус расход энергии в рассматриваемый момент. В главах «Включение и регулировка» и «Вопросы экономичности» значение этого избытка тепла будет рассмотрено детально.

- λ — теплопроводность $\frac{\text{Кал}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час}}$;
 s — толщина стенки (м);
 ϑ_1 — температура внутренней поверхности стенки печи ($^\circ\text{C}$);
 ϑ_2 — температура наружной поверхности стенки печи ($^\circ\text{C}$);
 ϑ_c — температура внутреннего пространства печи ($^\circ\text{C}$);
 ϑ_a — температура мастерской (цеха) ($^\circ\text{C}$);
 α_i — коэффициент теплопередачи для внутренней поверхности стенки $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час}} \right)$;
 α_a — коэффициент теплопередачи для наружной поверхности стенки $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час}} \right)$;
 F_i — площадь излучающей поверхности печи (м^2);
 l — сумма длин всех ребер печи прямоугольной формы (м);
 a, b, c — длина ребер печи (м);
 d_i — внутренний диаметр печи цилиндрической формы (м);
 d_1, d_2, d_3 и т.д. — наружные диаметры отдельных изоляционных слоев печи цилиндрической формы (м);
 d_a — наружный диаметр печи цилиндрической формы (м);
 F_a — площадь наружной поверхности стенок печи (м^2);
 ϑ_L — температура в месте L стержня, нагреваемого с одного конца ($^\circ\text{C}$);
 U — периметр стержня, нагреваемого с одного конца (м);
 F — площадь сечения того же стержня (м^2);
 L — длина того же стержня (м);
 S_m — толщина стенки муфеля (м);
 λ_m — теплопроводность материала муфеля $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час.}} \right)$;
 q — расход тепла для нагревания изделия и на покрытие потерь через ненагреваемые поверхности, отнесенный к обогреваемой площади муфеля $\left[\frac{\text{Кал.}}{\text{час. м}^2} \right]$;
 ϑ_{ma} — температура снаружи муфеля ($^\circ\text{C}$);
 ϑ_{mi} — температура внутри муфеля ($^\circ\text{C}$);
 F_n — площадь поверхности полезного объема (для печей со снаружи обогреваемым муфелем — внутренняя поверхность муфеля) (м^2);
 F_v — излучающая поверхность для печей с изнутри обогреваемым муфелем (м^2);
 λ_i — теплопроводность изоляции печей с изнутри обогреваемым муфелем $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час.}} \right)$;
 λ_a — теплопроводность изоляции печей со снаружи обогреваемым муфелем $\left(\frac{\text{Кал.}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час.}} \right)$;
 Q_i — потери холодного хода печи с изнутри обогреваемым муфелем $\left(\text{квт или } \frac{\text{Кал.}}{\text{час.}} \right)$;
 Q_a — потери холодного хода печи со снаружи обогреваемым муфелем $\left(\text{квт или } \frac{\text{Кал.}}{\text{час.}} \right)$;
 Q_{sp} — теплосодержание печи (квтч или кал.);
 c — теплоемкость $\left(\frac{\text{Кал.}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг.}} \right)$;
 γ — удельный вес $\left(\frac{\text{кг}}{\text{дм}^3} \right)$;
 V — объем (дм^3);
 ξ — относительное время включения

Если включить пустую холодную печь, то температура внутри печи начнет очень быстро подниматься, в то время как на наружной по-

верхности стенки долгое время нельзя будет обнаружить подъема температуры.

На рис. 21 изображен процесс разогревания печи. Три кривых этой диаграммы изображают температуру внутри печи и на наружной поверхности стенки печи (ϑ_1 и ϑ_2), а также и потребляемую мощность в функции от времени. Как только необходимая рабочая температура внутри печи будет достигнута, производительник будет склонен считать период разогревания печи законченным. Автор рекомендует назвать время от момента включения печи до момента достижения ею необходимой температуры *практическим временем разогрева печи*. В действительности процесс разогрева печи в этот момент еще не закончен, так как температура наружной поверхности стенки печи еще повышается. Если температура внутри печи теперь больше не должна подниматься, то нужно постепенно уменьшать подводимую мощность (в зависимости от времени, согласно кривой на рис. 21). Тем не менее, температура наружной поверхности стенок печи при этом

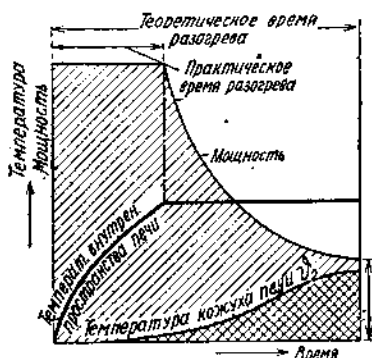


Рис. 21. Разогрев холодной печи (Пашкис, К 6).

будет повышаться. Через некоторое время, составляющее в нормальных условиях небольшую часть практического времени разогрева печи, между мощностью и температурой наружной поверхности стенки установится равновесие печи. Необходимое для этого время (считая от момента включения) будем называть *теоретическим временем разогрева печи*.

Мощность и температура наружной поверхности стенки печи приближаются к состоянию равновесия асимптотически, так что теоретическое время разогрева может быть дано лишь в том случае, если предусмотрена определенная точность приближения к асимптоте (Пашкис, К 6). Асимптотическая величина мощности соответствует устойчивому поддержанию постоянной температуры внутри печи при холостом ходе, а потому она дает *потери* холостого хода и зависит от температуры внутреннего пространства печи. Каждой температуре внутреннего пространства печи соответствуют свои определенные потери холостого хода (для одной и той же печи).

Площадь под кривой мощности от момента включения до достижения состояния равновесия пропорциональна всей энергии, подведенной во время периода разогрева, которая ушла на покрытие 1) теплоемкости печи и 2) потерь на лучеиспускание и т. п. во время разогрева.

Под *теплоудержанием* печи подразумевается то количество тепла, которое аккумулируется в материалах стенок печи и ее конструктивных деталей после разогрева до состояния термического равновесия. По-

тери на лучеиспускание во время разогрева в первом приближении можно принять пропорциональными площади под кривой температуры наружных стенок печи. Пересчетный коэффициент равен отношению ординаты кривой мощности к ординате температуры стенок печи, — обе в момент достижения равновесия.

Подведенная в период практического времени разогрева работа не должна быть смешиваема с теплосодержанием печи. При указании мощности, работы и времени разогрева необходимо отмечать температуру окружающей среды, к которой они относятся. | |

Теоретическое время разогрева для больших печей составляет несколько суток, между тем как практическое время разогрева для тех же печей обычно составляет только несколько часов.

Ниже мы в первую очередь займемся потерями при непрерывной работе (потери холостого хода), затем обратимся к расчету потерь, принимая во внимание только однократный разогрев печи (теплосодержание печи), и, наконец, рассмотрим периодическую работу печи. В заключение вкратце определим наиболее экономическую толщину стенки печи.

а) Потери при непрерывной работе печи (потери холостого хода)

а) Чистые потери на теплопередачу. Сначала рассмотрим печи, изолированные в тепловом отношении со всех сторон (в противоположность ваннам и т. п. печам, имеющим обычно одну неизолированную поверхность высокой температуры). Прежде чем обратиться к отдельным формам печи (прямоугольные, цилиндрические), рассмотрим вкратце основные законы, на которых строится расчет потерь.

а) Основная формула и ее упрощение (см. Каммерер, К 7). Для состояния равновесия поток тепла, протекающий через плоскую плиту, можно рассчитать на основании закона, почти совпадающего с законом Ома. Обозначим толщину плиты через s (рис. 22), ее теплопроводность через λ , а температуру обеих поверхностей плиты через ϑ_1 и ϑ_2 ¹⁾. Согласно основной формуле, через поверхность плиты F проходит количество тепла, выражаемое формулой:

$$Q_v = F \frac{\lambda}{s} (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (7)$$

Если F измеряется в кв. метрах, s в метрах, λ в $\frac{\text{Кал}}{\text{м, час, } ^\circ\text{C}}$, то Q_v определяется в Кал/час.

¹ Температура наружной поверхности стенки печи.

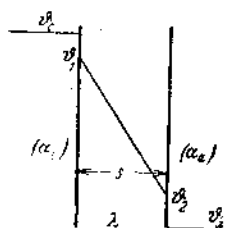


Рис. 22. Наглядное изображение обозначений.

В большинстве случаев известны не температуры поверхностей, а температуры соприкасающихся с ними пространств (температура внутреннего пространства печи ϑ_c и температура наружного воздуха ϑ_a). В этом случае вводится понятие сопротивления переходу тепла (тепловое переходное сопротивление), обозначаемое через $\frac{1}{\alpha_i}$ и $\frac{1}{\alpha_a}$; так как тепловой поток должен преодолеть сопротивление материала стенки печи и сопротивления перехода, то количество прошедшей теплоты будет равно

$$Q_v = F (\vartheta_c - \vartheta_a) \frac{1}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (8)$$

Из различных соображений — например, что внутренняя сторона печи должна быть механически прочной или же что теплоизолирующий материал, подлежащий применению, устойчив только до определенной максимальной температуры, — стенка печи часто делается в виде нескольких слоев. Тогда приходящее количество тепла определяется из выражения

$$Q_v = F (\vartheta_c - \vartheta_a) \frac{1}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a}}, \quad (9)$$

где $s_1, s_2, \dots, s_n$ — толщины отдельных слоев стенки, а $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — их теплопроводность.

Если можно будет отказать от учета переходных тепловых сопротивлений, это даст большое упрощение расчетов. Действительно, это часто оказывается возможным.

Например, в печах для отжига (температура около 800°) значение α_i едва ли упадет ниже 75 единиц. В сушильных печах (температура около 200° , металлическая внутренняя стенка) лучеиспускание значительно меньше, зато конвекция лучше, потому что в большинстве случаев в этих печах применяется искусственное движение воздуха. В этом случае в качестве нижнего предела для α_i можно принимать 40.

Следовательно, высшее значение $\frac{1}{\alpha_i}$ колеблется в пределах между 0,025 и 0,013.

Благодаря наличию тепловой изоляции, у наружной стенки печи температура значительно более низкая. На основании опыта можно принять значение $\alpha_a = 10 \left(\frac{1}{\alpha_a} = 0,1 \right)$.

Если допустить в расчете тепловых потерь ошибку (неточность) — $p = 10\%$, то можно пренебрегать величинами α_i и α_a до тех пор, пока остается справедливым выражение

$$\frac{s}{\lambda} \approx \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_a} \right) \cdot \frac{100}{p} = 0,125 \cdot 10 = 1,25. \quad (10)$$

На диаграмме 23 указаны минимальные толщины стенок печи

для различных величин коэффициентов теплопроводности, при которых возможно не принимать во внимание величин α при условии сохранения заданной наперед точности расчета. Для того, чтобы получить представление о влиянии допущенной неточности, в правом верхнем углу нанесена шкала неточностей (p). Соединяя нулевую точку с соответствующей точкой шкалы неточности прямой линией, получаем тот предел, внутри которого еще соблюдается намеченная точность расчета. Так как значения α были взяты исключительно низкими и поэтому в нормальных условиях неточность меньше приведенных цифр, то обычно значениями α_i и α_a можно пренебречь.

Обозначения на диаграмме рис. 23:

s — толщина стенки (м), λ — теплопроводность стенки печи
Кал

$\frac{\text{м}^2 \cdot \text{град}}{\text{час}}$, p — ошибка по формуле (10) в процентах. Следует соединить прямой линией нулевую точку с допустимым значением p на шкале процентов ($p\%$). Тогда соответствующие (связанные прямой) значения абсцисс и ординат дают для каждого значения λ минимально допустимую толщину стенки печи s .

При определении числового значения основной формулы для тел различной формы нам всегда придется говорить о *внутренней поверхности*, под которой в данном случае подразумевается поверхность внутренней стенки печи, не всегда совпадающая с поверхностью *полезного объема* печи. Если, допустим, необходимо построить печь с муфелем внутреннего нагрева (нагревающие сопротивления внутри муфеля) для изделий определенной величины, то, в зависимости от конструкции внутреннего пространства печи и нагревающих сопротивлений, всегда должен быть сохранен известный промежуток между изделиями и сопротивлениями; помимо того, некоторое место занимают и сами нагревающие сопротивления. Следовательно, в таких случаях необходимо различать поверхность полезного объема печи и поверхность потерь. Однако очень часто эти понятия смешиваются, что затрудняет, например, сравнение предложений фирм. В расчет потерь должна всегда вводиться поверхность потерь; так, например для электродных печей с расплавленными ваннами — поверхность ванны, для печей с муфелями наружного нагрева — внутренняя поверхность муфеля.

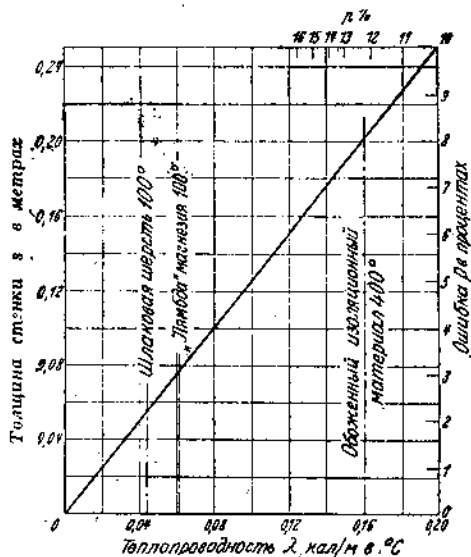


Рис. 23. Влияние пренебрежения значениями α_i и α_a при расчете тепловых потерь.

а) *Применение формулы к прямоугольным и цилиндрическим печам.* В печах, имеющих в основном прямоугольную форму, в расчет принимается пустотелый параллелепипед. Сначала предположим, что мы имеем дело с однородным телом, т. е. не будем принимать во внимание наружные формы и т. д., допущенные из конструктивных соображений. В таком случае прежде всего нужно решить, какую поверхность (внутреннюю, наружную или какую-либо другую) следует принять для величины F в формулах потерь от (7) до (9). До сих пор не удалось установить математически точную формулу, а потому приходится довольствоваться приближенными уравнениями, состав-

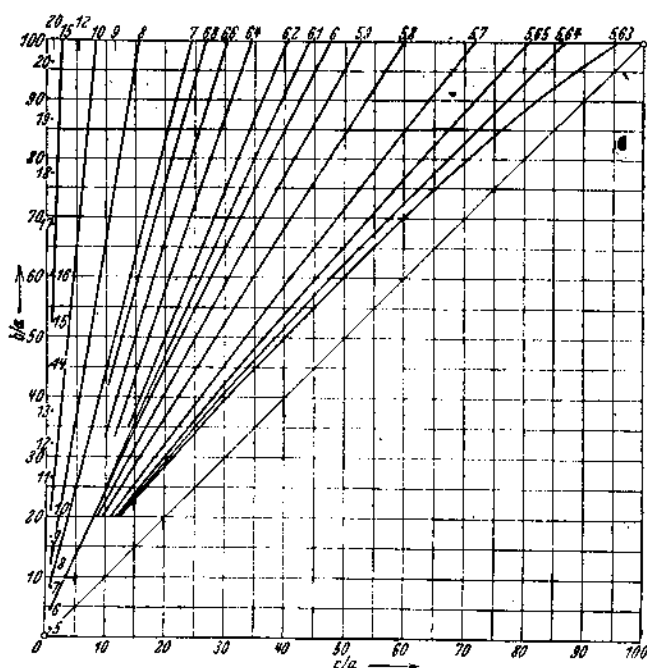


Рис. 24. Зависимость коэффициента λ от отношения длины ребер

$$\frac{b}{a} \text{ и } \frac{c}{a}; \quad \frac{b}{a} > \frac{c}{a} > 1.$$

ленными Гехлером (Ж 11) и Ленгмюйром (Ж 12). Оказалось, что получается очень хорошее соответствие между измеренными и вычисленными величинами, если в расчет берут среднюю геометрическую внутренней и внешней поверхности.

Тогда выражение $\frac{F}{s}$ можно изобразить в таком виде:

$$\frac{F}{s} = \frac{\sqrt{F_i F_a}}{s} = \frac{F_i}{s} \sqrt{1 + \frac{2ls}{F_i} + \frac{24s^2}{F_i^2}}, \quad (11)$$

где l — сумма длин ребер: $l = 4(a + b + c)$. В целях дальнейшего упрощения l представляется в виде функции от F_1 согласно обозначению: $l = f \sqrt{F_1}$.

При этом числовое значение f зависит от отношения длины ребер печи прямоугольной формы. На диаграмме 24 изображена зависимость f от обоих отношений ребер, $\frac{b}{a}$ и $\frac{c}{a}$. Для пользования диаграммой следует иметь в виду, что под a понимается длина наименьшего, а под b — длина наибольшего ребра. Применяя коэффициент f , можно написать выражение для $\frac{F}{s}$ следующим образом:

$$\frac{F}{s} = \frac{F_1}{s} \sqrt{1 + 2f \frac{s}{\sqrt{F_1}} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F_1}} \right)^2} \quad (11a)$$

Учитывая большую важность вычисления тепловых потерь для печей прямоугольной формы; рекомендуется для расчетов пользоваться этими формулами в виде графиков. С этой целью могут быть использованы два метода (рис. 25 и 26).

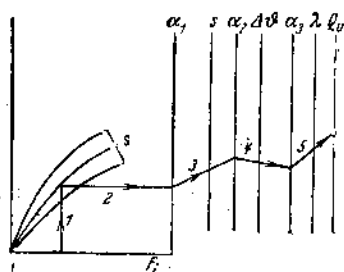


Рис. 25. Схема номограммы (таблица 1) для расчета потерь холостого хода печей прямоугольной формы.

f принято постоянным, s — вспомогательных осей, δ — отсчетов.

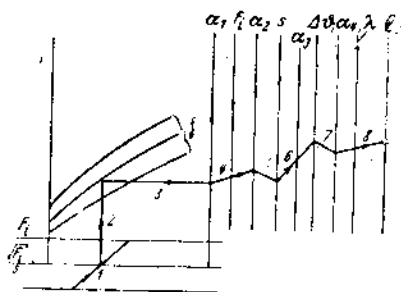


Рис. 26. Схема номограммы для расчета потерь холостого хода печей прямоугольной формы.

f принято переменным, δ — вспомогательных осей, s — отсчетов. Эта номограмма дает более точные данные по сравнению с рис. 25, но требует более сложных расчетов.

В первом случае (рис. 25) величина f принимается постоянной. Получаемая вследствие этого неточность не очень велика и изображена на рис. 27 в зависимости от f . Параметр кривых представляет собой величину f ; на ординате нанесены значения корней для различных значений f , кратных $f = 6$. На оси абсцисс нанесены значения $\sqrt{F_1}$.

Если ограничить допустимую неточность 10%, то для всех обычных печей можно считать по величине $f = 6$, если нет особо исключительных условий изоляции.

Ниже приведены применяемые при расчете тепловых потерь печей прямоугольной формы формулы в порядке их точности

$$\left. \begin{aligned} \alpha) \quad Q_v &= \frac{(\theta_c - \theta_a) F_i}{\frac{s}{\lambda} \sqrt{\frac{F_i}{F_a} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_a} \frac{F_i}{F_a}}} \\ \beta) \quad Q_v &= \frac{(\theta_c - \theta_a) \sqrt{F_i F_a} \cdot \lambda}{s} \\ \gamma) \quad Q_v &= \frac{(\theta_c - \theta_a) \lambda F_i}{s} \sqrt{1 + 12 \frac{s}{\sqrt{F_i}} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F_i}} \right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (11b)$$

Расчет потерь по формуле (11b, γ) может быть облегчен применением номограммы 1 (см. приложение). Здесь на оси абсцисс нанесена в логарифмическом масштабе величина площади внутренней

поверхности F ; в качестве параметра кривой избрана толщина стенки, а на оси ординат нанесено значение $\frac{F}{s}$ так-

же в логарифмическом масштабе. Первая вспомогательная шкала одновременно является составной частью номограммы; на других шкалах номограммы нанесены теплопроводность и разность температур. Вспомогательные шкалы обозначены α_1 и α_2 . Следующая за стрелками в порядке их номеров, находят искомые тепловые потери. Все данные относятся к температурам в пределах от 1 до 100°; поэтому температура на-

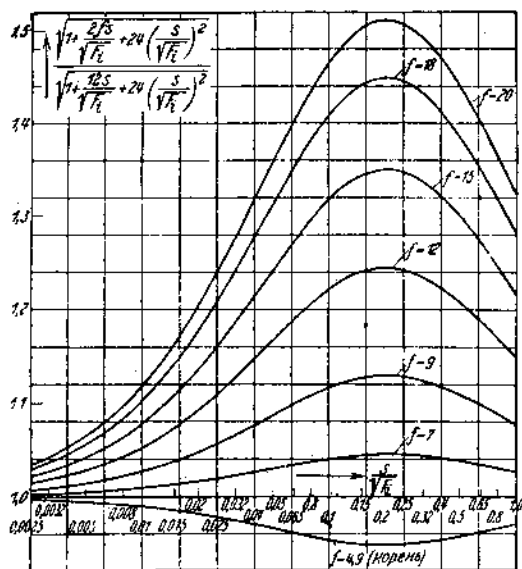


Рис. 27. Коэффициенты формы по уравнению (11a) при $f = \text{const} = 6$ при f переменном.

несена в особенно большом масштабе. Потери для температур свыше 100° находятся путем отсчета потерь для $1/10$ температуры с последующим умножением на 10; таким образом, потери для температуры, допустим, в 760° находятся посредством отсчета для 76° с последующим увеличением отсчитанного значения в 10 раз.

Расчет потерь через многослойные стенки. Во многих случаях, а именно в печах для высоких температур, внутренняя стенка печи

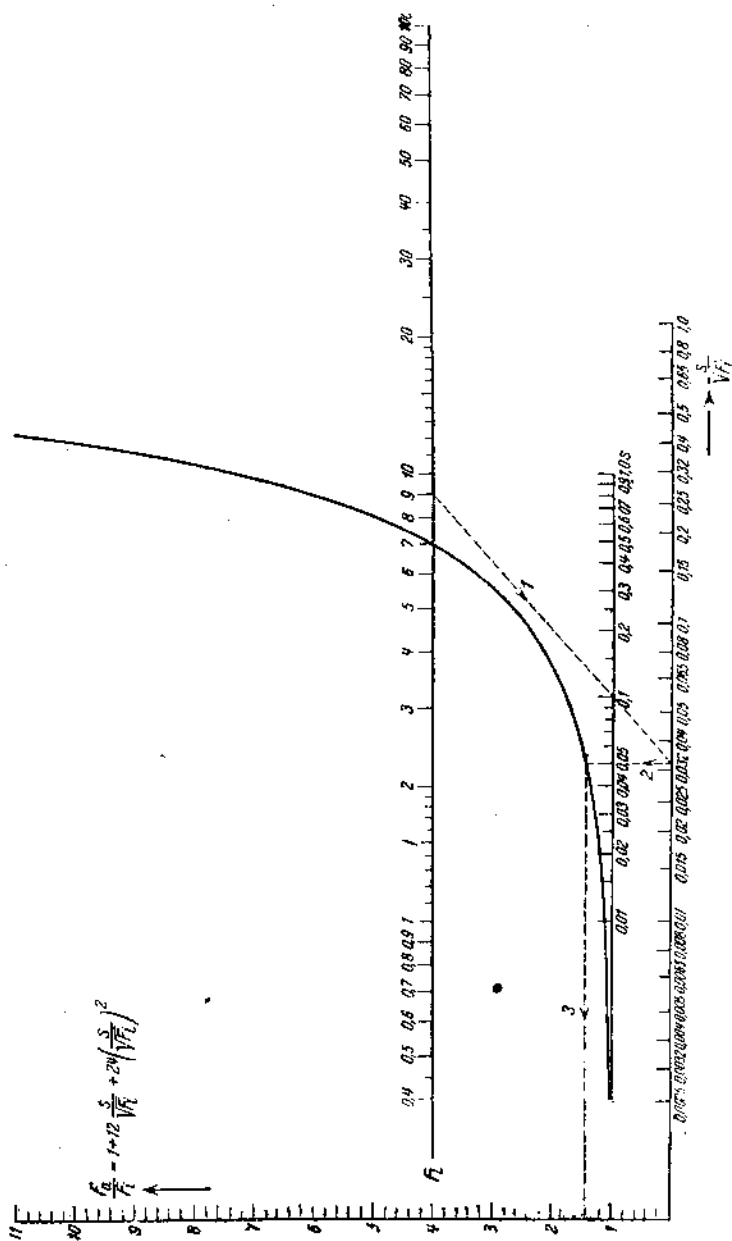


Рис. 28. Определение наружной поверхности "печи" прямоугольной формы по внутренней поверхности и толщине стенки для $f = \text{const} = 6$.

изготавливается из шамота и только поверх последнего наносится слой собственно тепловой изоляции.]

Для плоских поверхностей бесконечного протяжения можно было бы считаться со средней теплопроводностью λ , определяемой из толщин обоих слоев стенки s_1 и s_2 и соответствующих им теплопроводностей λ_1 и λ_2 , по формуле

$$\lambda = \frac{s_1 + s_2}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2}} \quad (12)$$

Для печей прямоугольной формы этот способ расчета дает только некоторое приближение, в то время как точный расчет должен учесть большую поверхность теплопрохождения, т. е. относительно более низкое тепловое сопротивление снаружи лежащих слоев. Если обозначить через F'_a площадь внешней поверхности внутреннего слоя стенки, т. е. поверхности пограничного слоя между обоими материалами, то тепловую потерю можно было бы высчитать из выражения:

$$Q_v = \frac{(t_c - t_a)}{\frac{s_1}{F \lambda_1 \sqrt{1 + 12 \frac{s}{F_i} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F_i}} \right)^2}} + \frac{s_2}{F'_a \lambda_2 \sqrt{1 + 12 \frac{s}{F'_a} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F'_a}} \right)^2}}} \quad 13$$

Обе части знаменателя могут быть, каждая в отдельности, подсчитаны по номограмме 1.

Необходимо только знать F'_a . Чтобы облегчить нахождение F'_a , на диаграмме рис. 28 изображено отношение $\frac{F'_a}{F_i} = f(F_i, s)$ при $f = 6 = \text{const.}$

Тем не менее расчет остается относительно сложным; при большой площади внутренней поверхности и при малой толщине шамота расчет со средней теплопроводностью по уравнению (12) вполне естественно даст меньшие ошибки, чем при малой площади внутренней поверхности и при большой толщине шамота. Равным образом расчет по средней теплопроводности по формулам (11) и (12) допустим тем более, чем ближе друг к другу величины теплопроводности обоих материалов. Для определения этих отношений служит таблица 6. (стр. 56 и 57).

В таблице 6 приведены тепловые потери в ваттах на 1000°C , причем в строчке «раздельно» потери рассчитаны по более точной формуле (13), в строчке «комбинировано» — потери рассчитаны по формуле (11) с учетом λ по формуле (12). В строчках «отношение» дано отношение первой величины ко второй. Для шамота повсюду принималась теплопроводность $\lambda_1 = 1$, а материал тепловой изоляции подсчитан для трех различных теплопроводностей $\lambda_2 = 0,05; 0,1; 0,2$.

Из этой таблицы мы видим, что для печей, имеющих площадь потерь более 40 м², обычно можно делать расчет упрощенным способом по формулам (11) и (12), не опасаясь ошибки более 10%; для меньших же печей, особенно при лучшем изоляционном материале и больших толщинах шамота, приходится, наоборот прибегать к более точным способам расчета.

Таблица 6 выясняет еще следующее обстоятельство. При малых печах и не слишком малых толщинах изоляции увеличение толщины шамота при той же толщине изоляционного слоя влечет за собою увеличение тепловых потерь. Это обстоятельство должно быть особо отмечено, так как оно выдвигает обязательное условие: строить электропечи с минимально возможными толщинами шамота. Само собою разумеется, толщина стенки не должна быть меньше некоторой минимальной величины, с одной стороны, принимая во внимание требуемую прочность, а с другой стороны потому, что в шамотном слое должно произойти определенное падение температуры, чтобы не была превышена некоторая максимальная температура в изоляционном слое. Об этой минимальной толщине шамотного слоя скажем еще следующее.

Если обозначить через s_1, s_2, s_3 и т. д. толщины составляющих стенку слоев различных материалов, через $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и т. д. их теплопроводность, через $\Delta\theta$ — общее падение температуры в стенке печи, а через $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3$, и т. д. — падение температуры в отдельных слоях стенки, то, так как падение температуры в отдельных слоях стенки пропорционально их тепловым сопротивлениям, стало быть

$$s_1 = \frac{\left(\frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots \right) \lambda_1 \cdot \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta}}{1 - \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta}}, \quad (14)$$

$$s_2 = \frac{\left(\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots \right) \lambda_2 \cdot \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta}}{1 - \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta}}. \quad (14a)$$

Если установлены температуры внутри печи, температуры поверхностей соприкосновения отдельных слоев ($\Delta\theta - \Delta\theta_1$; $\Delta\theta - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2$) и теплопроводность для, допустим, трех применяемых материалов, то, выбрав толщину одного слоя (например, s_3), получаем толщину других слоев из уравнений:

$$s_1 = \frac{\Delta\theta_1 \cdot \lambda_1 \cdot s_3}{(\Delta\theta - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \cdot \lambda_3} \quad (15)$$

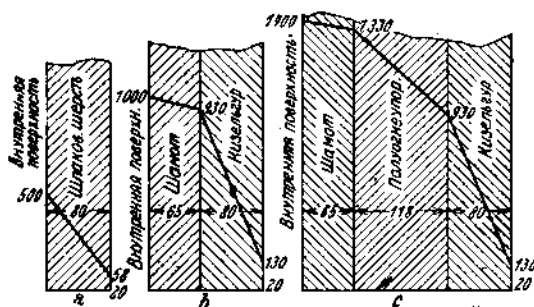
$$s_2 = \frac{\Delta\theta_2 \cdot \lambda_2 \cdot s_3}{(\Delta\theta - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \cdot \lambda_3}. \quad (15a)$$

Таблица 6

F_l (м ²)	λ_2 Кал м, час °С	Q_v	$s_1 = 0,04$ м			$s_1 = 0,12$ м			$s_1 = 0,24$ м		
			s_2 (м)			s_2 (м)			s_2 (м)		
			0,035	0,26	0,46	0,035	0,26	0,46	0,035	0,26	0,46
0,4	0,05	Раздельно	139	42,0	34,5	227	70,8	56,1	309	114	88,8
		Комбинировано	104	30,8	25,4	136	35,8	28,3	162	43,2	32,6
	0,1	Раздельно	255	81,9	67,6	352	130	105	404	190	154
		Комбинировано	197	61,2	50,5	237	70,2	55,8	258	80,8	63,3
	0,2	Раздельно	439	156	130	486	222	185	476	287	243
		Комбинировано	359	121	100	377	135	109	367	151	121
	0,05 0,1 0,2	Отношение	1,33	1,37	1,36	1,67	1,98	1,98	1,91	2,64	2,73
			1,29	1,34	1,34	1,49	1,85	1,88	1,56	2,36	2,43
			1,32	1,29	1,29	1,29	1,65	1,69	1,30	1,89	2,02
4,0	0,5	Раздельно	846	181	132	1030	238	171	1220	323	230
		Комбинировано	763	162	118	815	178	127	871	200	140
	0,1	Раздельно	1590	357	262	1720	454	331	1770	587	430
		Комбинировано	1450	321	235	1420	348	251	1390	384	273
	0,2	Раздельно	2830	696	513	2590	836	622	2290	993	758
		Комбинировано	2630	633	466	2270	666	490	1970	703	520
	0,05 0,1 0,2	Отношение	1,11	1,12	1,12	1,27	1,34	1,34	1,40	1,61	1,64
			1,10	1,11	1,11	1,21	1,31	1,32	1,28	1,53	1,57
			1,07	1,10	1,10	1,14	1,26	1,27	1,16	1,41	1,46
40	0,05	Раздельно	6940	1170	755	7050	1300	839	6760	1400	912
		Комбинировано	6710	1130	727	6480	1170	756	6190	1240	795
	0,1	Раздельно	13100	2320	1500	12100	2520	1650	10500	2650	1760
		Комбинировано	12700	2240	1450	11300	2300	1490	9850	2370	1550
	0,2	Раздельно	23700	4550	2970	18900	4770	3170	14500	4770	3270
		Комбинировано	23100	4410	2880	18000	4400	2910	14000	4340	2950
	0,05 0,1 0,2	Отношение	1,03	1,03	1,04	1,09	1,11	1,11	1,09	1,14	1,15
			1,03	1,03	1,04	1,07	1,10	1,10	1,07	1,12	1,13
			1,03	1,03	1,03	1,05	1,08	1,09	1,04	1,10	1,11
200	0,05	Раздельно	32800	5060	3080	31400	5300	3240	30700	5890	3640
		Комбинировано	32300	4990	3020	30100	5050	3090	27700	5150	3160
	0,1	Раздельно	62200	10000	6130	54300	10300	6370	47900	11200	7050
		Комбинировано	61300	9890	6030	52600	9900	6090	44000	9860	6160
	0,2	Раздельно	114000	19700	12100	85800	19600	12400	66600	20300	13200
		Комбинировано	111000	19500	12000	83900	18900	11900	62600	18100	11700
	0,05 0,1 0,2	Отношение	1,02	1,02	1,02	1,04	1,05	1,05	1,11	1,14	1,15
			1,02	1,02	1,02	1,03	1,05	1,05	1,09	1,13	1,1
			1,02	1,01	1,01	1,02	1,04	1,04	1,06	1,12	1,1

При этом не приняты во внимание α_i и α_a , так что $\Delta\theta$ представляет собою превышение температуры печи над температурой окружающего пространства.

Из приведенных выше формул можно определить минимальную толщину стенки печи, которая необходима для того, чтобы достигнуть намеченного падения температуры в каком-нибудь одном слое; правда, при этом поверхности, параллельные внутренней поверхности стенки, принимаются за изотермы, что, строго говоря, не соответствует действительности, так как по направлению к ребрам температура уменьшается. На практике обычно величина $\Delta\theta_1$ определяется тем, что известна внутренняя температура печи, а также допустимая предельная температура для первого слоя изоляции. Если ведут расчет на более



Потери 100° (квт)	1,28	2,27	2,04
Теплосодержание (100°/квтч) .	1,42	24,80	42,0
Предельная температура (°C)	500—600	1000—1100	1400—1500

Рис. 29. (Пашкис, Ж 13).

высокие температуры, и если, несмотря на это, хотят изолировать тем же материалом, то слой шамота должен быть взят тем более толстым, чем лучше должна быть изолирована печь, т. е., чем ниже должна быть температура наружной поверхности печи. Таким образом, требование возможно меньшей толщины шамота будет тем труднее удовлетворить, чем выше рабочая температура печи, и тем меньше будет экономия тепла вследствие применения изоляции. В этих случаях можно улучшить положение путем помещения между шамотом и изоляцией промежуточного слоя, температурная устойчивость и теплопроводность которого имеют величину промежуточную в сравнении с шамотом и изоляцией.

На рис. 29 (Пашкис Ж 13) показаны толщина стенок и падение температуры в отдельных слоях, составляющих стенки печи с внутренними размерами $1 \times 1 \times 1$ м, определенных расчетом, согласно уравнениям (14) и (15), для температуры рабочего пространства печи в 500° , 1000° и 1400° , и при условии, что изоляционный материал не должен подвергаться действию температуры выше 950° .

Рис. 29а соответствует температуре внутреннего пространства 500°, рис. 29б 1000°, и 29с 1400°.

Толщина шамотного слоя по уравнениям (15) получается меньше, чем это показано на рис. 29, а именно около 45 мм; однако слой шамота взят толщиной в 65 мм по требованиям прочности. Помимо того, на рис. 29с, во избежание слишком большой толщины, слой шамота взят также 65 мм и рассчитана толщина промежуточного слоя, сделанного из полуогнеупора. Во всех трех рисунках толщина слоя собственно тепловой изоляции выдержана постоянной, — равной 80 мм, так что ясно видно влияние температуры на тепловые потери, толщину стенки и падение температуры.

Печи цилиндрической формы. Как и для печей прямоугольной формы, поверхность теплопередачи увеличивается по мере приближения к наружной поверхности цилиндрической печи. В противоположность печи прямоугольной формы, в случае цилиндрической печи можно составить точную формулу теплопередачи, правда, не учитывая влияния концов цилиндра, т. е. принимая печь за бесконечно длинный цилиндр (Каммерер, К 7). Эта формула имеет следующий вид:

$$Q_0 = \frac{(\theta_c - \theta_a) \pi \cdot l}{\frac{1}{d_i \alpha_i} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_1}{d_i} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2}{d_1} + \dots \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_n}{d_{n-1}} + \frac{1}{d_n \alpha_n}} \quad (16)$$

где $\theta_c - \theta_a$ — падение температуры;

l — длина рассматриваемого куска цилиндра;

d_i, d_1 — внутренний и внешний диаметр цилиндра;

d_1, d_2, d_3 — наружный диаметр отдельных изоляционных слоев;

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — соответствующий отдельным слоям коэффициент теплопроводности;

α_i, α_n — коэффициенты теплопередачи.

Само собою разумеется, что и здесь могут быть сделаны упрощения, как это имело место в случае печей прямоугольной формы $\left(\frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{\alpha_n} = 0 \right)$.

Для расчета прохождения тепла через стенки полых цилиндров существуют подробные таблицы, правда, редко заключающие в себе данные для относительно больших диаметров, так как эти таблицы составлены для паропроводов. Некоторые такие таблицы приведены у Каммерера (К 7, К 9) и Грюнцвайга и Гартмана (К 8).

Так как значение печей цилиндрической формы значительно меньше значения печей прямоугольной формы, то мы не приводим здесь этих таблиц. Потери через лобовые поверхности печей цилиндрической формы рекомендуется вычислять по формуле для плоских стенок, внося в эту формулу площади наружной и внутренней поверхности лобовой стенки. Поясним это на примере (рис. 30): потери через поверхность цилиндрической части (косо заштрихованной) рассчитываются по формуле (16),

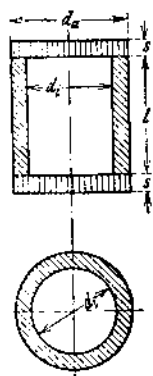


Рис 30. К расчету потерь холостого хода печей цилиндрической формы.

а) потери через лобовые стенки (вертикальная штриховка) рассчитываются по формуле (11b, β), при этом следует подставить для значений

$$F_i — \text{площадь } d_i^2 \frac{\pi}{4},$$

$$F_a — \text{площадь } d_a^2 \frac{\pi}{4} + d_a \pi s.$$

β) *Тепловое короткое замыкание.* При постройке печи фактически никогда не приходится иметь дело с положенными в основу наших предыдущих расчетов элементарными формами печей. Прежде всего, печь имеет всегда какое-то отверстие (дверца и т. п.), неизбежно нарушающее основную форму. Не говоря уже об увеличенной в большинстве случаев поверхности печи вследствие различных выступов или впадин, которые увеличивают наружную поверхность, в дверце имеются также неплотности.

Помимо дверцы, одним из главных источников термических коротких замыканий являются нагревательные элементы, так как они, по самой природе своей, своими токоведущими концами должны проходить сквозь стенку печи; между тем хорошие проводники электричества являются также хорошими проводниками тепла. Если же учесть, что эти выводы, вследствие различного коэффициента удлинения материала стенки и сопротивлений, должны быть не совсем плотно уложены в стенки печи, то станут понятными дальнейшие потери тепла вследствие конвекции. Можно было бы сделать попытку сэкономить тепло путем покрытия выводов за пределами стенки печи специальным изоляционным кожухом. Однако это недопустимо, так как будет препятствовать безукоризненности электрического контакта.

При неметаллических нагревательных элементах иногда применяется даже искусственное охлаждение: при водяном охлаждении дополнительные потери должны быть подсчитаны, исходя из температуры и количества охлаждающей воды. По сообщению германских карборундовых заводов, эта величина составляет, примерно, 40 вт/см² сечения вывода при 1000° С, в случае охлаждения при помощи только увеличения размеров (диаметра) выходящих из печи концов; расчет ведется по формуле (17). Необходимое количество охлаждающей воды и ее температура сильно зависят от конструкции нагревающих элементов, поэтому рекомендуется получить соответствующие данные от поставщиков этих сопротивлений.

Наконец, из соображений прочности внутренняя стенка печи должна быть в большинстве случаев соединена с холодной внешней стенкой при помощи материалов, обладающих достаточной прочностью, которые обычно относительно хорошо проводят тепло. В печах для низких температур металлическая внутренняя стенка соединяется с внешней стенкой железными связями. В печах для высоких температур с шамотной внутренней стенкой порою возникает необходимость опирать свод на шамотные же пята (конструкция (рис. 121 и 123.)

Точные расчеты каждого отдельного теплового короткого замыкания обычно не производятся, потому что основания для такого расчета еще слишком ненадежны.

О том, сколько тепла фактически можно потерять вследствие тепловых коротких замыканий, дают представление следующие цифры. Шамотная поверхность размером $0,3 \times 0,3 \text{ м}^2$ дает, примерно, те же тепловые потери, что и поверхность в 1 м^2 с кизельгуровой изоляцией (λ составляет около $0,10-0,12$); хромоникелевый мостик в 85 см^2 (соответствующий 100 выводам диаметром по 10 мм) отводит столько же тепла, сколько 1 м^2 кизельгуровой изоляции.

Вместо точного расчета в каждом отдельном случае, который, как это уже указывалось, в большинстве случаев не может быть произведен, полученные в результате вычисления по указанным ранее формулам тепловые потери умножаются на опытный коэффициент, одинаковый для печей одинаковой конструкции. Нельзя, например, брать одни и те же коэффициенты для печей с подвесным перекрытием и с обычным сводом, или для печи низкой температуры, отдельные нагревательные элементы которой включаются внутри (при помощи винтовых соединений, нельзя применять те же коэффициенты, что для печи, сопротивления которой выведены наружу поодиночке и включаются снаружи.

При помощи этого эмпирического коэффициента можно получить довольно точные предварительные расчеты. Величина этого коэффициента в значительной мере зависит от рациональности конструкции печи, а также от того, нужны ли шамотные опоры свода на всю толщину стенок или нет. В случае печей для средних и высоких температур (печи с керамической внутренней кладкой) величина коэффициента зависит также от величины (ширины) печи. На основании опыта добавка составляет от 50 до 150%, определенных расчетом тепловых потерь. В случае печей идентичной конструкции, если эта добавка определена для одной печи путем опыта, то для печей той же конструкции, но другой формы и величины, удастся заранее рассчитать тепловые потери с точностью до 10—15%, что с точки зрения точности наших данных о теплопроводности вполне достаточно.

γ) *Потери через незащищенные нагретые поверхности.* Упомянутым выше поправочным коэффициентом не учитываются потери вследствие лучеиспускания горячими поверхностями (как, например, поверхность ванны), а также потери вследствие лучеиспускания при открытии дверцы окна печи. Теплоотдача этими поверхностями происходит как вследствие лучеиспускания, так и вследствие конвекции.

Расчет лучеиспускания производится по приведенному на стр. 30 закону Кирхгофа. Коэффициенты лучеиспускания для различных поверхностей могут быть взяты из таблицы 2.

На этом же разделе можно основываться и в вопросах конвекции. Вдоль незащищенных поверхностей возникает сильное движение воздуха, вследствие естественного подъема теплого воздуха, которое, как уже указывалось, имеет большое влияние на теплопередачу путем конвекции.

В связи с этим следует упомянуть еще о том случае, когда из закрытой печи выступает часть изделия, например, в виде стержня. Для того, чтобы учесть тепловые потери, возникающие при такого рода тепловых коротких замыканиях, следует попытаться рассчитать распределение температуры вдоль стержня. Если принять обозначения:

- L — длина стержня, выступающая из печи;
- U, F — периметр и сечение стержня;
- λ — теплопроводность материала стержня;
- α_L — коэффициент теплопередачи в месте L ;
- ϑ_L — температура стержня в точке L ,

то по Греберу (К 3) получаем:

$$\frac{\vartheta_L}{\vartheta_c} = \frac{1}{\cos\left(\sqrt{\frac{\alpha_L U}{\lambda F}} \cdot L\right) + \sqrt{\frac{\alpha_L F}{\lambda U}} \sin\left(\sqrt{\frac{\alpha_L U}{\lambda F}} \cdot L\right)} \quad (17)$$

Полученные таким образом температуры следует помножить на соответствующие коэффициенты теплопередачи и взять их сумму по всей длине стержня. Чтобы облегчить применение

формулы (17), на диаграмме 31 она представлена в форме кривых.

б) Важнейшие специальные случаи. б а) Ванны (электродные печи). При расчете тепловых потерь электродных печей следует обратить внимание на то обстоятельство, что футеровка их часто недостаточно плотна; жидкость ванны просачивается сквозь нее наружу и образует, вследствие хорошей теплопроводности, источник значительных тепловых потерь.

В этом специальном случае рекомендуется производить расчет так,

как будто бы поверхность потерь больше, чем поверхность полезного объема ванны. На рис. 32 изображен поперечный разрез соляной ванны. Если считаться с тем, что соль просачивается до зоны а, тогда в основу расчета потерь рекомендуется положить диаметр d

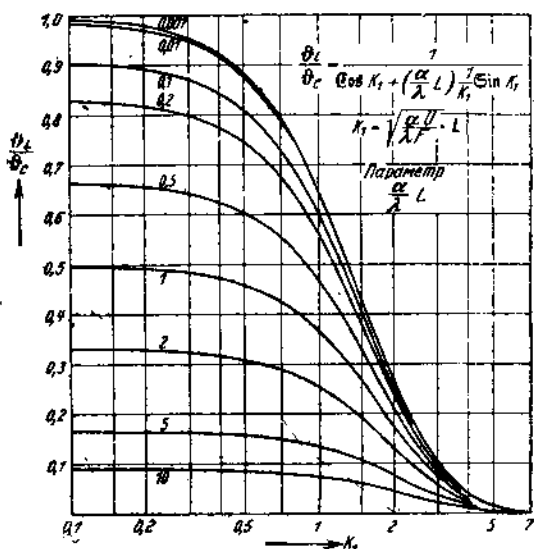


Рис. 31. Кривые, построенные по формуле (17).

вместо диаметра d_b . Соотношение $\frac{d_b}{d}$ зависит, между прочим, от абсолютной величины d_b , от материала футеровки, температуры и типичности футеровки. Оно может быть найдено для данной конструкции только на опыте. Однако эта неточность в объеме общего расчета потерь ванны играет относительно незначительную роль, потому что лучеиспускание поверхности ванны чрезвычайно велико.

б) *Печи с муфелем наружного нагрева.* Нагревающая обмотка в этих печах либо намотана на наружную поверхность муфеля, либо находится внутри огнеупорной стенки муфеля, причем, как в первом, так и во втором случае, муфель должен быть изготовлен из неэлектропроводного материала. Ясно, что неизбежный недостаток такой печи будет заключаться в высокой температуре нагревающих элементов. В связи с этим неизбежны более высокие потери по сравнению с печами, имеющими муфели с нагревом изнутри. Теплотехнические преимущества муфелей с нагревом снаружи состоят, с одной стороны, в уменьшенной площади потерь вследствие отсутствия дополнительного пространства для помещения нагревательных элементов, а, с другой стороны, в возможности применения лучше изолирующего материала (порошкообразных изоляторов).

Расчет тепловых потерь таких печей отличается от расчета печей с нагревом муфеля изнутри вследствие того, что в первого рода печах

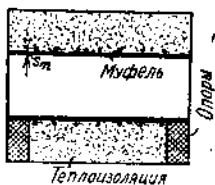


Рис. 33. Схема печи с муфелем наружного нагрева.

потери зависят от полезной нагрузки печи. На рис. 33 изображен схематический разрез печи с муфелем, нагреваемым снаружи. Если не учитывать тепловых потерь на ненагреваемых лобовых стенках, то в состоянии установившегося равновесия, когда полезного расхода тепла не происходит внутри муфеля, не может возникнуть разности температуры (черное излучение). Но в этом случае и в стенке муфеля нет падения температуры, и температура нагреваемого элемента не выше температуры печи, т. е.

внутри муфеля. Если же через стенку муфеля внутрь проходит тепло, то внешняя его сторона должна быть горячее, чем внутренняя. Если последняя должна иметь ту же температуру, что и внутренняя поверхность стенки муфеля внутреннего нагрева, то наружная поверхность стенки должна быть тем горячее, чем больше полезный тепловой поток.

Для дальнейших рассуждений примем следующие обозначения:

δ_m — толщина стенки муфеля;

λ_m — теплопроводность материала муфеля;

q — расход тепла для нагрева изделия и для покрытия потерь через ненагреваемые поверхности, отнесенные к нагреваемой поверхности муфеля;

θ_{ma} — температура наружной поверхности муфеля;

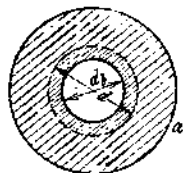


Рис. 32. Схематический разрез соляной ванны.

ϑ_{mi} — температура внутренней поверхности муфеля;

F_N — площадь поверхности полезного пространства печи (в муфельных печах с наружным нагревом равна площади внутренней поверхности муфеля);

F_D — площадь потерь муфельных печей с внутренним нагревом;

λ_i — теплопроводность тепловой изоляции в муфельных печах внутреннего нагрева;

λ_a — теплопроводность тепловой изоляции в муфельных печах наружного нагрева;

Q_i — потери холостого хода муфельной печи наружного нагрева.

Q_a — потери холостого хода муфельной печи наружного нагрева;

Тогда;

$$q = \frac{\lambda_m}{s_m} (\vartheta_{ma} - \vartheta_{mi}). \quad (18)$$

Потери муфельных печей наружного и внутреннего нагрева вычисляются по одним и тем же формулам, только вместо внутренней температуры стенки печи ϑ_c в расчет вводится наружная температура муфеля ϑ_{ma} . Значение ϑ_{ma} находят из уравнения (18) ($\vartheta_{mi} = \vartheta_c$).

При выборе конструкции печи (внутренний или наружный нагрев муфеля) следует основываться на отношении потерь холостого хода;¹ при одинаковой толщине изоляционного слоя это отношение равно:

$$\frac{Q_i}{Q_a} = \frac{F_V \cdot \lambda_i \cdot \vartheta_{mi}}{F_N \cdot \lambda_a \cdot \vartheta_{ma}}. \quad (19)$$

Величины λ_i и λ_a могут очень отличаться друг от друга. $\frac{F_V}{F_N}$ уменьшается с увеличением F_N , потому что предохранительное расстояние растет непропорционально величине печи. В муфельных печах малого размера потери всегда будут меньше для муфелей внешнего нагрева в сравнении с муфелем внутреннего нагрева; в случае интенсивно загруженных печей (q велико) происходит обратное явление. Потери в обоих случаях будут равны, если

$$\frac{F_V}{F_N} = \frac{\lambda_a \vartheta_{ma}}{\lambda_i \vartheta_{mi}}. \quad (19a)$$

Величина ϑ_{ma} определяется из уравнения (18):

$$\vartheta_{ma} = q \frac{s_m}{\lambda_m} + \vartheta_{mi}$$

и в соответствии с этим

$$\frac{F_V}{F_N} = \frac{\lambda_a}{\lambda_i} \left(q \frac{s_m}{\lambda_m} \cdot \frac{1}{\vartheta_{mi}} + 1 \right). \quad (19b)$$

Это уравнение графически изображено на рис. 34; по оси абсцисс отложено отношение $\frac{s_m}{\lambda_m}$, параметром кривой является $\frac{q}{\vartheta_{mi}}$, на вспо-

¹ Понятие «потери холостого хода» в муфельных печах наружного нагрева теряет свое буквальное значение, так как размеры потерь в этой печи зависят от полезного расхода тепла.

могательной оси x_1 нанесено $\left(q \cdot \frac{s_m}{\lambda_m} \cdot \frac{1}{\vartheta_{mi}} + 1 \right)$ без цифровых обозначений. При помощи шкалы $\frac{\lambda_i}{\lambda_a}$ можно отсчитывать на второй шкале значения $\frac{F_v}{F_N}$.

При сравнении печей внутреннего нагрева с печами наружного нагрева муфеля мы принимали, что коэффициент $\frac{F_i}{s}$ в уравнении (11), зависящий от формы, для обеих конструкций одинаков. С уменьшением поверхности потерь, как в муфельных печах наружного нагрева, этот коэффициент, конечно, увеличивается. Этот недостаток муфель-

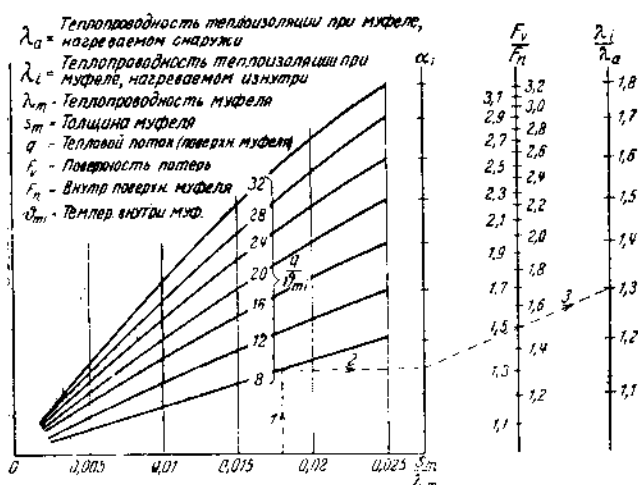


Рис. 34. Сравнение потерь холодного хода печей с муфелями внутреннего и наружного нагрева.

ных печей наружного нагрева уравновешивается преимуществом, которое заключается в более тонком огнеупорном слое, обуславливающим согласно таблице 5 меньшие потери холодного хода, чем в муфельных печах внутреннего нагрева с более толстой внутренней огнеупорной стенкой.

Чтобы получить представление о примерном пределе экономичности этого способа нагрева, рассмотрим следующий случай:

$$\frac{s_m}{\lambda_m} = 0,01, \quad \frac{q}{\vartheta_{mi}} = 10, \quad \frac{\lambda_a}{\lambda_i} = 1,5.$$

При таких условиях тепловые потери для обоих случаев одинаковы, если

$$\frac{F_v}{F_N} = 1,65.$$

Если, например, имеют печь, примерно, кубической формы, то отношение длины ребер будет равно 1,28; если считать, что для предохранительного расстояния и помещения нагревательных элементов в муфельной печи внутреннего нагрева нужно 100 мм, то длина ребра полезного объема составит около 0,35 м. Это значит, что при принятых соотношениях, в основу которых положены практические величины, муфельная печь наружного нагрева с поверхностью полезного объема около 0,75 м² (или емкостью около 450 л) экономичнее, чем муфельная печь внутреннего нагрева.

б) Расчет теплосодержания

Количество тепла, поглощенное печью по достижении устойчивого равновесия, должно быть заранее подсчитано с большой точностью. Это количество тепла складывается из тепла, поглощенного внутренней стенкой печи, нагревающими сопротивлениями, теплоизоляцией и наружной стенкой печи.

Для каждой из этих частей действительно следующее уравнение:

$$Q_{sp} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \cdot c \cdot \gamma \cdot V \text{ (Кал.)}, \quad (20)$$

где:

- Q_{sp} — количество поглощенного тепла (теплосодержание);
 $\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}$ — средняя температура соответственной части печи;
 c — удельная теплота соответственной части печи;
 γ — удельный вес¹ соответственной части печи;
 V — объем соответственной части печи.

Средняя температура $\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}$ в этой формуле не может быть достаточно точно определена, потому что, как указано выше, поверхности, параллельные стене, не представляют собой изотерм; они ближе к изотермам в шамотной кладке внутренних стенок, чем в спаружки расположенной изоляции. А так как шамот поглощает большую часть тепла, то влияние этой неточности не очень велико.

То обстоятельство, что шамот накапливает в себе большую часть поглощенного печью тепла, вытекает из нижеследующих соображений. Из четырех множителей выражения (20) удельная теплота шамота и изоляционного слоя почти одинакова; следовательно, при сравнении ею можно пренебречь. Объемный вес изоляции составляет от $\frac{1}{3}$ до $\frac{1}{5}$ объемного веса шамота. Точно также уровень средней температуры шамота, в котором происходит только незначительная часть падения температуры почти вдвое больше, чем средняя температуры изоляции (рис. 29). И только четвертый член — объем — для изоляции больше, чем для шамота, так как, во-первых, изоляция расположена снаружи, а, во-вторых, слой ее толще, чем слой шамота. Но так как большая толщина стенки способствует повышению средней температуры шамота сравнительно с температурой изоляции, то влияние большего объема последней этим в свою очередь уменьшается; таким образом, уравнение (20) даст для шамота более высокие значения, чем для изоляции. Для печей с металлическими

¹ Для керамических материалов вместо удельного веса принимается объемный вес

внутренними стенками изотермы значительно лучше совпадают с плоскостями, параллельными стенкам.

Чтобы воспользоваться формулой (20) с целью расчета теплосодержания стенки печи, должны быть определены температуры ϑ_1 и ϑ_2 для отдельных слоев. Мы называем их вообще ϑ_{1n} и ϑ_{2n} и начинаем с внутренней стенки печи.

Из уравнения (8) находим тепловой поток через 1 м² поверхности стенки $q = \frac{Q}{F}$ [по этому поводу см. также формулы (14) и (15)]. Этот тепловой поток в состоянии устойчивого равновесия при прохождении через отдельные слои имеет одну и ту же силу, так что можно написать

$$q = (\vartheta_c - \vartheta_{1,n}) \alpha_i = (\vartheta_{1,1} - \vartheta_{2,1}) \frac{\lambda_1}{s_1} \dots = (\vartheta_{1,n} - \vartheta_{2n}) \frac{\lambda_n}{s_n} = (\vartheta_{2n} - \vartheta_a) \alpha_a. \quad (21)$$

Из уравнения (21) можно определить $\vartheta_{1,1}$; $\vartheta_{2,1} = \vartheta_{1,2}$; $\vartheta_{2,2} = \vartheta_{1,3}$ и т. д. Как уже указывалось в начале этого раздела, процесс прогрева печи продолжается очень долго. Более крупные печи (диаметром около 2 м и глубиной около 1 м) требуют нескольких дней для того, чтобы они полностью прогрелись или полностью остыли. Однако, приходится подводить количество тепла, соответствующее полному теплосодержанию, относительно редко; это случается только после длинных перерывов в эксплуатации.

Гораздо важнее случай прерывистой работы печи, к рассмотрению которого мы и переходим.

с) Потери при периодической работе печи

В практических условиях печи почти всегда работают периодически, так как в большинстве случаев они выключаются хотя бы на выходные дни. При каждой периодической работе потери на разогрев и на охлаждение играют значительную роль, так как потребность в тепле, возникающая в результате охлаждения, никоим образом не исчерпывается расходом тепла во время практического периода разогрева после нового включения.

Регулярно-периодическая работа печи характеризуется двумя величинами: относительным временем работы печи (включения) и продолжительностью операции. Если обозначим через ED продолжительность фактической работы печи (время включения), а через AD время ее выключения, то относительное время включения

$$\zeta = \frac{ED}{ED + AD} = \frac{ED}{SD} \quad (22)$$

и продолжительность операции

$$SD = ED + AD. \quad (22a)$$

Зависимость между расходом тепла, относительным временем включения и продолжительностью операции схематически изображена

на диаграммах рис. 35, а и 35, б. Первый показывает зависимость расхода тепла от величины относительного времени включения при различных значениях SD — продолжительности операции. Линия 1 — бесконечно продолжительный цикл: тепло на нагрев печи расходуется только один раз и, принимая во внимание тепловые потери, им можно пренебречь; последние в ζ раз меньше, чем потери при непрерывной работе; линия 2 — бесконечно короткий цикл: температура печи во время выключения не снижается, потери такие же, как и при непрерывной работе. Расход тепла выражен в частях (%%) того расхода тепла, который получается при непрерывной эксплуатации в течение такого же периода. На рис. 35, б показан расход тепла в зависимости от продолжительности операции при постоянном ζ . К сожалению, числовой расчет

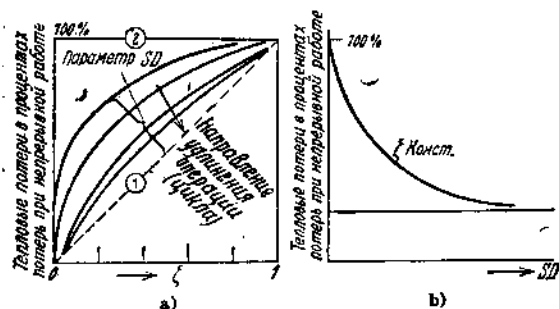


Рис. 35. Относительное время включения ζ , полное время операции (цикла) SD и тепловые потери при периодической работе.

этих кривых до настоящего времени еще невозможен. Можно дать только два предельных значения для тепловых потерь при периодической работе: они должны быть больше тепловых потерь в состоянии устойчивого равновесия за время работы печи ED включения печи (линия 1 на рис. 35, а), и меньше тепловых потерь в состоянии устойчивого равновесия (линия 2 на рис. 35, а) за время всей операции SD .

д) О наиболее экономичной толщине изоляции

Выше, рассматривая тепловые потери, мы считали толщину изоляции заданной; об установлении ее размеров говорилось только с точки зрения необходимого и допустимого падения температуры. При прочих расчетах изоляционной техники понятие «экономическая толщина стенки» играет значительную роль и служит основой для определения толщины слоя изоляции (Каммерер, К 10). Мы должны ознакомиться с этим понятием и исследовать, почему до настоящего времени экономическая толщина стенок не могла приниматься во внимание в печестроении.

Читателю станут яснее наши предпосылки, если он вспомнит сказанное об основной диаграмме печи.

Изоляция печи связана с эксплуатационными расходами изолированного объекта двояко: с одной стороны, стоимостью тепла, которая падает с увеличением толщины изоляции, и, с другой стороны, стоимостью капитальных затрат, возрастающих с увеличением толщины изоляции.

Функция, изображающая степень участия в эксплуатационных расходах изолированного объекта этих обеих величин, в зависимости от толщины изоляции будет следовательно иметь определенный минимум. Та толщина изоляции, при которой получается этот минимум, называется экономической толщиной изоляции.

Несмотря на то, что обычно от безукоризненного расчета требуется также определение экономической толщины изоляции, мы все же вынуждены при проектировании печей в большинстве случаев отказать от установления этой величины по следующим причинам:

1. Стоимости тепла должны складываться из двух частей:

а) стоимости тепловых потерь холостого хода, достаточно точно определяемые и падающие с увеличением толщины изоляции;

б) стоимости тепла, расходуемого на разогрев печи и охлаждение.

Если вся запасенная печью теплота каждый раз теряется и должна быть снова возобновлена, то эти потери точно также легко можно определить: в таком случае они равны теплосодержанию печи (Стасине, Ж 14.) Однако такой случай представляет собою только исключение; обычно же, как указано в предыдущем разделе, печь включается и нагревается снова раньше, чем она полностью отдаст весь запас тепла. Степень участия теплоты, заключающейся в печи в момент повторного включения, представляет собой функцию толщины изоляции, однако не может быть точно рассчитана, а поэтому отпадает база для определения экономической толщины слоя изоляции.

2. Как уже указано в соответственных разделах, в потери холостого хода включены потери вследствие тепловых коротких замыканий. Одна часть последних падает обратно пропорционально толщине стенки (например, потери через выводы сопротивлений); другая же часть совершенно не зависит от толщины стенки (например, потери через дверцу). Разделить тепловые короткие замыкания на зависящие и независящие от толщины слоя изоляции в настоящее время еще не представляется возможным.

3. Продажная стоимость печи, разумеется, влияющая на капитальные затраты, зависит не только от изоляционного материала, но и от конструкций наружной стенки печи, которая тем дороже, чем толще слой изоляции. Эта зависимость не может быть представлена в виде какой-либо формулы. Для того, чтобы найти зависимость стоимости наружной стенки печи от толщины изоляции, пришлось бы сконструировать большое число печей (хотя бы в общих чертах). При этом такую работу не пришлось бы выполнять раз навсегда, т. е. для каждой новой конструкции печи нужно ее повторять.

Поэтому в настоящее время толщину изоляции обычно не принимают равной экономической толщине. В большинстве случаев печи изолируются теперь как в Германии, так и в Америке, более тонким слоем, чем это диктуется требованиями экономики. Следовало бы по возможности увеличивать толщину изоляции настолько, насколько это вообще допустимо условиями продажной стоимости печи.

Пример (продолжение со стр. 44). Определить тепловые потери печей, описанных на стр. 40 размеров, имеющих температуры, указанные на стр. 38.

Можно считать, что за выходной день печи полностью не охлаждаются.

1. *Расчет потери халостого хода.* Для расчета тепловых потерь к полезному пространству следует прежде всего прибавить пространство, необходимое для помещения нагревательных элементов. Опыт показывает, что при заданных размерах полезного объема для нагреваемых элементов дна и перекрытия требуется 0,2 м, для нагревания боков — 0,18 м и по длине, вследствие неизбежного падения температуры в дверце, — 0,2 м. Таким образом, в основу расчета потерь кладутся следующие размеры печи:

Таблица 7

Полезная площадь (м ²)	a (м)	b (м)	c (м)	l (м)	Fi (м ²)
0,5	0,90	0,90	0,30	8,40	2,70
1,0	1,00	1,42	0,30	10,88	4,30
2,0	1,00	2,64	0,30	14,76	7,46
3,0	1,50	2,49	0,30	12,87	9,88

Стенка состоит из двух слоев: внутренней шамотной стенки толщиной 80 мм и изоляционного слоя толщиной 270 мм.

Изоляционный слой частично поронкообразный, а частично (со стороны пола) — кирпич. Порошок занимает 35% объема изоляции ($\lambda = 0,080$), кирпич — 65% ($\lambda = 0,115$).

Таким образом, средняя теплопроводность изоляционного слоя составляет,
 $0,080 \cdot 0,35 + 0,115 \cdot 0,65 = 0,103$.

Средняя теплопроводность всей кладки стенки печи равна:

$$\lambda = \frac{0,350}{\frac{0,080}{1} + \frac{0,270}{0,103}} = 0,13 \frac{\text{Кал}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{час.}}$$

Для сравнения печей разной величины мы отказываемся от применения формулы (13), а по формуле (11b, γ) для потерь получается следующее значение:

Таблица 8

Полезная основная площадь (м ²) . . .	0,5	1,0	2,0	3,0
Потери на печь (квт)	3,25	4,64	7,45	8,15
Общие потери, т. е. потери на печь, умноженные на число печей (квт) .	13,00	9,28	7,15	8,15

Принимая во внимание возможный резерв, который позволил бы при уменьшении выпуска продукции снизить и потери, выбираем печь величиною 1 м² основной площади и ставим таких 2 печи.

В номограмме 1 нанесены линии для этого значения.

2. Помимо того, нужно установить потери тепла при охлаждении печи во время выходных дней. Точных цифр, как сказано выше, ожидать не приходится. Потери при охлаждении могут быть определены только в очень широких пределах. Для этого вычисляем сначала теплосодержание печи.

Объем шамотной кладки составляет:

$$(1 + 2 \cdot 0,08) (1,42 + 2 \cdot 0,08) (0,30 + 2 \cdot 0,08) - 1 \cdot 1,42 \cdot 0,3 = 0,42 \text{ м}^3.$$

Объемный вес шамота равен 2000 кг/м³; вес шамота — 840 кг, объем изоляционного слоя составляет:

$$(1,16 + 0,54) (1,58 + 0,54) (0,46 + 0,54) - 0,845 = 2,755 \text{ м}^3.$$

Объемный вес изоляционного порошка составляет 290 кг/м³.

Объемный вес изоляционного кирпича равен 650 кг/м³.

Средний объемный вес: $290 \cdot 0,35 + 650 \cdot 0,65 = 525 \text{ кг/м}^3$.

Вес изоляции 1420 кг.

Падение температуры. Мы связываем теплосопротивления отдельных слоев с общим сопротивлением (другими словами, учитываем коэффициент теплопередачи).

Сопротивление шамотного слоя составляет $\frac{0,08}{1}$ ($\lambda = 1$).

Общее сопротивление равно: $\frac{0,08}{1} + \frac{0,270}{1,103} + 0,1 = 2,80$.

(Величина 0,1 представляет собою значение $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{10}$).

Падение температуры в шамоте равно $\frac{0,08}{2,80} = \frac{\Delta\theta_1}{660}$; $\Delta\theta_1 = 19^\circ$.

Падение температуры в изоляционном слое $\frac{0,270}{0,103 \cdot 2,80} = \frac{\Delta\theta_2}{660}$; $\Delta\theta_2 = 618^\circ$.

Результаты подсчета падения температуры графически изображены на рис. 36.

Теплообержение. Средняя температура шамота 670° .

Теплосодержание (начальная температура 20°): $650 \cdot 840 \cdot 0,2 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 127 \text{ квтч.}$

Средняя температура изоляционного слоя равна 352° .

Теплосодержание (начальная температура 20°): $332 \cdot 1420 \cdot 0,21 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 110 \text{ квтч.}$

Общее теплосодержание печи, включая надбавку на кожух и нагревающие сопротивления, составляет 250 квтч.

На основании теплосодержания можно примерно оценить тепловые потери в течение выходного дня.

Сначала после выключения печи температура наружной поверхности печи практически остается постоянной; потери холостого хода останутся в полной величине. Затем стенка начнет медленно охлаждаться изнутри наружу (рис. 36), так что через некоторое время на внешней поверхности стенки печи температура заметно упадет; в результате этого теплоотдача станет меньше. Путем кропотливого графического расчета по Шмидту (К 4), можно найти величину охлаждения в конце перерыва при условии, что перед этим печь была в состоянии устойчивого равновесия. Если же печь не находилась в этом состоянии, как это и может быть при ежедневной периодической работе, тогда от этого метода надо отказаться. В этом случае можно только примерно оценить потери при охлаждении так, как это будет сделано ниже, где определяется охлаждение печи в день отдыха.

Мы исходим из того положения, что охлаждение за каждую единицу времени равно потерям холостого хода. В нашем случае они составляют 4,64 квт. Охлаждение длится 24 часа. Таким образом, теплоотдача составляла бы при постоянной температуре поверхности печи $4,64 \cdot 24 = 111 \text{ квтч.}$, т. е. более 46% теплосодержания печи. Однако при таких потерях тепла температура поверхности печи к началу работы непременно понизится, так что основное положение, приводящее к вычислению потерь в 111 квтч, оказывается неправильным.

Во всяком случае, на основании этого соображения можно установить нижнюю границу потерь тепла; она должна быть больше, чем если бы потеря тепла все время

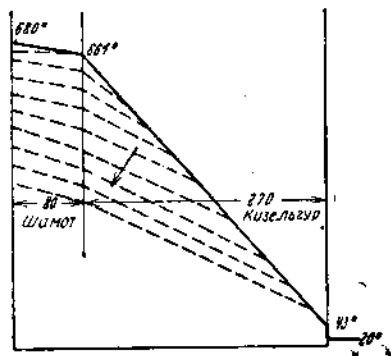


Рис. 36. Распределение температуры и процесс охлаждения стенки печи (схематическое изображение).

Штриховой пунктир изображает распределение температуры в периоды времени, следующие в направлении, указанном стрелкой.

составляла бы только 46% потерь холостого хода. Следовательно, она должна быть больше, чем $0,46 \cdot 111 = 51$ квтч. Между обоими этими пределами (111 и 51 квтч) и находится истинная величина потерь при охлаждении, и ее можно взять только совершенно произвольно, например, как среднюю арифметическую, т. е. 81 квтч.

Такая неточность отразится в нашем примере незначительно, так как эта потеря тепла, по сравнению с расходом тепла в течение рабочего периода времени между днями отдыха, не представляет сколько-нибудь заметной величины.

Однако, эта потеря гораздо заметнее, если печь охлаждается ежедневно (например, в течение 8 или 16 часов), и в этом случае расход энергии на разогрев печи представляет уже довольно значительную величину в общем ее тепловом балансе. Нам часто предлагают считать уменьшение теплоотдачи наружными стенками печи пропорциональным уменьшению теплосодержания. При такого рода расчете предполагается, что распределение температуры в стенке печи в каждый момент отвечает закону прямой линии, что не соответствует действительности. Преимущество этого способа состоит лишь в том, что в каждом случае приходится иметь дело с одинаковыми ошибками.

(Продолжение примера см. стр. 87).

5. НАГРЕВАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (СОПРОТИВЛЕНИЯ)

Обозначения. В этом разделе приняты следующие обозначения:

- γ — напряжение поверхности (вт/см²);
 - N_0 — установленная или номинальная мощность печи (квт);
 - l_0 — общая длина нагревающих элементов во всей печи (м);
 - u — периметр поперечного сечения нагревающего элемента (мм);
 - q — площадь поперечного сечения нагревающего элемента (мм²);
 - ρ — удельное сопротивление при рабочей температуре печи $\frac{\text{ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}}$;
 - $\varepsilon > 1$ — отношение сторон при прямоугольном сечении элементов;
 - a — короткая сторона прямоугольника при прямоугольном сечении элементов (мм);
 - d — диаметр нагревающих элементов круглого сечения (мм);
 - G — общий вес нагревающих элементов печи (кг);
 - γ — удельный вес материала элементов (кг/дм³);
 - R — электросопротивление всех нагревающих элементов печи (ом);
 - U_0 — напряжение тока на зажимах печи (в).
- Для расчета нагревающих элементов рекомендуется исходить из одной группы; под этим мы понимаем все последовательно включенные элементы одной фазы. Обозначим:
- N — мощность одной группы (квт);
 - U — напряжение одной группы (в);
 - l — длину нагревающих элементов одной группы (м);
 - G — вес нагревающих элементов одной группы (кг);
 - R — электросопротивление всех нагревающих элементов одной группы (ом);
 - S — наружная поверхность нагревающих элементов одной группы (см²).

а) У с т а н о в л е н н а я (н о м и н а л ь н а я) м о щ н о с т ь

После установления тепловых потерь и полезного расхода тепла в печи следует определить установленную мощность печи. Она должна быть принята больше, чем $\frac{\text{полезное тепло}}{\text{время нагрева}} + \text{потери}$.

Решающими в данном случае, помимо соображений, высказанных в разделе «Полезное тепло», представляются также следующие условия;

а) в устройстве нагревающих элементов должны быть даны известные допуски (допуски для материала и для намотки);

б) расход мощности изменяется пропорционально квадрату напряжения; согласно существующих в Германии норм, допустимы

колебания напряжения до 10%, однако часто возникают и более высокие колебания;

с) старение нагревательных элементов (окисление) выражается в увеличении их электросопротивления, которое чересчур резко могло бы уменьшить мощность, используемую для полезной теплоты, если номинальную мощность взять слишком низкой; с другой стороны, номинальную мощность не следует брать слишком высокой, так как в этом случае пострадает точность регулировки (стр. 106).

Под установленной или номинальной мощностью печи мы понимаем максимальную мощность, забираемую печью при номинальном напряжении. Так как сопротивление нагревательных элементов зависит от температуры и потому заметно изменяется в продолжение практического времени разогрева печи (в большинстве случаев падает), то следует отличать номинальную мощность в холодном состоянии от мощности в рабочем состоянии печи. Эта разница невелика и обычно составляет около 10—15%.

Номинальной мощности, представляющей собой для каждой печи при данной температуре постоянную величину, противопоставляется рабочая мощность, которая может быть уменьшена путем изменения включения сопротивлений (см. раздел «Включение и регулировка», стр. 100). Здесь мы только специально отметим, что номинальная мощность постоянна для каждой печи, если не учитывать вышеуказанные колебания напряжения, в то время как расход энергии может быть очень различный, и только в том случае, если невозможны какие-либо переключения, номинальная мощность всегда равна расходуемой мощности.

Обычно номинальная мощность значительно превосходит средний расчетный расход энергии (минимум на 40%), чтобы возможно было работать с известным избытком тепла даже при напряжении сети, пониженном на 10%.¹

б) Типы нагревательных элементов

Расчет нагревательных элементов отчасти зависит от их конструкции. Мы рассмотрим здесь следующие три основных типа:²

а) элементы из проволоки или из ленты (металлические элементы);

б) нагревательные стержни (в большинстве случаев, но не всегда неметаллические);

в) непосредственно нагреваемые ванны.

Конструктивные формы выполнения нагревательных элементов при изложении настоящих разделов предлагаются известными. Они описаны в настоящей книге на стр. 163—179.

¹ В тех случаях, когда есть полная уверенность, что напряжение не понизится ниже номинального, можно обойтись избытком в 20—25%.

² О расчете утопленных нагревательных элементов, применяемых иногда при постройке печей, см. Бельри (Ж 15).

в) Определение размеров нагревательных элементов

а) *Металлические нагревательные элементы, аа). Расчет напряженности поверхности элементов.* Теплота должна переходить с элементов на изделие. Поэтому элементы всегда будут иметь более высокую

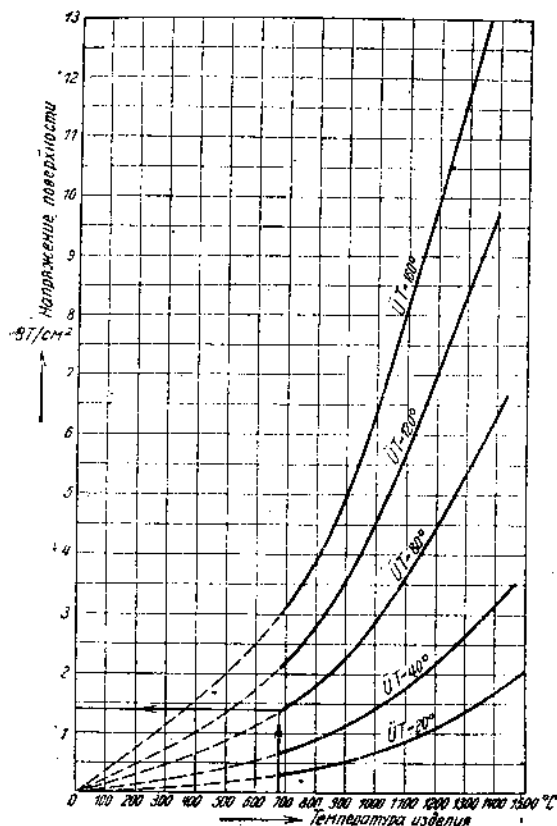


Рис. 37. Напряженность поверхности, температура изделия и превышение температуры (ΔT) нагреваемого элемента над температурой изделия (по Станцелю).

температуру, которую надо предусматривать уже при расчете времени нагрева. Станцель (Ж 16) пытался рассчитать превышение температуры элемента над температурой изделия на основе условий теплопередачи, которая должна зависеть, как это видно сразу, от плотности энергии или, что одно и то же, от напряженности поверхности $\left(\frac{\text{энергия}}{\text{поверхность}} \right)$ элемента. Хотя примененная Станцелем формула конвекции и не вполне надежна и величины, в нее входящие, без сомнения, зависят от способа заделки элементов; однако, учитывая важность вообще какого-нибудь решения этой задачи, мы все же приводим результаты расчетов Станцеля. При этом на оси абсцисс откладывается не температура элементов, как у Станцеля, а температура изделий. На диаграмме 37 изображена зависимость между напряженностью поверхности элементов, температурой изделий и превышением температуры элементов над температурой изделий.

Полученные значения требуют некоторой поправки, учитывающей уменьшение теплоотдачи, вследствие близкого расположения элементов или их частей друг к другу. Такие поправочные коэффициенты изображены на рис. 38 (также по Станцелю). Для того чтобы получить правильную напряженность поверхности нагревающих эле-

ментов, которую надо предусматривать уже при расчете времени нагрева. Станцель (Ж 16) пытался рассчитать превышение температуры элемента над температурой изделия на основе условий теплопередачи, которая должна зависеть, как это видно сразу, от плотности энергии или, что одно и то же, от напряженности поверхности $\left(\frac{\text{энергия}}{\text{поверхность}} \right)$ эле-

мента. Хотя примененная Станцелем формула конвекции и не вполне надежна и величины, в нее входящие, без сомнения, зависят от способа заделки элементов; однако, учитывая важность вообще какого-нибудь решения этой задачи, мы все же приводим результаты расчетов Станцеля. При этом на оси абсцисс откладывается не температура элементов, как у Станцеля, а температура изделий. На диа-

ментов, нужно значения, взятые из диаграммы 37, помножить на соответствующие коэффициенты из диаграммы фиг. 38, которая действительна и для петлеобразного (зигзаг) расположения; для спирали и рамки следует брать в расчет только расположенную снаружи элементов сторону, т. е. половину их поверхности. Величины, определяемые на основании диаграммы рис. 37 и 38, с пересчетом значений Станцеля (с принятых в Америке единиц измерений на метрические), вполне соответствуют данным немецкой практики. Однако следует отметить, что эти рисунки не позволяют судить о допустимой напряженности и сроке службы нагревающих элементов, и дают только ориентировочные указания относительно возможного превышения температуры элементов над температурой изделий.

Учитывая прочность элементов, ни в коем случае не рекомендуется допускать напряженности поверхности нагрева элементов выше следующих значений:

Температура °C	вт/см ²
600	3
750	2
900	1,4
1000	0,9
1100	0,7
1150	0,4

Однако, если представляется какая-нибудь возможность, следует допускать напряженность поверхности элементов около 0,8 названных величин. Правильное значение напряженности поверхности, вполне естественно, зависит очень сильно также и от способа заделки элементов. Приведенные значения предполагают, что нагревательные элементы могут свободно излучать тепло.

а) *Определение размеров нагревательных элементов (номограмма).* Известно, что:

$$N = \frac{U^2}{R \cdot 10^3}; R = \frac{\rho \cdot l}{q}; \gamma = \frac{N \cdot 10^3}{O}; O = u \cdot l \cdot 10;$$

$$G = \gamma \cdot q \cdot l \cdot 10^{-3}.$$

¹ В данном случае, в противоположность рис. 37, необходимо вводить в расчет полную поверхность и для спирали и рамки.

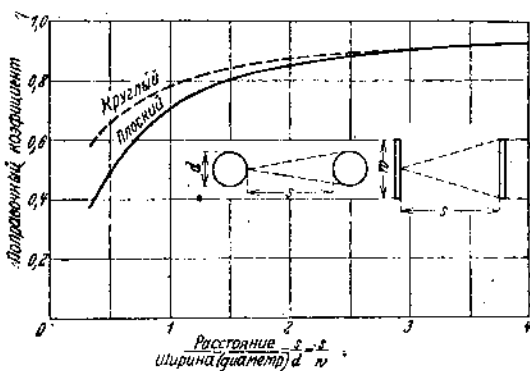


Рис. 38. Поправочные коэффициенты напряжения поверхности (по Станцелю, Ж 16).

Отсюда следует:

$$q \cdot u = \frac{10^5 N^2 \rho}{U^2 \gamma}, \quad (23)$$

$$G = \gamma \cdot q \cdot \frac{N}{\gamma \cdot u} \cdot 10^{-1} \quad (24)$$

$$l = 10^2 \frac{N}{\gamma \cdot u}. \quad (25)$$

Для сопротивления круглого сечения имеем:

$$u = \pi d \quad \text{и} \quad q = \frac{d^2 \pi}{4}.$$

В таком случае уравнения (23)—(25) примут вид

$$d = \sqrt[3]{\frac{10^5 N^2 \rho \cdot 4}{U^2 \cdot \gamma \cdot \pi^2}} \quad (23a)$$

$$G = \gamma \cdot \frac{N}{4 \gamma} \cdot d \cdot 10^{-1} = \frac{\gamma}{4 \gamma} \cdot \frac{N}{10} \sqrt[3]{\frac{10^5 N^2 \rho \cdot 4}{U^3 \cdot \gamma \cdot \pi^2}}, \quad (24a)$$

$$l = 10^2 \frac{N}{\gamma d \pi} = \frac{10^2 N}{\gamma \pi} \sqrt[3]{\frac{U^3 \cdot \gamma \cdot \pi^2}{10^5 \cdot N^2 \rho \cdot 4}} = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot N \cdot U^2}{\gamma^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot 4}}. \quad (25a)$$

Для элементов прямоугольного сечения:

$$u = 2a (1 + \varepsilon) \quad \text{и} \quad q = a^2 \varepsilon$$

и уравнения (23)—(25) примут вид

$$a = \sqrt[3]{\frac{10^5 \cdot N^2 \cdot \rho}{U^2 \cdot \gamma \cdot 2 \varepsilon (1 + \varepsilon)}}, \quad (23b)$$

$$G = \frac{\gamma \cdot \varepsilon N}{2 \gamma (1 + \varepsilon)} \sqrt[3]{\frac{10^5 N^2 \rho}{U^2 \gamma \cdot 2 \varepsilon (1 + \varepsilon)}} \cdot \frac{1}{10}, \quad (24b)$$

$$l = 10^2 \frac{N}{2 a \gamma (1 + \varepsilon)} = \sqrt[3]{\frac{10 N U^2 \varepsilon}{\rho \cdot 4 \cdot \gamma^2 (1 + \varepsilon)^2}}. \quad (25b)$$

Из этих уравнений вытекает следующее:¹

1. Длина, диаметр (при круглом сечении) или длина сторон (при прямоугольном сечении и принятом отношении длины сторон сечения) и вес нагревательного элемента вполне определяются мощностью, напряжением тока, напряженностью поверхности нагрева (т. е. плотностью энергии) и удельным весом материала нагревательных элементов.

2. Отношение длины, сторон сечения (т. е. диаметров) и весов для круглого провода к соответствующим величинам для ленты определяется «отношением сторон». На рис. 39 эти значения изображены в виде функции отношения сторон сечения ленты.

¹ Так же и у Стассине (Ж 17).

3. Приходящийся на единицу мощности вес нагревательных элементов пропорционален диаметру или длине стороны, в свою очередь зависящих от мощности.

Для трехфазного тока при включении звездой мощность группы понижается до $\frac{1}{3}$, а напряжение группы — до $\frac{1}{\sqrt{3}}$ значения однофазного тока той же мощности. В отношении длины сопротивления и веса его следует учесть, что для равной мощности трехфазного тока необходимы три группы. При включении звездой получаем

$$d_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} d_1 \quad (26a)$$

$$a_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} a_1 \quad (26b)$$

$$G_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} G_1 \quad (27)$$

$$l_{\Delta} = \frac{1}{\sqrt{3}} l_1 \quad (28)$$

Индекс „1“ обозначает, что эти значения относятся к соответствующим величинам при одной группе [(уравнения (23a) — (25a) и (23b) — (25b)].

Нагревательные элементы трехфазного тока, соединенные треугольником, само собою разумеется, должны относиться друг к другу, как три параллельно включенных группы элементов. Если мы включим 3 группы параллельно, то при равной общей мощности диаметр или длина стороны сечения понижается в отношении $\frac{1}{\sqrt{3}}$, потому что

на каждую ветвь приходится только $\frac{1}{3}$ мощности. Так как общая мощность остается одинаковой, то общий вес понижается, а общая длина увеличивается в том же отношении $\frac{1}{\sqrt{3}}$.

На диаграмме 40 приведены диаметры (или длины сторон) и вес, а также длины нагревательных элементов для различных схем включения.

Переходим к исследованию влияния отдельных факторов на d , a , l и G , основываясь на уравнениях (23) — (25), (23a) — (25a), (23b) — (25b).

Сначала замечаем на первый взгляд странное явление, заключающееся в том, что с увеличением удельного сопротивления ρ возрастает необходимый вес материала для нагревательных элементов.

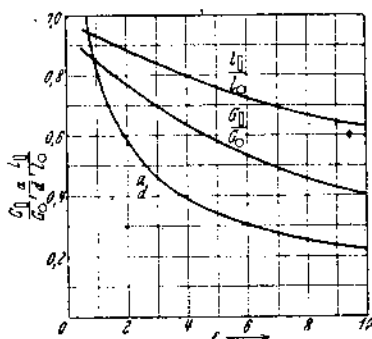


Рис. 39. Отношение длины ребер к диаметру, длине и весам прямоугольной и круглой проволоки в зависимости от отношения сторон сечения ленты.

Прежде всего это повысило бы требование на материал с возможно более низким удельным сопротивлением. Однако следует учесть, что необходимая длина нагревательных элементов одновременно также возрастает, вследствие чего затруднится помещение элемента в предназначенном для него месте. Таким образом, более высокое удельное сопротивление дает возможность уместить большую мощность в заданном объеме, но влечет за собою больший вес нагревательных элементов.

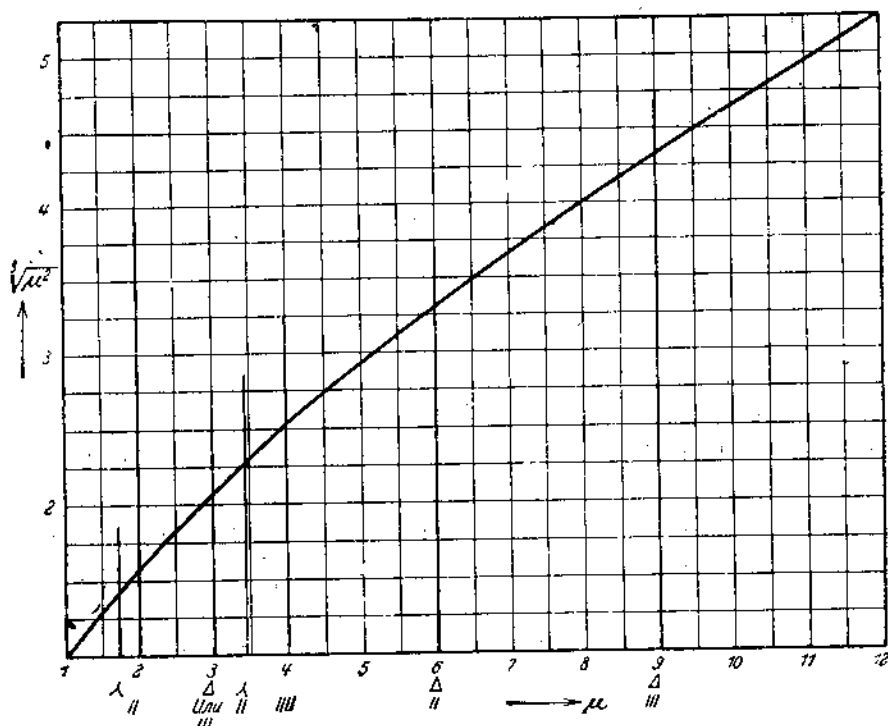


Рис. 40. Определение длины, диаметра (длины ребра), веса при нескольких (μ) параллельных ветвях по значению для одной ветви.

Диаметр и вес при одной ветви надо разделить на значение ординаты. Длину при одной ветви следует помножить на значение ординаты.

С увеличением напряжения поверхности нагревательного элемента γ уменьшается диаметр (длина стороны) в отношении корня третьей степени, вес в отношении степени $4/3$, а длина в соотношении степени $2/3$ и γ . Общий вес нагревательных элементов прямо пропорционален удельному весу γ ; на геометрические же размеры он влияния не оказывает.

С увеличением отношения сторон сечения ϵ , которое, в общем, из соображений прочности не следует брать более 10, понижается длина меньшей стороны a несколько более, чем в соотношении $2/3$.

длина элемента l уменьшается несколько более, чем в степени $1/3$, а вес несколько более чем в степени $4/3$.

С увеличением напряжения U уменьшается диаметр (длина сторон), а также вес в степени $2/3$, в той же степени увеличивается длина нагревательных элементов. Следовательно, более высокие напряжения U влекут за собою более толстые, а вследствие этого механически менее надежные сечения нагревательных элементов, особенно, как это будет видно из следующего раздела, при малых мощностях. Поэтому, при малых печах приходится иногда поднимать существующие напряжения при помощи трансформаторов; предел, с которого следует трансформировать, зависит от сечения, считаемого еще механически прочным. Рекомендуются придерживаться следующих минимальных размеров провода для нагревательных элементов.

			Диаметр не менее
Рамочные элементы	до	300°C	1,0 мм
» » »	свыше	300°C	2,0 мм
Спиральные элементы . .	до	600°C	2,0 мм
» » » . . .	»	1000°C	5—3,5 мм
» » » . . .	свыше	1000°C	7—6,0 мм
Ленточные элементы . . .	до	600°C толщиной	1,0 мм
» » »	»	800°C	2,0 мм
» » »	»	1000°C	3,0 мм

С увеличением мощности N увеличивается диаметр (длина стороны) в степени $2/3$, длина в степени $1/3$ и вес в степени $5/3$. Поэтому, из соображений экономии материала (а также для увеличения числа комбинаций включения) печи с большими номинальными мощностями снабжаются нагревательными элементами, разделенными на несколько групп. Ограничивающую роль в данном случае играет, во-первых, возможность размещения элементов и, во-вторых, толщина провода, о чем шла речь в предыдущем абзаце.

Ясно, что d , l , G и α можно легко рассчитать при помощи номограмм, а также указана область их применения.

Предельная мощность N одной группы — 150 квт, потому что при большей мощности слишком возрастут диаметр провода или напряжение до пределов, не встречаемых на практике. Если же в печи требуется большая мощность, то таковая должна быть разбита на несколько групп.

Напряжение U не повышается выше 500 в, с одной стороны, для того, чтобы не пострадал обслуживающий персонал при случайном прикосновении, а с другой, — потому что при напряжении свыше 500 в и высокой температуре огнеупорные материалы (например, шамот) не могут быть достаточно надежными изоляторами.

Удельное сопротивление применяемых материалов ρ (металлов) колеблется от 0,5 до 1,5 ом на м мм².

Напряженность поверхности нагревательных элементов представляет собой, в первую очередь, вопрос прочности, как об этом уже

говорилось. Ясно, что, чем тоньше материал сопротивления, тем ниже должна быть напряженность поверхности.¹ Опыт показывает, что с учетом допустимых предельных температур допустима максимальная нагрузка металлических нагревательных элементов до 3 Вт/см².

Номограмма относится к нагревательным элементам из ленты и из круглого провода. При пользовании ею исходят из мощности и напряженности поверхности и переходят таким образом к вспомогательной оси α_1 . Линия, соединяющая найденную таким образом точку с соответствующей точкой на линии напряжения, пересекает вторую вспомогательную ось α_2 . Соединение этой последней с соответствующей точкой на линии удельных сопротивлений дает в пересечении шкалы диаметров искомый диаметр провода. Эта последовательность отмечена порядковой нумерацией стрелок. Если же нужно определить размеры сторон нагревательного элемента из ленты, то сначала по номограмме 2 определяют диаметр круглого провода, который затем при помощи диаграммы 39 пересчитывается для выбранного заранее отношения сторон на этой диаграмме отложено по оси абсцисс, а по оси ординат — отношения $\frac{a}{d}$,

где a — длина меньшей стороны.

Найдя диаметр круглого провода, по номограмме легко находят длину и вес нагревательного элемента.

Для ленточного нагревательного элемента длину его находят также косвенным путем, определяя ее предварительно для круглого провода при тех же условиях. Соответствующий диаметр определяется соотношением длины сторон. Длину же ленточного нагревательного элемента находят на основании той же диаграммы 39 по длине элемента из круглого провода.

а) *Практическое применение.* Как уже указывалось, номограммы построены для мощности и напряжения одной группы. На основании результатов расчета номинальной мощности (см. раздел а) стр. 72) сразу видно, можно ли обойтись одной группой или же нужно несколько групп; попутно отметим, что, из соображений равномерной нагрузки сети, печи с номинальной мощностью свыше 10 кВт в большинстве случаев изготавливаются для трехфазного тока,² а поэтому, естественно, печь трехфазного тока должна иметь по меньшей мере три группы: по одной на фазу. Если нагревательные элементы должны быть включены звездой, нужно обратить внимание на то, чтобы в расчеты было введено не фазовое напряжение, а линейное.

Рекомендуется определять обмотку сначала для одной группы переменного и постоянного тока и для трех групп трехфазного тока. Если из соображений экономии материала (большее число параллель-

¹ Небольшие неизбежные колебания в толщине материала влекут за собой при тонком материале значительно большие относительные изменения сечения, чем в более толстом материале. Последние вызывают местные перегревы; сильно способствуют разрушению материала нагревательного элемента.

² В американской практике изготавливаются однофазные печи мощностью до 40 кВт

ных групп обуславливает меньший вес) или же из соображений техники включения и регулировки (см. следующий раздел) намечается большее число параллельных групп или включений звездой, то для пересчета можно пользоваться диаграммой 40. Лишь в тех случаях, когда получаемые диаметр и длина уже не укладываются в пределы номограмм, расчет сразу же производится на большее число групп.

Приведенные номограммы применимы в том случае, когда длина и диаметр рассчитаны по формулам (23a) — (25a) и (23b) — (25b). Как уже указывалось, из соображений прочности проволока или лента берутся не тоньше определенной величины. Однако это значит, что при выбранной напряженности поверхности элемента для данного напряжения тока и данной толщины проволоки или ленты нельзя превышать определенной мощности. Эти мощности получаются из уравнений (29)

$$N = U \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{d^3 \gamma}{\rho \cdot 10^5}} \quad (29a)$$

$$N = U \sqrt{\frac{\gamma \cdot a^3 \cdot 2\varepsilon (1 + \varepsilon)}{\rho \cdot 10^5}} \quad (29b)$$

Если нужно рассчитать обмотку для меньшей мощности, то, так как сечение определяется выбранной толщиной провода, длина получается из простой формулы сопротивления. Вместо того, чтобы пользоваться ею, можно исходить из диаметра и мощности в номограмме 2 и находить в качестве неизвестного напряженность поверхности элемента. По номограмме 3 для этой напряженности можно взять все остальные данные.

Таким же образом производится расчет, если найденный расчетом диаметр необходимо заменить каким-либо ближайшим из имеющихся в продаже диаметров.

После определения общей длины и сечения сопротивления нужно определить размеры отдельных нагревательных элементов; последнее зависит от их конструкции.

Ниже перечисляются важнейшие размеры некоторых конструкций нагревательных элементов с указанием, на что следует обращать внимание при установлении соответственного размера.

Рамочные нагревательные элементы

Длина рамки — обратить внимание на возможно лучшее использование соответственных размеров печи.

Ширина рамки — не выходить за пределы размеров, определяемых температурой и прочностью материала рамки.

Толщина выступов изолятора между витками — обратить внимание на путь утечки от витка к витку, хрупкость (возможность излома) при намотке и легкость изготовления.

Высота выступов изолятора, а также толщина самого изолятора — учесть легкость изготовления, обратить внимание на радиус закругления, допустимый для провода и ленты.

Расстояние до края — учесть возможность укрепления рамки на стенке печи, а на нагревательного элемента — на изоляторе.

Число витков — получается из длины рамки, расстояния до края и толщины выступов изолятора.

Длина нагревательного элемента на рамке обуславливается числом витков и размерами рамки.

Непременное расположение нагревательных элементов.

Расстояние между петлями — петли не должны соприкасаться, даже если они искривятся, прогнутся; учесть напряженность поверхности элементов (стр. 79—81).

Расстояние петли от стенки печи обусловлено конструкцией подвески.

Число витков обусловлено длиной стенки печи и расстоянием между петлями.

Длина нагревательных элементов на каждую стенку печи обусловлена числом витков, высотой стенки печи и расстоянием от петель до углов печи.

Спиральные элементы

Диаметр спирали (внутренний) выражается числом, кратным диаметру провода. Очень большой диаметр спирали (до 10-кратного диаметра провода) облегчает работу при намотке спирали; очень маленький диаметр спирали (4—5-кратный диаметр проволоки) более надежен в отношении провисания спирали при высоких температурах. В зависимости от возможности обрабатывать металл и высоты температуры рекомендуется в пределах вышерасположенных величин отношение диаметра спирали к диаметру проволоки принимать следующим:

при температурах выше 950°C	4—5-кратный диаметр провода,
» » от 750 до 950°C	5—7-кратный диаметр провода.
» » ниже 750°C	7—10-кратный диаметр провода.

Среднее расстояние между витками (шаг спирали) определяется расчетом (предполагаям напряженность поверхности), и его рекомендуется брать равным двойному диаметру спирали или несколько меньшим.

Длина оси спирали определяется размерами печи с учетом сохранения соответственных расстояний от стенок печи, перпендикулярных к оси спирали.

Длина провода на одну спираль определяется средним диаметром обмотки, длиной спирали и средним расстоянием между витками.

Расстояние между спиральями определяется внешним диаметром спирали и необходимой толщиной шамота между двумя спиральями.

Длина провода на единицу поверхности стенки печи определяется длиной провода на одну спираль и расстоянием между спиральями.

Мощность на единицу поверхности стенки печи определяется длиной провода на единицу поверхности печи, диаметром провода или периметром и напряженностью поверхности элементов.

Предполагая, что зазор между витками равен толщине проволоки, получаем:

Мощность [(спираль) (квт)] = длина оси спирали (мм) × средний радиус спирали (мм) × 10^{-4} × напряженность поверхности элемента (вт/см²).

Так, например, при радиусе спирали в 14 мм расстояние между спиральями в 60 мм и напряженности 1,3 вт/см² (что для небольших печей, работающих при 900°, представляет собой хорошее среднее значение), на 1 м² стенки печи придется поместить 20 спиралей длиной по 1 м, общей мощностью 36 квт; при радиусе спирали 20 мм, расстоянии между спиральями 100 мм и удельной нагрузке 1 вт/см² (хорошее среднее значение для печей большего размера, работающих при 900°), на 1 м² поверхности стенки печи надо установить 10 спиралей по 1 м длиной, а всего 20 квт.

В) Силикатные нагревательные элементы. Теоретически нагревательные элементы, конечно, должны рассчитываться так же, как металлические. Данные для этого расчета приводятся здесь не так полно, с одной стороны, потому что свойства этих материалов еще мало изучены, о чем подробнее будет сказано в разделе «Строительные материалы»; с другой стороны, выбирать размеры этих элементов нельзя так свободно, как размеры металлических, так как силикатные стержни изготавливаются вполне определенных, нормальных величин, на которые и надо ориентироваться.

Далее, расчет затрудняется еще тем обстоятельством, что силикат не имеет всегда одинакового постоянного удельного сопротивления; последнее колеблется в пределах от 100 до 8000.

В настоящее время употребляются силикатные нагревательные элементы исключительно в виде стержней круглого сечения. Для таких круглых стержней и построены номограмма для определения диаметра (рис. 41) и номограмма для определения длины (рис. 42) — обе в значительно меньшем масштабе, чем для металлических нагревательных элементов.

При температурах до 1000° расчет производится на напряженность поверхности в $30-35$ вт/см², для температур до 1300° — на напряженность $20-25$ вт/см², а для более высоких температур — $15-20$ вт/см². Номограмма применима для диаметров в пределах от 6 до 70 мм. Если нагревательные элементы вделаны в стенки печи (например, закрыты неметаллическими подовыми плитами), то напряженность поверхности стержней должна быть значительно снижена, до $0,3-0,5$ приведенных выше значений.

При расчете, с одной стороны, исходя из напряженности поверхности стержней и мощности, а, с другой стороны, нужно остановиться на стандартной нормальной величине диаметра стержня. В результате расчета получают величину удельного электросопротивления и проверяют, находится ли оно в тех пределах, в которых изготавливается избранный фабрикат. Если результат проверки оказывается благоприятным, то переходят к расчету общей длины стержней по номограмме, приведенной на рис. 42; если же удельное сопротивление, полученное расчетом, лежит вне вышеуказанных пределов, то диаметр должен быть установлен заново. Требуемая длина определяет количество $\left(\frac{\text{длина стержня}}{\text{ширина печи}} \right)$ стержней, а, так как полученное число

должно быть округлено до ближайшего целого (части стержня не могут изготавливаться), то слегка изменится напряженность поверхности по сравнению с принятым значением и потому она должна быть проверена в конце расчета.

В случае необходимости уложить большую мощность на малом пространстве, придется, в интересах равномерности температуры, снизить напряженность поверхности стержней. До какого предела можно увеличивать число стержней без опасения, что отдельные стержни, вследствие густоты расположения, будут взаимно нагреваться лучеиспусканием, еще не вполне выяснено. Фирма Сименс-Планни

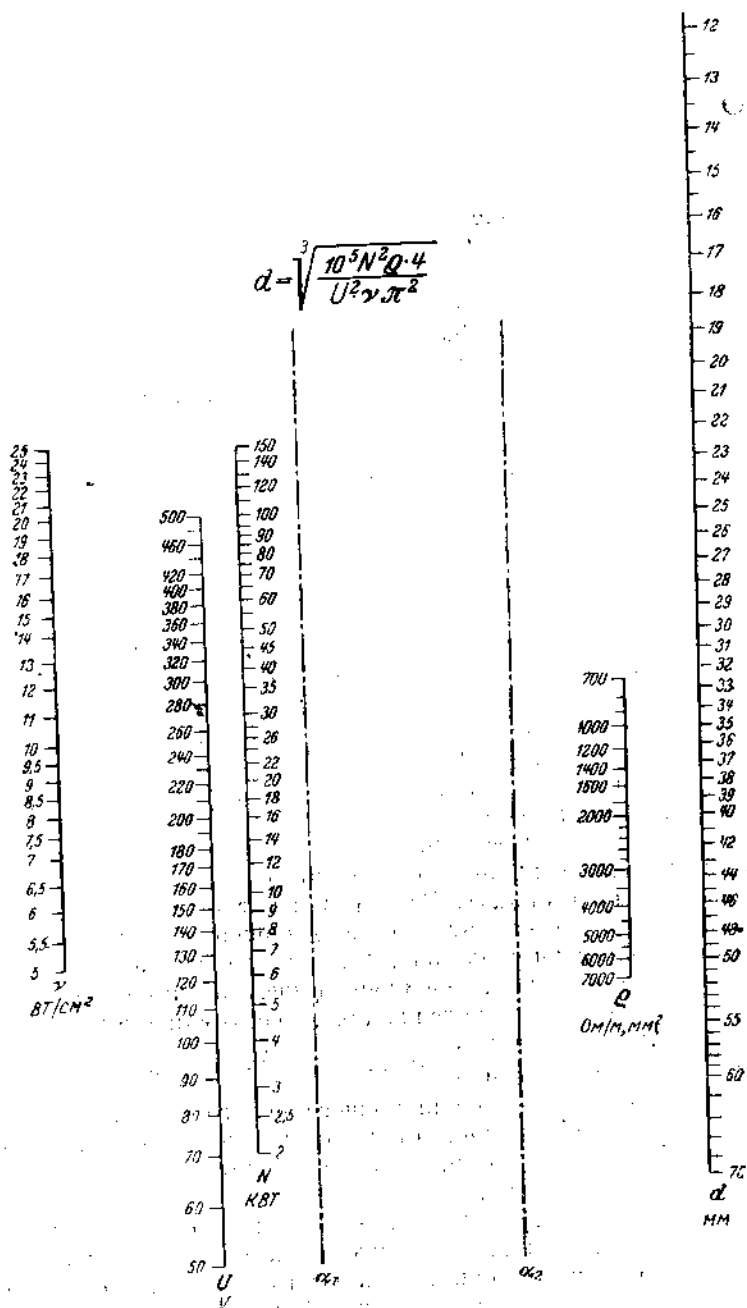


Рис. 41. Номограмма для расчета диаметра ослитовых стержней.
Способ пользования указан на номограмме 2 в приложениях.

рекомендует определять число стержней на основании следующего отношения, найденного чисто эмпирическим путем:

$$\frac{\text{поверхность всех стержней (см}^2\text{)}}{\text{объем печи (см}^3\text{)}} = \frac{1}{10}.$$

При расчете этого типа нагревательных элементов напряжение можно выбирать довольно свободно; так как стержни подвержены старению, то рекомендуется предусмотреть регулировку напряже-

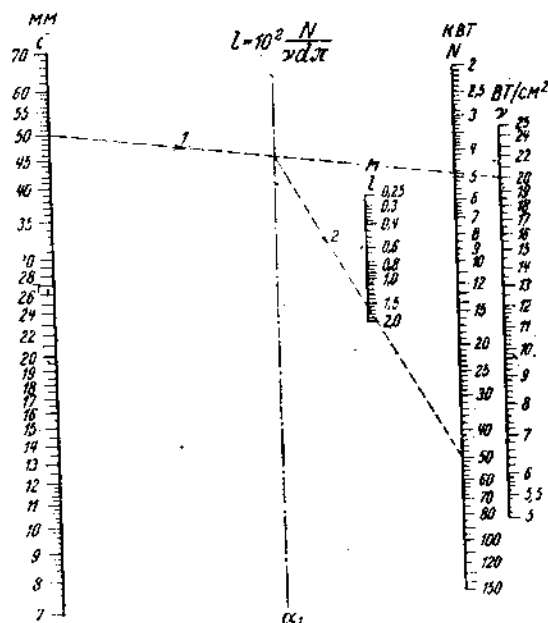


Рис. 42. Номограмма для расчета длины силовых стержней.
Пользоваться по указаниям на приложении 3.

ния, хотя бы применением регулировочных (ступенчатых) трансформаторов. По мере старения стержней напряжение постепенно повышается, так что мощность печи остается неизменной. Чем больше предел регулировки трансформатора, тем больше возможность использования стержней, конечно, при условии, что часть стержней не будет преждевременно механически разрушена. Можно рассчитать напряжение сети при помощи трансформатора, либо, наоборот, сначала пользоваться стержнями на пониженном при помощи трансформатора напряжении, которое постепенно увеличивать до напряжения сети. Наиболее благоприятен такой способ, когда стержни питаются напряжением сети как раз в середине срока своей службы. Само собою разумеется, что, вместо экономичной регулировки при помощи трансфор-

маторов, может быть применена и регулировка с помощью добавочных реостатов, причем в этом случае возможен только способ постепенного повышения напряжения. Регулировка напряжения при помощи реостатов чрезвычайно невыгодна: при старении на 30% (увеличение сопротивления) напряжение должно быть повышено на 30%. Поэтому потеря составляет те же 30%, так как стержни должны быть рассчитаны на пескостойко больший ток для того, чтобы печь работала на полную мощность и при пониженном напряжении, причем ток должен протекать также и по добавочному сопротивлению реостатов. Если предположить равномерное старение до 30%, то в реостатах в среднем поглощается до 15% подведенного количества энергии.

а) *Ванны*. В противоположность печам сопротивления косвенного нагрева, при которых необходимо определить размеры нагревательных элементов для заранее заданного напряжения сети, в печах прямого нагрева размеры нагревательного элемента, служащего одновременно полезным пространством, заранее заданы и нужно определить напряжение, потребное для получения необходимой мощности.

При этом, в случае применения трехфазного тока не совсем ясно, какой размер ванны следует брать как сечение и какой — как длину (в формуле сопротивления). Если мы примем ванну шестиугольного сечения (в плане), три электрода которой расположены симметрично на трех боковых поверхностях, то ток частично пойдет так, как будто бы сопротивление включено треугольником, а частично — к середине ванны по звезде.

Если глубину ванны обозначить через l , а среднюю длину пути тока через d , то сопротивление ванны будет равно:

$$R = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{d}{l \cdot d} = \frac{\rho}{l},$$

т. е. сопротивление не зависит от сечения шестиугольника ванны и обратно пропорционально глубине ванны.

После того, как установлено напряжение для определенной мощности, необходимо выбрать предел регулировки; обычно электродные ванны работают с очень низкими напряжениями от 10 до 30 в, и потому их приключают к сети через трансформатор; постоянный ток, вследствие опасности электролитического его действия, исключается. Так как до настоящего времени неизвестен достаточно устойчивый материал для длительного предохранения термопар от воздействия расплавленной соляной ванны, о которых, в первую очередь, идет речь, то такие печи не делаются с автоматической регулировкой температуры. Поэтому температура в этих печах регулируется путем изменения напряжения на трансформаторе, а поэтому необходимо определять предел напряжений в зависимости от изменения пропускной способности печи. При этом следует учесть, что удельное сопротивление расплавленных солей чрезвычайно сильно зависит от изменения температуры. Поэтому предел регулировки напряжения надо брать не слишком малым. Таким образом, некоторая неточность

приведенной формулы не имеет сколько-нибудь заметного практического значения.

Рекомендуется брать большее напряжение, в 4—6 раз выше минимального. Рассчитанное согласно изложенному выше нормальное рабочее напряжение должно находиться посредине предела регулировки.

Некоторое затруднение в расчете сопротивления соляных ванн возникает вследствие изменения сопротивления при погружении в ванну изделий; при этом уровень ванны повышается, а сопротивление ее падает. Часто изделия имеют меньшее удельное сопротивление, чем соль, в результате чего изделие с трудом нагревается до необходимой температуры. Были сделаны попытки избежать этого явления: для этого ванне придавалась такая форма, при которой изделие находилось вне путей тока.

Основы для расчета размеров электродов пока еще неизвестны. Большие поверхности электродов уменьшают переходное сопротивление между электродом и ванной, но, с другой стороны, увеличивают поверхность, подвергающуюся воздействию соли. Вполне понятно, что при равной поверхности более толстые электроды будут служить дольше, чем более тонкие. Однако до настоящего времени еще неизвестно, какую роль в этом обстоятельстве играет уменьшенное собственное сопротивление более толстых электродов. Нет также данных о сравнении износа электрода в плоских и глубоких ваннах, которые, конечно, не могут быть одинаковы, так как плотность тока не одинакова на различных глубинах ванны. На основании опыта электроды можно нагружать от 0,5 до 0,8 А/мм² сечения электрода.

Пример (продолжение со стр. 72). Рассчитать сопротивление печи, полезное тепло которой за 24 часа должно составлять 546 квтч. Потери в состоянии установившегося равновесия составляют 4,6 квт. Печь находится под током течение рабочей недели непрерывно. Продолжительность операции — 40 мин. Печь имеет размеры 1 × 1 = 1 м² полезной площади поди при 0,1 м полезной высоты.

Средний расход энергии за час составляет:

полезное тепло, включая мертвый вес,	$\frac{546}{24} = 22,75$ квт,
тепловые потери	= 4,6 »
Итого	27,35 квт.

Минимально-необходимая установленная мощность для того, чтобы гарантировать бесперебойную работу при 10% понижения напряжения, составляет:

$$\begin{aligned} 27,35 \\ 0,81 \end{aligned} = 33,7 \text{ квт.}$$

Для того, чтобы обеспечивать быстрое поднятие температуры после загрузки даже в том случае, если напряжение упало на 10%, установленная мощность принимается в 40 квт. В этом случае при нормальном напряжении регулятор начнет работать через очень непродолжительное время, и поэтому будет исключена возможность ступенчатого снижения мощности.

Допустим, что напряжение составляет 380 в. При определении сопротивления из номограммы мы находим из мощностей и напряжений одной группы: напряжение в 380 в; мощность — $40 : 3 = 13,3$ квт; напряженность поверхности нагревательных элементов по диаграмме 37, равна 1,4 в/см² (величина эта должна быть несколько уменьшена вследствие взаимного облучения нагретых прово-

тов, согласно данным рис. 38). Если зазор принять равным диаметру провода, то поправочный коэффициент будет равен 0,78, а удельная нагрузка составит 1,1 вт/см².

Часто можно получить значительно более высокие напряжения поверхности нагреваемых элементов (от 1,4 до 1,5 вт/см²)¹, однако в этом случае, без сомнения, на элементах получились бы более высокие температуры, чем это желательно в нашем примере. Как эти температуры передались бы поверхности изделий — представляет собой вопрос теплопередачи, и это обстоятельство следовательно зависит в значительной мере от правильности выбора коэффициента теплопередачи.

Рассчитаем сначала нагревательные элементы, как спирали. Из номограммы при удельном сопротивлении 1,3 для заданных основных величин получаем диаметр провода 3,89 (округленно 3,90) мм, а из номограммы 3 получается длина на фазу в 99 м.

Как видно, если бы стрелка 2 была проведена от 380 в, то она не пересекла бы ось α_2 . Для того, чтобы иметь возможность все же пользоваться номограммой, применен простой искусственный прием: было принято напряжение в 220 в и полученный таким образом диаметр (5,60) с помощью рис. 40 был пересчитан (220 в соответствует фазовому напряжению). Таким образом получаем 5,60 : 1,44 = 3,89.

Прежде чем определить вес, установим возможность помещения этого нагревательного элемента в печи.

Мы принимаем диаметр сердечника спирали равным 8-кратному диаметру провода, что составляет 31 мм; средний диаметр спирали равен диаметру сердечника плюс диаметр провода, т. е. 34,9 мм, длина витка $(34,9 \times \pi) = 109,5$ мм; необходимое число витков

$$\frac{3 \cdot 99}{0,1095} = 2710;$$

необходимая длина оси спирали при расстоянии между витками (зазор) 3,9 мм равняется 7,8 мм $\times 2710 = 21\,200$ мм = 21,2 м.

Размеры печи с предохранительными расстояниями составляют: основание 1,2 $\times$ $\times$ 1,3 м, высота — 0,3 м.

Глубина печи — 1,3 м — даст одновременно длину спирали. В соответствии с этим следует поместить всего 16,5 спиралей.

Так как нельзя применить полспирали, а число спиралей, вследствие присоединения к трехфазному току, должно быть кратно 3, принимаем 18 спиралей. Расстояние между витками, в соответствии с увеличенным числом спиралей, увеличивается в соотношении 18 : 16,5 и составляет таким образом $\frac{18}{16,5} \cdot 7,8 = 8,5$ мм; по той же причине

зазор между витками составляет 4,6 мм. Из 18 спиралей на каждой боковой стенке устанавливается по 2 спирали, у пода — 8, и у свода — 6. Неодинаковое распределение спиралей между подом и сводом объясняется, во-первых, естественным подъемом теплого воздуха, вследствие которого сверху образуются всегда несколько более высокие температуры; и, во-вторых, желанием достигнуть возможности размещать выводы от элементов с одной стороны печи (например, с задней стороны), что мыслимо только при парном расположении нагревательных элементов.

Вес нагревательных элементов точно также получается из номограммы 3 и составляет 28,5 кг (вес на фазу 9,5 кг; поэтому вес всей обмотки принят в 28,5 кг).

Можно было бы, вместо описанной только что обмотки, применить две цепи включенные параллельно, и получить согласно (рис. 40) путем деления диаметра и веса на 1,59 и умножением на ту же величину длины — новые значения этих величин: диаметр 2,45 мм, длина проволоки — 437 м (для всех трех фаз), вес — около 17,9 кг.

Преимущество этой обмотки представляет собой меньший вес (при существующих ценах экономия на 75—90 марок), и одновременно облегчение переключения; однако диаметр провода получается слишком малым.

Проверяем еще третью возможность: включение звездой по две группы параллельно. Такой вид обмотки в отношении веса, диаметра и длины должен быть промежуточным

¹ При определении напряжения поверхности мы брали полную поверхность проволоки, а не половину, как это принято по американскому способу расчета для спиралей, согласно стр. 75.

между описанными. Согласно рис. 40 для этой схемы включения вес, диаметр и длина определяются при помощи коэффициента 1,44 и составляют:

$$\begin{aligned}\text{диаметр } 2,45 \times 1,44 &= 3,53 \text{ мм.} \\ \text{длина проволоки } 478 : 1,44 &= 328 \text{ м,} \\ \text{вес } 17,9 \times 1,44 &= 25,8 \text{ кг.}\end{aligned}$$

Такой вид обмотки мы и выбираем. Разделение на отдельные спирали должно быть произведено соответственным образом, причем вследствие небольшой разницы между первоначально рассчитанным диаметром и окончательно выбранным, число спиралей не следует изменять.

Включение происходит в соответствии с рис. 54; можно было бы сделать переключение на 0,75 мощности автоматическим (стр. 117).

Нижне проводим краткий расчет обмотки для случая, когда нагревательные элементы изготовляются из ленты и располагаются в виде зигзага.

Сначала выбираем отношение сторон $\epsilon = 10$. Из рис. 39 для этого значения получаем следующие переводные коэффициенты: для меньшей стороны 0,23; для большей 62.

Это соответствует толщине ленты $0,23 \times 3,9 = 0,90$ мм. Так как толщину ленты не рекомендуется брать менее 1 мм, то необходимо или уменьшить ϵ или снизить напряженность нагрузки. Мы избираем последний путь вследствие вообще большей чувствительности ленточной обмотки по сравнению со спиральной; затем, так как зазоры согласно рис. 38, при ленточной обмотке станут меньше, чем при спиральной, это, в свою очередь, повлечет за собой изменения в величине напряжения поверхности. Принимая толщину ленты в 1 мм и в соответствии с этим определяем ее ширину, которая равна 10 мм. Дальнейший расчет происходит согласно стр. 81: мы находим напряжение поверхности элемента, соответствующее этому сечению, а затем соответствующую этому напря-

жению длину ленты. Соответствующий толщине ленты в 1 мм диаметр равен $\frac{1}{0,23} = 4,35$ мм.

Для этой величины и мощности в 13,3 кВт находим на номограмме 2, следуя за стрелкой по штриховому пунктиру, напряжение поверхности $v = 0,78$ вт/см². При этом оказалось возможным применить нормальное напряжение тока в 380 в, так что пересчет диаметра становится излишним. В соответствии с напряжением поверхности 0,78, на основании номограммы 3, получаем длину (для круглого провода диаметром 4,35 мм), равной 125 м/на фазу. Для ленты с соотношением сторон $\epsilon = 10$ длина оказывается $125 \times 0,63 = 78,8$ м.

По рис. 38 поправочный коэффициент равен $\frac{0,78}{1,4} = 0,555$; отношение $\frac{s}{w}$ со-

гласно этому, может быть равно 0,625 или $s = 6,25$ мм, т. е. ленты можно размещать на расстоянии 6,25 мм одна от другой.

Вес нагревающей обмотки получается равным $3 \times 15,1 = 45,3$ кг. для круглого провода 4,35 мм и для ленты $45,3 \times 0,41 = 18,6$ кг.

Отсюда видно, что меньшая напряженность, во-первых, влечет за собой повышение веса провода (45,3 кг против 28,6 кг), и что с другой стороны замена круглого провода лентой влечет за собой значительное уменьшение веса.

Поместить ленту длиной $3 \times 78,8 = 236,4$ м можно по следующим соображениям. Если свод, под и боковые стенки подлежат обогреванию, то по сторонам могут быть расположены зигзаги (петли) длиной по 0,2 м, а на своде и поде — длиной по 1 м. При одинаковом поперечном расстоянии между петлями чисто их определяется следующим образом:

$$\frac{236,4 \text{ м}}{(1,0 + 0,2) \cdot 2} = 90 \text{ петель.}$$

При длине печи в 1,3 м расстояние между петлями составляет 13,1 мм; эта величина больше вычисленного минимального расстояния в 6,25 мм, из чего видно, что обмотку можно поместить.

6. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ СЛУЧАИ

Обозначения. В этом разделе приняты следующие обозначения:

- C_{Σ} — коэффициент лучеиспускания черного тела (Кал./м², °С⁴);
- C_{σ} — вспомогательный коэффициент лучеиспускания (Кал./м², ч, °С⁴);
- C_f — коэффициент лучеиспускания стенки печи (Кал./м², ч, °С⁴);
- C_H — коэффициент лучеиспускания изделия (Кал./м², ч, °С⁴);
- F_H — излучающая поверхность печи (м²);
- F_I — излучающая поверхность изделия (м²);
- G — пропускная способность печи (кг/ч);
- L — количество воздуха (м³/ч);
- N — подведенная энергия (квт);
- $Q_{\Sigma 1}$ — потери холодного хода в пространстве предварительного нагрева (квт);
- $Q_{\Sigma 2}$ — потери холодного хода в нагревательном пространстве (квт);
- $Q_{\Sigma 3}$ — потери холодного хода в пространстве для охлаждения (квт);
- c — удельная теплота изделия (Кал./кг °С);
- c_a — удельная теплота воздуха (Кал./м³, °С);
- O — поверхность изделий в зоне, принимаемой в расчет для теплопередачи (м²);
- Θ — максимальная температура (°С);
- α — коэффициент теплопередачи (Кал./м², °С, ч).

Ниже рассмотрены два важных специальных случая расчета, которые, хотя и основаны на соображениях, изложенных в предыдущих разделах, однако требуют особого подхода. Такой особый подход будет необходим в очень многих практических случаях; однако мы полагаем, что на основании изложенных в книге общих положений расчета, для большинства специальных случаев соответствующий подход не представит затруднений.

а) Конвейерные печи

В конвейерных печах температура по всей ее длине обычно постоянна. В соответствии с этим то положение, на котором основывался расчет времени прогрева (стр. 18), отпадает. Более того, часто для различных зон такого рода печей при помощи нескольких регуляторов поддерживается различная температура. Однако и там, где в конвейерных печах применяется только один регулятор и где следовательно температура поддерживается одинаковой только в одном месте, она зависит от мощности и производительности; другими словами: для того, чтобы достигнуть определенного времени нагрева, необходимо распределить мощность по всей длине печи согласно известных законов. Расчет конвейерных печей должен удовлетворять одному из трех следующих требований:

1) возможно быстрый нагрев изделия, другими словами, попытка приблизиться к идеальным (практически недостижимым) условиям нагревания в камерной печи;

2) вполне определенные изменения температуры во времени;

3) регенерация тепла.

Эти требования связаны со следующими зависимостями:

а) часовая производительность $\times \frac{1}{\text{уд. вес}} = \text{часовой объем изделий}$;

б) часовой объем $\times \frac{1}{\text{толщина слоя}} = \frac{\text{полезная площадь}}{\text{время}}$;

По поводу зависимости (b) следует заметить, что очень часто (например, при печах для сушки лака или пшпек) отношение полезная площадь задается заранее.

$$c) \frac{\text{полезная площадь}}{\text{время}} \times \frac{1}{\text{число слоев на транспортной ленте}} = \frac{\text{площадь пода}}{\text{время}}$$

По поводу зависимости (с) заметим: при применении стеллажей и т. п. приспособлений при площади пода в 1 м² для *n* слоев, получаем *n* м² полезной площади.

$$d) \frac{\text{площадь пода}}{\text{время}} = \text{ширина пода} \times \text{скорость движения пода.}$$

$$e) \text{ скорость движения пода} \times \text{печное время}^1 = \text{длина пода.}$$

ж) *Способ расчета для удовлетворения требования г.* Расчет подводимой мощности (т. е. расчет нагревательных элементов), распределение температуры в изделии (т. е. расчет времени нагрева) и, строго рассуждая, следовательно также расчет потерь в конвейерной печи гораздо теснее связаны между собою, чем в камерной печи. Для удовлетворения требованиям возможно быстрого нагрева в каждом отдельном участке длины печи следовало бы преобразовать такое количество мощности в тепло, чтобы оно было достаточным для достижения изделием максимально допустимой температуры θ_0 немедленно же и чтобы эта температура поддерживалась постоянной. Это предельное требование не может быть выполнено, потому что как раз в первых участках длины печи подчитанная таким образом мощность в большинстве случаев не сможет быть принята.

До тех пор, пока нельзя рассчитывать изменение температуры в изделии, как функцию израсходованной мощности, необходимо подходить к расчету обходным путем: ориентировочно принять температуру первого участка печи, подсчитать для нее изменения в температуре изделия и проверить, можно ли поместить нагревательные элементы, полученные в результате расчета их на необходимую полезную теплоту и потери соответственного участка печи. Расчет изменения температуры в первом участке печи должен быть произведен по точкам по методу Крауза или Гребера (К 1, 2 и 3); температура в середине изделия к концу первого отрезка времени может быть рассчитана на основании рис. 4—10, так как значение *t* согласно условию

известно для характерной величины $\frac{at}{R^2}$.

В случае очень тонких изделий (например, при протяжных печах) придется отказаться от кропотливого расчета равномерности подъема температуры в изделиях, так как при применяемых

¹ Под печным временем подразумевается время пребывания изделия в печи, т. е. время нагрева + время выдержки в печи (для остывания и проч.).

скоростях протягивания может быть принято вполне совершенное выравнивание температуры внутри изделия (Юнкер, Ж 7). Данные о скорости протягивания можно найти, например, в справочнике «Гюте для металлургов» (Ж 11).

Однако, в связи с этим, вопросы теплопередачи для этих печей получают доминирующее значение. Производительность печи обуславливается только передаваемой мощностью, в свою очередь, зависящей от той температуры, которой могут достигнуть нагревающие элементы, а также и от коэффициента лучеиспускания изделий. После того как Юнкер опубликовал основы для этого расчета, Мертенс (Ж 18, 19) разработал графические пособия для расчета. На рис. 43 (по Мертенсу) показано передаваемое полезное тепло для максимальной температуры стенки печи в 1050° при различных температурах изделия и различных коэффициентах лучеиспускания. При этом не принята во внимание теплопередача конвекцией и разница в теплопроводности (что и допустимо, согласно упомянутой работе Юнкера, так как передача путем лучеиспускания достигает 91% общей теплопередачи —

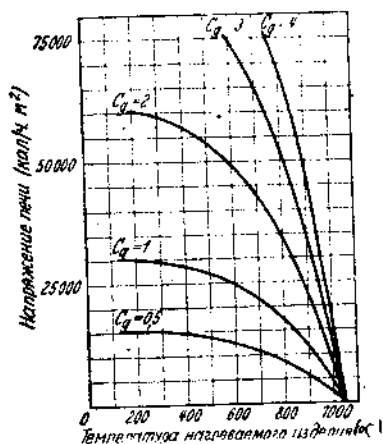


Рис. 43. Напряженность печи в кал/м² в час в зависимости от температуры накала и коэффициента излучения C_g . Напряжения относятся к внутренней поверхности муфеля (Мертенс, Ж 19).

для нагрева латуни при температуре около 600°). В уравнении (2) подставляются коэффициенты лучеиспускания C_I и C_{II} , а также заменяются поверхности путем применения вспомогательного коэффициента лучеиспускания C_g , который получается из формулы:

$$C_g = \frac{1}{\frac{1}{C_I} + \frac{F_I}{F_{II}} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_3} \right)} \quad (30)$$

Следует учесть, что при построении кривых в качестве излучающей поверхности была принята стенка печи. Фактическое напряжение поверхности нагревательных элементов должно остаться ниже значений этой диаграммы, потому что на 1 м² поверхности стены в большинстве случаев приходится меньше 1 м² поверхности нагрева сопротивлений. При более частом пользовании диаграммой 43 рекомендуется перечертить ее в соответствии с примененной конструкцией нагревательных элементов. Если на 1 м² поверхности стены поверхности нагревающих элементов, достигает допустим 0,6 м², то ординаты этого рисунка надо умножить на 0,6.

Из напряжений поверхности при известной толщине материала и скорости продвижения можно подсчитать длину печи (причем сле-

ует учесть потери холостого хода). Если на 1 м^2 можно поместить, допустим, 60 000 вт, а потери холостого хода составляют 2500 вт/м^2 , то для нагревания остается 57 500 вт.

Для массивных изделий и применяемых обычно скоростях прохождения через туннельную печь нельзя принимать равномерного распределения температуры по всему сечению изделия. В этом случае нужно проследить за изменением температуры во втором отрезке печи, начиная с конца первого отрезка, и повторить для него тот же расчет по способу Крауза и Гребера.

Если в конце последней зоны не достигнута требуемая равномерность температуры, то это значит, что длина печи взята слишком короткой и следует увеличить ее длину.

3) *Способ расчета для удовлетворения требования 2.* Этот способ в основном не отличается от описанного выше. Если намечено медленное повышение температуры, то затруднений с размещением требуемой нагревающей мощности не встретится. Если намечено медленное охлаждение, то в охлаждающей зоне придется поместить вспомогательные нагревательные элементы, которые могли бы покрыть разницу между теряемой данным участком печи теплотой и освобождаемой изделиями. Если требуется быстрое охлаждение, то необходим искусственный охладитель, причем вместо времени нагрева рассчитывается время охлаждения. Увеличить коэффициент теплопередачи можно путем применения более высоких скоростей охлаждающей среды (воздух или вода).

4) *Способ расчета для удовлетворения требования 3.* В печах для поточного производства рекуперация тепла осуществляется относительно просто. Это может быть достигнуто либо двумя потоками изделий в противоположных направлениях через печь, в которой отопляется только лишь средняя часть ее, либо при помощи только одного потока изделий, как в сушильных конвейерных печах, причём для рекуперации применяется воздух. При этом в первом случае по концам печи тепло передается от изделий, выходящих из печи, поступающим изделиям, так что последние входят в зону нагрева уже подогретыми. В сушильной конвейерной печи встречный поток воздуха выполняет функцию встречного потока изделий.

Нижеследующие выводы и замечания относятся к печам с воздушным противотоком; вполне понятно, что их можно применить соответственным образом ко всем печам с рекуперацией тепла.

В печах с воздушным противотоком нагревательными элементами снабжена только средняя часть (зона нагрева), а передняя и задняя часть печи не отапливаются. Схематическое распределение температуры изображено на рис. 44, из которого видно, что изделия поступают в зону нагрева уже подогретыми и выходят из зоны охлаждения с температурой значительно более низкой, чем рабочая температура печи. Часть тепла непрерывно циркулирует в печи от потока изделий *A* к воздушному потоку *B* и обратно к потоку изделий *A*. Это особенно ясно видно на диаграмме Санкея (рис. 45), изображающей тепловой баланс зоны нагрева.

Скобками отмечено общее количество тепла, поступающего в нагревательное пространство печи. Тепло поступает в него в виде возвращенного тепла из подогревательного пространства 1, возвращенного тепла из охлаждающего пространства 7, и в виде электрической энергии (прямоугольник слева от скобки). Тепло нагревающего пространства частично расходуется на покрытие потерь холостого хода 4, остаток отводится из него отчасти воздухом (А 1, 2, 3), отчасти изделиями (В 5, 6, 7). Из тепла, заключающегося в воздухе и изделиях, некоторая часть возвращается (1 и 7) обратно в нагревательное пространство. Некоторая часть (2 и 6) с воздухом и изделиями и остаток (3 и 5) служит для покрытия потерь через лучеиспускание в подогревательном и охлаждающем участке печи. 1 — тепло, возвращенное из подогревательного пространства; 2 — тепло, уносимое воздухом (потери!); 3 — потери в подогревательной части печи, 4 — потери в нагревательной части печи, 5 — потери в охлаждающей части печи; 6 — тепло, уносимое изделиями (потери!); 7 — тепло, возвращенное из охлаждающего пространства.

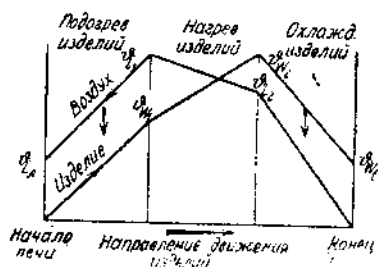


Рис. 44. Схема распределения температуры в печи с противотоком.

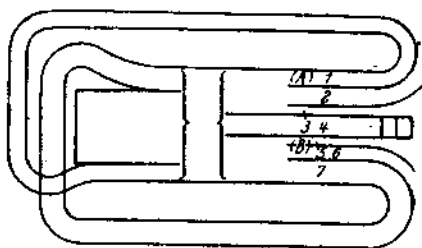


Рис. 45. Баланс тепла сушильной печи непрерывного действия, работающей по принципу противотока (Пашкин, Ж 71).

Ясно, что сумма теплосодержания изделий и воздуха в конце зоны нагрева может оказаться даже больше, чем подведенная энергия. Другими словами, это обозначает, что коэффициент полезного действия (отнесенный к максимальной температуре) получается больше единицы, что создает впечатление непригодности коэффициента полезного действия для характеристики экономичности печи.

Перейдем к расчету мощности. Количество работающего воздуха в большинстве случаев может быть выбрано произвольно. В сушильных печах известное минимальное количество воздуха требуется самим сушильным процессом. Однако это теоретическое количество воздуха обычно слишком мало, так что из соображений теплопередачи принимают несколько большее количество его, которое может быть выбрано до известной степени произвольно.

При определении количества воздуха необходимо также принимать во внимание безопасность эксплуатации, так как пары некоторых газов при смешении в определенном отношении с воздухом обра-

зуют взрывчатую смесь. Количество воздуха в этом случае должно быть настолько большим, чтобы была исключена возможность взрыва или, наоборот, оно должно быть настолько малым, чтобы взрыв не мог произойти вследствие недостатка кислорода. Первый путь более надежен, но он требует большого расхода тепла.

Если обозначить температуры по рис. 44, то, согласно обозначений, приведенных в начале настоящего раздела, получаются следующие 5 соотношений (около каждого уравнения написаны вновь появившиеся неизвестные).

$$(\theta - \theta_{L1}) c_p \cdot L = \theta_{W1} \cdot c \cdot G + Q_{v1} \quad (\theta_{L1}, L) \quad (31a)$$

$$\left(\frac{\theta_{L1} + \theta_{L2}}{2} - \frac{\theta_{W1}}{2} \right) \cdot O \cdot \alpha - \theta_{W1} \cdot c \cdot G + Q_{v1} \quad (\theta_{W1}) \quad (31b)$$

$$(\theta_{W2} - \theta_{WE}) c \cdot G = \theta_{L2} \cdot c_p \cdot L + Q_{v2} \quad (\theta_{WE}, \theta_{L2}) \quad (31c)$$

$$\left(\frac{\theta_{W2} + \theta_{WE}}{2} - \frac{\theta_{L2}}{2} \right) \cdot O \cdot \alpha - \theta_{L2} \cdot c_p \cdot L + Q_{v2} \quad (31d)$$

$$(\theta_{L1} - \theta_{L2}) c_p \cdot L + (\theta_{W2} - \theta_{W1}) c \cdot G + Q_{v2} = N. \quad (N) \quad (31e)$$

При составлении уравнений пришлось принять следующие упрощения:

1. $\theta_{L1} = \theta_{W2}$ равна максимально допустимой рабочей температуре, в дальнейшем обозначаемой через Θ .

2. Q_{v1} , Q_{v2} , Q_{v3} независимы от L , т. е. при расчете потерь мы пренебрегаем величиной α ; кроме того, не принимаются во внимание различия в потерях, возникающие вследствие изменения температур в зоне нагрева и в зоне охлаждения.

3. Не приняты во внимание различия температуры в разных точках изделий, т. е. предполагается, что изделие всегда прогрето вполне равномерно (предположение, вполне допустимое при тонком изделии, в сушильных печах для лакированной жести).

4. Теплоемкость считается постоянной, независимой от температуры.

5. Коэффициент теплопередачи принят независимым от количества воздуха (предпосылка, значительно влияющая на точность расчета). Вместо этого можно было бы во всех тех случаях, где в уравнениях встречается α , ввести, вместо этой постоянной величины, функцию количества воздуха (что определяет собою скорость воздуха), однако в этом случае получились бы еще более сложные уравнения.

Из рассмотренных уравнений (31) прежде всего следует, что $L = f(N)$, а их дифференцированием определяется количество воздуха, требующее минимального подвода мощности. В основу уравнений положено, что количество изделий в каждой из трех зон одинаково, т. е. что все эти зоны (предварительного подогрева, рабочая зона и зона охлаждения) одинаковой длины. В противном случае вместо O и G должны быть подставлены значения, соответствующие длине каждой зоны. Другими словами, в расчет надо было бы ввести продолжительность обработки изделий в каждой зоне.

Для наиболее простого случая (одинаковой длины всех трех зон) получается:

$$L = \frac{1}{c_p(2K_1 + K_2)} \sqrt{\frac{K_1 K_2}{\Theta} \left[4K_1 K_2 \Theta - 2K_1(2Q_{v1} + Q_{v3}) = K_2(Q_{v1} + Q_{v3}) \right]} - \frac{K_1 K_2}{c_p(2K_1 + K_2)} \quad (32)$$

В этом уравнении для сокращения написано $c = G = K_1$, $0\alpha = K_2$.

Из сказанного видно, что количество воздуха, количество изделий и мощность связаны между собою самым тесным образом. Чтобы достигнуть минимально возможного расхода тепла, следовало бы при эксплуатации печи приспособлять количество воздуха ко всем изменениям пропускной способности печи. Практика подтверждает это

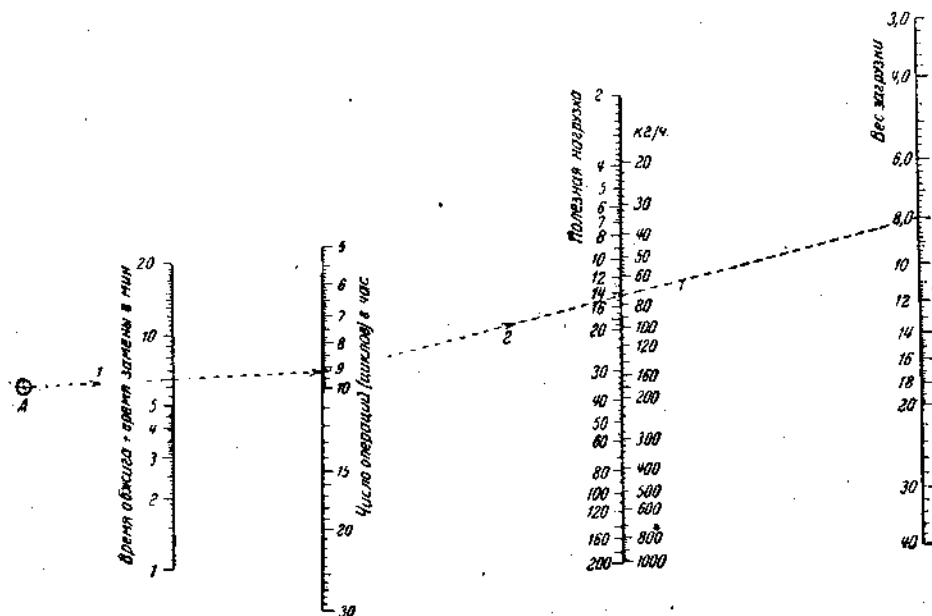


Рис. 46. Номограмма для определения полезного тепла в эмалировочных печах при 900°.

положение: конвейерная печь шла на холостом ходу с полной своей номинальной мощностью, однако с количеством воздуха, рассчитанным для большой пропускной способности, причем воздух не охлаждался до требуемой температуры. Когда же печь стала работать с нормальной производительностью, она стала работать безукоризненно. Температура выходящего воздуха была значительно ниже, чем при испытании вхолостую, и изделия сушились надлежащим образом.

При проектировании печи рекомендуется не только рассчитывать количество воздуха для минимума мощности, но и строить кривую

зависимости мощности от количества воздуха. Если получается плоский минимум, то количество воздуха рекомендуется принимать меньшим, чем это соответствует минимуму мощности.

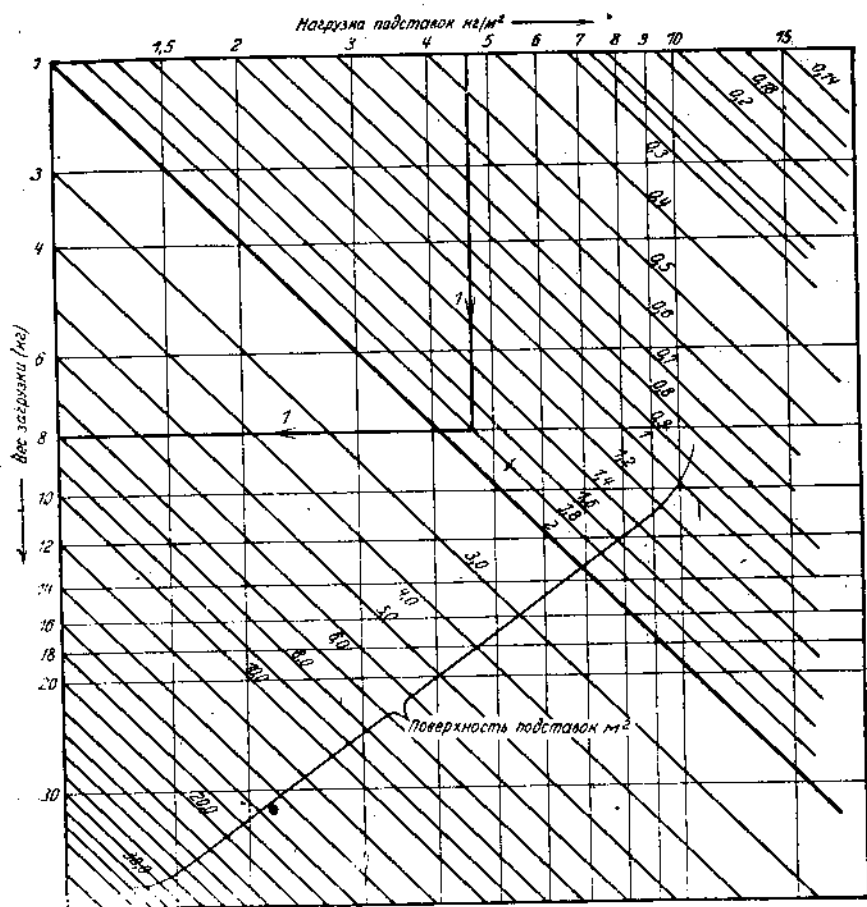


Рис. 47. Определение величины (веса) загрузки по удельной нагрузке подставок и их поверхности (логарифмические шкалы).

Затем следует выбор вентилятора. Так как вентилятор по необходимости располагается на одном конце печного канала, то ему придется подавать значительно больше воздуха, чем должно проходить через печь. Абсолютная величина общего количества воздуха теоретически может быть подсчитана из сопротивлений движению воздуха; практически же расчет не дает нужных результатов. Для определения количества воздуха рекомендуется привлечь опытного специалиста по вентиляторам, чтобы учесть регулировку количества воздуха.

б) Эмалировочные печи

При обжиге эмали изделия помещаются на весьма короткое время (2—5 минут) в печь и охлаждаются на открытом воздухе. Очень тяжелые и большие предметы, как, например, купальные ванны, обжигаются несколько дольше: от 10 до 20 минут; очень малые предметы можно обжигать еще более короткое время. Для ускорения работы и для того, чтобы не повредить эмаль при загрузке, изделие устанавливается в холодном состоянии на особую подставку, и совместно с нею вводится в печь. Несмотря на всевозможные улучшения материала этих подставок с целью уменьшения их веса, последний все же часто оказывается значительно больше веса изделий, вводимых на них в печь.

Обычно работают с одной или двумя подставками, которые нагреваются совместно с изделиями и с ними же вынимаются из печи. При

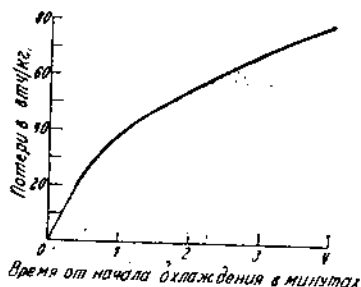


Рис. 48. Тепловые потери трехгранного колосника с длиной ребра 6,5 мм при охлаждении от 900° на воздухе

работе с двумя подставками они загружаются поочередно. Время, проводимое подставками вне печи, в большинстве случаев недостаточно для полного их охлаждения. Следовательно, в расчет полезного тепла можно не вводить полный вес подставок.

Таким образом, при расчете эмалировочной печи особую задачу представляет определение полезного тепла с учетом загрузки материалом, заключающим в себе значительную часть тепла, и установление потерь, происходящих вследствие частого открытия дверцы.

Собственно полезное тепло (для нагревания эмалируемых изделий) определяется по тем простым формулам, которые приведены на стр. 41. Следует принять во внимание, что часто бываю заданы не часовая производительность в килограммах, а удельная нагрузка подставок (в килограммах на 1 м² поверхности подставок), и продолжительность обжига. По номограмме, приведенной на рис. 46, для часто применяемой при обжиге эмали температуры в 900° можно найти собственно полезную нагрузку в час в киловатт-часах, из продолжительности обжига, продолжительности замены деталей на подставке и величины удельной нагрузки. Так как часто удельная нагрузка подставок и их величина известны, то количество загружаемых изделий легко может быть определено из этих двух величин, для чего можно воспользоваться диаграммой, изображенной на рис. 47. Способ пользования этими диаграммами виден из приведенного на упомянутом рисунке примере.

Чтобы узнать теплосодержание подставок, следует сначала определить, какое количество тепла отдается единицей поверхности подставок на единицу времени. Для подставок с трехгранным сечением,

с длиной грани 6,5 мм на рис. 48 приведена соответствующая кривая (тепловые потери, отнесенные к весу). Эта кривая относится к жароустойчивому металлу и составлена по уравнениям Гребера

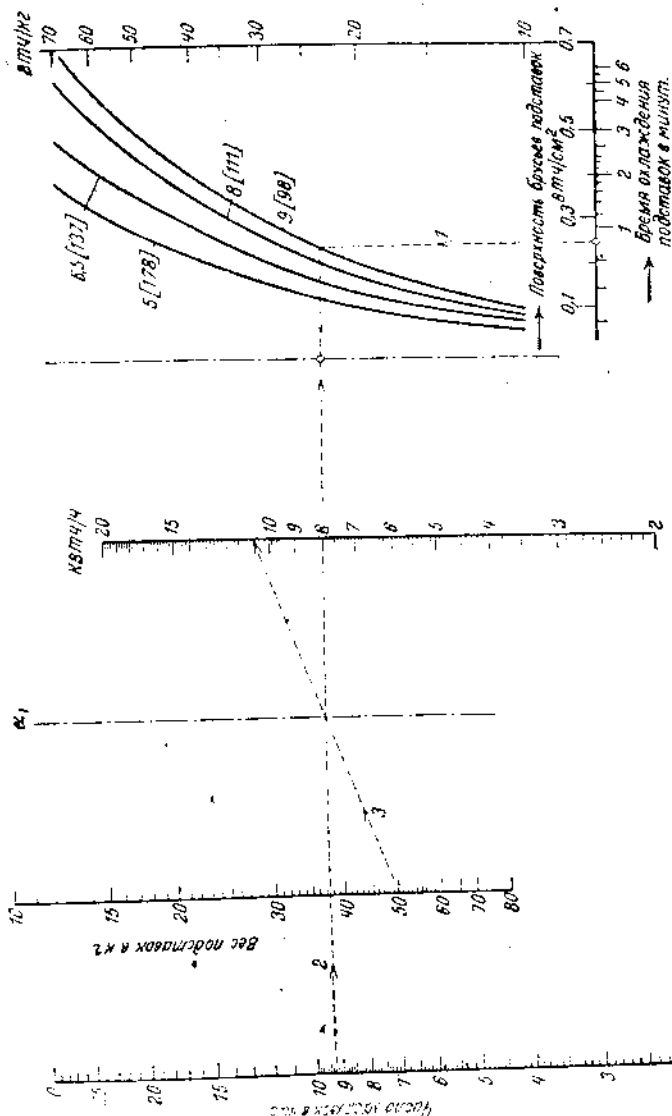


Рис. 49. Определение теплосодержания подставок в эмалированных песках при 900°. Числа на кривых вспомогательной диаграммы (справа) показывают длину стороны опорных брусков; треугольного сечения в мм; в скобках проставлены значения веса в граммах на метр длины бруска.

(К 2, 3); она проверена на опытах и вполне соответствует результатам практики, равно как и весь описанный здесь ход расчета. Соответствующие значения последней кривой занесены на вспомогательном построении номограммы рис. 49. Остальные кривые того же вспомо-

могательного построения относятся к другим размерам сечений подставок. Путем пользования остальными шкалами (вес подставок, число загрузок, т. е. операций, и вспомогательная ось) в порядке, указанном стрелкой, находят количество тепла, теряемое подставкой в киловатт-часах.

Наконец, надо определить также потери через дверцы. При этом время, в течение которого дверцы остаются открытыми, не всегда равно времени охлаждения подставок и, помимо способа работы, зависит также от внимательности обслуживания и от легкого хода дверцы. Потери через дверцу определяются на основании формулы для лучеиспускания (2) в предположении, что вся площадь окна излучает при рабочей температуре печи.

II. ВКЛЮЧЕНИЕ И РЕГУЛИРОВКА

Выше указывалось, что установленная мощность печи должна быть всегда больше, чем средний расход мощности. При нагреве в горячей печи холодных изделий либо при разогреве холодной печи сперва включается полная мощность; по достижении же необходимой температуры печи средняя мощность должна быть снижена, если температура дальше не должна повышаться.

Среднюю мощность можно уменьшить, или уменьшая продолжительность включений при постоянном расходе тока, либо уменьшив самый расход тока.

Первый способ регулировки осуществляется путем включения или выключения всех нагревающих элементов.

Расход тока можно изменять скачками или плавно; при одинаковом напряжении печи можно изменять схему включения нагревательных элементов или можно изменять напряжение, не касаясь схемы включения элементов, или, наконец, применять оба способа одновременно.

Все описанные способы регулировки могут производиться от руки или автоматически.

Прежде всего мы займемся способами уменьшения расхода мощности, а затем выясним вопрос о точности регулировки.

1. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

а) Изменение продолжительности включения

По достижении печью определенного уровня температуры (θ_{c1} , рис. 50) она выключается; температура начинает падать; по достижении температуры θ_{c2} печь снова включается и т. д. При этом средняя мощность падает по кривой, подобной α , которую можно получить, отсчитывая расход тока печью по счетчику. Вместо того, чтобы переключать в зависимости от температуры, можно переключать в зависимости только от времени. В этом случае относительное время включения должно соответствовать расходу мощности.

б) Изменение расхода тока

Скачкообразное уменьшение расхода энергии N может быть достигнуто путем переключения нагревающих элементов или подведением к печи более низкого напряжения. Если применяются только

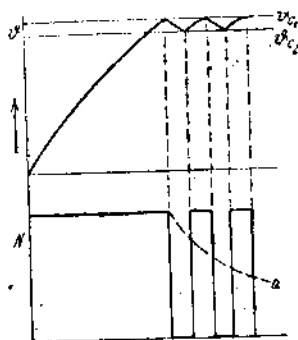


Рис. 50. Изменение температуры и мощности при изменении продолжительности включения.

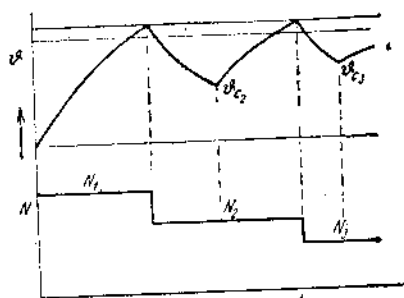


Рис. 51. Колебания температуры и мощности при изменении количества забираемой энергии.

эти мероприятия, т. е. если работу ведут без переключения на повышенное напряжение через короткое время, то температура изменяется согласно кривой, показанной на рис. 51. Из рисунка видно, что после каждого уменьшения мощности температура понижается настолько, насколько это необходимо для достижения теплового равновесия, причем в зависимости от рода и величины загрузки тепло может переходить от изделия к стенке печи. Чем меньше разница между N_1 и N_2 или между N_2 и N_3 и т. д., тем меньше становится разность между температурами θ_{c1} и θ_{c2} , или между θ_{c2} и θ_{c3} т. д.; тем больше требуется, однако, ступеней переключения. Если постепенно уменьшать разность $N_1 - N_2$, $N_2 - N_3$ и т. д., то, в конце концов, приходят к непрерывному уменьшению расхода энергии (см. ниже стр. 106).

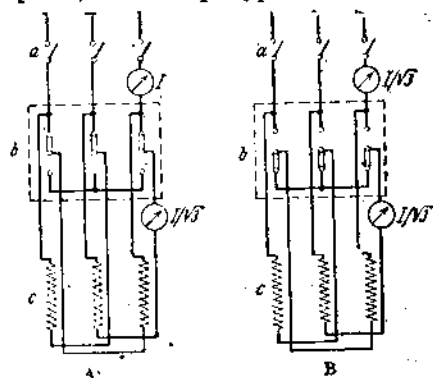


Рис. 52. Переключение нагревательных элементов.

А — положение при включении треугольником; В — положение при включении звездой; а — трехполюсный главный выключатель (для 1 амп); б — трехполюсный переключатель со звезды на треугольник на $1/\sqrt{3}$ амп; с — нагревательные элементы.

а) Изменение расхода тока путем выключения или переключения нагревательных элементов. Постепенная регулировка путем переключения нагрева-

тельных элементов может затрагивать либо все элементы в одинаковой степени, либо только некоторую их часть; в последнем случае должны быть предприняты меры, гарантирующие требуемое распределение температуры в печи как до, так и после переключения.

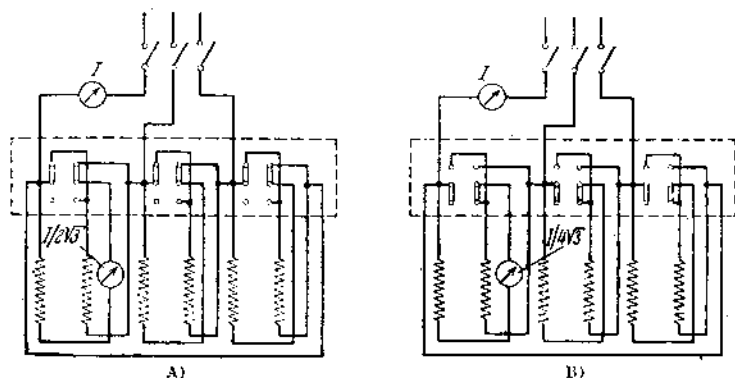


Рис. 53. Переключение нагревательных элементов.

А — параллельное включение; В — последовательное включение.
а — трехполюсный главный выключатель (на I амп); б — двухполюсные переключатели для каждой фазы (на $\frac{I}{4\sqrt{3}}$ амп.); с — нагревательные элементы.

Основные формы переключения при неизменном относительном распределении энергии следующие: переключение со звезды на треугольник и последовательно-параллельное переключение при трехфазном токе; при постоянном или однофазном токе возможно только последовательно-параллельное переключение; в соединении треугольником нагревательные элементы, как известно, поглощают в три раза больше энергии, чем при включении звездой; при параллельном включении двух одинаковых ветвей обе вместе забирают в четыре раза больше энергии, чем при последовательном включении их. Следует отметить, что соответственные переключатели (трехполюсный переключатель со звезды на треугольник и двухполюсный переключатель для последовательно-параллельного переключения на каждый провод или фазу) могут быть рассчитаны на меньший ток, чем полный ток печи, как это видно из рис. 52 и 53. Ступенчатое снижение мощности в отношении 1 : 3 или 1 : 4 относительно грубо; для того, чтобы получить более плавные ступени, можно принять включение соответственно рис. 54; сопротивление рассчитано таким образом, что при включении звездой двумя параллельными группами забирается 100% мощности. Тогда получаются следующие ступени мощности:

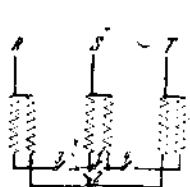


Рис. 54. Включение двойной звезды.

|| обозначает две группы, включенные параллельно, ; две группы, включенные последовательно, | включена только одна группа.

- Λ 100%; рубильники 1, 2, 3, 4, включены;
 Δ 75%; выключены рубильники 1, 2;
 Λ 50%; » » 1, 3, 4;
 Λ 25%; » »

Первые три ступени можно выполнить при помощи четырех однополюсных рубильников, как это показано на рис. 54. Для 4-го включения нужно большее количество рубильников. Если при последовательно-параллельном переключении остановиться на двух группах нагревательных элементов для различной силы тока (сопротивление R_I и R_{II}), то можно достигнуть изменения мощности и иными ступенями, изображенными на рис. 55. Однако следует принять во внимание, что при последовательном включении отношение количества энергии, преобразованной в обеих нагревательных группах, отлично от такового при параллельном включении. Достижимое уменьшение мощности зависит от отношения сопротивлений нагревательных элементов обеих групп. Это отношение нанесено на рис. 55 по оси абсцисс, причем под R_{II} подразумевается меньшее сопротивление, так что отношение R_{II} к R_I всегда представляет собой правильную дробь.

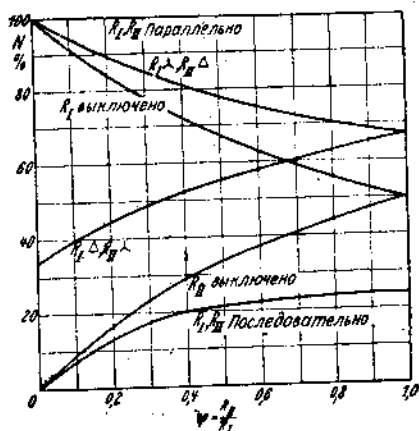


Рис. 55. Уменьшение общей установленной мощности при различных сопротивлениях двух параллельных групп.

$$\left(\frac{R_{II}}{R_I} = \psi \leq 1 \right).$$

По оси ординат нанесена мощность в процентах при параллельном включении для различных схем. Если обозначить полную мощность через N_a , а уменьшенную мощность через N_b , то получаем:

$$\begin{aligned}
 \frac{N_b}{N_a} &= \frac{\psi}{\psi + 1}, \text{ когда выключается } R_{II}; \\
 \frac{N_b}{N_a} &= \frac{1}{\psi + 1}, \text{ когда выключается } R_I; \\
 \frac{N_b}{N_a} &= \frac{\psi}{(\psi + 1)^2}, \text{ когда } R_I \text{ и } R_{II} \text{ включены последовательно}; \\
 \frac{N_b}{N_a} &= \frac{3\psi + 1}{3\psi + 3}, \text{ когда } R_I \text{ включено треугольником, а } R_{II} \text{ пере-} \\
 &\quad \text{ключается звездой}; \\
 \frac{N_b}{N_a} &= \frac{\psi + 3}{3\psi + 3}, \text{ когда } R_I \text{ включено звездой, а } R_{II} \text{ включено} \\
 &\quad \text{треугольником.}
 \end{aligned} \quad (33)$$

Эти уравнения и положены в основу рис. 55. Возможные переключения после их выполнения влекут за собою другое распределение тепла в печи, чем в исходном положении. То же самое относится к схеме включения, изображенной на рис. 56, позволяющей переключение на 66, 50 и 33% начальной мощности, причем при включении на меньшую мощность часть нагревательных элементов выключается.

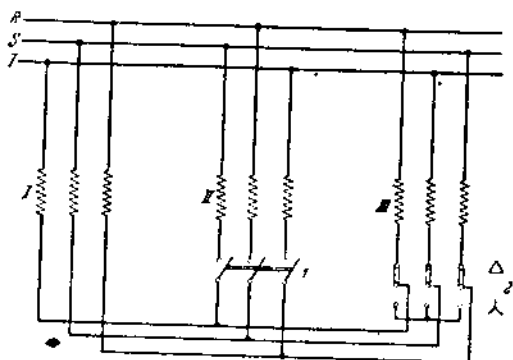


Рис. 56. Схема соединений для регулировки мощности.

Положение	Рубильник 1	Рубильник 2	Мощность %	Нагрузка нагрев. элем. %
	выключен		100	100
B	»		66,6	100
C	выключен		50	75
D	»		33,3	100

Выбор схемы включения (рис. 52—54, 56) частично основан на подходящей силе тока для включающей аппаратуры. Электрическое распределение энергии на три фазы во всех описанных до сих пор схемах остается еще равномерным.



Рис. 57. Переключение со 100 на 50% мощности.

Если же отказаться от равномерного распределения электрической нагрузки на все три фазы, то путем отключения одной лишь фазы можно уменьшить мощность на 50% по отношению к начальной (рис. 57). Нагрузка фаз после переключения неравномерна. А — соединение звездой; В — соединение треугольником. а — включено 100%, а — выключено 50%. На-

пряженность поверхности нагревательных элементов перед переключением и после переключения написаны над и под чертой дроби при соответственных ветвях.

3) Изменение расхода тока путем регулировки напряжения. Для изменения напряжения применяются обычно автотрансформаторы, если только в распределительном устройстве не оказывается трансформаторов с секционированными обмотками, которые можно применить для регулировки. Ступени напряжения автотрансформатора можно выбирать относительно свободно, и при соответствующем подборе их значительно сокращается стоимость трансформатора (см. Папкис, Ж 20).

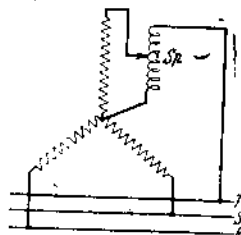


Рис. 58. Схема соединений для уменьшения мощностей (автотрансформатор в одной фазе). Соединение звездой.

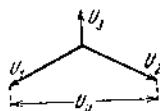


Рис. 58а. Векторная диаграмма к рис. 58.

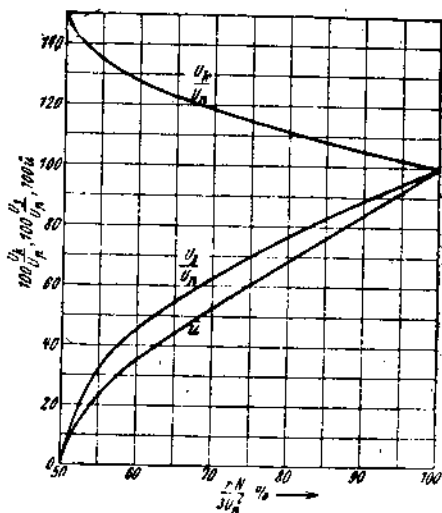


Рис. 59. Первичное и вторичное напряжения и передача для различных мощностей при соединении по схеме рис. 58.

На рис. 58 изображена схема соединения, позволяющая устанавливать любую мощность в пределах от половины до полной, если нагревающие элементы включены звездой. В зависимости от коэффициента трансформации однофазного автотрансформатора \$S_p\$ мощность в трех фазах будет изменяться.

Обозначим:

- U_p — фазовое напряжение равномерно нагруженной системы;
- U_D — линейное напряжение $\sqrt{3} U_p$;
- $U_1 = U_2$ — напряжение между включенными в звезду фазами R и S;
- U_3 — вторичное напряжение автотрансформатора (напряжение включенной в звезду фазы T);
- U_k — первичное напряжение автотрансформатора;
- a — передаточное отношение (коэффициент трансформатора) автотрансформатора;
- N_{ges} — полная мощность;
- R — сопротивление одной фазы.

В таком случае (ср. также векторную диаграмму рис. 58а).

$$U_3 = \operatorname{tg} \alpha \cdot U_p; \quad U_1 = U_2 = \frac{U_p}{2 \cos \alpha},$$

$$N_{ges} = \frac{1}{R} \left[(U_1)^2 + (U_2)^2 + (U_3)^2 \right] = \left[0,5 (U_p)^2 + 1,5 (U_3)^2 \right] \frac{1}{R},$$

$$\frac{R \cdot N_{ges}}{(U_p)^2} = 0,5 + 1,5 \frac{(U_3)^2}{(U_p)^2} = \frac{R \cdot N_{ges}}{3 \cdot (U_p)^2} = 0,5 + 0,5 \frac{(U_3)^2}{(U_p)^2}. \quad (34)$$

При этом следует отметить, что, когда U_3 повышается от 0 до U_p , то первичное напряжение на зажимах трансформатора U_k также изменяется, потому что сдвигается нулевая точка системы. Получаем следующие зависимости:

$$U_k = 1,5 U_p - U_1 \sin \alpha = 1,5 U_p - \frac{U_3}{2},$$

$$\frac{U_k}{U_p} = 1,5 - 0,5 \frac{U_3}{U_p}. \quad (34a)$$

Отсюда следует, что передаточное отношение получается:

$$\dot{y} = \frac{U_3}{U_k} = \frac{1}{1,5 \frac{U_p}{U_3} - 0,5}. \quad (34b)$$

На рис. 59 нанесены напряжение U_3 , первичное напряжение U_k и передаточное отношение $\dot{y}$ в виде функции отношения

$$\frac{\text{мощность с трансформатором}}{\text{полная мощность}}.$$

При пользовании всеми описанными схемами, в которых распределение энергии перед, переключением и после такового различно, грозит неодинаковое распределение температуры в обоих случаях. Для предотвращения этой опасности нагревательные элементы большой и малой мощности следует располагать в печи попеременно. Так, например, располагают поочередно спирали нагревательных групп I и II (рис. 55) или фаз T, R и S (рис. 58).

Плавной регулировки можно достигнуть при помощи вентильных трубок, напряжение на сетке которых изменяется в зависимости от температуры.

2. ТОЧНОСТЬ РЕГУЛИРОВКИ¹

а) Истинная и кажущаяся разность регулировки

Выше, на рис. 50 и 51, было сделано допущение, о котором мы умолчали, что процесс регулировки точно определяет наблюдаемую температуру. Если ввести в печь, которая включается и выключается при помощи секундомера через равномерные, одинаковые промежутки времени, несколько приборов для измерения температуры (допустим,

¹ Пашкев, Ж 21.

термоэлементы с различными арматурами), то при записи температуры во время отдельных рабочих периодов получится картина, изображенная на рис. 60.

Кривые получены (в порядке номеров их обозначений 1 — 3) на приборах с последовательно увеличивающейся степенью инертности. Очевидно, что продолжительность периода всегда остается постоянной, в то время как отклонение показаний от среднего и сдвиг фазы изменяются вместе с инертностью. Линия 4 показывает изменение забираемой мощности в процессе нагревания. Она поднимается сразу при включении до полной своей величины и падает до нуля немедленно после выключения.

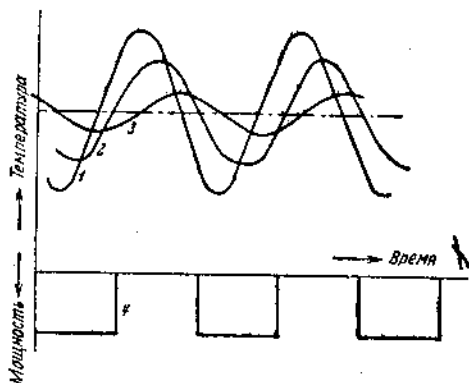


Рис. 60. Кривые температуры при равномерно регулируемом включении печи; кривые, получены при помощи приборов, обладающих различной инертностью.

Из рисунка мы видим, что число регулировочных периодов, отмеченное отдельными термоэлементами, одинаково, однако сдвиг фазы и уровень крайних значений различны для отдельных термоэлементов.

Из этого можно вывести заключение, что указание на точность регулировки или лучше — указания разности регулировки, как мы дальше будем называть разность между крайними значениями температуры во время одного регулировочного периода, недостаточно для того, чтобы характеризовать процесс регулировки. В зависимости от качества контрольного устройства т. е. пирометра¹ которым контролируется температура в данной точке рабочего пространства печи, получаются различные (кажущиеся) кривые регулировки. Чем более инертно воспринимает тепло пирометр, тем искаженнее получается кажущаяся кривая по сравнению с истинной кривой,² измеренной безинерционным прибором. Под истинной регулировочной кривой мы будем далее обозначать кривую, снятую прибором, не имеющим инерции. Так как расстояние термопары от нагревательных элементов имеет влияние на время для передачи показания, а следовательно и на разность регулировки, то, согласно нашему определению, истинная разность регулировки должна быть определена безинерционным прибором в месте регулировки.²

¹ Каждый регулятор состоит из контрольного (термопара и гальванометр), переключающего и переключающего устройства. Подробнее см. стр. 208.

² Безинерционное измерение приблизительно осуществляется для техники при помощи пирометра общего излучения без трубки накаливания, а для научных измерений — при помощи фотоэлектрических элементов. С достаточной точностью можно считать безинерционным измерение тонкими обожженными (без колуха) термоэлементами.

Среди большого числа возможных регулировочных кривых мы выбираем кривую, снятую прибором, нормально относящимся к данной печи, и называем ее кажущейся кривой регулировки.

В соответствии с этим мы можем установить, что разница между истинной и кажущейся разностью регулировки может быть объяснена двумя обстоятельствами:

- а) инертностью термпары,
- б) пространственным разделением мест измерения температуры и регулировки.

б) Нечувствительность регулятора (передаточного устройства)

Переключение (включение или выключение) печи при регулировке происходит каждый раз тогда, когда в регулятор поступают импульсы максимальной или минимальной температуры. Эти температуры, разность которых называется «нечувствительностью передаточного органа» (D), совпадает при безинерционном пирометре с разностью регулировки. При наличии же пирометра, обладающего инерцией, разность регулировки как истинная, так и кажущаяся, будет значительно больше, чем нечувствительность. К этому мы подробно вернемся позднее, здесь же займемся только нечувствительностью.

Нечувствительность, свойственная всем без исключения регуляторам, выступает в одних приспособлениях для регулировки отчетливо, в других же она менее бросается в глаза: непосредственно же ее можно наблюдать в автоматических регуляторах с двумя контактами, в которых расстояние между ними (выраженное в единицах температуры) равно нечувствительности. В регуляторах с одним контактом и скользящим движением контакта последний должен пройти некоторый путь, чтобы заставить выключиться выключающий орган. Так, например, искра разрыва затухает только по прохождении контактами некоторого пути: в момент разрыва контактов возникает маленькая дуга, обрывающаяся только по достижении ею какой-то определенной длины. Эта длина соответствует известному расстоянию между контактами, которое, в свою очередь, отвечает определенной разности температур (нечувствительность). Само собою разумеется, такое же явление возникает и при других неэлектрических передаточных средствах: так, например, сопло для воды под давлением должно иметь определенное открытие для того, чтобы оно вообще могло действовать. Помимо того, во всех передаточных устройствах появляется дополнительная нечувствительность, вследствие механического трения и упругих деформаций, которые, конечно, надо учитывать.

Наличие нечувствительности обозначает потерю времени. Несмотря на то что необходимая температура достигнута, выключение производится не сразу, а спустя некоторое время. При этом безразлично, требует ли переключение, раз оно уже началось, конечно, или ничтожно малого времени для окончания.

с) Характеристика и кривая нарастания температуры

Потеря времени, обусловливаемая нечувствительностью, связана с разностью регулировки двумя зависимостями: характеристикой и кривой нарастания температуры.

Характеристика. На рис. 61 изображен разрез арматуры термоэлемента. Идя от середины кнаружи, мы последовательно находим собственно термопару, керамическую внутреннюю трубку и металлическую внешнюю. Допустим, что к началу какого-нибудь периода регулировки температура распределяется подобно линии *b*; между термоэлементом и источником тепла имеется перепад температуры по ломаной линии. Термоэлемент достиг как раз низшего предельного значения нечувствительности. Печь включается, и под влиянием нагревания начинает изменяться распределение температуры в арматуре пирометра. Чем быстрее нарастает температура в печи, тем скорее в головке термопары установится распределение температуры, подобное линии *a*, и печь снова выключается. Чем быстрее повышается температура, тем больше к концу периода повышения превышение температуры печи сравнительно с температурой термопары. Чем больше подлежащие нагреванию массы регулятора, тем дольше при равном превышении температуры печи прохождение интервала от *b* к *a*. Если для какой-нибудь арматуры пирометра откладывать повышение температуры печи, соответствующее каждой продолжительности включения печи (время, в течение которого печь включена: продолжительность включения *ED*), то получится характерная для данной арматуры кривая, называемая характеристикой пирометра. Последняя различна для разной продолжительности. Такие характеристики изображены, например, на рис. 62; из него мы видим, что характеристики можно рассматривать с достаточной степенью приближения как равноугольные гиперболы, постоянное произведение ординат которых пропорционально нечувствительности (*D*).

$$(\Delta\theta \cdot ED = K_2 D).$$

Величина коэффициента K_2 зависит от материала, толщины, поверхности термопары, а также от условий теплопередачи между печью и термопарой. Помимо этого следует полагать, что на величину K_2 влияют также и теплотехнические свойства печи. Однако установлено, что, отношение значений K_2 нескольких пирометров в различных печах оди-

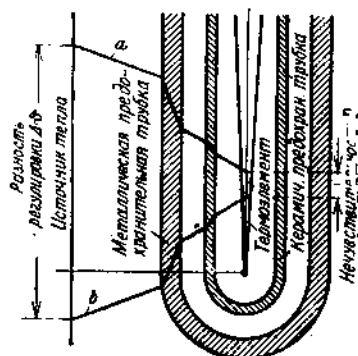


Рис. 61. Распределение температуры в термопаре регулятора (Пашкис, Ж 21).

наково; отсюда следует, что, если известна характеристика нескольких пирометров в одной печи и поведение одного из них в других печах также установлено, то возможно определить значение K_2 прочих пирометров.

Вернемся к рис. 61. С его помощью мы можем понять также и разницу между истинной и кажущейся разностью регулировки. В тот момент, когда достигнуто распределение температуры, соответствующее кривой *b*, печь включается, и температура начинает повышаться.

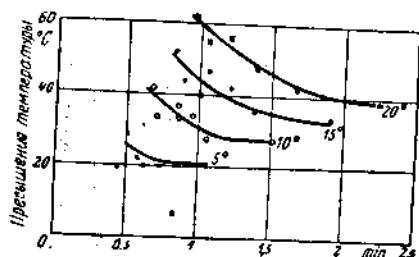


Рис. 62. Характеристики для величин нечувствительности в 5, 10, 20° С (Пашкис, Ж 21).

Действие этого повышения температуры сначала сказывается на внешних слоях арматуры, внутри которой еще существует различие в температуре термоэлемента арматуры: температура печи по показанию гальванометра продолжает еще понижаться (кажущееся ложное показание прибора).

Повышение температуры происходит медленно снаружи внутрь прибора; когда пирометр достигает своего минимального показания, он начинает указывать на повышение температуры, и таким образом кривая кажущейся температуры изменит свое направление. Сдвиг фазы во времени между истинной и кажущейся кривыми зависит, между прочим, от толщины арматуры. На рис. 67 а и б даны примеры еще двух таких кривых.

Кривые получены в трубчатой печи. Истинная кривая регулировки снималась при помощи оголенного, тонкого, никель-хромового термоэлемента, а кривая кажущегося изменения температуры таким же, более толстым термоэлементом, заключенным к тому же в жароустойчивую металлическую трубку (диаметром 15/25 мм).

Кривая нарастания температуры. До тех пор, пока печь включена, к ней подводится определенное количество тепла за единицу времени. Часть этого тепла используется для поддержания состояния печи таким, какое оно есть в данный момент; остаток представляет собою избыточную теплоту (Q). Скорость повышения температуры в первом приближении пропорциональна избытку тепла. Приближение это, однако, при сравнительно малых продолжительностях одного регулирующего периода, достаточно точно (в действительности нарастание температуры происходит по логарифмической кривой).

$$\frac{\Delta \theta}{ED} = K, Q.$$

На рис. 63 изображена прямая линия, изображающая нарастание температуры.

д) Определение разности регулировки

На упомянутом рисунке указано, как из обеих кривых — характеристики и кривой нарастания температуры — определяется разность регулировки. Этот эскиз относится к непосредственно управляемым печам, т. е. печам, в которых исключена возможность появления истинного повышения температуры после выключения печи и истинного понижения температуры после включения (в том месте, где находится пирометр регулятора). Этого можно достигнуть, например, путем помещения пирометра в непосредственной близости от нагревающих элементов.

Если нанести на абсциссу, проходящую через нижнюю точку поворота истинной кривой регулировки, прямую нарастания температуры и характеристику как функции времени, то координаты точки пересечения представляют собою разность регулировки и продолжительность включения (равную времени установки безинерционного пирометра). Таким образом:

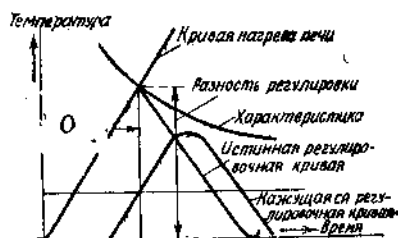


Рис. 63. Определение истинной разности регулировки и продолжительности включения из характеристики и кривой нарастания температур. О — продолжительность включения.

$$\frac{\Delta\theta}{ED} = K_1 U \quad (35)$$

$$\Delta\theta \cdot ED = K_2 \cdot D. \quad (36)$$

Отсюда следует:

$$\Delta\theta = \sqrt{K_1 K_2 U D}, \quad ED = \sqrt{\frac{K_2 D}{K_1 U}}. \quad (36a)$$

Так как U изменяется с уменьшением потребности в тепле, то и разность регулировки $\Delta\theta$ не является постоянной величиной, а увеличивается тем больше, чем меньше потребность в тепле, т. е. чем больше избыток тепла.

е) Замедление

При наших рассуждениях до настоящего времени мы принимали, что, как только регулятор достигнет границы нечувствительности, тотчас же происходит переключение (замедление равно 0). Но причинам, обуславливаемым конструкцией регулятора (стр. 208) в большинстве случаев происходит еще некоторое замедление; таким образом, переключение происходит не в любой момент, а только через определенные промежутки, независимые от нарастания темпера-

руры (положительного или отрицательного). В этом случае разность регулировки будет зависеть не только от печи, регулятора и процесса нагрева изделий, но также и от величины этого замедления. В качестве примера приведем приборы с падающей дугой, описанные более подробно ниже. Здесь же мы только кратко отметим, что переключение может быть произведено при помощи падающей дуги только тогда, когда стрелка находится над соответствующим контактом. Падающая дуга поднимается и опускается через определенные промежутки времени t_A . В зависимости от того, когда стрелка достигает предела нечувствительности, замедление колеблется между 0 и t_A .

При замедлении t_A разность регулировки $\Delta\theta_A$ находится на основании следующих соображений: она складывается из трех частей $\Delta\theta_A = -\Delta\theta + \vartheta_2 + \vartheta_3$; $\Delta\theta$ представляет собою разность регулировки, которая возникает без учета замедления и которая рассчитывается согласно уравнению (36а). ϑ_2 и ϑ_3 представляют собою надбавки к разности регулировки, вызванные тем, что переключения не происходит, несмотря на то, что достигнут высший или низший предел нечувствительности. Однако, согласно определению, нарастание температур за единицу времени составляет $K_1 U$. В соответствии с этим по истечении времени t_A температура поднимается на величину $\vartheta_2 = t_A \cdot K_1 U$. Для времени охлаждения (выключенное состояние) ΔD в продолжение периода регулировки расход тепла рассматривается как отрицательный избыток тепла. Поэтому мы можем написать:

$$\frac{\Delta\theta}{AD} = K_1 \cdot Q, \quad (35a)$$

где Q — расход тепла в данный момент.
В таком случае

$$\begin{aligned} \vartheta_2 &= t_A \cdot Q \cdot K_1, \\ \Delta\theta_A &= \Delta\theta + \vartheta_2 + \vartheta_3 = \sqrt{K_1 K_2 U D} + t_A \cdot K_1 (U + Q) = \\ &= \sqrt{K_1 K_2 U D} + t_A \cdot K_1 \cdot N_0. \end{aligned} \quad (37)$$

Расход тока в каждый момент равняется расходу тепла плюс избыток тепла ($Q + U$). Полная разность регулировки будет колебаться между значениями уравнений (36а) и (37) в зависимости от того, ближе ли замедление к нулю или к t_A , которая может быть различна в разные регулировочные периоды.

Но и замедление может оказаться замаскированным. При применении для целей регулировки милливольтметров с одним контактом для усиления слабой направляющей силы прибора, часто прибегают к помощи периодически действующей дополнительной силы, способствующей приближению или удалению стрелки от контакта. Период, в течение которого начинает действовать эта сила, и является задержкой t_A .

Влияние задержки видно из приведенных ниже чисел, относящихся к печи и регулятору со следующими данными: $N_0 = 4350$ вт; $Q = 600$ вт; $D = 10^\circ\text{C}$.

Задержка (с)	Истинная полная разность регуляровки ($^\circ\text{C}$)
0	66
20	90
30	102
40	114

г) Печи с косвенным управлением

Выше мы предполагали, что пирометр действует непосредственно под влиянием нагрева нагревательными элементами; следовательно, в печи не может быть ни одной части, температура которой лежала бы между температурой нагревательного элемента и пирометра. Удовлетворение этого условия в значительной мере зависит от расположения пирометра в печи.

Если пирометр расположен очень близко от нагревательных элементов, то он будет реагировать на его температуру; если же он расположен в массе изделий (как это часто рекомендуется для наблюдения за процессом нагревания), то внешняя сторона изделия примет слишком высокую температуру. Если он будет находиться между нагревательными элементами и изделиями, то он будет иметь промежуточную между ними температуру.

Было бы желательно поместить регулятор на поверхности изделия и установить таким образом, чтобы предельно допустимая температура изделия — ϑ_0 влекла бы за собою переключение. Это расположение практически в большинстве случаев невыполнимо, потому что изделия не обладают достаточно ровной поверхностью, чтобы не приходилось опасаться повреждения пирометра при загрузке. Если нельзя поместить пирометр на поверхности изделий, то наиболее желательно, чтобы он находился в непосредственной близости от нагревающих элементов, причем в этом случае температура должна быть установлена выше ϑ_0 в соответствии с температурным перепадом (рис. 37, параметр кривой).

В печах более или менее значительной длины (или глубины) рекомендуется устанавливать один за другим несколько регуляторов. Это целесообразно не только из соображений равномерности температуры, но и по другим причинам. Например, расположение изделий согласно рис. 64 должно повести к перегреву нагревательных элементов у мест А и В: при загрузке регулятор включает печь, потому что температура регулятора и нагревательного элемента понижается вследствие присутствия холодных изделий; через некоторое время, когда регу-

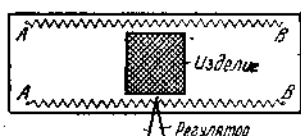


Рис. 64. Неправильное устройство (одного регулятора для длинной печи и короткого изделия недостаточно).

лятор держит печь еще под током, температура в точках *A* и *B* повысится настолько, что нагревающая обмотка может перегореть.

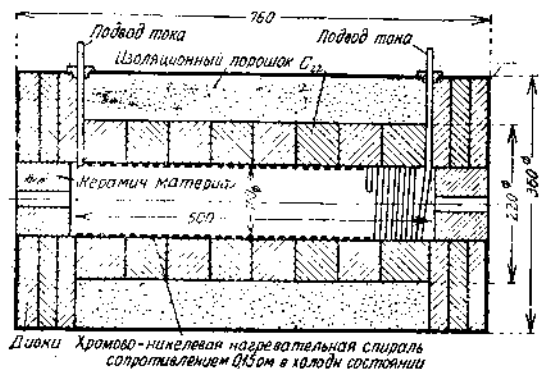


Рис. 65. Трубчатая печь (Пашкис, Ж 21).

Ферма рабочего пространства часто требует помещения пирометра в других местах вопреки вышесказанным соображениям. Периодически пирометр помещают, например, в ненагреваемой задней стенке печи.

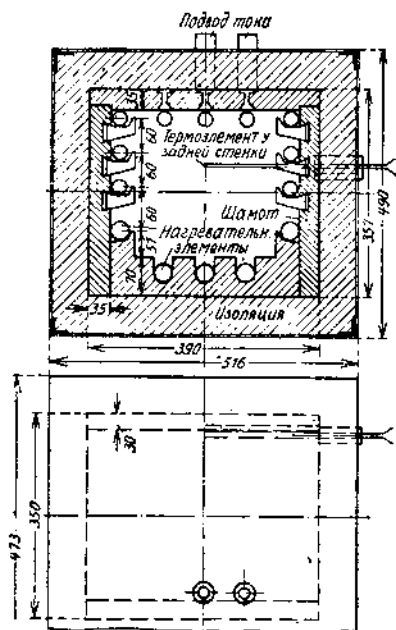


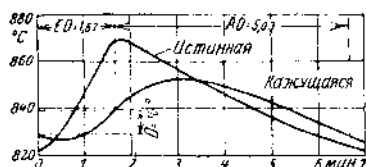
Рис. 66. Печь прямоугольной формы (Пашкис, Ж 21).

Ферма рабочего пространства часто требует помещения пирометра в других местах вопреки вышесказанным соображениям. Периодически пирометр помещают, например, в ненагреваемой задней стенке печи.

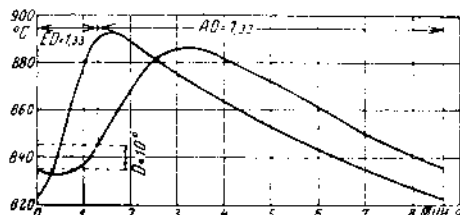
случаях разность регулировки особенно зависит от состояния нагрева печи и изделия.

г) Печи с наружным нагревом полезного объема (муфеля наружного нагрева)

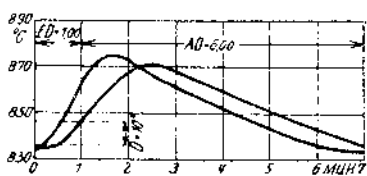
Явления, которые мы рассматривали в печах с косвенным управлением, выражены здесь значительно более резко. Полезный объем, т. е. рабочее пространство (например, ванна), отделен промежуточной стенкой (тиглем, стенкой муфеля и т. п.) от пространства, в котором расположены нагревающие элементы.



а)



б)



в)

Рис. 67. Истинные и кажущиеся кривые регулировки (Пашкин, Ж 21). а) и б) — трубчатые печи; в) — печи прямоугольной формы. Установленная мощность по рис. 67а составляла 2 445 вт ($\dot{U} = 1861$ вт). Установленная мощность по рис. 67б составляла 4 355 вт ($\dot{U} = 3 685$ вт). Обращает на себя внимание большая разность регулировки при б), объясняемая большим избытком тепла.

Тут имеется две основных возможности регулировки:

- 1) пирометр помещается в рабочем пространстве,
- 2) пирометр помещается в нагревательном пространстве.

В первом случае вся установка работает как печь с прямым управлением и с чрезвычайно инертной арматурой: стенка муфеля, жидкость ванны и т. п. действуют замедляющим образом на показания пирометра. В тот момент, когда наступает изменение нагрузки печи, хотя бы вследствие погружения большого количества изделий в ванну, температура понижается. Если регулятор и подействовал, что происходит через относительно короткое время, потому что инертность собственной арматуры в сравнении с инертностью муфеля (тигла) и проч. очень мала и печь включается, но температура ванны понижается дальше. Когда она затем начинает подниматься, то стенки и ванна уже поглотили слишком много тепла; температура продолжает повышаться, хотя произошло выключение.

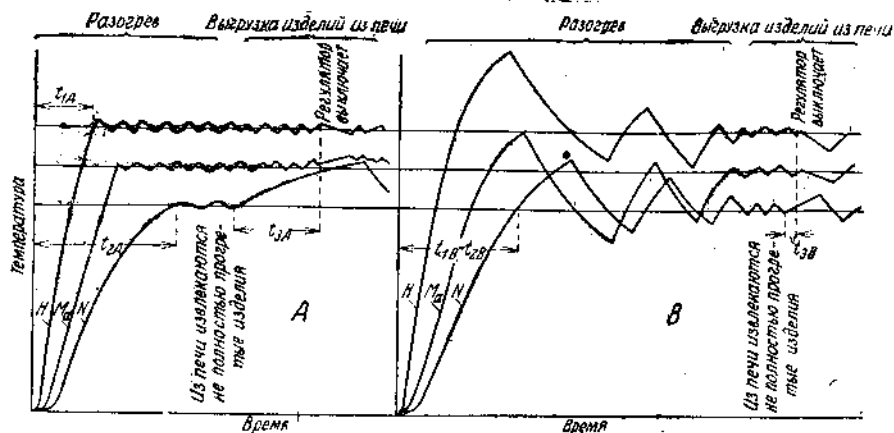


Рис. 68. Схема регулировочных процессов печи с муфелем наружного нагрева.

Температурные кривые: H — нагревательного пространства, Ma — наружной стенки муфеля, N — полезного пространства печи

Эксплуатационный период	Регулятор в нагревательном пространстве (случай А)	Регулятор в полезном пространстве (случай В)
газогрев	Регулятор начинает работать раньше, чем в случае В ($t_1 A < t_1 B$). Так как, вследствие действия регулятора, не может наступить временное повышение температуры в нагревательном пространстве, то происходит только медленное приближение к номинальной температуре нагревательного пространства.	Регулятор начинает работать позднее, чем в случае А. Внутри муфеля номинальная температура достигается раньше, чем в случае А. ($t_2 B < t_2 A$), однако значительно превосходит ее, так как температура внутри муфеля слишком высока для непрерывной работы.
Состояние установившегося равновесия	Достигается раньше, чем в случае В. Разности температур в полезном пространстве меньше, чем в случае В. Регулятор является, так сказать, дроссельным приспособлением, т. е. он снижает средний расход энергии независимо от полезного пространства.	Повышение температуры у регулятора, правда, немедленно влияет на отопление, однако из аккумулярованной муфелем теплоты часть переходит в полезное пространство или из такового. Муфель действует, как большая арматура.
Изменение потребности полезного пространства в тепле, например, при загрузке или разгрузке муфеля	Изменение потребностей в теплоте должно сперва выразиться в изменении температуры муфеля; в продолжение времени, необходимого для прохождения изменения температуры через муфель, влияние отопления продолжается в том же направлении. Регулировка становится грубее.	Регулятор охлаждается скорее, чем в случае А ($t_3 B < t_3 A$) и работает быстро. Температура быстро изменяется.

Во втором случае (пирометр в отопительном пространстве) устройство работает безукоризненно до тех пор, пока тепло в рабочем пространстве поглощается равномерно. Однако в этом случае можно было бы заменить температурный регулятор реле времени, уменьшающим более высокую установленную мощность до пределов меньшей средней мощности. Однако как только начинает колебаться нагрузка, это устройство оказывается менее благоприятным, чем описанное выше: проходит некоторое время, пока регулятор начнет действовать, а затем опять некоторое время, пока изменение мощности станет заметным.

Разности регулировки могут быть удержаны в малых пределах путем применения пирометров с малыми значениями характеристики (K_1). Средства уменьшить разность регулировки при помощи малых значений K_2 будут описаны в следующем разделе.

На рис. 68 дана схема регулировочных процессов в печи с мв-фелем наружного нагрева.

4. СПОСОБЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ

Все схемы регулировки имеют в основном вид одной из схем, изображенных на рис. 69—72. Само собой понятно, что изображенные здесь схемы можно объединить со схемами переключения, приведенными на рис. 52 и последующих. С увеличением нагрева изделий все более повышается избыток тепла в печи, как это было уже сказано, и влечет за собою, помимо упомянутого уже увеличения разности регулировки, укорочение периодов включения (более частое переключение). Делаются попытки устранить эти два нежелательных явления путем снижения расхода тока печью по мере увеличения нагрева изделий. Приведенная ниже сводная таблица 9 дает представление о некоторых возможностях осуществить это автоматически.

III. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПЕЧЕЙ

В настоящее время многие свойства материалов, рассмотренные ниже, цифрами охарактеризовать пока невозможно. Это объясняется отчасти тем, что формулы, выражающие зависимость того или другого свойства от какого-нибудь фактора, еще не установлены (например, чувствительность материала к грубому обращению). Отчасти же это происходит потому, что еще не найдена методика производства достаточно точного испытания (например, устойчивость материала нагревательных элементов по отношению к атмосфере печи при рабочей температуре), наконец, в некоторых случаях, по той причине, что еще не установлены необходимые цифровые данные (например, цифры, характеризующие размягчение изоляционных материалов под давлением). Однако при описании свойств материалов, по возможности, будут указаны способы исследования и методы сравнения.

№	Мощность при разогреве	Регулировка мощности		Включение контрольного органа	Преимущества
		от	до		
1	Полная	Полная	Нуль	1 или 2 контакта	Простое, дешевое устройство
2	Полная	Полная	Уменьш.	1 или 2 контакта	Простое, дешевое устройство
3	Полная	Уменьш.	Нуль	3 контакта или 2 контакта с вспомогательным реле	Сохранение выключающего механизма при относительной дешевизне всего устройства
4	Полная	а) Полная б) Уменьш.	Нуль Нуль	1 или 2 контакта; переключение с а) на б) по истечении установленного времени	Сокращение времени прогрева, так как полное нагревание возможно и после начала регулировки. Простая схема
5	Полная	а) Полная б) Уменьш.	Нуль Нуль	1 или 2 контакта; переключение с а) на б) при помощи счетчика с контактами, производящего переключение, как только средний расход работы в час станет ниже нижней ступени регулировки	Сокращение времени прогрева, так как полное нагревание возможно и после регулировки. Переключения в теоретически правильный момент
6	Полная	а) Полная б) Уменьш.	Нуль Нуль	2 термоэлемента в толще и снаружи изделий. Переключение с а) на б) по разности показаний термоэлемента	—
7	Полная	а) Полная б) Уменьш.	Уменьш. Нуль	3 контакта. Нагревание по а) ведется до тех пор, пока уменьшение мощности влечет за собой повышение температуры	Простая схема Точная регулировка

Недостатки	Область применения
Сильный износ выключателя вследствие частых переключений Большая разность регулировки	Малые, дешевые печи
Как выше, но не в столь сильной степени. Ограничение установленной мощности в случае требования одноступенчатого переключения. Нижняя ступень должна быть меньше потерь холостого хода	Печи для вполне определенных изделий
Момент переключения происходит либо произвольно, либо при первой реакции регулятора, т. е. раньше чем мощность упадет до величины, которая может быть получена на нижней ступени, как следствие этого — потеря времени	Печи, в которых первоначальные затраты являются основным фактором рентабельности
Переключение в зависимости от времени неточно, так как правильный момент переключения, между прочим, зависит и от изделий (когда потребная мощность тоже снижает ступени регулировки)	Большие, полностью автоматизированные печи
Сложная схема	Большие, полностью автоматизированные печи
Установка термодатчиков в толще изделий затруднительна. Перегрев внешней части слоя изделий	Большие, полностью автоматизированные печи
Потеря времени, так как до момента выключения печи работа ведется не при максимально допустимой температуре, а при средней, в пределах от среднего до нижнего контакта	Большие, полностью автоматизированные печи

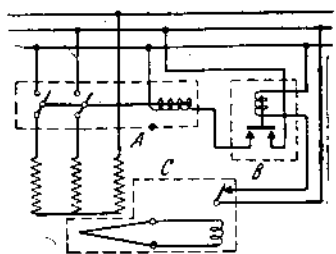


Рис. 69. Регулятор с максимальным контактом.

А — контактор; В — реле постоянного тока; С — регулятор температуры с максимальным контактом.

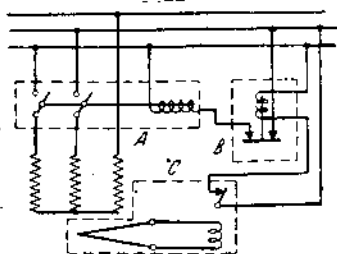


Рис. 70. Регулятор с минимальным контактом.

А — контактор; В — реле рабочего тока; С — регулятор температуры с минимальным контактом.

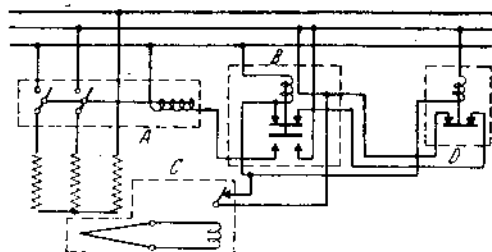


Рис. 71. Регулятор с максимальным контактом и замедленным включением.

Печь включается по достижении максимальной температуры; одновременно приводится в действие реле D, допускающее повторное включение только по прошествии установленного времени, независимо от положения стрелки С. Если по прошествии установленного времени температура упала, то включение происходит, если же она еще выше максимума, то D снова включается, и печь остается на следующий период включения выключенной.

Аналогичная схема существует для регулирования по рис. 70. А! — контактор; В — реле постоянного тока с самоуставляющимися контактами; С — регулятор температуры с максимальным контактом; Р — реле времени.

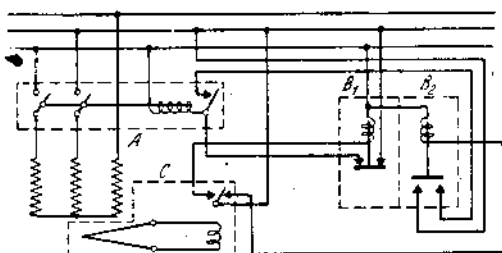


Рис. 72. Регулятор с максимальным и минимальным контактами.

Каждый контакт производит только включение, но не выключение. Положение контактора остается неизменным до получения противоположного импульса.

А — контактор с самоуставляющимися контактами; В — реле рабочего тока, включает контактор, удерживаемый в этом положении даже тогда, когда В₁ прерывает цепь; В₂ — реле постоянного тока прерывает цепь, удерживающую контактор; С — регулятор температуры; максимальный и минимальный контакты замыкаются только на короткое время.

Числовые данные относительно свойств материалов (поскольку таковые известны) будут даны в разделах А2 и С2.

А. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1. ОБЗОР СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Большинство жароустойчивых металлов употребляются в печестроении как для изготовления сопротивления, так и для конструктивных деталей, например, загрузочных приспособлений и т. п.; поэтому рассмотрение печных материалов не основано на классификации их по областям применения. Вполне понятно, что понятие «жароустойчивости» в данном случае относительно; так, например, железо может считаться жароупорным для температур до 400—500°; о его применении, как нежароустойчивого материала, например, для наружной облицовки печи, разумеется, не приходится говорить.

В качестве жароустойчивых металлов в настоящее время применяются при постройке печей главным образом следующие: железо профильное и листовое, медно-никелевые сплавы, хромо-железные сплавы, хромо-никелевые сплавы, содержащие железо и не содержащие железа, никель, хром и молибден.

Как будет видно из описания этих металлов, их свойств и методов испытания, выбор пригодных для той или другой цели материалов только на основании результатов лабораторных испытаний пока невозможен; в настоящее время гораздо больше приходится основываться на опытных практических данных. Эти опытные данные приложены в таблице 10, где материалы расположены в порядке их устойчивости при различных температурах и указано их обычное название.

Несмотря на хорошую устойчивость против окисления и многократные попытки использовать хром в чистом виде при постройке печей сопротивления, практически не применяется, вследствие неудовлетворительных механических свойств (хрупкость, плохая обрабатываемость и склонность к деформированию); нагревательные элементы из хрома с присадкой вольфрама или молибдена не употребляются по тем же причинам. Молибден при высоких температурах неустойчив против окисления и потому может найти себе применение только в печах с атмосферой из инертного газа, заполняющего всю печь или омывающего только самое сопротивление (стр. 257).

При изготовлении нагревательных элементов, даже предназначенных для работы при низких температурах, пользуются исключительно нихромовыми сплавами: железо употребляется редко, вследствие малого электросопротивления при низких температурах; медно-никелевые сплавы — вследствие незначительной разности в цене по сравнению с нихромом и относительно малой их жароустойчивости. Переработка хромо-железных сплавов в проволоку или ленту представляет большие затруднения, чем обработка нихромовых сплавов, причем разница в цене не особенно значительна. Наконец, никель имеет так же, как железо, низкое удельное электросопротивление. В специальных случаях, когда имеет большое значение очень высокий температурный коэффициент сопротивления, никель

Таблица 10

°C	Материалы для сопротивлений ¹	Строительные материалы (внутренняя стенка, загрузочные приспособления и т. д.)
350	Прокатное железо, чугун, медно-никелевые сплавы, нихромовые сплавы	Прокатное железо, чугун
500	Чугун, медно-никелевые сплавы, никель, нихромовые сплавы	Прокатное железо; ² чугун, хромо-железные сплавы
600—700	Никель, нихромовые сплавы	Хромо-железные и нихромовые сплавы
700—1100	Нихромовые сплавы	Нихромовые сплавы
1100 ³ —1200	—	Нихромовые сплавы

лем, наоборот, пользуются охотно. Применяемые в качестве материала для нагревательных элементов нихромовые сплавы могут быть разделены в зависимости от состава на следующие группы. Материалы, отвечающие первой строчке, применимы только до 600—700°.

Таблица 11

Хром	Никель	Железо	Прочие	Завод
8—20	7—15	Остальное	—	Крупн, Шеллер-Блекман
15—20	60	„	—	Гереус, Крупн, Шеллер-Блекман
20	78	Максимум 2		Гереус, Крупн

В Америке нашел частичное применение сплав хрома, алюминия и железа, примерно, следующего состава: алюминий 4—9%, хром 14—24%, остальное — железо. Более или менее исчерпывающих опытных данных об этом материале, заманчивом вследствие дешевизны его составных частей, еще нет.

¹ Применимость характеризуется температурой самого сопротивления.

² Применение железа следует, по возможности, ограничить, так как при температуре выше 400—450° срок его службы значительно сокращается; срок службы можно повысить путем присадки небольших количеств других металлов, например, меди.

³ Для температур выше 1100° в настоящее время употребляются только неметаллические сопротивления (силитовые).

В качестве строительного материала для температур до 400° применяется главным образом железо, а для более высоких температур — обычно хромо-железные сплавы. И только в случае, если наряду с высокими температурами требуется очень большая прочность или химическая устойчивость, пользуются нихромовыми сплавами, которые делаются пригодными для этой цели путем присадки молибдена или марганца (например, сплав В7М фирмы Гереус: 15% хрома, 60% никеля, 16% железа, 2% марганца и 7% молибдена).

2. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И ИХ ИСПЫТАНИЕ

К металлам, как к строительным материалам для печей, должны быть предъявлены следующие требования:

- а) устойчивость (неокисляемость) в атмосфере печи;
- б) инертность по отношению к контактирующим материалам;
- в) механическая прочность;
- г) нечувствительность к грубому обращению (все эти требования относятся к рабочей температуре печи);
- д) минимальное старение;
- е) легкая обрабатываемость;
- ж) небольшой коэффициент теплового расширения;
- з) соответствующее назначению удельное сопротивление;
- и) температурный коэффициент сопротивления, равный нулю или положительный;
- к) легкое восстановление.

- а) Устойчивость (неокисляемость) в атмосфере печи при рабочей температуре

Применимость металлического материала ограничивается обычно не точкой его плавления, а его способностью реагировать с кислородом воздуха и с другими материалами печи (см. ниже); это происходит потому, что почти все металлические строительные материалы, применяемые для печей, работают надежно только при температурах, лежащих значительно ниже их точки плавления. Металлы разрушаются при работе в окисляющей атмосфере (воздух) вследствие окисления, так что в качестве показателя устойчивости принимают количество окалины (окислов) в миллиграммах на 1 см^2 поверхности металла в час. Этот окисленный слой отслаивается и обнажает нижележащие слои, которые, в свою очередь, подвергаются окислению. Однако окислы некоторых металлов при не слишком высоких температурах плотно сидят на основном металле и в этом случае защищают таковой от дальнейшего окисления. Эти металлы можно считать жароустойчивыми до соответственных температур.

Так, например, железо может считаться жароустойчивым только при температурах ниже 500° , потому что при более высоких темпера-

турах окалина отскакивает относительно легко. При чисто восстановительной атмосфере, даже во время периода охлаждения, как в некоторых типах печей для светлого отжига, можно применять железо и в случае более высоких температур. В других типах печей для отжига существует попеременно восстановительная и окислительная атмосфера, и в этом случае железом уже нельзя пользоваться для температур выше 500° . Однако, редко применяются и нихромовые сплавы, так как частое образование окислов с последующим их восстановлением может повлечь за собою изменение строения металла. На основании опыта видно, что для этой цели больше всего пригодны железо-никелевые сплавы (64% железа и 36% никеля)¹.

Испытание на устойчивость по отношению к атмосфере печи до настоящего времени распространялось главным образом на материалы для нагревательных элементов. Однако, так как согласно указанному выше, те же материалы часто применяются для конструктивных частей печи, было бы желательно произвести для них специальные испытания, потому что форма и свойства поверхности (например, литейная корка² и т. п.) могут играть весьма значительную роль.

Ниже описываются способы испытания материала для нагревательных элементов, так как еще неизвестны способы испытания материалов в иных формах чем проволока или лента.

Для испытания срока службы проволоки, употребляемой для изготовления нагревательных элементов, в атмосфере различного состава (чаще всего в воздухе) можно в основном пользоваться тремя способами, основанными на:

- а) изменении сопротивления,
- б) изменении веса,
- в) непосредственном определении срока службы.

Прежде чем перейти к рассмотрению каждого из способов в отдельности, следует отметить, что эти испытания не могут заменить испытания в службе, так как достижение металлом определенного срока службы определяется также следующими факторами: уровнем температуры, напряженностью поверхности нагревательного элемента, его конструкцией, наличием или отсутствием тока, равномерностью температуры и условиями работы элементов — продолжительностью включений и выключений и их частотой. Прочность очень сильно зависит от обращения во время эксплуатации и, самое главное, от поддержания в чистоте нагревательных элементов. Так как ни один способ испытания не может должным образом охватить все факторы, то значение нижеописанных способов этим значительно уменьшается, никогда нельзя быть уверенным, что именно непредусмотр-

¹ По имеющимся сведениям фирма Геркус успешно пользовалась нихромовыми сплавами для нагревательных элементов в вакуумных плавильных печах, а также в печах для светлого отжига с попеременно-окислительной и восстановительной атмосферой.

² Как выяснилось, литейная корка на литых металлах представляет собою хорошую защиту против воздействия атмосферы печи; поэтому следует избегать обрабатывать отливки, предназначенные для конструктивных частей печи.

ренная в условиях опыта деталь не окажет решающего влияния на устойчивость материала в условиях эксплуатации.

а) Испытание срока службы по изменению сопротивления. О способах определения изменения сопротивления будет сказано ниже, при рассмотрении требования в (устойчивость по отношению к соприкасающимся материалам). По поводу устойчивости нагревательных элементов против окисляющего действия атмосферы печи следует отметить следующее. Так как слой окислов металла обладает весьма ничтожной электропроводностью сравнительно с чистыми металлами, то прежде полагали, что отношение удельного сопротивления исследуемого образца в первоначальном состоянии и после употребления должно было бы дать непосредственно отношение окисленного сечения к общему первоначальному сечению проводника. Несмотря на всю заманчивость этого рассуждения, оно, к сожалению, неправильно, потому что сопротивление чистого металла, как это доказано Роном (Ж 22, 23), зависит также от структуры. Рон предлагает, правда, в качестве выхода нагревать материал перед испытанием в условиях, исключающих окисление, до температуры выше температуры испытания, чтобы заранее исключить изменения в структуре; однако он сам указывает на очень малую действенность этого способа (более подробно см. в разделе б).

б) *Испытание срока службы по изменению веса.* Вторым методом испытания — определение потерь в весе — был предложен Клейном (Ж 24) и усовершенствован Роном (Ж 22), Генкстенбергом и Борнефельдом (Ж 25). При способе испытания, предложенном Роном, материал не ставится в те же условия, в каких он находится при нормальной эксплуатации.

Подлежащий испытанию материал, по Рону, укладывается в виде спирали на двух роликах из марквардтовской массы; после этого спираль нагревается, и ей дают остыть. Часть окалины при этом отскакивает самостоятельно (отскакившая окалина), а часть удаляется путем вытягивания и новой намотки спирали (удаления окалины). Это принудительное вытягивание материала в практических условиях обычно не имеет места и сомнительно, может ли оно заменить прочие возникающие в материале дополнительные напряжения в процессе работы и сохраняют ли испытываемые материалы после этого свои служебные качества, какие они имели во время опыта.

Вместо взвешивания окалины Генкстенберг со своими сотрудниками Борнефельдом и Фрицем тщательно удаляет окалину химическим путем и устанавливает уменьшение веса самого образца. Этот способ описан Фрицем и Борнефельдом (Ж 26), а результаты опыта приведены Генкстенбергом и Борнефельдом (Ж 25). Выводы относятся к нормальным пластинкам толщиной в 5 мм.

По поводу этого метода следует заметить, что каждый образец может быть применен только один раз, так как образовавшийся слой окиси должен быть сначала удален, и только после этого могут быть сделаны соответственные выводы. При большой еще неясности всего

этого вопроса не исключена возможность индивидуальных различий в отдельных образцах. Далее, кажется абсолютно необходимым очень тщательно очищать образцы от окарины, всеми мерами избегая в то же время воздействия химических очищающих средств на здоровый металл. Необходимые химические реактивы перечислены в названных работах. Продолжительность испытания установлена в 120 и 240 часов.

γ) *Непосредственное определение срока службы.* Третий способ испытаний Смиттельса, Вильямса и Эвери (Ж 27) исходит непосредственно из установления срока службы материала. Тонкие, нормированных размеров спирали помещаются в также нормированные держатели и подвергаются попеременному нагреванию и охлаждению, при чем устанавливается, сколько таких циклов выдерживает образец до разрушения. Смиттельс разработал этот метод для очень тонких проволок (0,375 мм). Пересчет на более толстые проволоки в литературе до настоящего времени не встречался. Весьма сомнительно также, чтобы результаты опыта, полученные на тонких проволоках, могли быть перенесены на более толстые.

Таким образом мы приходим к выводу, что до настоящего времени произвести безукоризненное лабораторное исследование металлов на устойчивость против окисления еще не представляется возможным.

б) Устойчивость по отношению к соприкасающимся материалам

Что касается устойчивости по отношению к соприкасающимся материалам, то прежде всего необходимо констатировать, что для медно-никелевых сплавов данных в этом отношении еще не имеется. Для пихромовых сплавов прежде всего чрезвычайно опасна сера¹. Из остальных элементов неблагоприятно влияет одновременное действие окислов железа и кремнекислоты. Это объясняется тем, что при совместном действии окиси железа и кремнекислоты образуется легкоплавкий шлак, разрушающий предохранительный слой окислов на поверхности пихрома.

Вопрос о воздействии соприкасающегося материала (опор и пр.) на пихром еще очень мало выяснен, так как к химическому действию часто присоединяются еще местные термические перегрузки, вследствие неравномерной намотки или местных перегревов. В этом отношении следует указать на работы Альберс-Шепберга и Быховского (Ж 28), вообще исключаящих существование химического воздействия контактирующего материала в исследованном ими случае, в то время как внешние обстоятельства такое воздействие позволяли предполагать. Авторы хотят доказать, что не всякое разрушение металлических материалов, которое неспециалист попытается отнести за счет воздействия керамического материала (например, вследствие изменений во внешнем виде керамической массы), действительно вызывается последним.

¹ Сера часто находят в кизельгуре.

С какой осторожностью следует решать эти вопросы, видно из опыта, поставленного для исследования действия некоторого сорта кизельгура на никром. Спираль наружного диаметра около 28 мм была уложена в кизельгур. В середине был уложен термоэлемент, и все это устройство нагревалось посредством пропуска тока по спирали (температура 1000°). Спираль перегорела через 1500 часов. Осмотр показал, что практически вся спираль оказалась неповрежденной, и только в одном месте возник местный перегрев. Так как спираль была намотана с особенной равномерностью, то перегрев может быть объяснен лишь местным пороком в поврежденном месте. Спираль была сварена и по прошествии еще 1500 часов не было обнаружено никаких следов дальнейшего разрушения.

Систематические сравнительные исследования действия материала (опор и т. д.) на материал нагревательных элементов еще сложнее, чем определение устойчивости материала против действия печной атмосферы. Окончательное решение вопроса и в данном случае возможно только практическим путем. Лабораторные испытания не смогут воспроизвести достаточно полно все условия эксплуатации; постановка же длительного опыта имела бы только ограниченное значение, потому что дополнительные явления, вследствие неравномерной намотки, местных загрязнений в процессе эксплуатации и т. п., могут представить собою гораздо большую опасность, чем сам опорный материал.

Лабораторное воспроизведение эксплуатационных условий представляет еще следующее большое затруднение. Возвращаясь к спирали. Допустим, что требуется испытать действие различных опорных материалов на определенный материал для нагревательных элементов. Если какая-нибудь из спиралей намотана неравномерно, так что она в некоторых местах неплотно прилегает или же после незначительного нагревания деформируется вследствие внутренних напряжений, то поверхность соприкосновения уже не является первоначальной, и опыт получается искаженным. Поэтому подобные опыты следует предпринимать таким образом, чтобы опорный материал был обращен в порошок, а испытуемый материал сопротивления был погружен в этот порошок.

Из приведенного примера ясно, что при производстве опыта надо действовать очень осторожно. После тщательной чистки металла воздействие может быть определено либо химическим анализом, либо взвешиванием или измерением увеличения сопротивления.

До настоящего времени не опубликованы результаты опытов ни для одного из этих трех способов исследования. Измерение увеличения сопротивления имеет указанные уже выше недостатки. Правда, для очень грубых проверок в производстве этот способ можно было бы применить, когда работа должна дать только приближенные результаты.

Так как увеличение сопротивления пропорционально сечению, а химическое воздействие пропорционально поверхности, то в случае, если нужно сравнить результаты опытов с проволоками различных

сечений, следует умножить относительное увеличение сопротивления на отношение сечения к периметру

$$\left(\frac{\text{конечное сопротивление}}{\text{начальное сопротивление}} \times \frac{\text{сечение}}{\text{периметр}} \right).$$

Помимо собственно опорных материалов, на материал нагревательных элементов могут химически действовать и другие находящиеся в печи материалы. Так, например, опыт показывает, что некоторые науглероживающие вещества разрушающе действуют на вихром. Цементирующие вещества, находясь в коробках для цементации, элементам и коробкам из вихрома не вредят, так как в коробках всегда достаточно кислорода для того, чтобы избежать восстановления окиси хрома. Однако необходимо, чтобы коробки для цементации перед употреблением были покрыты слоем окиси, почему пустые коробки рекомендуется прокалывать перед пуском их в эксплуатацию.

с) Механическая прочность

Прочность металла при высоких температурах раньше определялась так же, как и при нормальных температурах, при помощи испытаний на разрыв (Эртел Ж 29—см. указатель литературы, составленный до 1922 г.). Однако выяснилось, что продолжительность действия нагрузки на металл при повышенных температурах играет очень большую роль; при длительной нагрузке металл начинает «ползти»; это явление или само собою прекращается через некоторое время, или при известных условиях может вызвать разрушение металла. Следовательно, вместо испытания на разрыв необходимо применять такой метод испытания, который учитывал бы эти явления.

В основу всех методов испытаний, имеющих целью выяснение всего данного комплекса вопросов, положено то обстоятельство, что скорость удлинения (процентное удлинение в единицу времени) достигает максимальной величины в первые часы испытания. Определение для каждой температуры нагрева *длительной прочности*, или *предела ползучести*, как называют ту нагрузку, при которой даже по истечении бесконечно большого времени не происходит разрыва металла, представляется чрезвычайно длительным делом. Поэтому Помп, Дамеи и Эндерс (Ж 30, 31) предлагают определять наряду с *истинным пределом ползучести* также *практический*, за который принимается величина максимальной нагрузки, при которой получается определенная скорость удлинения через определенное время после начала испытания (опять-таки для определенной температуры).

Для определения *практической длительной прочности* машина для испытания на длительную нагрузку была переконструирована и были произведены исследования различных сортов стали при температурах до 500°. Пользование такой машиной при этих температурах, а при более высоких и тем более, должно натолкнуться в условиях заводской работы на значительные затруднения, вследствие того, что необходимо точно регулировать температуру. В то же время сле-

дует полагать, что для производственных условий подойдет описанное Роном (К 12) приспособление для установления предела ползучести.

Аппарат схематически изображен на рис. 73. Испытуемый образец в виде стержня *C* служит одновременно регулятором температуры: при помощи укрепленного на нем упора *G* и пружинной пластинки *D* стержень управляет контактом *b*, который включает или выключает обмотку печи через реле *H*. Нагревающая обмотка находится внутри печи *A*. Испытуемый образец нагружается грузом *L*. Температура в печи регистрируется самопишущим термометром *K* при помощи термоэлемента *I*.

При какой-нибудь определенной нагрузке (до тех пор, пока образец нагружен ниже предела ползучести) температура поддерживается стержнем на одном уровне. Если же нагрузка превышает предел ползучести для данной температуры, то стержень вытянется и выключит при этом печь. Температура будет понижаться до тех пор, пока явление ползучести не прекратится, т. е. когда нагрузка будет соответствовать границе ползучести.

По указаниям Рона можно либо начать испытание при такой температуре, когда взятое усилие вызовет напряжение, вне всякого сомнения, выше предела ползучести, и постепенно и медленно можно опускаться к температуре, отвечающей отсутствию ползучести для данной нагрузки. Такая кривая изображена на рис. 74. Черные кружки относятся к опытам, при которых стержень сначала был нагружен более высоким напряжением и после некоторой деформации пришел в равновесное состояние. Светлые кружки относятся к опытам, когда нагрузка сначала была ниже предела ползучести; после этого температура повышалась до тех пор, пока при установленном напряжении не наступала ползучесть. Испытываемые стержни предварительно отжигались при температуре 1050°.

Можно также начать с температуры, ниже необходимой для появления ползучести при данном напряжении и повышать температуру, примерно на 20° через каждые 24 часа, пока не наступит явление ползучести. Этот прибор не требует ухода и имеет то преимущество, что с его помощью можно в относительно короткое время определить

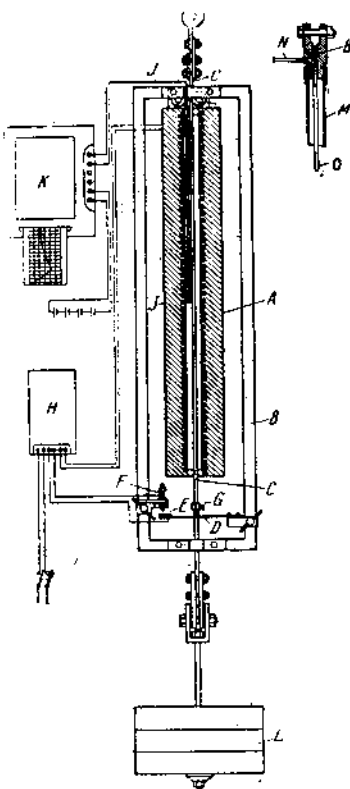


Рис. 73. Аппарат для определения предела ползучести (Рон, К 12).

истинный предел ползучести. Оба описанных метода испытания дают в результате различные значения для предела ползучести, так что можно говорить о нижнем и верхнем пределах. Нижнее значение соответствует достижению установившегося состояния сверху, т. е. более высокая предварительная нагрузка уменьшает прочность материала.

К сожалению, цифровые данные, полученные этим способом, кроме тех, которые указаны при описании аппарата (Рон, К 12), автору неизвестны.

Из трудов Леблея могут быть сделаны такие выводы:

1) Повидимому, предел ползучести зависит от площади сечения испытуемого материала; при диаметре проволоки менее 1,5 мм предел ползучести значительно понижается.

2) Для исследованного им сорта нихрома при температуре выше 900° предел ползучести ниже 35 г/мм^2 .

Обычно при установлении размеров деталей напряжения берутся с некоторым запасом прочности. Для учета описанного здесь явления ползучести соблюдение такого коэффициента прочности усложняется вдвойне: с одной стороны, потому что абсолютные величины предела ползучести так малы, что конструкции, выполненные даже без коэффициентов прочности, получаются тяжелыми и дорогими, а, с другой стороны, потому что условия надежности требуют, чтобы была преду-

смотрена возможность повышения температуры и за пределы рабочей температуры, а предел ползучести сильно понижается с увеличением температуры.

д) Нечувствительность материала к грубому обращению

Вполне понятно, что нечувствительность материала к грубому обращению не может быть выражена в цифрах. Некоторые заключения можно вывести на основании величин, характеризующих механическую прочность материала. Точно так же, как и для всей печи, в отношении отдельных строительных материалов должно быть признано, что их с трудом удается изготовить достаточно надежными.

Особенную роль играет прочность (в указанном смысле) для металлических конструктивных деталей: вспомним хотя бы загрузочные приспособления. Тем не менее, едва ли удастся довести прочность печей до того предела, когда можно будет отказаться от требования обслуживать электропечи так же тщательно и осторожно, как и любую машину.

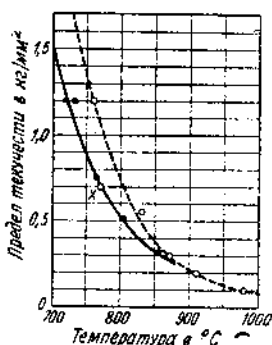


Рис. 74. Предел ползучести нихрома (Рон, К 12).

е) Минимальное старение материалов

Особенное значение это свойство имеет для неметаллических сопротивлений. Если же здесь все-таки упоминается об этом, то лишь потому, что не исключена возможность изменения некоторыми металлическими строительными материалами с течением времени своих свойств, независимо от химических реакций, в которые вступает внешняя поверхность материала. Литературные данные по этому вопросу автору неизвестны.

г) Легкая обрабатываемость

Многие материалы, считающиеся жароустойчивыми, относительно тверды и потому трудно обрабатываются.

Наиболее часто применяемые нихромовые сплавы подвергаются обработке путем пластического деформирования в холодном и в горячем состоянии, и могут свариваться при помощи электричества как по способу сопротивления, так и дуговой сваркой. При дуговой сварке необходимы электроды из того же материала, который подлежит сварке. Удастся также и автогенная газовая сварка, причем необходимо работать либо нейтральным (данные фирмы Крупн и Шеллер-Блекман), либо слабо окислительным пламенем (данные фирмы Герееус).

Данные о сопротивлении разрыву различных материалов в холодном состоянии, с которым обрабатываемость в известной степени, связана, сведены в таблицу 12.

Таблица 12

Фирма	Материал	Химический состав материала					Сопротивление разрыву кг/мм ²
Герееус	В В 7 М С ₀	Плавильные в вакууме	15 Cr	61 Ni	20 Fe	4 Mn	60
			15 Cr	60 Ni	16 Fe	2 Mn ; 7 Mo	80
			20 Cr	73,5 Ni	1,5 Fe	3 Mn ; 2 Mo	75
Крупн	NCT 3 NCT 6 NCT 8		25 Cr	20 Ni	65 Fe		68
			20 Cr	60 Ni	20 Fe		65
			20 Cr	78 Ni	2 Fe		63
Шеллер-Блекман	R 40 R 60		23 Cr	35 Ni	0,25 C	остальное Fe	60—80
			15 Cr	60 Ni	0,25 C	остальное Fe	

г) Коэффициент теплового расширения

Для металлов, предназначенных для конструирования печных деталей, это свойство играет особенно большую роль. Существующие методы испытаний для производственных условий мало пригодны и описаны, например, у Гейгер-Шеель (К 13). В таблице 13 приведены

величины коэффициента теплового расширения для некоторых материалов.

Таблица 13

Фирма	Материал	Тепловое расширение в % на 1°С
Геркус	В	14×10^{-6}
	В 7 М	13×10^{-6}
	С ₀	15×10^{-6}
Крупн	NCT 3	$18,5 \times 10^{-6}$
	NCT 6	$16,5 \times 10^{-6}$
	NCT 8	$17,1 \times 10^{-6}$

О величине теплового расширения железо-никелевых сплавов, также имеющих применение в конструкциях печей, сказано у Гименца (К 14).

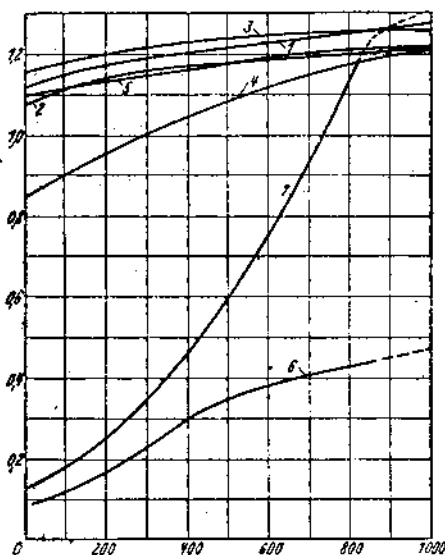


Рис. 76. Удельное электрическое сопротивление (б мкм²/м) (ордината) в зависимости от температуры (°С) (абсцисса).

Материал: 1 — Геркус В, 2 — Крупн NCT 3, 3 — Геркус В 7 М, 4 — Крупн NCT 6, 5 — Геркус С₀, 6 — никель-марганец (Геркус); 7 — электролитическое железо.

h) Удельное электро-сопротивление

Вполне понятно, что электрическое сопротивление имеет значение только для материала нагревательных элементов. Для того, чтобы уменьшить влияние переходных сопротивлений, рекомендуется при измерении сопротивления пользоваться кусками материала большой длины. Особенно нужно следить за тем, чтобы слой окисла в месте соединения с источником тока был тщательно удален. Как видно из раздела «Расчет» (стр. 77), вес материала нагревательных элементов тем меньше, чем ниже удельное сопротивление. Поэтому вполне естественно стремиться к возможно малым удельным сопротивлениям.

Однако для малых и средних печей при низком удельном сопротивлении нагревающих элементов сечение проволоки будет малым, и одновременно увеличится длина проволоки, подлежащей помещению в электропечь, так что по этой причине для малых печей

желательно применять материал с высоким удельным сопротивлением. Думать о том, какое удельное сопротивление выгоднее — малое или большое — можно только при печах с температурами до 600, максимум 700°. При более высоких температурах срок службы имеет настолько существенное значение, что все другие вопросы отступают на задний план. Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры для ряда наиболее употребительных материалов, идущих на изготовление нагревательных элементов, представлена на рис. 75. Очень сильное повышение электросопротивления никеля с повышением температуры дает возможность создавать при помощи этого материала так называемые саморегулирующие приборы, которые дают почти постоянный расход мощности при очень сильных колебаниях напряжения.

й) Температурный коэффициент электросопротивления, равный нулю или положительный

И это свойство, вполне естественно, имеет значение только для нагревательных элементов. Значение температурного коэффициента косвенно может быть выведено из рис. 75. Отрицательный температурный коэффициент представляет для печей такую опасность: при колебаниях напряжения и обуславливаемых ими временных повышениях температуры печь при отрицательном температурном коэффициенте может перегореть. Если температурный коэффициент сопротивления положительный, то печь в большей или меньшей мере саморегулируется (никель). В этом случае печь может быть оборудована самыми небольшими переключающими приборами, потому что при увеличении нагрева печи расход тока автоматически понижается. Когда регулятор начинает работать, расходование тока печью значительно меньше, чем вначале, и таким образом то, что достигается обычно при помощи сложных схем, при большом положительном температурном коэффициенте происходит само собой.

к) Легкость изготовления

Разнообразие изготавливаемых типов печей и обуславливаемая этим неуверенность в их качестве делают весьма желательным получение тех материалов, которые оказались удачными, того же химического состава и с теми же свойствами. При чрезвычайном влиянии небольших изменений в составе сплавов тщательность изготовления этих материалов играет очень большую роль, и потому особенно рекомендуется очень осторожно выбирать поставщиков этих материалов. Способ изготовления, вполне естественно, также играет большую роль; так например, плавка под вакуумом, вследствие возможности удаления поглощенных металлом газов, дает некоторую гарантию равномерности и правильности требуемого состава сплава.

В качестве иллюстрации значения точного соблюдения определенного состава сплава укажем на работу Грубера (К 15), описывающего

устойчивость жароустойчивых сплавов по отношению к сере. В качестве мерила действия серы было принято увеличение веса отдельных образцов после одночасового действия сероводорода. При 1000°, например, получены следующие результаты: на один сплав (20% Fe; 61% Ni; 15% Cr; 4% Mn) сероводород оказывает действие, принятое за 100%. На подобный ему сплав (19% Fe; 58% Ni; 14% Cr; 4% Mn; 5% Al) действие равно 50%, а третий сплав (18% Fe; 56% Ni; 13% Cr; 4% Mn; 9% Al) показал только 3%.

Из различных опытов, произведенных фирмой Гереус, видно, что термическая обработка, которой подверглись жароустойчивые металлы, также несколько влияет на их свойства [смотри Рон, (К 12) — о влиянии на предел ползучести: Гименц (К 14) — о влиянии на удлинение].

В НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Из неметаллических материалов, идущих на изготовление нагревательных элементов, находит применение исключительно силит, употребляемый обычно в виде стержней. Следует отметить, что требования, предъявляемые к этому материалу, заранее в значительной мере не могут быть выполнены, а по существу своему они идентичны тем, которые предъявляются к металлическим сопротивлениям (стр. 125).

а и б) Устойчивость по отношению к атмосфере печи и к опорным материалам при рабочей температуре

По указаниям предприятий, изготовляющих силитовые сопротивления, последние, прежде всего, разрушаются щелочами, окислами железа, меди и тяжелых металлов. Точно также в реакцию с силитом легко вступают силикаты и сульфаты. По поводу воздействия на силит газов сведения расходятся: например, нет определенных указаний на то, действуют ли на силит окись углерода, уголекислота, а также кислород или воздух.

с) Механическая прочность

Вследствие наличия токоподводящих частей в силитовых стержнях возникают механические напряжения: в тех местах, где концы стержней значительно усилены сравнительно с собственно нагревающей частью, при малейшей трудно устранимой несимметричности возникают изгибающие напряжения; в тех местах, где для достижения хорошего контакта прижимаются контактные наконечники, в материале стержня могут легко возникнуть напряжения продольного изгиба. Мы не располагаем числовыми данными о прочности силита; впрочем, знание этих величин не имеет большого значения,

потому что величина возникающих напряжений не может быть установлена. На основании опыта мы можем только сказать, что в случае применения стержней силита в качестве нагревательных элементов, он нагружается почти до пределов его прочности: нормальные напряжения силит выносит вполне удовлетворительно, но даже незначительная несимметричность в укреплении стержней может повлечь за собою самые нежелательные последствия.

д) Нечувствительность к грубому обращению

Изготавливаемые в настоящее время силитовые стержни в этом отношении оставляют желать очень многого; следовательно, при обращении с этими нагревательными элементами надо проявлять чрезвычайную осторожность.

е) Минимальное старение

Не говоря о преждевременной поломке силитовых стержней, причиной непригодности силита в большинстве случаев является увеличение его сопротивления. Это старение иногда наступает по всей длине стержня, а иногда даже неравномерно. В чем состоит сущность явления старения — в окислении, кристаллизации, обжиге или диссоциации — еще не выяснено. Точно также неизвестно, какие причины практически влияют на срок службы в эксплуатации.

В общем, можно считать увеличение сопротивления после 1000—2000 часов работы, примерно, на 30% при 1300—1400° и на 15% при 900°.

Сопротивление увеличивается до названных пределов не по идентичным кривым; при одних обстоятельствах материал стареет больше всего в первые часы работы, при других — постепенно.

Для того, чтобы дольше использовать стержни, нужно иметь возможность повышать напряжение по мере старения сопротивлений. Пределы такого повышения напряжения неизвестны; мнения по вопросу о том, можно ли путем длительной подрегулировки напряжения практически увеличить срок службы сопротивления за пределы некоторой величины, расходятся. При исключительно благоприятных условиях может быть получено только половинное увеличение сопротивления за единицу времени.

ф) Легкая обрабатываемость

Это свойство силитовых стержней для конструктора печей не играет роли, потому что сопротивления получают от поставщика в готовом к установке виде.

г) Малый коэффициент теплового расширения

Коэффициент теплового расширения силитовых нагревательных элементов вследствие необходимости конструировать соединения с токоподводящими частями, имеет большое значение. Чем меньше линей-

ное расширение, тем надежнее может быть выполнен контакт. С другой стороны, некоторые конструкции требуют большого линейного расширения (близкого к расширению металлов), т. е., чтобы силитовый стержень расширялся в тех же пределах, как и металлическая соединительная деталь.

h) Удельное сопротивление

Силит при применении одних и тех же исходных материалов может иметь самое различное удельное сопротивление (стр. 88).

i) Температурный коэффициент сопротивления

Силит имеет отрицательный температурный коэффициент, однако путем соответствующей химической обработки этот недостаток может быть устранен. Силит (производства Сименс-Планья) изменяет свое сопротивление в зависимости от температуры согласно следующего уравнения

$$\frac{R}{R_0} = 1 - 7,95 \times 10^{-4} \theta + 3,15 \times 10^{-7} \theta^2, \quad (38)$$

где R_0 — сопротивление в холодном состоянии.

Силитовые стержни «Глобар» (производства германских карборундовых заводов) имеют небольшой положительный температурный коэффициент.

к) Легкое изготовление

Это свойство должно очень интересовать и конструктора и производственника, работающего с электропечью. К сожалению, техника изготовления силита и в этом отношении не очень далеко ушла вперед. Сопротивление силита в холодном состоянии показывает колебания до 1000%¹. Сопротивление в горячем состоянии гарантируется с точностью до 10%.

Если один из стержней преждевременно разрушается — по причине ли небрежного, неосторожного обращения или вследствие недостатков материала, то в большинстве случаев подлежат замене все стержни, и по крайней мере стержни одной группы (равномерное распределение температуры), так как вновь установленный стержень будет иметь значительно меньшее сопротивление, чем бывшие в употреблении. Можно было бы попытаться подвергнуть новый стержень искусственному старению на основании данных о сопротивлении поломанного стержня, однако в этом случае нет никакой уверенности,

¹ Это число выглядит гораздо неблагоприятнее, чем оно есть в действительности: силит обладает отрицательным температурным коэффициентом и потому в горячем состоянии поглощает значительно больше энергии, чем в холодном, так что с повышением температуры различие сглаживается. Так как расход тока горячих стержней гораздо больше, чем холодных, то даже значительные расхождения в холодном состоянии не влияют на расчеты токопроводящих проводов.

что дальнейшее старение будет происходить по закону той же кривой, что и других стержней.

С. КЕРАМИЧЕСКИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При постройке печей, кроме металлов, используются также керамические материалы, разделяемые по области их применения на три группы:

1) строительный материал в узком смысле слова, т. е. употребляемый на кладку стенок печи (внутри, а иногда и снаружи), а также в местах больших механических нагрузок;

2) тепловая изоляция;

3) электрическая изоляция.

Некоторые материалы пригодны для каждого из этих применений; обычно же каждому назначению соответствуют свои материалы.

В качестве строительного материала, в первую очередь, применяется шамот, затем стеатит и стеатитообразные массы.

В качестве теплоизоляции применяются кизельгуровые изделия, стеклянная и шлаковая вата, магнезия, асбест, а также искусственные материалы на основе этих материалов.

И, наконец, в качестве электроизоляционных материалов применяются в первую очередь стеатит и ему подобные массы, а также шамот.

Кроме того, употребляются обычные электротехнические изоляционные материалы (бакелитовые и т. п. массы), используемые для наружных частей печи. Однако последние материалы не описаны в этой книге, потому что к ним не предъявляется никаких особых требований; интересующихся этими материалами мы отсылаем к соответственной литературе.

1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНСТРУКЦИЮ ПЕЧЕЙ И ИСПЫТАНИЕ

а) Механические свойства

а) Прочность. В первую очередь имеет значение сопротивление сжатию, а также разрыву, причем последнее рассматривается в связи с вопросом об устойчивости при переменных температурах.

Числовые величины, характеризующие прочность, вполне естественно, зависят от температуры, при которой производится испытание. Однако, помимо температуры, весьма значительную роль играет также время. (Ж 33; Г. Гирш, Ж 34). Ниже речь идет о явлении так называемого размягчения под давлением, чрезвычайно похожего на описанное в предыдущем разделе явление ползучести металлов. Если керамическое изделие нагрузить при определенной температуре какой-либо тяжестью, значительно меньшей, чем разрушающая нагрузка при этой температуре, то при более или менее длительном испытании получится остающееся изменение размеров. Это испытание

производится в нормальной машине для испытаний на сжатие при повышенных температурах.

Известны три различных метода производства испытания (Гирш, Ж 34 и 35).

1. При постоянном давлении температура медленно повышается и, в конце концов, достигается та температура, при которой наступает разрушение образца (Герм. индустр. нормы ДИН 1064) (рис. 76).

2. Температура поддерживается постоянной, а давление медленно повышается до начала разрушения образца.

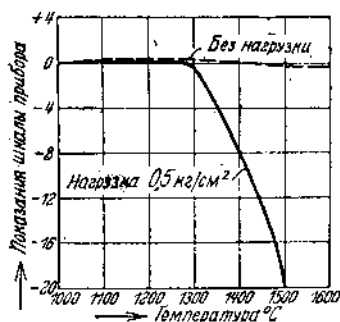


Рис. 76. Исследование размягчения под давлением (материал супердаа) (Каммерер, Ж 51).

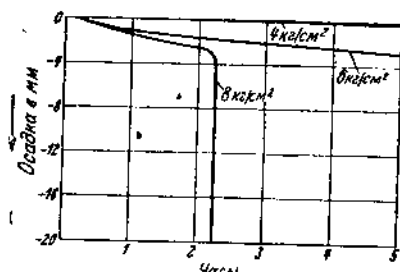


Рис. 77. Исследование размягчения под давлением (при постоянном давлении и постоянной температуре) в зависимости от времени; высота образца 50 мм.

3. Температура и давление поддерживаются постоянными и наблюдается изменение длины в течение большого периода времени. Для сравнения следует определить изменение длины в ненагруженном состоянии при тех же температурах; разница показывает влияние нагрузки (рис. 77).

Первые два метода не дают правильной картины, так как условия нагрузки при работе печи в большинстве случаев соответствуют третьему методу, и до настоящего времени неизвестно достаточно точного способа перерасчета результатов, полученных по методам 1 и 2, на практические условия работы материала. Третий метод, ставящий материал в условия практической работы, страдает большой продолжительностью опыта. В противоположность металлам в данном случае нельзя выносить заключение об условиях длительной работы по изменению формы в течение первых часов опыта. Следующие цифры, полученные в лаборатории керамической промышленности, могут иллюстрировать это обстоятельство:

Материал: фабрикат из обожженного кизельгура (Johns Monville).

Сопротивление сжатию в холодном состоянии и при 1185°C: 39 кг/см².

Испытание на размягчение при сжатии — см. рис. 77.

Производство таких опытов в течение необходимого времени связано с очень большими затруднениями, потому что при этом требуется непрерывное наблюдение. Тем не менее представленные кривые показывают, что при небольших нагрузках и относительно невысокой температуре в некоторых случаях даже через несколько часов начинается деформация. Чтобы иметь возможность практически использовать результаты этого метода исследования, было бы желательно произвести возможно более продолжительные опыты для ряда температур.

В действительности можно будет нагружать материал только частью той нагрузки, при которой даже в конце опыта не оказалось никакой деформации.

В проспектах предприятий, изготавливающих керамические и изоляционные материалы, всегда указывается сопротивление сжатию в холодном состоянии; однако, если прочность какого-либо материала интересует конструктора печи, то значение для него имеет только та нагрузка, которую данный материал безболезненно выдерживает в условиях длительной эксплуатации при рабочей температуре. При этом следует указывать допустимую величину деформации, рабочую температуру и время наблюдения. Нужно, например, требовать, чтобы нагрузка при температуре в 1000° в течение, допустим, x часов не вызывала сжатия, большего чем на 1% высоты образца. Всякий же расчет прочности, основанный только на величинах показателей прочности в холодном состоянии, вполне понятно, совершенно ненадежен и бесполезен.

Насколько автору известно, до настоящего времени опытов на размягчение при растяжении не производилось. Для деталей загрузочных приспособлений, подвергающихся растягивающим усилиям, такие определения были бы интересны. Для характеристики материала в отношении сопротивляемости действию переменных температур сопротивление размягчению при растяжении не будет иметь большого значения, потому что при быстрых переменах температуры не может возникнуть сколько-нибудь длительное растягивающее напряжение.

β) *Твердость*. От прочности нужно отличать твердость материала, которая играет при постройке печей значительную роль в тех, например, случаях, когда следует ожидать значительного износа, хотя бы при применении транспортных приспособлений. Кроме того, применение мягкого материала сопряжено с трудностями. В качестве меры твердости может служить шкала твердостей Моора. Последняя, как известно, недостаточно проработана, и, кроме того, при применении ее к керамическим изделиям возникают некоторые затруднения, так как, вследствие их пористости, не всегда может получиться достаточно ясная картина. Возможно также испытание твердости керамических материалов шариковой пробой по Бринелю (Ж 36).

γ) *Хрупкость* материала выражается в отскакивании углов и ребер при относительно небольших толчках и ударах. Хрупкость можно приблизительно характеризовать динамическим сопротивлением

изгибу. Испытанию подвергается круглый образец, причем он производится на маятниковом копре. Измеряется работа удара, необходимая для разрушения образца, и по ней рассчитывается ударное сопротивление изгибу на 1 см^2 . Сравнимыми являются только результаты испытания стержней, приблизительно равных диаметров и точно равных по длине. Для того, чтобы определить ударное сопротивление изгибу в зависимости от температуры, можно было бы производить испытания на приборе, помещенном в печь, однако такого рода приспособление до настоящего времени не применялось по причине, как мы полагаем, экспериментальных затруднений.

б) *Истирание*. Многие керамические части печей подвержены истиранию, причем не только части загрузочных приспособлений, но даже и части стенок печи, трущиеся одна об другую вследствие попеременного расширения и сжатия при нагревании и охлаждении. Под печи и аналогичные части сильно истираются вследствие частого передвижения изделий по их поверхности. Обычно истирание увеличивается с величиной пор, т. е. с крупностью строения материала. Для испытания пользуются либо богемской шлифовальной машиной, в которой образец истирается на стальном диске, вращающемся с определенной скоростью, причем нажим образца на диск поддерживается постоянным и добавляется наждак. Определяется уменьшение веса после определенного времени. Можно производить испытание также путем действия на образец нормальных размеров в продолжение известного времени струей песка под определенным давлением и установить потерю веса (г/см^2). Наконец, можно применить испытание барабанной пробой (Ж 36; Дунге-Берль, К 17).

в) *Объемный вес*. Известно, что большинство керамических материалов в широком смысле слова более или менее пористы. Величина и форма пор имеют исключительно большое влияние на свойства керамических материалов. Часть пор проходит через все тело, соединяясь между собой, другая часть пор образует замкнутые пустоты. Под пористостью понимают отношение объема пор к объему всего тела, причем различаются истинная и кажущаяся пористость, в зависимости от того, учитываются ли все или только открытые поры. Удельным весом называется вес единицы объема сплошного керамического материала. Для определения удельного веса (а вместе с тем и пористости) образец необходимо размолоть в очень мелкий порошок и определить его удельный вес пикнометрическим методом, что можно выполнить достаточно тщательно только в лаборатории.

В противоположность удельному объемным весом называется вес единицы объема керамического материала в рабочем состоянии; он, вполне естественно, очень колеблется в зависимости от пористости и может быть определен простым взвешиванием.

Абсолютное значение удельного веса различных керамических материалов колеблется в очень небольших границах: приблизительно от 2000 до 4000 кг/м^3 , в то время как объемный вес изменяется в пределах между 250 и 3500 кг/м^3 .

В соответствии с кажущейся пористостью находится так называемая водопоглотительная способность, нас, однако, не интересующая, и затем газопроницаемость, к которой мы вернемся ниже. На все эти свойства влияет не только пористость, но и абсолютная величина отдельных пор (Каммерер, К 18). Так называемые плотно обожженные массы при равной пористости (одинаковый объемный вес) ведут себя совершенно иначе, чем пористо обожженные.

Понятие объемного веса теряет свой смысл при сыпучих или слоистых материалах, поскольку не указывается степень утрамбовки, так как в зависимости от того, насколько сильно спрессовываются эти материалы, изменяется и их объемный вес.

с) *Газопроницаемость*. Для всех печей, внутри которых искусственно поддерживается определенная атмосфера, газопроницаемость материалов, примененных для внутренней стенки печи, играет значительную роль. Она выражается числом кубических сантиметров воздуха на квадратный сантиметр поверхности образца, проходящих сквозь образец определенной толщины, например, (1 см).

г) *Гигроскопичность* керамических материалов тесно связана с их пористостью, так как открытые поры, объем которых определяет кажущуюся пористость, могут наполняться водой. Поэтому их объем называют также водопоглотительной способностью. Определяется она погружением образца в воду и установлением поглощенного количества воды.

д) *Постоянство размеров*. Постоянство размеров керамических материалов значительно меньше, чем у металлических, вследствие усадки (усадка происходит и при сушке, и при обжиге керамических материалов). Постоянство размеров имеет очень большое значение, потому что большие колебания в размерах керамических деталей требуют при установке их на место дополнительной обработки, так как тонкие швы в печной кладке значительно улучшают ее качество. Эта обработка должна производиться при помощи машин, в большинстве случаев путем шлифовки.

Отнюдь не рекомендуется шлифовать в помещении механического цеха, потому что от неизбежно поднимающейся при этом пыли страдают находящиеся в цехе машины; следовательно, керамические детали необходимо изготавливать по возможности таким образом, чтобы не было необходимости в дополнительной их обработке.

и) *Отсутствие утряски*. Это свойство имеет значение прежде всего для порошкообразных или волокнистых материалов, применяемых для тепловой изоляции. Более или менее плотно утрамбованные материалы при сотрясениях дают утряску и в результате образуются пустоты, в значительной мере понижающие изолирующую способность материалов.

Для испытания материалов на утряску автором был применен ящик, внутри которого помещался испытуемый материал. При помощи особого механизма этот ящик встряхивался, причем падал с определенной небольшой регулируемой высоты около 5 мм. Чем меньший

вес материала на данный объем был помещен в ящик, тем более короткое время происходило оседание. Существует некоторая определенная плотность трамбовки, при которой оседание вообще не наблюдается.

Требование о помещении определенного веса сыпучего материала в данном объеме само по себе недостаточно; важное значение имеет еще равномерность трамбовки. Достижение хорошей утрамбовки, особенно при легком кизельгуровом порошке, столь затруднительно, что часто применяют хотя и более тяжелый и лучше проводящий тепло порошок, но легче поддающийся трамбовке.

б) Теплотехнические свойства

а) *Теплопроводность.* Значение теплопроводности становится ясным из раздела «Расчет». Теплопроводность различных строительных материалов в общем хорошо известна. Для правильного суждения о ней обратим внимание только на следующие пункты:

1. Следует всегда различать, к какой температуре относятся данные о теплопроводности: к средней ли или к температуре наиболее горячей поверхности. Последний род указаний, который часто встречается в литературе, за исключением немецкой, ведет к заблуждениям, так как средняя температура при данной температуре внутри печи зависит от толщины слоя материала.

2. Теплопроводность сильно зависит от температуры. [1]

3. Значительно еще распространенный взгляд, согласно которому материал изолирует тем лучше, чем он легче, не всегда соответствует действительности и может повести к грубейшим ошибкам. Даже при одинаковых исходных материалах теплопроводность зависит еще от способа переработки и главным образом от величины пор. В общем, можно сказать, что при одинаковых исходных материалах теплопроводность тем ниже, чем мельче и многочисленнее поры (Каммерер, К 18).

Определение теплопроводности относится к наиболее трудным измерениям теплотехники и едва ли может быть выполнено достаточно точно в цеховых условиях. Соответственные аппараты описаны у Каммерера (К 7), Райша (Ж 38), Шмидта и Гельхофа (Ж 39). Само измерение продолжается в большинстве случаев несколько дней и требует во все время производства опытов равномерной температуры помещения. Однако гораздо важнее установления точной цифры теплопроводности в большинстве случаев сравнение теплопроводности нескольких материалов. Такое сравнение можно удобно производить, пользуясь некоторыми типами нормальных печей. Пирани и Вангенгейм (Ж 40) предлагали для этой цели цилиндрические печи; автор же производил соответственные измерения в печи прямоугольной формы и получал таким образом достаточно точные данные для сравнения теплопроводности различных материалов. Если принять в качестве эталона какой-нибудь материал, теплопроводность которого определена

каким-нибудь научным учреждением, то путем обратного перерасчета можно с достаточной точностью вычислить теплопроводность других материалов, сопоставляя потери холостого хода нормальной печи при изоляции нормальным эталонным материалом и при изоляции материалов, подлежащим сравнению. Сравнение теплоизолирующих материалов в отношении их теплопроводности должно учитывать также стоимость этих материалов. Это требует, чтобы теоретически для каждой печи был определен наиболее экономичный изоляционный материал путем тщательных расчетов. Во избежание этих расчетов можно с достаточной точностью считать наиболее экономичным тот материал, для которого произведение $p\lambda^2 \dots p\lambda^3$ является минимальным; здесь p — цена 1 м³ материала, а λ — теплопроводность (Пашкис, Ж 41).

б) *Теплоемкость*. В условиях эксплуатации определение теплоемкости, так же, как и определение теплопроводности, редко представляется возможным. Точное определение можно произвести, например, калориметрическим методом (Шеель, К 16, стр. 429).

γ) *Тепловое расширение*. Большинство рассматриваемых материалов в ненагруженном состоянии при нагревании расширяются, в то время как недостаточно обожженные материалы при последующем нагревании часто дают дополнительную усадку. Необходимо знать кривую расширения, которую можно найти путем нагревания образца в криптольной печи и определения его длины.

δ) *Огнеупорность* материала определяется номером конуса Зегера, показавшим одинаковую с коническим образцом из испытуемого материала огнеупорность (Din 1061 и 1063). Раньше полагали, что огнеупорности следует уделять большое внимание. Однако, в настоящее время выяснилось, что последняя имеет, по сравнению с другими свойствами материала, такое же, примерно, значение, как в металлических материалах точка плавления, так как материал становится негодным для применения в печи уже при значительно более низких температурах, чем характеризующая его огнеупорность.

ε) *Нечувствительность к быстрым изменениям температуры* является одним из важнейших свойств материалов, применяемых при постройке печей. При каждом разогреве печи происходит повышение температуры, осуществить которое желательно возможно скорее. При каждом открытии печной дверцы в печь проникает струя холодного воздуха, влекущая за собою понижение температуры. Чем резче изменения температуры, тем больше опасность разрушения материала. Это происходит потому, что соседние слои материала различно расширяются вследствие различия их температур, и материал не может выдержать возникающих вследствие этого напряжений, если они превышают прочность материала. Грубо — пористые массы относительно легко сделать нечувствительными к изменениям температуры, так как возникающие напряжения на растяжение могут частично выровняться путем образования маленьких трещин, кончающихся в порах, в то время как при более плотных массах возможность такого внутреннего поглощения напряжений исключается. Однако и плотные малопористые материалы могут быть значительно устойчивее к изменениям темпе-

ратуры; это достигается в том случае, если либо вызывающие разрушение силы малы (когда мало расширение), либо противопоставляемая разрушающему усилию прочность на разрыв достаточно велика. Произвольное повышение последней в настоящее время невозможно, в то время как уменьшение расширения во многих случаях удастся. Согласно изложенному, следует опасаться разрушения материала прежде всего при тех температурах, когда коэффициент теплового расширения данного тела имеет резкое (скачкообразное) изменение.

Напряжения, возникающие вследствие разности температур, зависят также от толщины материала и его теплопроводности. Вполне понятно, что в данном случае решающую роль играет не средняя толщина, а наиболее толстые места, или, другими словами, — форма тела очень сильно влияет на чувствительность к быстрым колебаниям температуры. Следовательно, придавая надлежащую форму, например, путем устройства соответственных разгрузочных швов, можно сильно влиять на улучшение устойчивости при колебаниях температуры. При этом теплопроводность определяет, как велика может быть разность температур при заданной степени устойчивости к колебаниям температуры. Поэтому было предложено (Нортон, Ж 42) в качестве мерила чувствительности к колебаниям температуры (свойство, обратное устойчивости при колебаниях температуры) применить следующее выражение:¹

$$\text{Чувствительность к колебаниям температуры} = \frac{\text{линейный коэффициент теплового расширения}}{\text{теплопроводность и сопротивление скручиванию}}$$

Согласно опытам Нортон, число охлаждений в зависимости от приведенного выражения представляет собою гиперболообразную кривую. Однако этот показатель устойчивости при колебаниях температуры не получил еще общего признания.

Так как числового измерителя для определения устойчивости при колебаниях температуры нет, то опыты могут дать только сравнительные величины; поэтому рекомендуется производить опыты над образцами, одинаковыми по форме с изделиями из них; в противном случае надо быть очень осторожным при пользовании на практике результатами испытаний.

Германские индустриальные нормы (1068) предусматривают испытания материалов или в виде кирпича нормальных размеров, или в виде цилиндров.

При испытании кирпича нормальных размеров три кирпича укладываются одним концом в печь и нагреваются до температуры 950°. Эта температура поддерживается в печи в продолжение 1 часа, после чего образцы охлаждаются в течение 3 мин. в проточной воде; по окончании выделения пара на воздухе образцы нагреваются снова и т. д. Испытание считается законченным, когда отскочит не менее 50%

¹ Реферат Филиппа, Ж 43, к которому приложен подробный литературный указатель.

углов, подвергавшихся этим непрерывным колебаниям температуры. Германскими индустриальными нормами скорости повышения температуры; а также скорости охлаждения не нормированы (не указаны температура воды и скорость охлаждения). Если этот метод испытания желательнее применить для сравнения различных материалов, то рекомендуется установить одинаковую скорость повышения температуры печи, а также прочие указанные условия испытания.

При втором способе испытания в качестве образцов применяются сплошные цилиндры стандартных размеров, которые, в противоположность нормальным кирпичам, нагреваемым только с одного конца, подвергаются нагреву целиком. Нагрев продолжается 15 мин., а охлаждение — 3 мин. Однако в течение этого времени нагрева во многих материалах не удается выровнять температуру, поэтому рекомендуется производить нагревание дольше. Характеристикой материала служит число охлаждений до разрушения образца. При одном и том же материале это число обычно больше, чем определенное при испытании нормального кирпича.

Автор неоднократно проделывал опыт над цилиндрами с той, однако, разницей, что вместо сплошных цилиндров применял полые. Последние подвешивались в печи на тонких проволоках и с помощью этих же проволок удалялись из печи для полного охлаждения в воздухе. При отсутствии такой подвески, уже от одного прикосновения прибором для вытаскивания может произойти преждевременное охлаждение и механическое повреждение образца.

Следует еще раз отметить, что форма тела и условия испытания должны по возможности соответствовать условиям практической службы. Так, например, в качестве охлаждающего вещества (воздух или вода) необходимо избирать то, которое соответствует нормальным условиям работы, потому что результаты испытания при применении одного из этих охлаждающих веществ могут значительно отличаться от результатов испытания при другом охлаждающем веществе.

с) Х и м и ч е с к и е с в о й с т в а

а) *Реакции с материалом нагревательных элементов* стр. (128—129).

б) *Сопrotивляемость действию шлака* в рассматриваемых здесь печах играет сравнительно незначительную роль, в то время, как в соляных ваннах сопротивляемость действию солей имеет очень большое значение.

Испытание на действие солей может быть произведено способом, подобным испытанию на действие шлака. В нормальном кирпиче высверливается отверстие, в которое или наливается жидкая соль или в котором расплавляется соль. По истечении некоторого времени действия соли камень расширяется по диаметру углубления и определяется величина площади сечения камня (см²), в пределах которой материал кирпича вступил в реакцию с солью.

д) Электрические свойства

а) *Изоляционная способность.* Описываемые в дальнейшем материалы представляют собою плохие проводники электричества¹.

Изолирующая способность в большинстве случаев используется как сопротивление изоляции, при определении которого следует обращать внимание на то, чтобы сопротивление измерительных приборов соответствовало измеряемому сопротивлению. Помимо трудностей, обуславливаемых выбором инструмента, само конструирование установки для измерения электросопротивления при высоких температурах требует особенного внимания в отношении способов подвода тока. Соединение электрода с образцом должно быть настолько плотным, чтобы не могли возникнуть сколько-нибудь значительные переходные сопротивления. Заблаговременное укрепление контакта (примерно в форме пружинящего зажима) не дает результата, так как клемма и образец обычно имеют различные коэффициенты удлинения, которые влекут за собою при повышении температуры ослабление хорошего контакта. Достаточно плотного контакта пытаются достичь, например, тем, что один из электродов берется очень тяжелый. При помощи этого электрода образец прижимается к подложенному под него второму электроду.

б) *Электролиз.* Керамический материал печи в большинстве случаев находится под некоторым напряжением, которое вызывается электрическим оборудованием печи, так что не исключена возможность разрушения материала электролизом. Однако каких-либо определенных сведений по этому поводу в распоряжении автора нет.

2. ОБЗОР КЕРАМИЧЕСКИХ ПЕЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ниже описаны некоторые керамические материалы, которые применяются при постройке электропечей. Лучше всего при рассмотрении сгруппировать их согласно области их применения. Поэтому опишем последовательно:

- а) огнеупоры,
- б) полугогнеупорные и теплоизоляционные материалы,
- в) электроизоляционные строительные материалы.

а) О г н е у п о р ы

Наиболее широкое применение получил шамот, в некоторых же случаях, при больших нагрузках, употребляются богатые окисью алюминия материалы, как силлиманит или муллит. Ниже приводятся свойства двух сортов шамота и одного сорта муллита марки «DTS эдель-муллит».

¹ Правда, проводимость этих материалов значительно увеличивается с повышением температуры.

Таблица 14

Показатели	Шамот марки «Максисал»	Шамот марки «Протос»	DTS эдельмуллит
Сопротивление сжатию при нормальной температуре (кг/см ²)	200—250	130	750—1 500
Размягчение под давлением: T_a	1 405	1 470	1 600
T_{40}	1 650	1 625	1 800
Удельный вес (кг/дм ³)	2,6	2,6	—
Объемный вес (кг/дм ³)	1,95	1,87	2,08—2,4
Пористость (объемный процент)	25	28	—
Постоянство размеров (%)	±0,75	±2	—
Водопоглощение (весовой процент)	11	13	12,8—2,0
Теплопроводность ² (кал/ч, °C, м)	см. рис. 78	—	—
Удельная теплота (кал/°C, кг)	„ „ 78	Обычно сжата	0,2—0,22
Огнеупорность (конус Зегера)	33—34	34	—
„ (°C)	1 730—1 750°	1 750°	—
Нечувствительность к колебаниям температуры (число охлаждений)	70	40	60—2

в зависимости
от объема.
вес. а

б) Полужелезные пористые и теплоизоляционные материалы

а) *Материалы, применяемые при температурах от 400 до 600°C.*
Для указанной области температур находят применение асбестовые и магниевые материалы. Наряду с ними в качестве уплотняющего материала употребляется шлаковая вата и реже стеклянная вата. Наконец, отметим еще воздушную изоляцию, которая, правда, еще не получила сколько-нибудь значительного применения при постройке печей, главным образом вследствие трудности монтажа по сравнению с другими методами изоляции. Большое преимущество такой изоляции — малая теплоемкость — не имеет того значения (учитывая массу печи, загрузочных приспособлений, изделий и т. д.), какое придается ей при изоляции, например, труб. О воздушной изоляции писали Шмидт (Ж 45) и Каммерер (Ж 46, К 7).

Прочность изоляционных материалов для низких температур невелика. Однако это свойство не имеет особенно большого значения, так как каркас печи во многих случаях может быть изготовлен из

¹ Данные о размягчении под давлением следует понимать таким образом: под T_a подразумевается температура, при которой начинается размягчение, а под T_{40} — температура, при которой осадка достигает 40%.

² Теплопроводность огнеупорного кирпича в значительной мере зависит от структуры. Исследования по этому поводу произведены Эссером, Зальмангом и Шмидт-Эрих-гаузенем (К 19, см. также Э. Шмидт, К 20).

³ Штейнгоф (Ж 44) прекрасно описал происхождение, изготовление и обработку извергура, уделяя особенное внимание легким огнеупорам. Литература указана в перечисленной.

стали. При некоторых условиях можно даже сделать из них внутреннюю стенку печи. Изоляция из изоляционных плит практически всегда может выдерживать собственный вес, так что ее надо только сделать достаточно прочной с наружной стороны путем штукатурки. Так как внешние стенки испытывают невысокие температуры, то выполнение достаточно прочной штукатурки не представляет никаких затруднений.

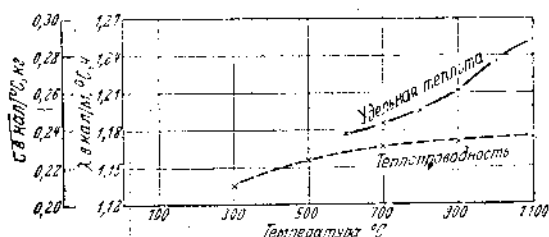


Рис. 78. Теплопроводность и удельная теплота шамота (Максималь).

Нижеприведенная таблица 15 дает представление о свойствах некоторых, наиболее употребительных изоляционных материалов этой группы.

Таблица 15

Материал	Объемный вес (кг/м³)	Максим. рабочая температура (°C)	Уд. теплота на объемную единицу (ккал/м³ °C)	Постоянство размеров (%)
Магнезиальные пластины (85% MgO)	140	300	336	2
Пластины диамаг	250	500	600	2
Перелит	260	600	672	—
Лямбда	300	300	660	—
Шлаковая вата	260	1	572	—

Теплопроводность различных материалов следует взять по данным рис. 79. Теплоемкость в общем можно принять равной от 0,22 до 0,24.

¹ Предел применимости шлаковой ваты оспаривается и в значительной мере зависит от тщательности изготовления. При определении предела применимости следует иметь в виду не только прочность самой шлаковой ваты, но также и то, что многие сорта ее при более высоких температурах способны вступать в реакцию с металлами, а при некоторых обстоятельствах способны разрушаться, вследствие выделения газов. Следующим недостатком шлаковой шерсти является ее особенно сильная гигроскопичность, а чрезвычайным ее преимуществом — очень легкий и по сравнению с кизельгуровым порошком — аккуратный монтаж. Об изготовлении шлаковой шерсти см. Гуттманн (Ж. 47) о применении — см. Боландер (Ж. 48), в частности при высоких температурах — (см. Гюнтер (Ж. 49).

Отметим, что материал лямбда представляет собою смесь асбеста с гипсом, а диамаг является магнизиальным продуктом. Все пластинчатые материалы, т. е. все упомянутые в таблице 15 изоляционные средства, за исключением шлаковой ваты, которую надо трамбовать, так мягки, что их можно резать ножом. Обработка их поэтому

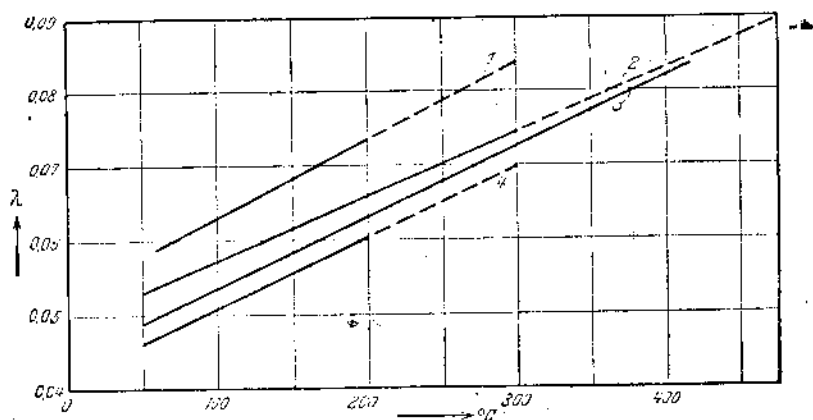


Рис. 79. Теплопроводность λ (кал/м, °С, ч) изоляционных материалов, применяемых при температурах до 600° (по указаниям поставщиков).
1 — материал лямбда; 2 — пластины диамаг; 3 — шлаковая вата, 4 — магнизиальные пластины.

очень легка. Можно также, конечно, применять изоляционные смеси, употребляемые в размоченном состоянии как при изолировке

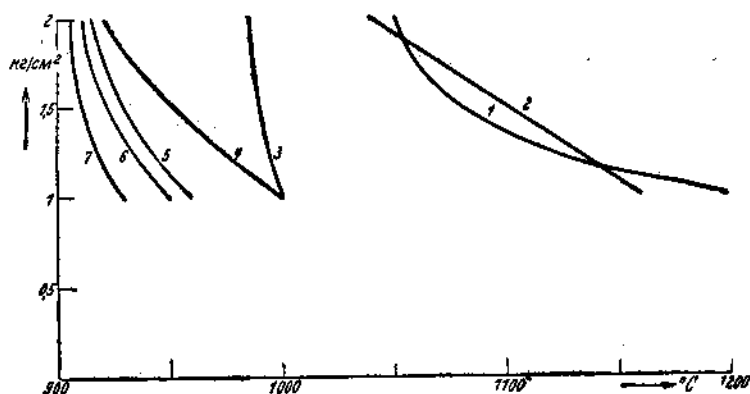


Рис. 80. Допустимое давление для стершамолевых фабрикатов
1 — полугнеупор; 2 — кристобалит; 3 — супериор; 4 — марка 20;
5 — марка 21; 6 — марка 22; 7 — марка 23.

труб; однако автор не усматривает в пользовании ими никаких преимуществ по сравнению с описанными материалами, которые сравнительно легко монтировать.

3) *Материалы, применяемые при температурах от 800 до 1000°.* В этих температурных пределах применяется большинство кизельгуровых фабрикатов, как в виде сплошной породы, так и в виде порошка. Для относящихся к этой группе стершамолевых фабрикатов зависимость температуры, обуславливающей начинающееся размягчение от давления, изображена на рис. 80.

Объемные веса некоторых сортов кирпича, и насыпные веса для порошкообразных материалов, при которых не бывает утряски, приведены в табл. 16, где указаны также максимально допустимые температуры и теплоемкость, отнесенная к единице объема.

Таблица 16

Материал	Объемный или насыпной вес ¹ (кг/м³)	Максим. допустимая температура (°C)	Удельная теплота на объемную единицу (кал/°C, м³)
Стершамоль 20	900	1000	198
" 21	700	960	154
" 22	450	950	99
Кизельгур твердого обжиг	825	950	182
Стершамоль 23	380	930	84
Диа 138	700	900	154
Стандарт	525	900	116
Sil-O-Cel-кирпич	480	875	106
Sil-O-Cel-бетон	950	1000	209
Стершамоль IIIa	525	1000	116
Кизельгур 8 R	400	900	88
" 91	240	900	53
Sil-O-Cel-порошок	250	875	55

Теплопроводность материалов в зависимости от температуры представлена на рис. 81. О влиянии этих материалов на металлы см. соответствующие разделы при описании металлических материалов. В большинстве случаев не удается получить вполне определенных данных, так как все эти вопросы еще слишком мало исследованы, и потому рекомендуется проверить применимость отдельных материалов в соединении с определенными металлами путем соответствующего опыта.

Электрические свойства этих материалов также до настоящего времени неизвестны. Вполне естественно, что электропроводность всех материалов точно так же, как и теплопроводность, возрастает

¹ Под насыпным весом здесь понимается вес материала в 1 объеме при такой плотности утряски, при которой не возникает осадки материала при длительной эксплуатации.

² Sil-O-Cel — бетон получается при затворении на месте применения водой смеси и "материала, называемого Sil-O-Cel (молотый натуральный американский кизельгур с объемным весом 445 кг/м³), с порландским цементом. Температурный предел устанавливается порландским цементом в то время, как сам по себе американский кизельгур в виде грубозернистого помола можно применять до 1095°.

с увеличением влажности. Поэтому, в случае применения таких материалов, которые употребляются в сыром состоянии, следует позаботиться о хорошей просушке, а большие печи приходится даже сушить во время постройки. Этого требуют как электрическая изоляция, так и теплотехнические соображения. Влага из толстых слоев материала может быть удалена только через толщу самого материала, и в некоторых случаях это продолжается очень долго. Правда, внутренние слои, нагревающиеся очень скоро, высыхают относительно

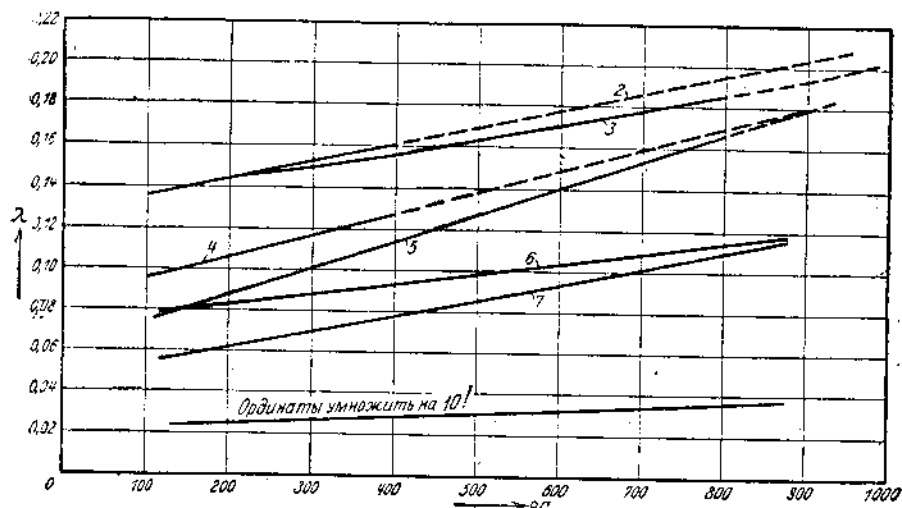


Рис. 81. Теплопроводность λ (кал/м, °С, ч) теплоизоляционных материалов, применяемых при температурах до 800—1000°.

1 — сплосель СЗ-бетон; 2 — кизельгур твердого обжига; 3 — стершамоль 21; 4 — стандарт; 5 — стершамоль 23; 6 — сплосель-кирпич; 7 — сплосель в порошке.

быстро, однако при последующем охлаждении они вновь насыщаются влагой из внешних холодных слоев. Значительно более низкие величины теплопроводности порошкообразных материалов по сравнению со сплошными породами вызывают необходимость детально изучить вопрос о правильном распределении изолирующего слоя (стр. 182, 185).

γ) *Материалы, применяемые при температурах от 1000 до 1400°.* Несколько лет тому назад были найдены материалы, выдерживающие названные температуры и одновременно обладающие значительно более низкой теплопроводностью, чем обычные огнеупорные материалы. Американцы называют эти материалы полугогнеупорами.

Прочность этих материалов на сжатие весьма велика, что, как видно из приведенных рассуждений, не играет значительной роли; сопротивление же размягчению при нагреве под давлением, наоборот, имеет чрезвычайно большое значение (Штейнгоф, Ж 50). Хотя еще неизвестны результаты испытаний в условиях длительной

нагрузки, однако данные выше приведенных рисунков могут дать некоторое представление: на рис. 80 показана допустимая нагрузка на сжатие для различных стершамолевых фабрикалов в зависимости от температуры, при которой материал начинает осаживаться.

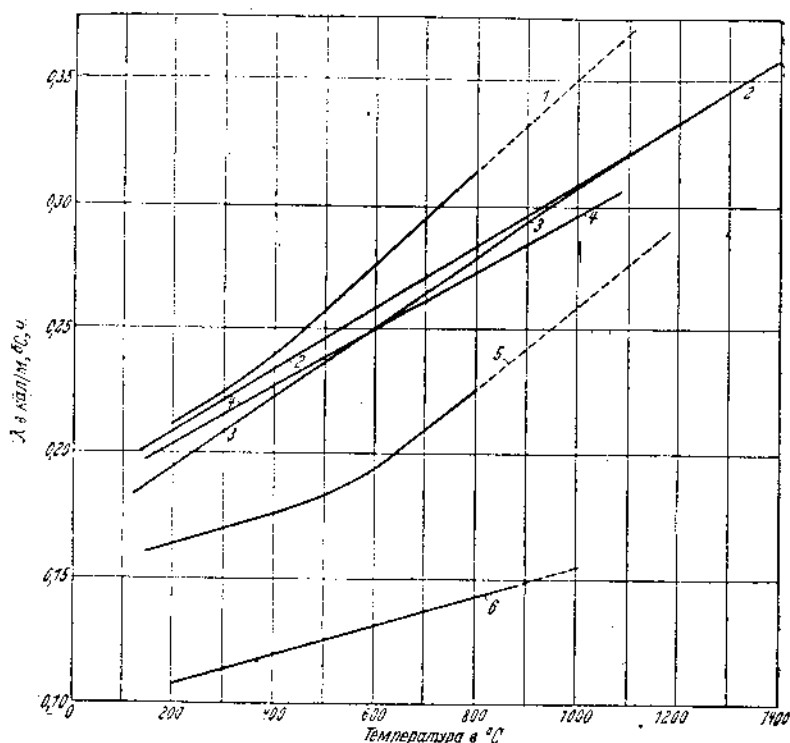


Рис. 82. Теплопроводность полугогнеупорных материалов (по данным поставщиков).
1 — стершамоль-погугнеупор; 2 — силосель-кирпач; 3 — супердиа; 4 — силосель С 22;
5 — кристобалит; 6 — супериор.

Каммерер (Ж 51) сообщает, что материал супердиа в ненагруженном состоянии не обнаруживает более или менее значительных объемных изменений до 1600° , а при нагрузке $0,5 \text{ кг}$ на 1 см^2 начинает давать осадку уже при температурах около 1280° (рис. 76). Отсюда Каммерер делает вывод, что при давлении перпендикулярно тепловому потоку этот материал можно применять до температуры около 1350° , так как более холодные части кирпича воспримут давление; при этом Каммерер считается с падением температуры в материале около $5^{\circ}/\text{мм}$. Если давление направлено параллельно тепловому потоку, ни в коем случае нельзя переходить за температуру $1200\text{—}1250^{\circ}$.

Постоянство размеров гарантируется в $1,5\text{—}2\%$.

Теплопроводность этих материалов в зависимости от температуры представлена на рис. 82. Из него видно, что между разными материалами не наблюдается большой разницы; однако по сравнению с теми материалами, которые предназначаются для более низких температур теплопроводность значительно выше. Теплоемкость всех материалов составляет около 0,22 кал/кг, °С. Величины теплоемкости, отнесенные к единице объемного веса, равно как и самые объемные веса, приведены в таблице 17.

Таблица 17

Материал	Объемный вес (кг/м³)	Теплоемкость на единицу объема (кал/°С, м³)
Супердиа	700—750	155—165
Супербрик	610	134
Полуголеупор	900	198
Кристобалит	600	132
Супериор	550	121
С 22	610	134

Цифровые данные о зависимости теплоемкости от температуры получаются с очень большим трудом (см. например, Каммерер, К 7).

с) Электроизоляционные строительные материалы

Под электрическими изоляционными материалами имеются ввиду в первую очередь стеатит и стеатитоподобные массы. О свойствах, насколько они известны, дает представление таблица 18, полученная от фирмы «Стеатит-магнезия». Особенно подходит для оборудования электрических печей материал реостит, однако наряду с ним имеет большое значение масса под названием «зипа» с замечательно малым коэффициентом расширения, которая пригодна для изготовления опор для нагревательных элементов.

IV. НЕКОТОРЫЕ СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРИНЯТЫЕ В ПЕЧНОЙ ТЕХНИКЕ

* В задачу настоящей книги не может входить описание всех применяемых в печной технике измерительных приборов и способов измерения. Следует, однако, уделить исключительное внимание только тем специальным способам и методам, которые приняты в печах сопротивления и основаны в первую очередь на измерении температуры и мощности.

Таблица 18

Показатели	Ресист	Зипа
Вес единицы объема (кг/дм ³)	2,28	2,2
Пористость (в процен- тах объема)	20	0,1—4 ¹
Ударная вязкость при изгибе (кг/см ²)	1,6	1,9—2,3
Сопротивление изгибу (кг/м ²)	334	500—650
Сопротивление разрыву (кг/м ²)	110,5	180—350 ¹ (не глазировано)
Сопротивление сжатию (кг/см ²)	655	3 000—5 000
Линейный коэффициент расширения	20°—500° = $3,8 \times 10^{-6}$ 20°—950° = $4,65 \times 10^{-6}$	20°—650° = = $1,25—1,7 \times 10^{-6}$
Теплопроводность (Кал/°С, м)	0,84	—
Температура размяг- чения (°С)	1 650	1 430
Удельное электросопро- тивление	около 300° = $5,0 \times 10^7$ 600° = $1,4 \times 10^5$ 900° = $7,7 \times 10^3$	300° = $2,2 \times 10^8$ 600° = $1,1 \times 10^6$ —
Сопротивление пробое	30,5	50—100 ¹
Твердость	9	—

1. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЕЗНОГО ТЕПЛА

Полезное тепло обычно определяют следующим образом. При помощи электросчетчика определяется количество полученного печью тепла, а при помощи одельного опыта устанавливаются потери. Разница между общим количеством полученного тепла (работы) и потерями представляет собой полезное тепло.

Этот способ имеет два недостатка:

1. Определяется только среднее полезное тепло для всех загруженных в печь изделий без учета возможных различий в нагреве отдельных изделий.

2. Измерение это может быть выполнено просто только при устойчивом режиме печи.

Эти недостатки можно устранить, если определить поглощенное изделиями количество тепла непосредственно, что возможно сделать для небольших изделий при помощи калориметрического измерения.

¹ Цифры относятся к различным сортам «Зипа».

О методике точных калориметрических измерений можно найти указания в большинстве справочников (например, Кольрауш К 12, Грамберг, К 22). В большинстве практических случаев придется отказаться от точных измерений и работать описанным ниже простым способом, с которым автор достиг точности около 3% (при работе с небольшими латунными изделиями, нагревавшимися до температур между 700 и 800°). Точность измерения определена путем нагрева изделий в лабораторной печи до определенной температуры, после чего в измерительном приспособлении, подлежащем градуировке и проверке, измерялось содержание тепла. Как указано, отклонение по сравнению с действительной температурой составляло не более 3%.

Изделие непосредственно из печи бросается в сосуд проверенного прибора, наполненный водой; по повышению температуры воды в сосуде может быть определено содержание тепла в образцах, и, зная их теплоемкость, можно подсчитать среднюю температуру. Однако при этом способе нужно считаться со следующими источниками возможных ошибок:

а) Сосуд повышает теплоемкость устройства. Учитывая неизбежное падение температуры в стенке сосуда, вес последнего следует включать только частично.

б) Вследствие инертности термометра, служащего для определения температуры воды, требуется некоторое время для получения его показаний, в течение которого стенка сосуда отдает тепло.

с) Образцы вынимаются из печи в большинстве случаев при помощи инструмента, могущего стать источником ошибок вследствие поглощения им тепла (этот инструмент в случае надобности может быть предварительно нагрет).

д) При доставке от печи к сосуду происходит дальнейшее охлаждение образцов.

По поводу двух последних пунктов следует отметить, что и во время эксплуатации интересна не температура изделия в печи, а температура его после выемки из печи. Если этот калориметр поставить на определенном расстоянии от печи, то это измерение может дать результаты, особенно соответствующие условиям практики.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗОГРЕВА ПЕЧИ И ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА¹

Теоретическое и практическое время разогрева, теплосодержание печи и потери холостого хода можно определить одним и тем же опытом (Пашкис, К 6). Для этого включают совершенно остывшую печь, снабженную регулятором температуры, и следят за температурой наружной поверхности печи.

Для выполнения опыта необходим счетчик, пирометр для наблюдения за температурой внутри печи и не менее одного пирометра (или термометра) для наблюдения за температурой наружной поверхности печи. Кроме того, рекомендуется особенно при определении времени

¹ См. расчет на стр. 44.

разогрева следить за напряжением и, наконец, за температурой помещения.

К счетчику не предъявляется никаких особых требований. При несимметричной нагрузке нужен счетчик трехфазного тока, а при симметричной и при включении треугольником можно обойтись более дешевым однофазным счетчиком. Правда, это относится только к безындукционной нагрузке, каковою и можно считать обычно нагрузку печи (несмотря даже на наличие трансформатора) с достаточной точностью. Если при трехфазном токе (включение нагревательных элементов треугольником или звездой) включить катушку напряжения счетчика между любыми двумя фазными проводами, а катушку тока в один из тех же проводов, то счетчик можно рассматривать, как один из измерительных приборов схемы двух ваттметров. Как известно, при этой схеме оба измерительных прибора при безындукционной нагрузке дают одинаковые показания, так что показания нашего счетчика придется умножить на 2. При схеме открытого треугольника для получения того же коэффициента 2 надо включить катушку тока в одну из фаз, а катушку напряжения — между этой же фазой и нулевым проводом.

О приборах для измерения температуры сказано ниже, в следующем разделе 6 — об измерении температуры. Вполне понятно, что при испытании печи на разогрев температура ее должна измеряться прибором, принятым для измерения температуры в условиях эксплуатации.

Определять температуру наружной поверхности печи рекомендуется в нескольких местах; для этой цели применяются либо термоэлементы, либо ртутные термометры. По вопросу об укреплении измерительных приборов отсылаем интересующихся к специальным трудам, как, например, Клоблауха-Хенки (К 23).

Технические трудности измерений в данном случае заключаются в том, что необходимо найти устройство, при котором, в результате установки измерительного прибора не получалось бы ни теплового подпора, что повысило бы отсчет температуры в сравнении с истинной температурой наружной поверхности печи, ни излишнего отвода тепла, вследствие которого измеренная температура окажется ниже истинной температуры.

Температуру помещения не следует измерять слишком близко от печи, так как, вполне естественно, вблизи печи теплее, чем в остальной части помещения.

Расчет производят следующим образом. Отложив время в качестве абсциссы (рис. 21), наносят в качестве ординаты мощность и температуру. Для определения мощности при 15-минутных отсчетах на счетчике разность двух соседних отсчетов умножается на 4, при 10-минутных отсчетах на 6 (6 раз в час); эта величина наносится над серединой рассматриваемого отрезка времени. Сначала при постоянном напряжении мощность также остается постоянной. Если нет уверенности, что напряжение в продолжение всего опыта остается постоянным, то рекомендуется его регистрировать; это даст возможность легко объяснить неувязки в показаниях счетчика.

Температура внутри печи практически начинает повышаться почти сейчас же после включения, а вернее — после очень небольшого про-

межутка времени, зависящего от инерции измеряющего температуру прибора. Повышение температуры (за исключением обусловленного инерцией прибора первоначального перепада) первое время происходит прямолинейно и только через некоторое время, зависящее от большего или меньшего избытка тепла в печи, кривая на диаграмме начнет изгибаться, обращаясь вогнутою в сторону оси абсцисс. В температуре наружной поверхности печи сначала не замечается никакого повышения.

Когда температура внутреннего пространства печи достигает необходимого уровня, начинает работать регулятор, который понижает среднюю мощность, вследствие чего температура начинает колебаться вверх и вниз около необходимого уровня. Понижение мощности, вследствие выключения и включения, выражается сначала в небольших, постепенно возрастающих разностях между двумя соседними отсчетами счетчиков. В то время как температура внутреннего пространства печи колеблется около своего среднего номинального значения, наружная поверхность печи медленно приближается к своему устойчивому тепловому состоянию. Как только оно достигнуто, понижается также и мощность до постоянной величины — потеря холостого хода, которые могут быть определены при помощи нескольких последовательных отсчетов счетчика, разности между которыми должны быть одинаковы. Площадь (рис. 21) под кривой мощности (обозначим через B) планиметрируется и пересчитывается в киловатт-часы.

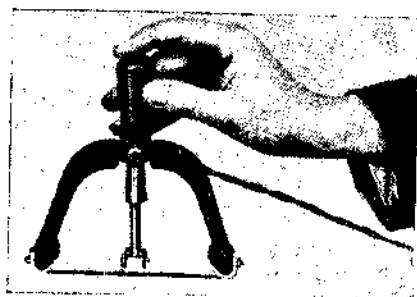
Поверхность под кривой температуры наружной поверхности печи также планиметрируется и пересчитывается в киловатт-часы следующим образом: путем планиметрирования сначала получают произведение температуры на время, которое умножается на отношение ординат кривой мощности и кривой температуры наружной поверхности для пересчета в киловатт-часы и получаем величину C . Разность $B - C$ дает теплосодержание печи в киловатт-часах.

3. АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА

После определения потерь холостого хода на основании опытов, описанных в предыдущем разделе, в большинстве случаев нужно знать, чем вызываются эти потери холостого хода. Сначала на основании формул (11) определяют теоретические потери и сравнивают их с найденными опытом. Как известно, расхождение следует отнести за счет термических коротких замыканий. В некоторых случаях появится необходимость выяснить раздельное влияние различных термических коротких замыканий в изготовленных печах для того, чтобы иметь возможность произвести соответственные переделки. Это разделение термических коротких замыканий в большинстве случаев можно произвести путем измерения температуры поверхности печи в различных местах. Места термических коротких замыканий значительно горячее, чем хорошо изолированные места, и при помощи схемы теплоотдачи, которая с достаточным приближением пропорциональна

температурам, удастся быстро выяснить влияние отдельных термических коротких замыканий.

При этом следует учитывать два источника ошибок. Но температуры, а превышение температур поверхности печи над температурой помещения пропорциональны тепловым потерям; некоторую роль играют также условия теплопередачи (сквозняки, соседство других печей и т. п.). При одинаковом превышении температуры поверхности печи отданное количество тепла изменяется в зависимости от коэффициента теплопередачи. При сравнении теплоотдачи различными частями поверхности печи эти различия оказывают большое влияние¹. Для изме-



рения температуры поверхности печи применяются специальной конструкции термоэлементы для измерения на поверхности (поверхностный пирометр), которым теперь дана целесообразная и удобная конструкция (рис. 83). При введении в расчет коэффициента теплопередачи следует учитывать движение воздуха и другие искажения температурного поля.

Рис. 83. Поверхностный пирометр фирмы Сименс и Гальске.

Ошибка, могущая возникнуть вследствие неточности измерения в этом месте, уменьшается, если

теплоотдача другими частями печи, помимо наружной поверхности, исключается или же точно известна. Так, например, для уменьшения теплоотдачи стенками печи рекомендуется уплотнить щели (около дверей, вводов и т. п.), так как очень трудно учесть движение воздуха через эти отверстия; с другой стороны, вполне возможно точно определить потери в охлаждающей воде путем измерения расхода воды и температуры при ее поступлении и уходе, и эту величину прежде всего вычесть из общих потерь холостого хода.

При анализе прочих оставшихся после этого потерь поступают следующим образом. Все потери холостого хода делят на площадь поверхности печи и, приняв средний коэффициент теплопередачи, определяют среднюю температуру кожуха. Сравнением измеренных температур с этой средней расчетной температурой легко можно доказать наличие термических коротких замыканий.

Понятно, что вначале точки наибольшего отклонения температуры от средней неизвестны; поэтому рекомендуется представить результаты измерений в форме графического изображения температур по каждой стенке печи, например, в форме изотерм. При оценке можно пользоваться либо непосредственно разностями температур, либо при большой разнице между ними температуры умножаются на

¹ В противоположность этому различие коэффициентов теплопередачи не имеет значения при расчете тепловых потерь, так как сопротивлением внешнего перехода тепла по сравнению с теплопроводностью стенки печи можно пренебречь.

соответственные значения коэффициентов теплопередачи, и только эти произведения, пропорциональные теплоотдаче на единицу поверхности, можно будет сравнивать между собою.

4. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЕЧЕЙ С ТЕПЛОВЫМ РАВНОВЕСИЕМ, ЗАВИСЯЩИМ ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Ранее в наших рассуждениях было сделано допущение, действительное для большинства печей, что тепловые потери практически не зависят от производительности печи. Следует упомянуть еще вкратце об определении потерь в тех печах, для которых такое допущение неверно. В данном случае речь идет прежде всего об некоторых разновидностях конвейерных печей (например, сушильные туннельные печи по принципу противотока, протяжные канальные печи и т. и.). Для того, чтобы узнать потери холостого хода и теплосодержание этих печей, необходимо составить тепловой баланс при нормально нагруженной печи и расчетом определить потери.

Поясним это на примере сушильной конвейерной печи, описанной на стр. 230, предназначенной для сушки шишек (Пашкис, Ж 52). Следует особенно подчеркнуть, что величины, подлежащие определению для составления теплового баланса, в каждой печи различны и что способы измерений должны приспосабливаться к требуемой степени точности и к имеющимся вспомогательным средствам.

В нашем случае шишки (так называемые масляно-песчаные шишки) в целях предохранения их от механических повреждений, укладывались в слой мелкого песка, применяемого во влажном состоянии. Заключаящаяся в нем влага должна быть, конечно, испарена. Масло, на котором замешивается масса, в результате процесса разложения густеет.

Таким образом, тепло расходуется на: 1) нагревание песка шишек, 2) нагревание масла, 3) нагревание слоя песка на поддонах и испарение из него влаги, 4) нагревание поддонов, 5) нагревание цепи и стеллажей, 6) потери холостого хода и 7) покрытие теплосодержания печи.

Шишки вводятся в печь на железных поддонах, вес которых, по сравнению с весом шишек, довольно значителен. Так как печь работает по принципу противотока, то расход тепла на нагрев проходящих через печь шишек не равен произведению температуры нагрева на их вес и теплоемкость; в расчет принимается только та температура, которую имеют шишки, оставляющие печь. Так как разные по размеру предметы не могут при выходе иметь одинаковую температуру, то теплосодержание шишек определялось при помощи калориметра, температура песчаного слоя — при помощи ртутного термометра, а температура поддонов — при помощи термозлементов (различие температуры по толщине материала поддонов вследствие высокой теплопроводности железа и незначительной толщины материала не принимались во внимание; то же самое относится к песчаной подложке из-за невозможности учесть разность температур).

Тепло, заключающееся в отходящем воздухе, определялось путем измерения температуры и количества воздуха при помощи трубки Пито Прадтля. Потери холостого хода определялись путем измерения температуры наружной поверхности печи во многих местах. Коэффициент теплопередачи α был принят равным $10 \text{ кал/м}^2, ^\circ\text{C}$, ч, а каждая отсчитанная температура умножалась на соответственный элемент площади. Тепловые потери вследствие лучеиспускания печи и стеллажей во время задержки перед открытой дверью печи вместе с тепло-содержанием печи включались в остаточное количество тепла. В общем, было произведено пять опытов, которые дали следующее распределение тепла в расходной части баланса.

Таблица 19

Статьи расхода тепла	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
	Количество тепла (квтч)				
Шипки (остаточная теплота)	25	25	28	17	14
Нагревание масла	2	1	5	1	1
Теплота испарения воды из песчаной подстилки	6	5	6	5	6
Песчаная подстилка (остаточная теплота)	2	2	2	2	2
Поддоны (остаточная теплота)	26	13	22	21	16
Воздух	257	198	289	265	238
Лучеиспускание	34	28	35	40	31
Остаточное тепло и теплосодержание печи	52	90	43	6	61

Раздельный учет теплосодержания печи и потерь в печи был бы теоретически возможен, если бы произвести опыты в практически неизменных условиях в течение целого рабочего дня и проследить за изменениями остаточного тепла в зависимости от времени дня. Однако провести такой опыт оказалось невозможным — совершенно независимо от стоимости опытов — по той причине, что для опыта в течение целого дня не могло быть получено достаточного количества шипок одинаковой величины. Можно было бы, конечно, измерять температуру печи и стеллажей во время остановки печи перед дверью печи и затем вычислить потери, приняв соответственный коэффициент теплопередачи. Вычтя эти потери из оставшихся, мы получили бы теплосодержание печи.

Так как результаты показали, что наибольшее количество тепла теряется с воздухом, то была произведена попытка — и не без успеха — уменьшить этот расход путем уменьшения количества воздуха. Расход тепла на остаточную теплоту в шипках, поддонах и песчаной подстилке повысился на величину большую, чем достигнутое

уменьшение потерь тепла с воздухом. Следует полагать, что существует некоторая оптимальная величина количества проходящего воздуха, при которой расход тепла составляет наименьшую величину (стр. 192). Однако эта величина в условиях нашего опыта не могла быть установлена из-за эксплуатационно-технических причин.

Помимо этих, самих по себе важных для эксплуатации результатов, потребовалось отнести расход тепла не к количеству выпущенных шишек, как это обычно делается в литейных, а к «приведенному весу», который может быть рассчитан согласно следующего уравнения:

$$G_r = G_s + G_p \cdot \left(\frac{0,20}{0,13} \right) = G_s + G_p \cdot 1,54, \quad (39)$$

где

G_r обозначает «приведенный вес»,

G_s — вес песка шишек,

G_p — вес поддонов, причем все веса отнесены к одинаковому времени работы.

Введение понятия «приведенный вес» помогает выяснить очень большие колебания в удельном расходе энергии (квтч/кг), который, будучи отнесен к весу песка, колеблется от 0,154 до 0,335 квтч/кг, а отнесенный к «приведенному весу» — от 0,0945 до 0,0645 квтч/кг. Отношение максимального значения к минимальному при расчете по «приведенному весу» уменьшилось с 2,17 до 1,47; остающееся расхождение может быть объяснено влиянием колебаний в загрузке печей, составлявшей от 3875 до 6282 кг «приведенного веса» в день, а также влиянием различного расхода воздуха.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

О методике точных измерений температур в лабораторных условиях можно найти указания во многих справочниках, которые считаем читателю известными; однако измерять с такой же как в лабораториях степенью точности в условиях эксплуатации печей редко возможно. Об измерениях в эксплуатационных условиях также можно многое найти в литературе. Здесь мы только укажем на возможные ошибки при практическом измерении температуры печей и опишем наиболее простые способы их избежания, не претендуя на абсолютную полноту сообщаемых сведений (ср. Вальгера и Лоренц, Ж 53).

а) Температура холодного спая термоэлемента отличается от температуры, принятой при проверке установки. Точка зрения, согласно которой в целях корректирования следует только прибавить к отсчету температуру холодного спая, так же неправильна, как и предположение, что речь идет о постоянной ошибке (Кейнат. К 24), или что ошибка может быть устранена применением компенсационного провода. В большинстве случаев температура помещения колеблется в зависимости от времени дня и года. Если холодный спай компенсационного провода находится еще в зоне излучения печи, то, в зависи-

¹ 0,20 — теплоемкость шишки; 0,13 — теплоемкость железа.

мости от степени ее прогрева, будут получаться новые ошибки. Поэтому нужно принять соответственные меры, чтобы исключить влияние колебаний температуры на холодный спай, — например, поместить холодный спай под полом.

б) Помимо колебаний температуры холодного спая, ошибку в показаниях может повлечь за собою колебание температуры милливольтметра. В противоположность ошибке, отмеченной в п. «а», которую в большинстве готовых установок можно устранить, влияние температуры на показания самих измерительных приборов устранить невозможно. Эта ошибка возникает вследствие того, что катушка прибора изготовлена из меди, сопротивление которой зависит от температуры. В хороших приборах ошибку можно уменьшить путем применения добавочных сопротивлений из материала, электросопротивление которого не меняется в зависимости от температуры (например, константа). Чем больше при заданном пределе измерений добавочное сопротивление, тем меньше энергии остается для самого измерительного прибора и тем он должен быть чувствительнее.

в) Измерение температуры внутри печи вблизи ее стенки дает ошибочные результаты вследствие довольно энергичного отвода тепла арматурой термопары. Поэтому рекомендуется термопару на известную часть длины вдвигать вглубь печи.

г) Слишком тяжелая, массивная арматура термопар делает их непригодными для измерения быстро протекающих тепловых процессов.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Издавна электрическим печам приписывают особо равномерное распределение температуры, и потому вполне понятно постоянное желание убедиться в этой равномерности путем непосредственного измерения. По поводу этого следует прежде всего отметить, что «равномерность» сама по себе может относиться только к поверхности определенного рода изделий, так как в последних нас интересует только их температура, которая зависит от распределения нагревающих элементов и величины, степени нагрева и расположения нагреваемых предметов. При печах с движением воздуха опыт даст практические результаты только в том случае, если изделие пропускается через печь обычным производственным порядком и равномерность распределения температуры устанавливают путем измерения таковой на поверхности. При печах с теплопередачей лучеиспусканием можно (если не представляется возможным произвести опыт с изделиями, постоянно встречающимися в эксплуатации) заполнить полезное пространство печи возможно однородными изделиями и установить распределение температуры путем измерения повышения температуры поверхности изделий.

КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Исключительное разнообразие конструкций электропечей в целом, отдельных деталей их, делает невозможным исчерпывающее описание в пределах этой книги всех конструкций. Поэтому здесь будут описаны только типичные конструкции и дан обзор возможных отклонений от таковых.

Две температуры, именно около 500° и около 1000° , представляют собой пределы, влияющие решающим образом на выбор строительных материалов, а также и самой конструкции печи.

Внутренние стенки в печах низкой температуры, т. е. до 500° , можно делать из обычного железа, не опасаясь разрушения стенок окислением.

При температурах свыше 500° необходимо уже применять для внутренних стенок печей керамические материалы, однако до 1000° для нагревательных элементов применимы никелевые сплавы. Печи для температур от 500 до 1000° можно назвать *печами средней температуры*.

При температурах свыше $1000 - 1100^{\circ}$ в настоящее время не представляется возможным применять металлические нагревательные элементы и приходится пользоваться неметаллическими. Нужно думать, что развитие сплавов, устойчивых при высоких температурах, поведет к применению металлов, не содержащих никеля. Печи с температурой свыше 1000° именуются *печами высокой температуры*.

ДЕТАЛИ ПЕЧЕЙ

А. НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Нагревательные элементы разделяются на две больших группы:

- 1) свободно излучающие элементы, в которых проводящий ток материал элемента расположен свободно в печи;

- 2) утепленные нагревательные элементы, при которых передача от них тепла изделию не может происходить непосредственно.

Тепло должно пройти во втором случае сначала сквозь слой электрической изоляции. Поэтому нагревающиеся проводники должны достигнуть значительно более высокой температуры чем та, которая

может быть с пользой употреблена на поверхности нагревательных элементов. Этот недостаток уравнивается, однако, тем преимуществом, что материал элементов защищен от окисления и прикосновений.

1. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

а) Свободно излучающие элементы

а) *Рамочные нагревательные элементы.* Эти элементы наматываются на керамические изоляторы, имеющие либо крестообразную, либо другую подходящую форму и позволяющие таким образом обойтись без металлических опор, или же применяются керамические изоляторы, подобные изображенному на рис. 84, которые пасаживаются на железную рамку, изготовляемую согласно требуемой форме нагреваемого элемента (рис. 85). Наконец, элементы из металлической ленты можно изготовлять любой длины и для самых разнообразных сечений ленты, нанизывая изоляторы на железные траверсы¹ (рис. 86). На поддерживающую железную полосу *b*, желательного прямоугольного сечения, надеваются изоляторы (невидимые на рисунке) и прокладки *a*, *c*.

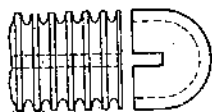


Рис. 84. Изолятор рамочного элемента (стеатит-магнезия).

Такие изоляторы могут быть укреплены и непосредственно на обогреваемой поверхности (например, стенки котлов), после чего наматывается проволока.

Ленточное сопротивление *d* лежит на изоляторах. Вставляя различные прокладки *a*, *c*, можно менять шаг намотки как угодно.

Подготовленная железная рамка обычно приводится во вращение специальной машиной (в случае надобности можно пользоваться токарным станком). После того как насажены изоляторы, лента или провод укрепляется на рамке и при вращении последней наматывается. Наконец, лента обрезается, и другой конец ее также укрепляется на рамке.



Рис. 85. Рамочный элемент. Следует обратить внимание на сварку нагревающей проволоки с соединительной.

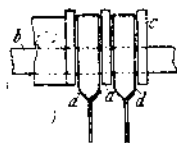


Рис. 86. Деталь рамочного элемента.

При изготовлении следует обращать внимание на следующее:

1. Применяемый для рамки материал должен отвечать рабочей температуре печи.

2. При слишком большом расстоянии между сторонами рамки, несущими изоляторы, если элемент покоробится, между проволоками элемента и рамкой может произойти короткое замыкание.

¹ Русско-герм. патент. 502 413.

3. При разработке конструкции изоляторов должны быть приняты в соображение пути утечки. Разделительные прокладки и ребра между витками должны быть поэтому достаточно высокими.

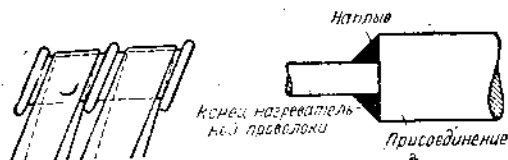


Рис. 87. Косые изоляторы. При значительной ширине рамки они необходимы, во избежание + отскакивания углов изолятора.



Рис. 88. Сварное соединение круглой проволоки с соединительным куском.

а — соединяемые куски установлены впритык и затем автоматическим или дуговым способом наварен напыль, как показано на рисунке; б — обе части подготовлены показанным на рисунке образом и свариваются электричеством впритык.

4. Достаточно полно устранить утечку можно только при помощи толстых ребер, так как высота их для каждой толщины ограничена условиями изготовления и условиями механической прочности.

5. В случае большой ширины рамки наклон ленты при обмотке играет весьма значительную роль. Поэтому необходимо либо употреблять косые изоляторы (рис. 87), либо делать расстояние между изоляторами значительно большим, чем ширина ленты, чтобы лента или проволока могли свободно проходить по изоляторам. В противном случае при обмотке могут сколоться выступы изоляторов.

6. Концы проволоки или ленты должны быть изготовлены таким образом, чтобы можно было присоединять токоподводящие провода. Если, как обычно, эти провода присоединяются при помощи винтовых зажимов т. е. к каждому элементу проводится соединительный провод, то нагревательная проволока должна быть соединена с зажимами. На рис. 85 изображено соединение зажима с нагревательной проволокой. В нагревательных элементах,

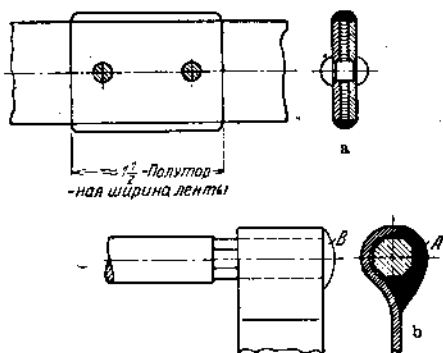


Рис. 89. Сварное соединение ленты с соединительным стержнем.

а — утолщение ленты нагревательного сопротивления путем наварки с каждой стороны куска ленты такой же толщины. Три ленты укладываются на протяжении полуторной ширины ленты, охватываются двумя заклепками и свариваются по узким сторонам. б — соединение нагревательной ленты с круглым стержнем. Лента охватывает приблизительно половину окружности соединительного стержня и сваривается с последним (А). Рекомендуется дополнительная сварка по торцевой поверхности (В).

изображено соединение зажима с нагревательными элементами,

предназначенных для высоких температур, производят сварку проволоки с винтом. Конец нагревательной проволоки для этой цели утолщается, во избежание нагревания самой клеммы, причем это утолщение рекомендуется доводить до трех - четырехкратного сечения; так, например, проволока диаметром 1,2 мм утолщается примерно до 2 мм. Такое же утолщение концов производится и в том случае, если соединение отдельных элементов выполняется вне печи, так что провода от каждого нагревательного элемента выводятся сквозь стенку печи.

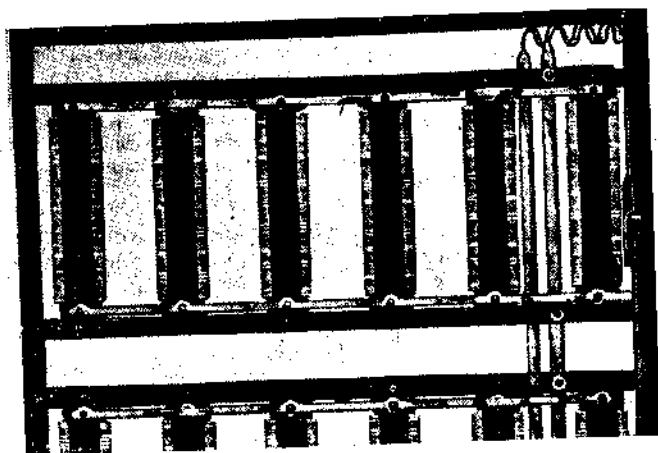


Рис. 90. Рамка с нагревательными элементами.
Соединения медными полосами.

Соединение нагревательной проволоки с утолщением производят либо путем сварки (рис. 88 и 89), либо путем обматывания нагревающего проводника проволокой равной или лучшей электропроводности. Вместо сварки применяются также зажимы, причем усиливающий наконечник иногда делается в виде трубки.

На рис. 90 изображена плита (рама) со смонтированными на ней нагревательными элементами, как обычно в сушильных печах. Вследствие монтажа на раме перемена элементов производится очень легко.

Рамочные нагреватели находят себе применение, главным образом, в печах с температурой до 450—500°.

б) *Спиральные нагревательные элементы* (рис. 91) производятся либо на машинах для изготовления спиральных пружин (машины эти должны быть построены очень прочно, учитывая высокие цифры механических свойств материала элементов), либо на токарных станках на стержне (рис. 92). Усиление концов производится тем же способом, что и в рамочных нагревателях.

Особенное внимание следует уделить подвеске спиралей. Во-первых, точки опоры должны быть, возможно, более правильны

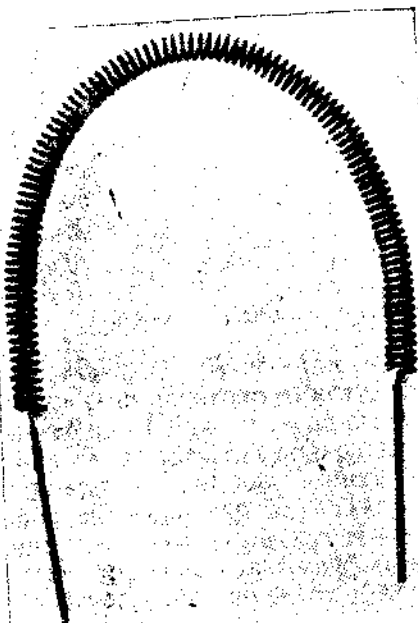


Рис. 91. Спираль из нихрома. Следует обратить внимание на очень равномерную намотку: отдельные витки должны находиться на одинаковом расстоянии между собой, во избежание перегрева в более тесно намотанных местах. Утолщенные присоединительные концы приварены.

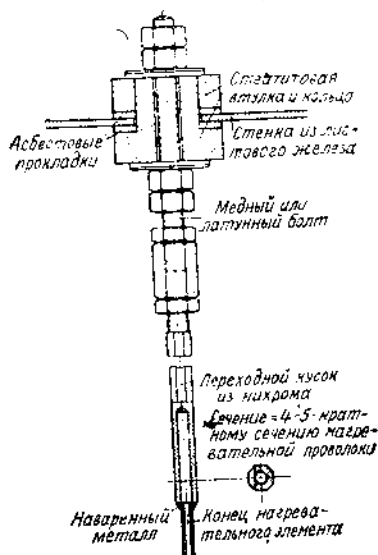
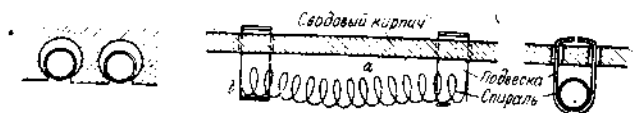


Рис. 93. Вывод нагревательного элемента через стенку печи. Соединение нагревательной проволоки с выводом (Геркус).



Рис. 92. Изготовление спирали на токарном станке. Отдельные витки укладываются плотно один к другому и затем растягиваются на требуемую длину. Вместо этого можно также мотать на заранее установленный шаг.

во-вторых, необходимо тщательно следить за тем, чтобы нагревательные элементы могли повсюду одинаково хорошо отдавать тепло. Оба



А — закладыва-
ние спиралей
в желобки,

В — подвешивание спиралей
на подвесках.

Рис. 94. Укрепление нагревательных элементов на своде.

требования, особенно при установке потолочных нагревательных элементов, легко вступают друг с другом в противоречие, как это видно из рис. 94, А. Метод укладки спиралей в углубления безупречен, однако теплоотдача сильно снижается. С другой стороны, при конструкции по рис. 94, В теплоотдача происходит без помех, однако механические напряжения в точке а между двумя подвесками, достигают значительной величины и влекут за собою провис спирали; вследствие этого в точках опоры в витки сближаются, и возникает опасность местного перегрева со всеми его последствиями.



Рис. 95.
Укрепление
нагреватель-
ных элемен-
тов на стенке.
Выпячиванию
спиралей пре-
пятствуют за-
кладные шти-
фты С и или
привязывание
спиралей в
точке д.

При наличии спиральных элементов на боковых стенках печи надо следить за тем, чтобы спирали при расширении от нагревания не выступали из желобов опорных крошштейнов (рис. 95). Этого можно достигнуть посредством употребления предохранительных штифтов с, как показано на рисунке, или же путем подвязывания спиралей к стенке печи (точка д). Правда, при этом монтаж и демонтаж нагревательных элементов несколько затрудняется. Можно делать крошштейны с высоко выступающими бортами, чтобы выскакиванию спиралей из опоры препятствовал значительный подъем, который она должна преодолеть.

При нагревательных элементах, расположенных по боковым стенкам и особенно на полу, надо следить за тем, чтобы грязь, попадающая в желоба для спиралей, не попадала на последние. Если же это происходит, то могут возникнуть повреждения двоякого рода: во-первых, грязь может вступить в химическую реакцию с материалом элементов или материалом печи (а часто с обоими) (рис. 96): во-вторых, если спираль покрыта грязью и окалиной, то в соответственном месте задерживается выделение тепла, и спираль может быть разрушена вследствие местного перегрева. Единственным действительным средством против этого является регулярная основательная чистка печи. Промежутки между такими чистками могут быть увеличены, если спирали уложены в

желобах специальной формы (рис. 97).¹ Фирма Сименс-Шуккерт применяет специальной формы подовый кирпич с отверстиями, сквозь



Рис. 96. Поврежденная спираль
(Пашке, Ж 13).

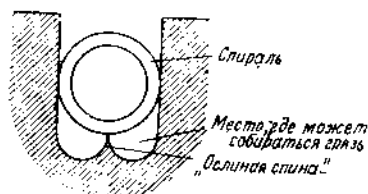


Рис. 97. Спираль, опирающаяся на специальный выступ.

которые окалина может падать между нагревательными элементами в установленный под печью лист.

Спиральные нагревательные элементы применяются главным образом в печах с температурой от 500 до 1100°.

γ) Спиральные нагревательные элементы на сердечниках (стержнях). Некоторые конструкторы печей употребляют, вместо свободно лежащих спиралей, спирали, намотанные на керамические сердечники. Такая конструкция изображена на рис. 98. Несколько отличается от нее конструкция, представленная на рис. 99, где применены дистанционные утолщения *а*. Часто проволоочная спираль наматывается на стержень, так что можно говорить о свернутой вдвое спирали. Оба конца проволоки могут быть расположены на одном конце стержня, если пропустить один из концов проволоки по осевому каналу сердечника.

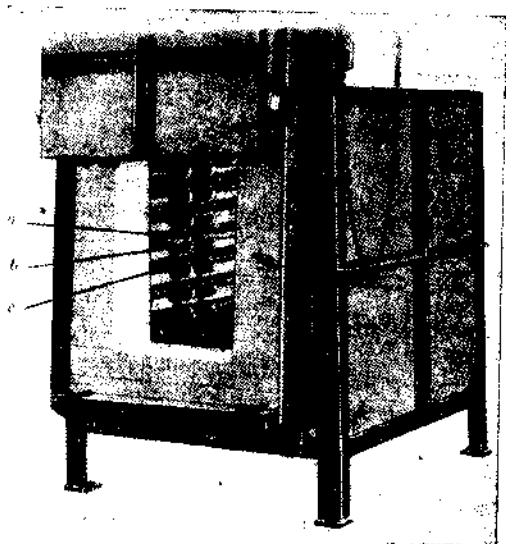


Рис. 98. Печь со стержневыми нагревательными элементами.
Шаг намотанной спирали в точках касания сердечников с опорами увеличен так что проволока опор не касается.

δ) Зигзагообразные нагревательные элементы. Нагревающая лента (иногда вместо нее берут очень толстые стержни круглого материала) изгибается в виде зигзага и укрепляется на стенке печи. Ленту можно укреплять непосредственно на опорных кирпичах - кронштейнах

¹ Германский патент 533 148.

(рис. 100), причем следует опасаться, однако, местных перегревов в точках подвеса (рис. 101). В месте соприкосновения возникает тепловой подпор, так что лента перегревается и, кроме того, в точке подвеса



Рис. 99. Стержневой нагревательный элемент. Дистанционные утолщения а дают возможность беспрепятственно класть элемент на опоры.

лента сильнее всего нагружена механически; она растягивается и потому увеличивается сопротивление этого места. Вследствие этого уменьшается и механическая прочность в том же месте. Оба влияния, сочетаясь, постепенно усиливаются и влекут за собою разрыв ленты. На рис. 101 ясно видны капли расплавленного металла.

Так как при ленточных нагревательных элементах механическое напряжение, во всяком случае, больше, чем при спиральных элементах, то эти элементы рекомендуется нагружать меньше, чем спиральные.

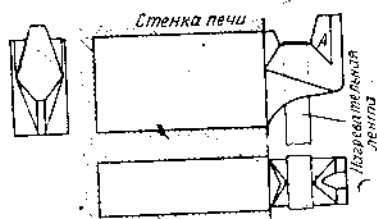


Рис. 100. Керамиковая опора для ленточных элементов. Клиннообразная форма опоры элемента А должна уменьшать опасность перегрева ленты.

Опасность перегрева в точках подвеса может быть практически устранена путем вставки металлической опорной детали. Так, например, фирма Сименс-Шуккерт укладывает на кронштейне опорного кирпича кусок жести из жароустойчивого металла, который

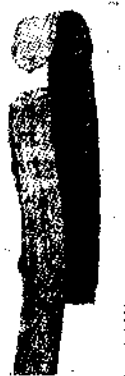


Рис. 101. Разрушенная лента (Пашкис, Ж 13).

действует как охлаждающее ребро. Та же конструкция применяется и компанией «Вестингауз»; АЭГ и Дженераль-Электрик. Подвешивают также ленту при помощи проволоочной петли, укрепляя последнюю на опоре.

Зигзагообразные нагреватели особенно распространены в Соединенных Штатах и главным образом в печах с температурой от 500 до 1100°.

Так как опорные кирпичи изготавливаются из материалов, отличающихся от материалов стенки печи, то между ними может не быть достаточной связи. При укреплении нагревательных элементов часто

возникают также дополнительные напряжения. Поэтому были сделаны попытки спроектировать конструкции, препятствующие вытягиванию отдельных кирпичей из кладки печи. Были также предложены изготовить для подвешивания крючки из металла.¹ Металлическая лента часто склонна к деформациям, поэтому были сконструированы различного рода дистанционные бруски для того, чтобы иметь возможность укладывать отдельные петли зигзага возможно ближе один к другому.²

б) Закрытые (утопленные) нагревательные элементы

а) *Запрессованные в слюду элементы* (рис. 102) Нихромовая лента навивается на листок (пластинку) миканита лучшего качества. Обмотанная нихромовой лентой пластинка с приложенными к ней с двух сторон узкими установочными миканитовыми полосками закрывается двумя покровными листами из миканита. Ток подводится при помощи никелевых полосок, расположенных с обеих сторон и прочно соединенных с нагревающей обмоткой; этот нагревательный элемент укладывается в металлический чехол и запрессовывается. Изготовленный таким образом элемент совершенно защищен от брызг воды и чрезвычайно прочен.

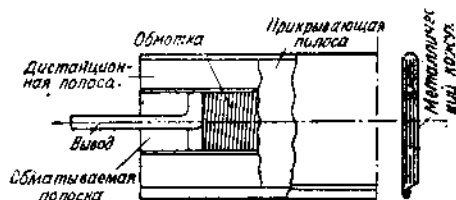


Рис. 102. Нагревательный элемент, запрессованный в слюду.

Максимально допустимая температура поверхности 300° ; максимально допустимая напряженность поверхности: при 300° — $1,2—1,5$ вт/см², при 125° — $2,2—2,5$ вт/см². Эти температурные данные относятся к поверхности футляра.

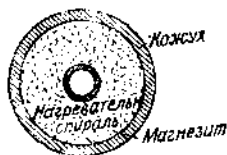


Рис. 103. Разрез нагревательного стержня (Дженераль-Электрик, АЭГ).

3) Пластинчатые нагревательные элементы.

Нагревающий провод помещается в керамическом материале таким образом, что он совершенно защищен от доступа воздуха. Элемент этот может быть укреплен либо путем привинчивания болтом сквозь центрально расположенное отверстие или залит в железо. Нагрузка $4—5$ вт/см² поверхности пластины, измеренной с одной стороны.

г) *Стержневые элементы* для низких и средних температур изготовляются часто. Прежде для этой цели в железные трубы закладывали узкие рамочные элементы. Несколько лет тому назад фирмой Дженераля-Электрик была предложена интересная конструкция, показанная на рис. 103. Очень тесно намотанная спираль удерживается

¹ Амер. пат. 1 638 822; герм. пат. 458 446.

² Амер. пат. 1 617 361 и 1 661 852; герм. пат. 489 581.

при помощи кусков лавы в центре железной трубы. Промежуток между трубой и спиралью заполняется магнезитом, затем труба подвергается обстукиванию специальной машиной. После такой обработки спираль, магнезит и труба расширяются одинаково, так что получается совершенно однородный нагревательный элемент.

Изготовленные таким образом трубы можно изгибать и даже ставить в стальные отливки, благодаря чему эти элементы могут найти

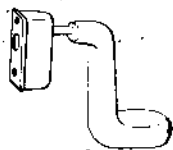


Рис. 104. Залитый (в металл) нагревательный стержень. Слева коробка для присоединения.

себе применение в самых разнообразных случаях. В виде простого нагревательного стержня этот элемент подходит для сушильных печей, так как, в противоположность рамочным элементам, даже при перегорании элемента не обнажаются раскаленные места; благодаря этому исключается всякая возможность взрыва газов, образующихся при сушке. Затем такие стержневые нагревательные элементы, залитые в стальную отливку, прекрасно могут служить для нагревания ванн при низких температурах. На рис. 104

изображен такой вделанный в отливку элемент.

б) *Сетчатые нагревательные элементы.* К группе утолщенных нагревателей можно отнести сетчатые элементы, представляющие собой ткань из асбеста и константановой проволоки. Мы упоминаем о них, потому, что они широко применяются для нагревательных целей в промышленности; в закрытых печах они употребляются редко.

в) *Заделанные в стену печи сопротивления*, о которых уже шла речь в разделе «Расчет», будут рассмотрены при описании стенок печи (стр. 185).

с) Смена нагревательных элементов

Одним из наиболее важных недостатков электрических печей является то обстоятельство, что при выходе из строя хотя только одного нагревательного элемента необходим более или менее длительный перерыв в эксплуатации печи. В большинстве случаев должна остыть вся печь для того, чтобы иметь возможность заменить или восстановить поврежденный нагревательный элемент.

Среди специалистов по этому вопросу существуют две диаметрально противоположные точки зрения.

С одной стороны, считают, что элементы должны быть настолько надежны в эксплуатации, чтобы никогда не требовать замены; с другой стороны, указывается на то, что аналогичную порчу нагревательного элемента порчу горелки газовой печи можно немедленно ликвидировать, поставив новую. Таким образом, в противоположность газовой печи, электропечь никогда нельзя будет считать надежной в эксплуатации, если только не будет устранен указанный недостаток — невозможность замены нагревателей во время работы.

Печи с большим периодом охлаждения, работающие в поточном производстве, должны по возможности иметь заменяемые нагреватели

или же в них должно быть смонтировано по меньшей мере два полных комплекта нагревательных элементов, так что при выходе какого-нибудь одного элемента из строя, вместо испорченного комплекта можно немедленно включить другой. Наоборот, печи, рассчитанные на краткие операции и охлаждающиеся к тому же очень быстро, не должны иметь заменяемых нагревателей, потому что такая конструкция связана со значительным удорожанием печи и повышением потерь холодного хода.

Учитывая большое количество печей, в которых желательно наличие заменяемых нагревателей, а также большое значение этого вопроса, опишем ниже главные опыты создания заменяемых нагревателей, хотя на практике привились только некоторые из таких конструкций.

Нагревательные элементы располагают на стенках печей. Для возможности замены элементов нужно сделать соответствующую стенку удаляемой или же в стенке, перпендикулярной обогреваемой, делают удаляемым кусок стены в таком месте, чтобы можно было удалять испорченные элементы.

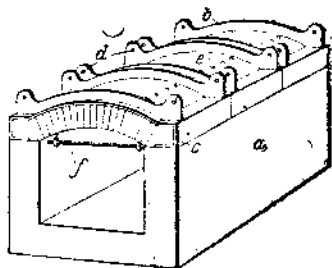


Рис. 105. Нагревательный элемент, заменяемый в процессе работы печи.

a — боковая стенка печи; *b* — свод печи, разделенный по длине на несколько частей; *c* — швеллерное железо, на которое опирается свод; *d* — поперечины с серьгами для подъема свода; *e* — отверстия для укрепления нагревательных элементов; *f* на своде.

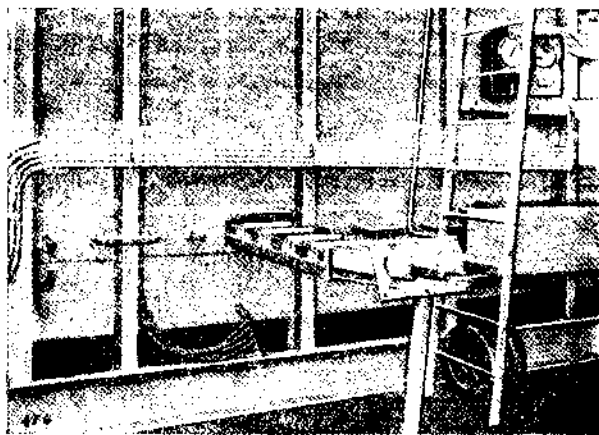


Рис. 106. Замена рамочного элемента.

а) Удаление части или всей обогреваемой стенки. Особенно типичная конструкция изображена на рис. 105: свод печи съемный, на нем

укреплена по крайней мере часть нагревательных элементов; ¹ кроме того по снятии свода можно легко извлечь испорченный нагревательный элемент из числа расположенных на стенках. ²



Рис. 107. Заменяемый нагревательный элемент.

Рамка *А* усилена поперечными связями и движется в печи по направляющим. На поперечных связях находятся изоляторы, на которых уложен зигзагами нагревательный элемент

в) Удаление части стенки, перпендикулярной к обогреваемой стене. Эта конструкция более распространена, чем первая, и особенно при рамочных нагревателях, которые применяются только при низких температурах, когда направляющие для передвижения рамки

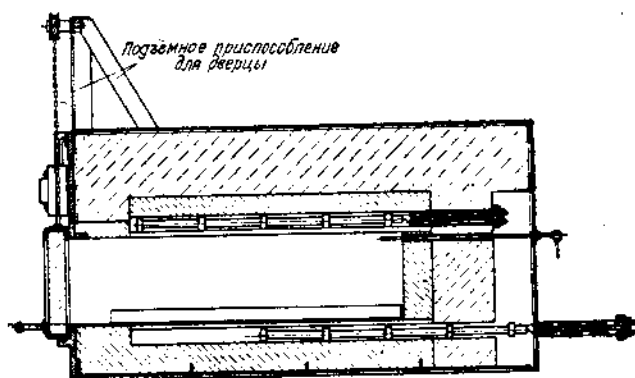


Рис. 108. Замена стержневого нагревательного элемента во время работы. На рисунке изображен подовый элемент в момент замены; элементы свода уложены в желоба подобно рис. 94 а и могут заменяться аналогичным образом.

могут быть сделаны железными (рис. 106). Сам нагревательный элемент изображен на рис. 107. Часто применяемая форма заменяемых элементов на стержнях показана на рис. 108. Интересна также конструкция, представленная на рис. 109, пригодная для не слишком глубоких печей.³

Дверца вращается на шарнире *к*, укрепленном на своде печи *а*. На дверце при помощи металлических опорных частей *г*, сверху и снизу укреплены насадки *з* и *н*, закрывающие при закрытой дверце элементы пола, стенок и свода спереди. Дверца *д* выполнена

¹ Герм. пат. 442 258.

² Брит. пат. 302 223.

³ Герм. пат. 496 256.

таким образом, что потери тепла через щели весьма малы. После открывания дверцы элементы f могут быть вынуты из желобов; предварительно нужно разъединить соединение с задней стороны стенки (на рисунке изображен такой момент для нижнего сопротивления), b — низ кожуха печи.

В этой конструкции нагревательные элементы, без сомнения, можно очень легко менять. Однако, эта легкая заменяемость покупается ценою повышенных потерь тепла, обусловленных слишком малым перекрытием дверцы, а также периодическими тепловыми потерями при открывании дверцы. Спиральные элементы в большинстве случаев можно менять только тогда, когда они лежат в желобах шамотового кирпича, причем при желании временно их можно делать более жесткими¹. В большинстве случаев они могут заменяться вместе со своими стержнями;² таких конструкций известно довольно много, но сколько-нибудь значительного применения на практике они не получили. Требования, (между которыми конструктор должен найти компромисс) предъявляемые к заменяемым нагревательным элементам, следующие:

- 1) минимальное увеличение потерь холостого хода;
- 2) удобное удаление испорченных элементов;
- 3) возможно малая потеря объема рабочего пространства;
- 4) максимальная дешевизна;
- 5) возможно быстрое выполнение замены.

Способа вполне удовлетворительного выполнения этих требований до сих пор не найдено. Лучшее всего подходит конструкция, приведенная на рис. 108, применимая только для стержневых элементов.

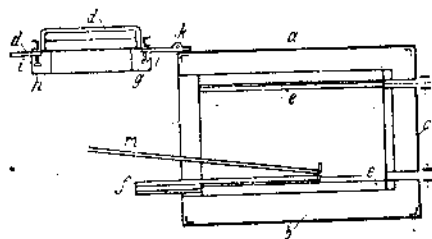


Рис. 109. Нагревательный элемент во время работы печи (по Кампеу).

2. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Неметаллические нагреватели практически никогда не утапливаются, а всегда работают со свободным излучением. При конструировании печи следует обратить особенное внимание на подведение тока к элементам. При расчете уже упоминалось, что в этом случае следует иметь в виду три положения: хорошо проводящие выводы переносят тепло от внутренней стенки печи к зажимам и, следовательно, являются источником потерь, повышая одновременно температуру зажимов; плохо проводящие выводы, хотя и уменьшают потери, вызываемые теплопроводностью, однако в общем увеличивают потери, так как

¹ Герм. пат. 508 191;

² Герм. пат. 485 287 и 505 384; Брит. пат. 271 003 и 345 874.

нагреваются током и также повышают температуру зажимов; низкая температура зажимов, необходимая для надежности контактов, вызывает большой перепад температуры на концах выводов и увеличивает таким образом тепловые потери.

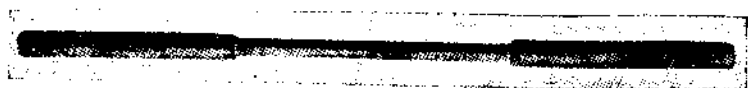


Рис. 110. Силидовый стержень с утолщенными концами.

Понижение электрического (а вместе с тем и теплового) сопротивления выводов и поддержание определенного уровня зажимов посредством интенсивного охлаждения также ни в коем случае не является идеальным выходом из положения.

Понижение сопротивления единицы длины выводов производится или путем утолщения концов или путем уменьшения удельного сопротивления в этих же местах. На рис. 110 изображен нагревательный стержень с утолщенными концами. Утолщенный конец может быть изготовлен из того же материала, что и нагревательный стержень.

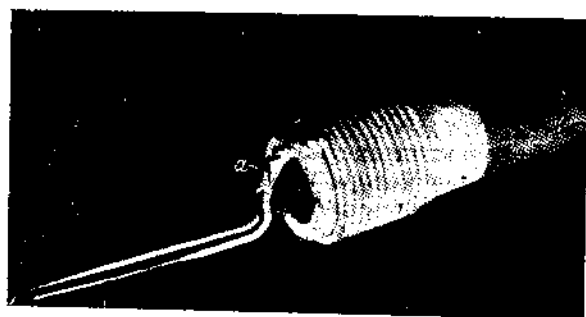


Рис. 111. Соединительная часть силидового стержня с металлизированным утолщенным концом, снабженным никелевой проволокой.

Усиление концов производится различными способами. В большинстве случаев разрезная или неразрезная муфта наводится на конец стержня, а промежуток между стержнем и муфтой заполняется замазкой или металлом.¹ Если выводы должны иметь более низкое сопротивление, чем нагревательный элемент, то может быть применена дополнительная обработка: они могут быть силицированы,² покрыты алюминием,³ обмотаны алюминиевой проволокой⁴ или же, наконец, их можно обработать тугоплавкими металлами.⁵

¹ Герм. пат. 399 502, 480 750 и 481 735.

² Герм. пат. 488 635.

³ Герм. пат. 353 072.

⁴ Герм. пат. 388 170.

⁵ Герм. пат. 443 936.

Длина утолщенных концов в настоящее время доводится до 300, максимум 350 мм. Из этой длины необходимо вычесть еще некоторую часть для укрепления проволоки, идущей к соединительному зажиму (рис. 111), так как эта проволока не должна лежать в стенке печи. Вследствие этого стенки печей приходится делать довольно тонкими, в результате чего применение такого вывода при высоких температурах менее экономично.

При температурах до 1000° можно рекомендовать стержни без утолщений, но с металлизированными концами.

При установке стержней необходимо заботиться о том, чтобы они могли легко расширяться; поэтому выводные трубки следует набивать асбестовой ватой не туго. Равным образом контакты не должны делать стержень жестким. Применяется специальная форма конца намоточной проволоки (а на рис. 111), дающая возможность свободного удлинения стержня.

Необходимость свободного расширения затрудняет также устройство выводов вертикальных стержней, так как они могут быть закрепляемы только с одной стороны. Прежде закреплялся верхний конец, в то время как нижний конец мог свободно расширяться. Если окалина попадала в нижнее отверстие, стержень зажимался и ломался, так как не мог расширяться. Во избежание этого стали утапливать нижний конец стержней на изолированную плиту, так что они получили возможность свободно расширяться вверх.¹ При вертикальном расположении стержней во избежание проникновения воздуха внутрь печи необходимы еще дополнительные предохранительные мероприятия.

Наконец, следует тщательно следить за тем, чтобы в материале стержней не возникло изгибающих напряжений, т. е. чтобы стержни никоим образом не подвергались давлению со стороны подведенных к ним проводов.

Вполне понятно, что концы стержней должны быть возможно холодными. Для этой цели, если недостаточно естественного воздушного охлаждения, применяются охлаждающие ребра.² При большой толщине стенки печи концы выводов не могут быть расположены свободно, так как длина выводных концов, как сказано выше, не может быть увеличена по соображениям механической прочности. В этом случае в месте вывода в стенке печи делается выемка (рис. 112), однако, чтобы расположенные в углублении стенки выводы были достаточно охлаждены, применяется направляющий железный лист для воздуха. Вполне понятно, что вследствие этого возникают новые тепловые потери.

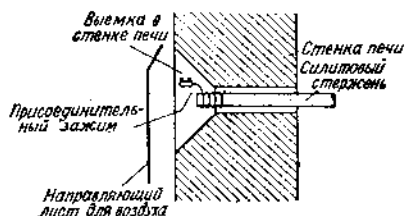


Рис. 112. Углубления в стенке печи для охлаждения присоединительных зажимов.

¹ Брит. пат. 305 470.

² Швейц. пат. 121 282.

Совершенно другой путь избрало американское о-во «Глобар», разработавшее выводы под этим же названием¹. Эти выводы (контакты) изготовлены из металла и прижимаются осевым давлением пружины к силитовому стержню. Во избежание дополнительной тепловой нагрузки места контакта вследствие наличия переходного сопротивления, концы силитового стержня подвергаются специальной

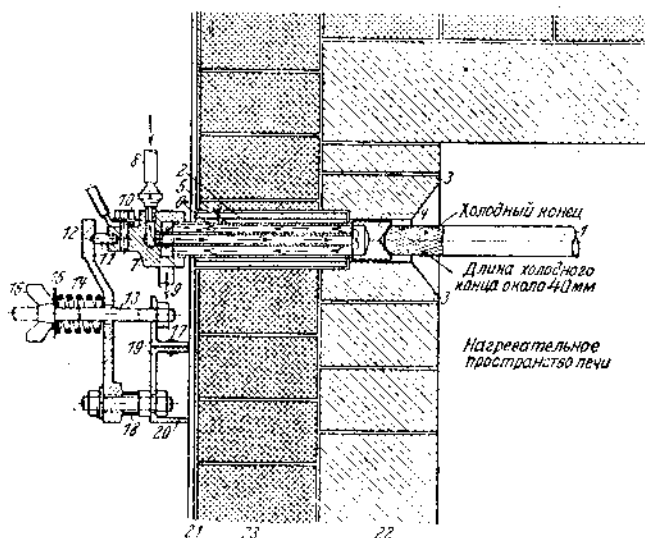


Рис. 113. Укрепление нагревательного элемента Глобар с охлаждаемыми водой токоподводящими зажимами.

обработке, повышающей их способность проводить ток, так что выделение тепла в этих местах меньше, чем на рабочей длине стержня. Для того, чтобы при этом не уменьшить полезного объема печи, применяется кирпич специальной формы (3 на рис. 113), имеющий соответственный вырез. Контакты из жароустойчивого металла при температурах до 1000° охлаждаются воздухом, а при более высоких температурах они делаются пустотелыми и охлаждаются водой.

Схема присоединения водяного охлаждения ясно видна из рис. 113.

Обозначения на фиг. 113 следующие:

1 — стержень Глобар; 2 — трубка; 3 — фасонный кирпич; 4 — охлаждаемая водой головка контакта; 5 — внешняя отводящая трубка (охлаждающая вода); 6 — внутренняя подводящая трубки (охлаждающая вода); 7 — головка зажима; 8 — приходящая вода; 9 — уходящая вода; 10 — подвод тока; 11 — электрическая изоляция; 12 — на-

¹ Швейц. пат. 126 639.

жимной рычаг; 13 — болт; 14 — нажимная пружина; 15 — подкладная шайба; 16 — крылатая гайка; 17 — коптргайка; 18 и 19 — дистанционные прокладки; 20 — держатель зажима; 21 — кожух печи; 22 — огнеупорная футеровка; 23 — тепловая изоляция.

Замена стержня возможна и в горячей печи (рис. 114).

Перед закладкой нового стержня следует нагреть таковой до возможно более высокой температуры. В печь вводятся металлические трубы и прижимаются к концам стержня, подлежащего удалению.

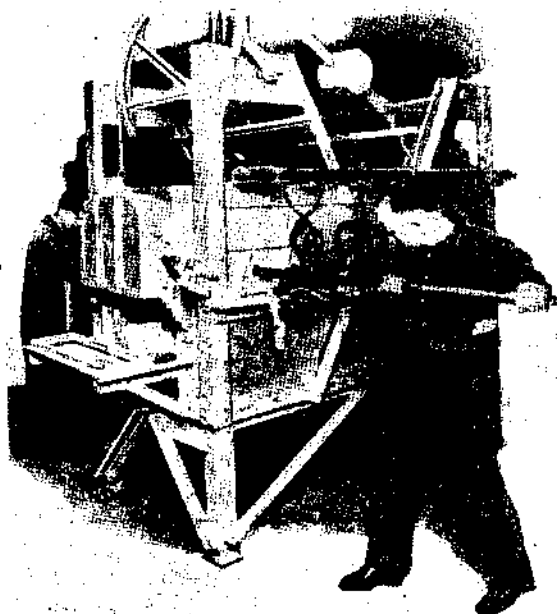


Рис. 114. Замена стержня Глобар во время работы печи.

При одновременном нажиме на обе трубы элемент проталкивается на одну сторону печи. Затем новый стержень прикладывается к протолкнутому концу трубы и прижимается другой трубой, после чего, удерживаемый в таком состоянии, вводится в печь. Замена одного стержня продолжается 10—15 минут.

В. СТЕНКИ ПЕЧЕЙ

Конструкция внутренних стенок печи в чрезвычайно большой степени зависит от рабочей температуры печи. В соответствии с этим мы рассмотрим конструкции стенок для названных ранее трех групп печей в отдельности.

1. ПЕЧИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

а) Стенки и свод

Внутренняя стенка делается из листового железа. Для удержания в определенном положении и для поддержания веса изделий она должна быть соединена с наружной стенкой при помощи связей. Здесь нужно обратить внимание на следующее:

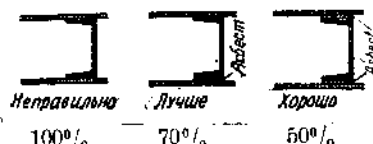


Рис. 115. Схема соединения внутренней и внешней стенок печей низкой температуры.

Потери на 1 м профильного железа по отношению к неправильному соединению, припаятому за 100%.

1. Внутренняя и внешняя стенки имеют весьма различные температуры; следовательно, обе стенки должны работать отдельно друг от друга. Поэтому соединительные связи не должны быть очень жесткими.

2. Значительные расширения от нагревания, которым подвержена внутренняя стенка, должны быть предусмотрены самой конструкцией печи.

3. Каждое металлическое соединение (связь) между внутренней и внешней стенкой вызывает тепловую потерю. Последняя тем больше, чем короче связь и чем больше ее сечение.

4. Промежуток между стенками и соединительными связями, по возможности, набивают асбестом или другим плохим проводником тепла. Даже очень тонкие слои изоляции дают заметные результаты (рис. 115).

В качестве теплоизоляции часто применяется шлаковая вата (свойства ее описаны на стр. 148). В Америке часто для печей низкой температуры пользуются воздушными изоляционными прослойками, асбесто-кизельгуровыми и асбесто-магнезитовыми смесями. При рыхлых материалах, как, например, шлаковой вате, набивка должна быть достаточно тугой.

Значительные потери вследствие тепловых коротких замыканий дали в Америке повод составлять стенки печей из отдельных деталей. Два типичных образца таких конструкций изображены на рис. 116 и 117. В конструкции по рис. 116 применяются изолированные соединительные куски для связи отдельно доставляемых панелей, имею-

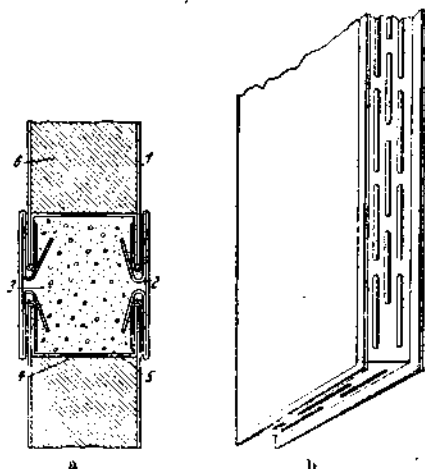
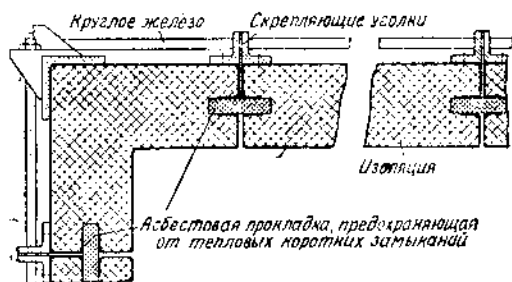


Рис. 116. Конструкция стенки печи.

щих, благодаря перфорации торцевой жести, весьма малые тепловые короткие замыкания (рис. 116b).

Обозначения на рис. 116 приняты следующие:

a — разрез через соединение; *1* — стальной кожух; *2* — замыкающая деталь, являющаяся одновременно компенсатором; *3* — изоляция соединительного участка; *4* — отверстие в торце стенки; *5* — стальной кожух соединительного куска; *6* — изоляция панели; *b* — вид панели печи.



{ Рис. 117. Конструкция стенки печи.

б) Дверицы

От температуры печи зависит также и конструкция дверцы. Дверца печи низкой температуры в большинстве случаев состоит из коробки, наполненной теплоизоляционным материалом. Большие дверцы, вследствие значительной разности температур, могут перекосяться; дверная рамка, находя-

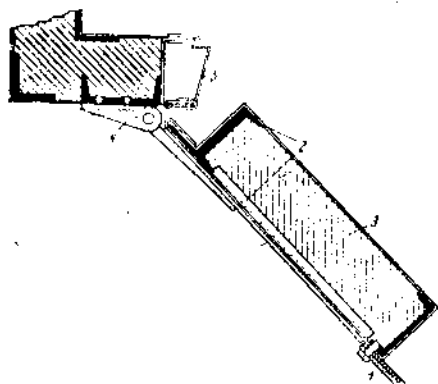


Рис. 118. Конструкция дверцы. *1* — уплотнение дверцы; *2* — железный кожух; *3* — изоляция дверцы; *4* — переставная петля; *5* — пружинящее уплотнение дверцы.

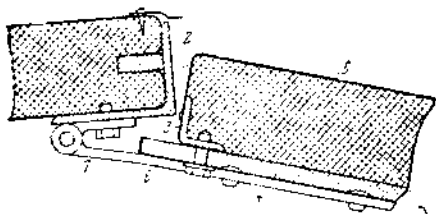


Рис. 119. Конструкция дверцы.

щаяся в металлическом соединении с внутренностью печи, нагревается, в то время как середина плоскости дверцы, защищенная хорошей изоляцией, остается относительно холодной.

Были попытки уменьшить тепловые короткие замыкания самой дверцы и прилегающих к ней петель путем применения соответств-

ных конструкций (рис. 118). Для того, чтобы достигнуть герметичности, соприкасающиеся плоскости дверцы и печи рекомендуется обкладывать эластичным материалом, например, асбестом, который даже при появлении небольшого перекоса дверцы достаточно хорошо уплотняет щели.

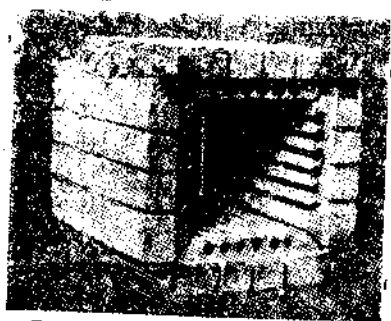


Рис. 120. Стенка печи из фасонного кирпича.

Другая американская конструкция изображена на рис. 119.

Обозначения, относящиеся к этому рисунку, следующие:

1 — асбестовая прокладка, препятствующая тепловым коротким замыканиям; 2 — дверца, закрываемая легко и плотно; 3 — рамка из углового железа для усиления конструкции; 4 — 12-миллиметровый асбестовый картон, перекрывающий зазоры и препятствующий теплопередаче от угольника к кожуху; 5 — тепловая изоляция; 6 — внешний кожух; 7 — петля, допускающая полное открытие дверцы.

2. ПЕЧИ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

а) Стенки

Внутренняя стенка печи в большинстве случаев делается из шамота и кладется или из специального фасонного кирпича (рис. 120) или из нормального кирпичика и половинок (рис. 121). Применяются также и нормальный и фасонный кирпич (рис. 122).

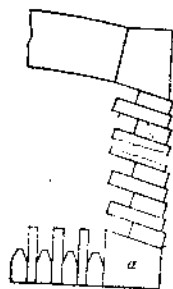


Рис. 121. Схема кладки печи.

При помощи одного номера фасонного кирпича (а) боковая стенка может быть выложена нормальным кирпичом и защищать со-
противления от опадающей окалины (см. рис. 104).

Если печь должна отапливаться при помощи спиральных элементов, то на поверхности нагреваемых стенок должны быть приготовлены соответственные углубления, о форме которых сказано при рассмотрении конструкций нагревателей. Боковые стенки печи из специального фасонного кирпича и из сплошных плит должны быть предохранены от опрокидывания. Боковые стенки из нормального кирпича также необходимо предохранить от опрокидывания наружу. Поэтому, несмотря на возникающее вследствие этого повышение потерь холо-
стого хода, изолирующий слой обычно приходится делать, хотя бы частично, из кирпича, для того чтобы поддержать внутреннюю стенку. Промежутки между контрфорсами из изоляционного кирпича могут быть заполнены изоляционным порошком. Под

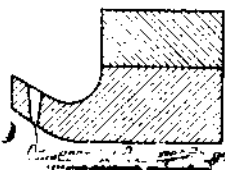


Рис. 122. Фасонный кирпич для стенки печей. В желобки укладываются спирали. Металлические штафты предохраняют та-
ковые от выпучивания.

печи также приходится устанавливать на фундаменте из теплоизоляционного кирпича. В случае более значительных нагрузок на под, особенно при высоких температурах, и частом их колебании приходится делать не отдельные опорные столбики, а полностью уложить весь под на кирпичную тепловою изоляцию.

б) С в о д

Свод может быть выполнен:

- а) в виде перекрытия целой плитой;
- б) в виде свода обычного типа;
- в) в виде подвешенного свода.

Свод из сплошной плиты обычно возможен только при ширине печи не свыше 1 м, так как шамотные плиты большего размера до настоящего времени не удастся изготовить достаточно надежными. Шамотные плиты большей длины можно выполнять только при очень значительной их толщине, что нежелательно по теплотехническим соображениям и повышает опасность излома.

При большей ширине, а также при круглых печах свыше 0,5 м диаметром, необходимо применять нормальный свод. Распор свода окончательно воспринимается только наружными стенками печи и ее арматурой. Само собою разумеется, что при этом все промежуточные части должны быть достаточно прочными. Если нагрев слоев, паходящихся за огнеупорной футеровкой, достигает температур свыше 900° , то изоляционные материалы могут быть сдавлены распором свода (рис. 123). Если кирпичи тепловой изоляции m в месте a соприкосновения с огнеупором сдадут, то свод оседет. Во избежание такой опасности рекомендуется делать кирпичи $m-m$ (или, в зависимости от температуры, только внутри расположенные кирпичи m) не из изоляционного материала, а из шамота. Вследствие того, что теплопроводность шамота значительно выше, чем теплоизоляционных материалов, возникают дополнительные тепловые потери.

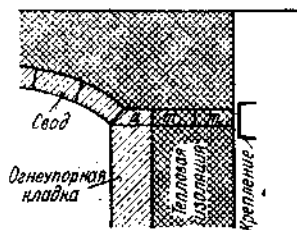


Рис. 123. Опора свода.

Расчет величины распора свода затрудняется по двум причинам:

1. Помимо собственного давления свода — статического давления, которое нужно рассчитать, возникают вследствие неравномерного теплового расширения, дополнительные напряжения, которые могут быть значительно больше, чем статическое давление, и не поддаются никакому предварительному расчету.

2. Коэффициенты прочности материала, как об этом уже сказано в разделе «Строительные материалы для печей», в большинстве случаев неизвестны. Поэтому в области применения изоляционного кирпича для поддержания свода можно действовать только ощупью, однако не следует опасаться опытов в этом направлении, учитывая достигаемую таким образом большую экономию тепла.

При ширине печи свыше двух метров обычные своды в эксплуатации весьма ненадежны и потому применяются редко. М. Ф. Кинг (Ж 57) описывает испытанный в Америке достаточно надежный способ применения сводов для печей даже большей ширины. Обычно в таких больших печах делаются так называемые подвесные своды (рис. 124), сложенные из отдельных фасонных кирпичей, подвешенных к несущему каркасу, расположенному вне печи. При этой конструкции необходимо выполнить следующие специальные условия:

1) кирпичи не должны истираться соприкасающимися сторонами, поэтому между отдельными кирпичами должны быть соответственные просветы (щели);

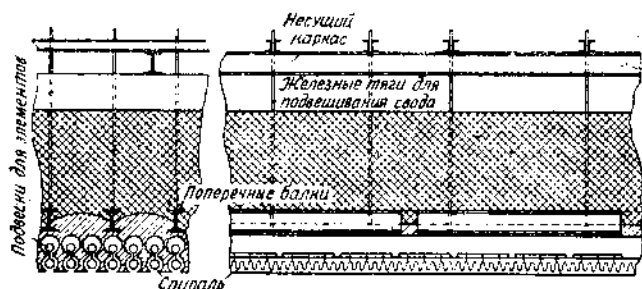


Рис. 124. Подвесной свод. Спираль подвешены к коротким изоляторам.

2) эти просветы не должны проходить через всю толщину свода наружу;

3) сквозь просветы не должны попадать внутрь печи частички изоляции и т. п.;

4) подвески, несущие отдельные кирпичи, должны быть механически достаточно прочными даже при высокой температуре наружной поверхности шамота;

5) подвески должны отводить возможно меньшее количество тепла.

Просветы между кирпичами могут быть обезврежены путем накрывания их асбестовым картоном, а в печах высокой температуры — кирпичами. Применение изоляционного порошка для изоляции подвесного свода, согласно изложенному, практически совершенно исключается, так что при этой конструкции неизбежны относительно большие тепловые потери.

Для того, чтобы уменьшить тепловые потери через подвески, таковые должны быть изготовлены из материалов с малой теплопроводностью, поскольку свобода выбора не ограничивается требованиями механической прочности. Были предложены даже конструкции, при которых подвески составлялись поочередно из металлических и керамических звеньев, чтобы уменьшить теплопроводность.

Американская практика отчасти разрешила вопрос устройства неподвесных сводов шириной более двух метров посредством применения сводового кирпича специальной формы (рис. 125).

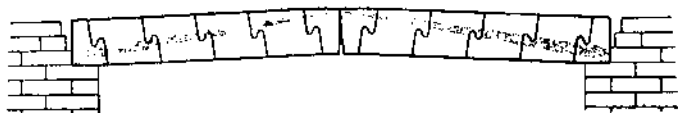


Рис. 125. Специальная конструкция свода из фасонного кирпича.

Заштрихованная площадь изображает направление главного усилия распора свода. Щели у края и по середине дают возможность всей конструкции «дышать». Обращает внимание малая стрела свода.

На рис. 126 изображена общая схема кладки печи.

Следует обратить внимание на направление нагревательных элементов, расположенных на своде вдоль, а на полу поперек печи, чем значительно облегчается поддержание более равномерного распределения температуры. Печь служит для цементации; чтобы дать свободный выход продуктам сгорания цементирующего порошка, сделана вытяжная труба, снабженная клапаном,

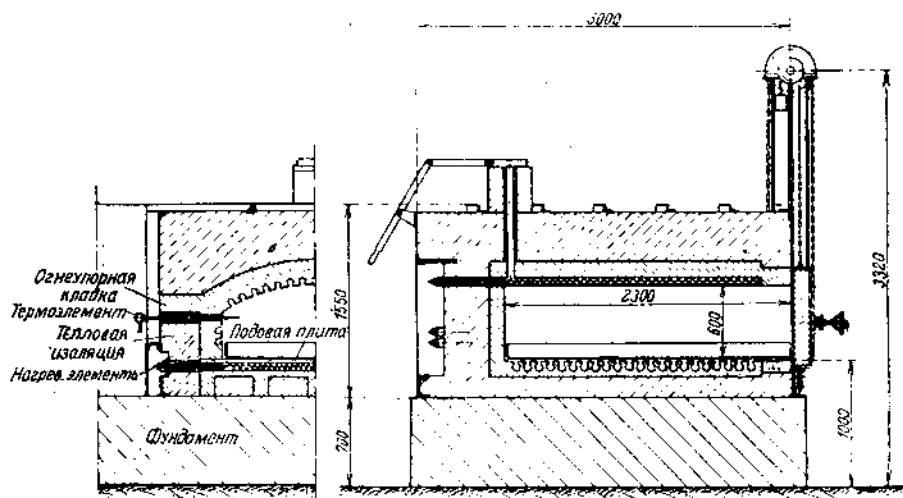


Рис. 126. Схема кладки камерной печи.

Еще в разделе «Расчет» упоминалось о печах с муфелями наружного нагрева. Печь Вильд-Барфильда представляет собой тип печи с шамотным муфелем, имеющим на наружной его поверхности нагревающую обмотку. Муфель с обмоткой окружен порошком магнезии (стр. 242).

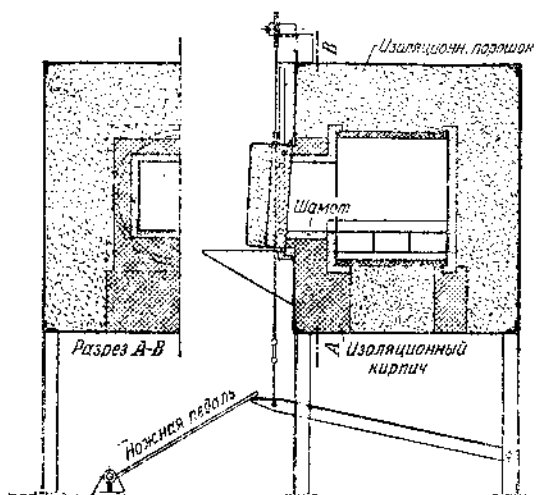


Рис. 127. Муфельная печь.

За исключением опорных кирпичей, на которых постоит муфель, вся изоляция сделана из порошка, благодаря чему потери холостого хода очень малы.

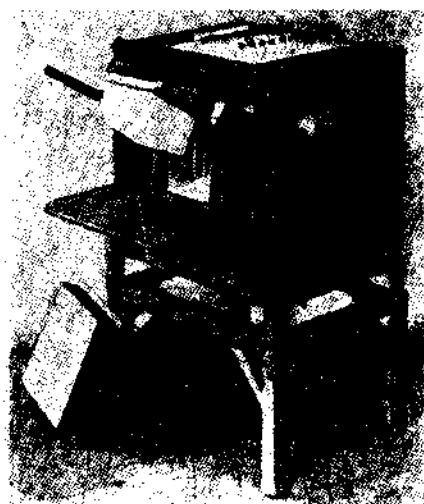


Рис. 128. Откидная дверца. Следует обратить внимание на верх печи: предохранительный кожух снят, видны соединения силиконовых сопротивлений.



Рис. 129. Уплотнение дверцы песочными запорами (сверху и снизу).

На рис. 127 изображен разрез печи, в которой муфель окружен теплоизоляционным порошком. Конструкция такой муфельной печи получается очень простой. При вертикальном нагреваемом пространстве печи необходимо сделать только нижнюю часть из прочного материала (изоляционного кирпича). Муфель выдерживает собственный вес и окружается изоляционным порошком. Горизонтальный муфель должен быть установлен своими концами на кирпичи. Весь остальной промежуток может быть заполнен изоляционным порошком.

Подобна этому и конструкция таких печей, длина которых настолько велика, что приходится приставлять ряд муфельей. В местах притыка одного муфеля к другому устанавливаются кирпичи, поддерживающие оба муфеля; остальная часть печи заполняется обычным образом теплоизоляционными материалами (Мазукович, Ж 58).

с) Д в е р ц ы

В малых печах иногда применяются откидные дверцы (рис. 128); в печах большего размера движение дверцы происходит в большинстве случаев в плоскости, параллельной плоскости дверцы (отодвигаемая в сторону или поднимаемая дверца). При любой конструкции должны быть соблюдены следующие условия:

- 1) плотное закрывание печи;
- 2) легкое обращение;
- 3) малый вес;
- 4) небольшие тепловые потери;
- 5) прочность, т. е. сохранение первоначальных свойств после более или менее продолжительной эксплуатации.

К пункту 1). Для этой цели на горизонтальных ребрах дверцы применяются преимущественно песочные карманы, действие которых, вследствие влияния углов, ограничено (рис. 129). На вертикальных ребрах уплотнение производится прижиманием. Внешняя лобовая стенка печи, обычно изготовляемая из железа, трется о кирпич; при этом неизбежно некоторое истирание последнего. Чтобы обезвредить действие истирания, дверца иногда делаетсядвигающейся не вверх, а вниз. В результате падающие с дверцы частички кирпича не попадают на находящиеся в печи изделия. Чтобы по возможности уменьшить истирание, применяют конструкцию, при которой с помощью соответственно выполненных направляющих дверца приводится в соприкосновение со стенкой печи только в момент окончательной посадки, т. е. в конце закрывания¹ (рис. 130):

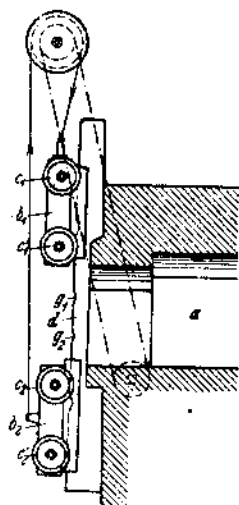


Рис. 130. Конструкция дверцы.

¹ Швейц. пат. 143 500.

a — печное пространство; b_1, b_2 — половинки дверцы; c_1, c_2 и c'_1, c'_2 — ролики дверцы; направляющая d снабжена выемками g_1 и g_2 , в которые попадают ролики, соединенные с половинками дверцы, в конечных их положениях. Помимо указанных роликов, обеспечивающих плотное закрывание дверцы, на рисунке показана конструкция, допускающая быстрое открывание и закрывание дверцы, состоящей из двух половинок. При помощи выступов на направляющих дверца отводится от рамки в самый момент открывания, и таким образом ее износ уменьшается. Противовес становится излишним, так как обе половинки дверцы взаимно уравниваются. Чтобы улучшить прилегание дверцы к стенке печи, часто употребляется специальное прижимное устройство (нажимные болты и т. п.; см. рис. 145).

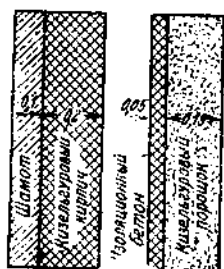


Рис. 131. Способы футеровки дверцы.

Несмотря на одинаковую теплопроводность в конструкции b потеря значительно меньше, чем в конструкции a , так как поверхность ее меньше.

и стоимость. С другой стороны, малый вес свидетельствует о малой толщине слоя изоляции; поэтому требование возможно малого веса часто противоречит требованию 4 — малых тепловых потерь. Некоторый компромисс между этими требованиями может быть создан путем отступления от обычной формы футеровки (например, рис. 131а, вес около 340 кг/м^2) и применения для футеровки дверцы схемы примерно по рис. 131б. Такая футеровка при приблизительно одинаковом тепловом сопротивлении весила бы только 135 кг/м^2 .

Следует добавить, что при обычной конструкции, когда дверца движется по лицевой передней стенке печи, поверхность, определяющая потери, становится меньше, если дверца тоньше. Футеровка по этому способу предполагает, правда, высококачественный изоляционный материал. Такая дверца, насколько известно автору, впервые была применена в американской практике (Джонс-Менвилль).

Другим способом уменьшения веса дверцы является уменьшение перекрытия, хотя при этой конструкции потери через боковые поверхности дверцы увеличиваются (рис. 132). С другой стороны, слишком большое перекрытие делает дверцу слишком тяжелой. Для устранения этого противоречия, дверца была выполнена как часть передней стенки (рис. 133). Благодаря этому перекрытие равно 0, и в то же

время избегаются потери через боковые поверхности дверцы. Применение этой конструкции, правда, ограничивается малыми печами (Цеперник, Ж 59).

Существенное значение для малых тепловых потерь имеет плотное прилегание дверцы. Особенно значительно могут быть снижены потери при двух расположенных одна за другою дверцах. При этом внешняя дверца подвергается со своей внутренней стороны действию сравнительно низкой температуры, и потери через нее сильно уменьшаются. Такие дверцы строятся так, что внутренняя дверца только вставляется в печь.

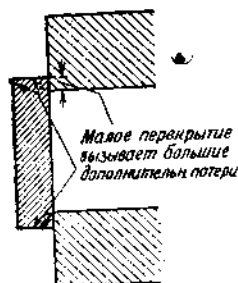


Рис. 132. Значение внешнего перекрытия дверцы.

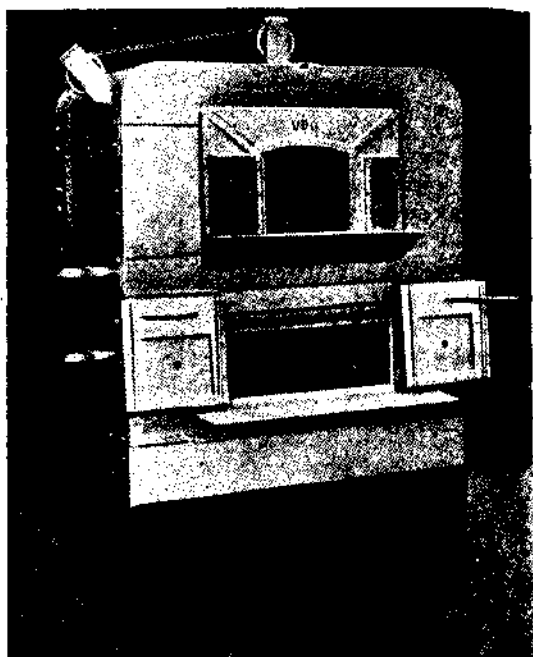


Рис. 133. Конструкция дверцы. Дверца верхней камеры двойной муфельной печи скользит не перед передней стенкой, а в ней. Накладная дверца раздвижная.

Известны также конструкции, в которых обе дверцы (паружная и внутренняя) приходят в движение одновременно¹ (рис. 134).

Внешняя дверца f связана с внутренней a при помощи троса или цепи g . Внутренняя дверца усилена металлическими частями c , укрепленными на валу b . При подъеме дверцы f вращением d , укрепленного на валу b цепное колесо также приводится во вращение и дверца a укладывается в углубление g . Дверцы уравновешены противовесами k .

Иногда вместо внутренней дверцы применяется цепной занавес. Загрузку и выгрузку из печи нехрупких изделий можно тогда производить со спущенными цепями, благодаря чему уменьшаются тепловые потери. Эти цепи подвергаются воздействию температуры печи и поэтому должны быть изготовлены из жароустойчивого материала, что влечет за собою удорожание дверцы. Во избежание этих расходов цепи

¹ Герм. пат. 461 427 и 474 940.

помещаются против дверного отверстия только при открытой двери, благодаря чему уменьшаются потери тепла на лучеиспускание, однако при этом терлется действие двойной дверцы (рис. 135).

Цепной занавес укреплен снизу подъемной дверцы. Когда дверь поднимается, занавес устанавливается против отверстия муфеля, освобождая для загрузки или разгрузки печи только отверстие, соответствующее величине изделия. Когда дверь закрыта, цепной занавес висит спаружи и может охлаждаться.

В заключение приведем конструкцию механизма для приведения в движение печной дверцы, при котором вопрос о весе дверцы значительно утрачивает свою остроту (рис. 136). Раскаленная внутренняя поверхность дверцы, правда, при этом приходит в близкое соседство со сравнительно хо-

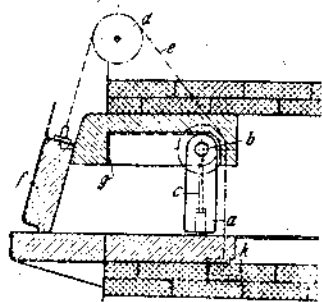


Рис. 134. Печь с двумя взаимно связанными дверцами.

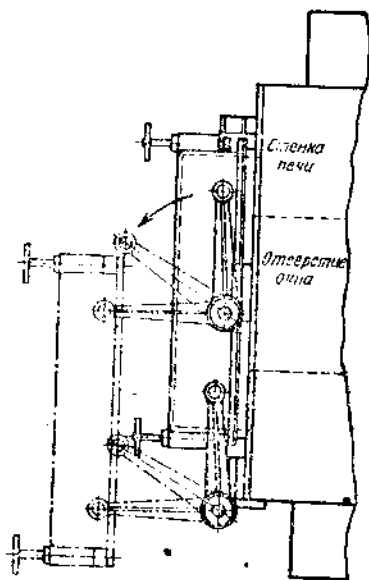


Рис. 136. Конструкция дверцы. Вид сверху.

После удаления закрепления (маховички) дверца может быть передвинута в направлении, указанном стрелкой, вокруг двух вертикальных осей. Пунктиром обозначена дверца в полуоткрытом состоянии.

Рис. 135. Цепной занавес.

лодной наружной стенкой печи. Вследствие этого дверца сильно охлаждается, что влечет за собою тепловые потери и кроме того умень-

² Русс. герм. пат. 896 790.

шается прочность дверцы. Затем, может также пострадать окраска печи

Для вертикальных печей роль дверцы выполняет крышка. Если большие крышки можно приводить в движение только механическим путем, то крышки малых печей можно сделать откидными. Обычно применяется следующая конструкция: крышка приподнимается при помощи рычага, закрепляется в приподнятом положении и после этого сдвигается в сторону вторым рычагом. Вследствие применения предварительного вертикального подъема можно пользоваться песочным затвором ¹.

3. ПЕЧИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Стенки, верх (свод) и дверцы печей высокой температуры делаются совершенно так же, как в печах средней температуры. Необходимо только уложить за огнеупорной внутренней стенкой слой полугнеупорного кирпича, потому что теплоизоляционные материалы не в состоянии выдержать тех температур, до каких нагреваются внешние слои огнеупорной футеровки. Вследствие этого высококачественные изоляционные материалы отодвигаются наружу, что при одинаковых внутренних размерах печи связано со значительным увеличением тепловых потерь (рис. 29).

С. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПЕЧЕЙ

(Загрузочные и транспортные устройства)

Возможность получения низких температур на наружной поверхности электропечей, а также простота их включения дали толчок к изготовлению таких печей, которые легко могут быть включены в цепь современного поточного производства. В противоположность ранее применявшимся печам с угольным или нефтяным отоплением, электропечь не создает вредных условий работы своим жаром и отходящими газами. Ввиду этого электропечь натолкнула на конструирование и разработку ряда более или менее автоматических загрузочных и транспортных приспособлений, область применения которых, как показал позднейший опыт, не ограничивается электропечью (Булле и Флессель, Ж 60). Однако употребление их при электропечи значительно облегчается, благодаря чистоте во время работы

Исключительное разнообразие конструкций электропечей обуславливается тем, что эти приспособления обычно должны работать совместно с другими приспособлениями для эксплуатации, так что один и тот же процесс может выполняться при помощи весьма разнообразных средств для перемещения. Чтобы дать общее представление о них, мы воспользуемся классификацией их с теплотехнической точки

¹ Брит. пат. 255 479; амер. пат. 1 646 213.

зрения. Приспособления для загрузки и перемещения материалов оказывают влияние не только на стоимость этих операций, но и на все тепловое хозяйство печи. Это влияние выражается:

- 1) в увеличении теплосодержания (или мертвого веса) печи
- 2) в увеличении потерь холостого хода.

Применение загрузочных приспособлений может повлечь за собою и уменьшение расхода тепла, так как они сокращают время, потребное для выгрузки и новой загрузки изделий в печь (благодаря чему увеличивается пропускная способность печи, а потери холостого хода уменьшаются). Помимо того, загрузочные приспособления могут значительно уменьшить время, в течение которого дверца печи остается открытой. Наиболее резкая разница между различными конструкциями, без сомнения, заключается в их влиянии на мертвый вес; поэтому последний мы положим в основу классификации приспособлений для загрузки и внутрипечного перемещения. В соответствии с этим мы получаем следующие группы загрузочных и транспортных приспособлений в порядке повышения расхода тепла в связи с увеличением мертвого веса:

- 1) загрузочные приспособления, работающие вне печи и совершенно не попадающие в печь (мертвый вес равен 0);
- 2) приспособления, находящиеся в печи (мертвый вес равен 0, но зато обычно увеличивается теплосодержание и потери холостого хода печи);
- 3) приспособления, находящиеся в печи короткое время;
- 4) приспособления, находящиеся в печи столько же времени, сколько и изделие.

Между отдельными группами нет резких границ и потому отнесение приспособлений к той или иной группе в последующем изложении может иногда показаться несколько произвольным.

1. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, РАБОТАЮЩИЕ ВНЕ ПЕЧИ

Типичной для этой группы является загрузка при помощи толкателя. Толкатель через равномерные промежутки времени продвигает в печь ближайшее к нему изделие; оно толкает следующее, лежащее ближе к середине печи и в свою очередь передающее толчок дальше, так что последнее изделие выходит из печи (рис. 137). Во избежание истирания пода печи проложены рельсы; при высоких температурах и при длинных печах следует позаботиться о том, чтобы эти рельсы не срывались с места.

Само собою разумеется, что это приспособление может найти применение только тогда, если изделия достаточно прочны для того, чтобы выдержать такого рода транспорт. Часто в тех случаях, когда изделия не обладают надлежащей прочностью, их укладывает на листы из материала, достаточно жар устойчивого, соответственно температуре печи; такие листы, однако, уничтожают преимущества малого мертвого веса.

На рис. 138 изображено загрузочное приспособление, относящееся к этой же группе. В нем толкатель заменен цепью с кулачками.

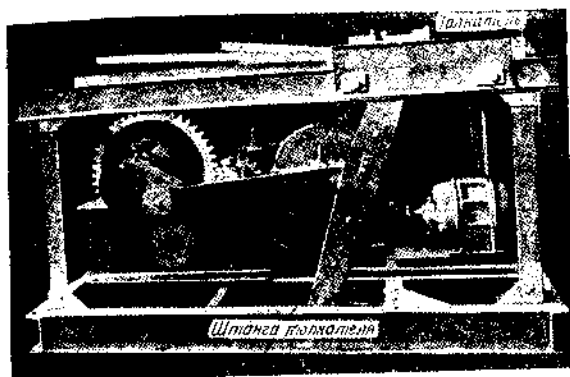


Рис. 137. Толкатель.

В станке виден мотор, приводящий в движение при помощи червяка и двух пар цилиндрических зубчатых колес эксцентрик, передающий колебательное движение штанге толкателя.

Здесь же следует упомянуть о протяжных печах, применяемых для термической обработки проволоки, ленты или жести, в которых

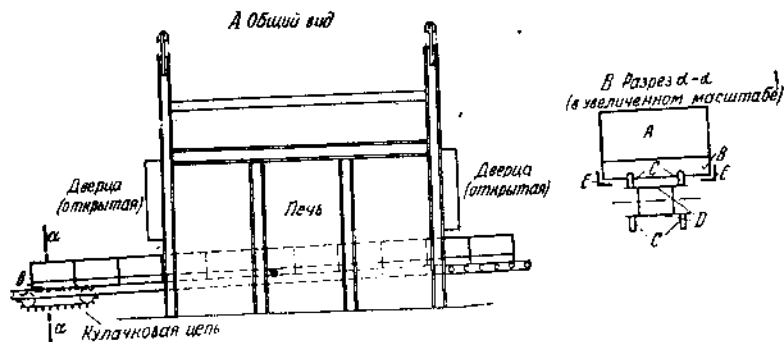


Рис. 138. Печь с кулачковой цепью.

Коробки А снабжены ребрами В, за которые захватывают кулачки цепи D. Коробки скользят в направляющих Е.

изделие протягивается через печь при помощи установленного снаружи устройства (такие печи описаны на стр. 268—271). Сюда же следует отнести печи со съемной рабочей камерой (стр. 241) и нагревательные колодцы со съемной крышкой (стр. 240).

2. ЗАГРУЗОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, ПОСТОЯННО НАХОДЯЩИЕСЯ В ПЕЧИ

а) Подскачивающимися секциями

Печи с такими загрузочными приспособлениями можно назвать также печами с качающимися секциями (балками) пода.

Схема действия такой печи показана на рис. 139, а конструктивное выполнение в значительной мере зависит от температуры печи.

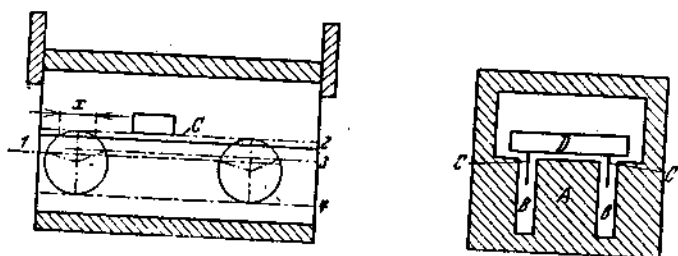


Рис. 139. Принцип устройства печи с подъемными мостами.

Под печи *A* снабжен двумя или несколькими прорезами *B*, в которых движутся качающиеся балки *C*, приводимые в движение эксцентриками или другими соответственными приспособлениями, заставляющими каждую точку качающейся балки двигаться по кругообразной, эллиптической или иной траектории. При этом изделие *D* поднимается с неподвижного пода, при каждом ходе балки передвигается на величину *x* и снова укладывается на под. Приводное устройство может быть расположено в прорезах или под ними, либо, если качающиеся балки выходят за дверцу, то и снаружи печи. Литерами 1—4 обозначен ряд последовательных положений эксцентрика.

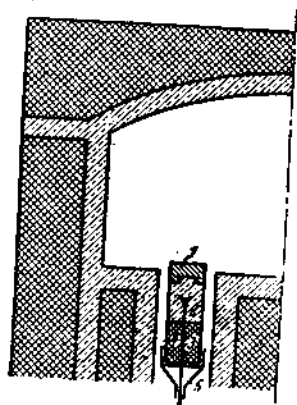


Рис. 140. Конструкция качающихся секций пода.

Изгибающие напряжения в балках при устройстве, отвечающем типовому эскизу рис. 139, часто достигают очень высоких значений, что в случае применения такого приспособления при высоких температурах недопустимо. В таких случаях рекомендуется конструкция качающихся секций пода печи, изображенная на рис. 140.

Обозначения, принятые на рис. 140, следующие:
1 — огнеупорная кладка должна быть твердой, нехрупкой и мало изнашиваемой, 2 — огнеупорный цемент, соединенный при помощи ласточкиного хвоста с 1 и посредством металлических стержней 3 (круглое железо и т. п.) с каркасом 5; 4 — изоляционный кирпич; 5 — каркас, связанный с эксцентриком (эксцентрик на рисунке не показан). Таким образом сверху балки выкладываются огнеупорным кирпичом, и защищаются эксцентрики, располагающиеся под печью. Во многих случаях, например, при длинных низких печах, эти эксцентрики устраивают таким образом, чтобы их можно было извлекать из-под печи для ремонта или замены.

В соответствии с различными требованиями, предъявляемыми к равномерности хода, движение секций пода иногда разделяется на вертикальное и горизонтальное, так что необходимо два отдельных мотора. Вместо неподвижных и подвижных секций пода можно также применять две системы секций подвижных, привод которых относительно друг друга имеет сдвиг по фазе времени¹. Вполне понятно, что основную форму этого устройства можно развивать и дальше, причем оно сможет выполнять и ряд дальнейших функций. Примером такой конструкции могут служить сконструированные французской фирмой Луа и Обе печи², в которых производится одновременно передвижение и переворачивание плоских изделий.

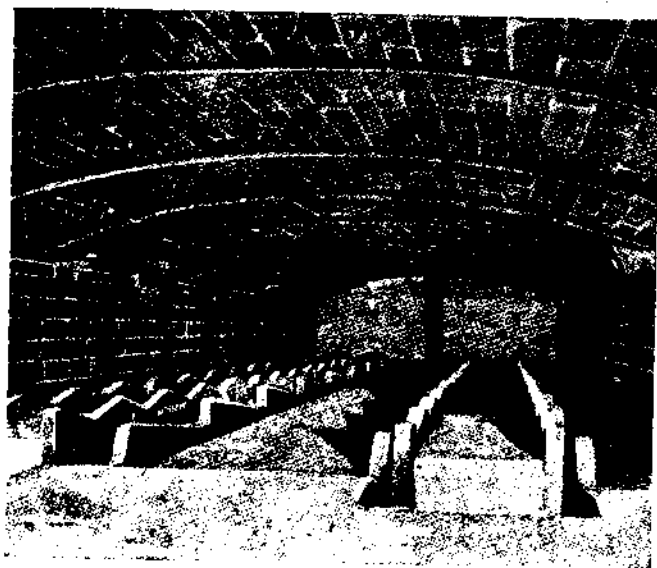


Рис. 140а. Вид печи с катающимися секциями пода.

На рис. 140а изображена печь с двумя катающимися секциями пода. Секции снабжены зубчатыми бортами из нихрома, служащими для захвата и переноса изделий.

б) Роликовый под

Под печи состоит из ряда роликов, вращающихся с одинаковой скоростью. Эти ролики обычно приводятся в действие механизмом, расположенным вне печи, и передвигают находящиеся на них изделия.

¹ Амер. пат. 1886696.

² Франц. пат. 515 837.

На рис. 141 изображен внутренний вид печи с роликовым подом (см. Пашкис, Ж 13). Конструктивное выполнение роликов может быть весьма разнообразным. Для неслишком высоких температур ролики могут быть изготовлены из жароустойчивого материала (Натузиус,

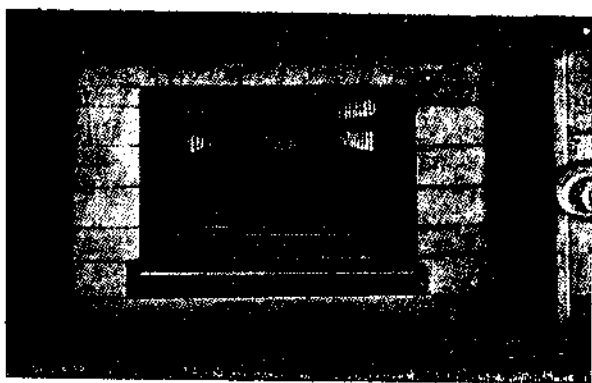
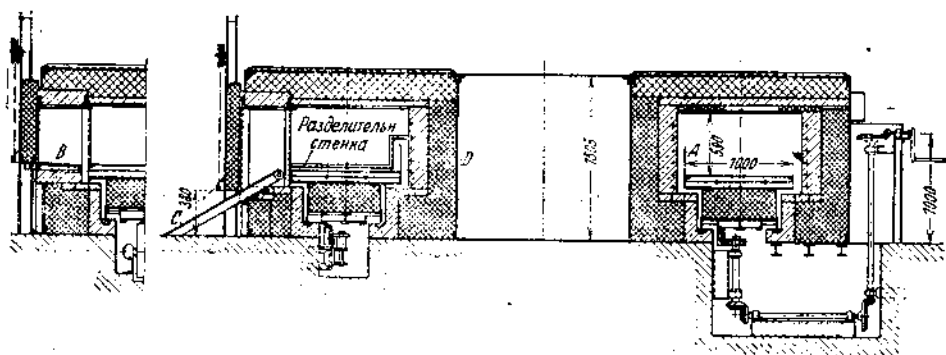


Рис. 141. Внутренность печи с роликовым подом.

Ж 61); при более же высоких температурах и тяжелых изделиях необходимо более прочное устройство. Обычно нужно приводить все ролики во вращение, потому что при большом трении вследствие высоких температур некоторые ролики могут перестать вращаться.

с) Печи с вращающимся подом

Круглый под вращается вокруг оси, проходящей через его центр. Нагревающие элементы обычно устанавливаются на неподвижных



Фиг. 142. Печь с вращающимся подом.

боковых стенках свода. Были попытки отапливать также вращающийся под, подводя к нему ток через контактные кольца. Схема печи с вращающимся подом изображена на рис. 142.

Вращение пода производится от руки, однако часто это делается при помощи мотора. Следует обратить внимание на песочное уплотнение между подом и неподвижной частью печи. Предохранительный лист *A* с внутренней стороны кольцевого пода препятствует падению изделий из рабочего пространства в канал под подом. Имеются две дверцы: одна (*a*) для загрузки, другая (*b*) для разгрузки печи. У загрузочной дверцы — небольшой наклон порога по направлению к вращающемуся поду; при разгрузочной дверце — воронка для разгрузки печи. Между загрузочной и разгрузочной дверцами установлена разделительная стенка во избежание взаимного влияния загружаемых и разгружаемых изделий. Стенка *D* печи выполняется также с теплоизоляцией; этим уменьшается площадь наружной поверхности, через которую происходят потери.

Нагретые изделия выгружаются обычно через дверцу, расположенную рядом с загрузочной, а иногда и через эту последнюю. Для разгрузки пытались использовать и сам под путем составления его из ряда подвижных поддонов, при наклоне которых открывается отверстие в поду, через которое печь разгружается.

д) Барабанные печи

Вместо вращения пода вокруг вертикальной оси, как в печах с вращающимся подом, можно вращать корпус печи вокруг горизонтальной или наклонной оси. На рис. 143 изображена такая муфельная вращающаяся печь в разрезе.

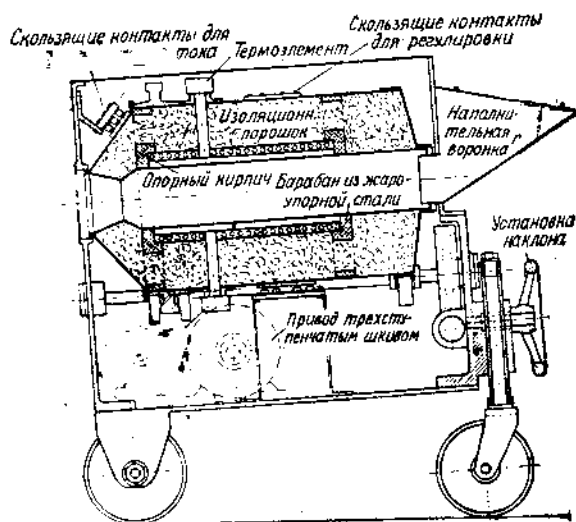


Рис. 143. Барабанная печь.

Внутри муфеля с вделанными в стенку муфеля нагревательными элементами помещается барабан из жароупорного металла, доходя-

ший с обеих сторон до торцевых стенок печи. Нагревательный муфель укреплен при помощи шамотных дисков в наружном кожухе печи. Для того, чтобы тепловые короткие замыкания сделать возможно меньшими, в дисках проделаны отверстия. Изоляция достигается при помощи порошка. Внешний кожух, изоляция, нагревательный муфель и барабан из жароупорного металла вращаются вместе. Ток подводится скользящими контактами.

При слишком сильном наклоне оси и при высоких температурах возникает опасность, что изделия не будут проходить равномерно сквозь печь, а, удерживаясь вследствие трения некоторое время на одном и том же месте, затем сразу продвигнутся через всю печь. Чтобы достигнуть равномерного передвижения, муфель на внутренней стенке снабжается иногда шнеком, заставляющим изделия проходить через печь равномерным потоком. Загрузка часто производится при помощи неподвижно укрепленного бункера (воронки), как показано на фиг. 143, но иногда применяются также загрузочные ковши.

е) Ленточный транспортер (не выходящий из печи)

Обычно цепи или бесконечные ленты находятся в печи столько же времени, сколько изделие; цепи нагреваются вместе с изделием и на обратном пути к загрузочному окну вне печи совершенно остывают. Во избежание вызываемого этим увеличения расхода тепла, были сконструированы цепные или ленточные печи, в которых и обратный ход цепи происходит полностью внутри печи. Для этой цели камера печи делается

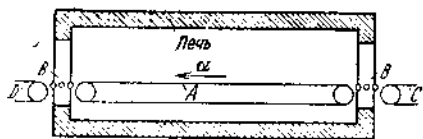


Рис. 144. Схема конвейерной печи с цепью.

несколько выше, чем это необходимо для изделий вместе с цепью, и таким образом получается возможность поместить под подом обратный конец цепи (рис. 144) (Брук, Ж 62).

Цепь *A* передвигает изделие в направлении, показанном стрелкой α , через печь. Изделия подводятся цепью *C* и отводятся цепью *D*. Передача с *C* на *A* и с *A* на *D* производится при помощи приспособлений *B*, состоящих, например, из ряда отдельно приводимых в движение роликов. Цепь *A* все время остается в печи; таким образом аккумулированное ею тепло не теряется. В данном случае необходимы специальные устройства для передачи изделий с наружного транспортного конвейера на цепь, расположенную в печи; это может быть выполнено, например, путем расположения цепных колес подающей и находящейся в печи цепей на одном валу в месте передачи. Иногда между обеими цепями помещают один или несколько приводных передаточных роликов (валков), окружная скорость которых должна быть равна скорости движения цепи. Наконец, можно заставить изделия падать на бесконечную цепь, так что для подачи изделий используется сила тяжести.

1) Сравнение загрузочных и транспортных приспособлений,] постоянно [находящихся в печи.

При сравнении различных загрузочных приспособлений этой группы мы приходим к следующим выводам: в печах низкой температуры при неслишком большой длине под с качающимися секциями представляет собою идеальное транспортное приспособление. Прорезы в поду печи и связанное с этим усложнение конструкции отпадают, так как подвижные секции могут быть сделаны в виде простых, слегка усиленных прокатных балок: отвод тепла концами стержней весьма незначителен. При очень высоких температурах и в очень больших печах устройство пода с качающимися секциями имеет преимущество исключительной защищенности частей привода от воздействия высокой температуры. Эта конструкция всегда позволяет производить периодическую работу: без всякой опасности для транспортного приспособления печь может быть быстро наполнена, и затем на все время нагрева транспортное приспособление может быть остановлено, а дверца оставлена закрытой. Таким образом мыслима полунепрерывная работа печи, представляющая некоторые достоинства.

Недостатком таких подов является то обстоятельство, что на них могут быть транспортируемы более или менее одинакового размера изделия, так как нужно быть уверенным, что при подъеме секций изделие с них не соскользнет. Вторым недостатком подов с качающимися секциями является то обстоятельство, что изделие не остается в покое, а периодически перемещается, причем не исключена возможность перемещения изделия в сторону.

Если можно применить не слишком тяжелые цепи (цепной транспортер) и если есть возможность выполнить их достаточно надежными, то указанные недостатки устраняются. Однако, цепи нуждаются, особенно при средних и высоких температурах, во многих опорах, а иногда постоянно трутся о под печи, вследствие чего они сильно изнашиваются. Затем, обычно нельзя останавливать цепь на долгое время, так как в наиболее горячем месте многие детали цепи могут быть покорежены. В печах с вращающимся подом расход тепла относительно мал, так как, в случае надобности, цилиндрическая пустота внутреннего кожуха может быть заполнена теплоизоляционными материалами, в этом случае теплоотдача может происходить только на внешней и торцевой поверхностях. Недостатком печей с вращающимся подом является то обстоятельство, что загрузка и разгрузка печи практически происходит в одном месте; в связи с этим транспорт изделия сквозь печь не совпадает с движением потока изделий в рабочем процессе, как это чаще всего бывает при больших конвейерных печах. Наконец, вращающиеся муфельные печи могут найти себе применение только в тех случаях, когда изделия нечувствительны к грубому обращению, так как изделия непрерывно падают с некоторой высоты стенки барабана и, в свою очередь, не должны повреждать последнюю.

3. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, НАХОДЯЩИЕСЯ В ПЕЧИ КОРОТКОЕ ВРЕМЯ

а) Загрузочные вилки

В поду печи устраивается ряд щелей (пазов), в которых могут перемещаться пальцы загрузочной вилки, опускающейся после ввода изделия в печь несколько ниже, так что изделие садится на участки пода (столбики), расположенные между щелями (Тама, Ж 63). Часто делается две щели, причем вилка передвигается либо на специальной загрузочной тележке, находящейся перед печью, или подвешивается на тележке монорельса подвесной железной дороги, или же, наконец, висит на кране (Тамеле, Ж 64). (Рис. 145).



Рис. 145. Камерная печь для отжига.

В поду печи (рис. 145) имеется два паза *A*, в которые входит вилка загрузочной машины для того, чтобы опустить изделие на мосты, расположенные между пазами. Для направления загрузочной машины перед правой группой печей устроена плита, имеющая два выреза *B*, соответствующие подовым щелям.

Следует обратить внимание на конструкцию дверец. Дверцы обеих левых печей открываются вверх, а обеих правых — вниз. Контакты *C*, расположенные соответственно сверху или снизу, выключают нагревательные сопротивления при открытой дверце. Подъем дверцы производится мотором. Противовесы у левых печей — над ними, а у правых — сзади печей. Дверцы левых печей прижимаются посредством винтов *D*, а правых — с помощью рычагов *E*, притягиваемых электромагнитами.

б) Тележки с подъемными платформами

В случае очень длинных печей применение загрузочных вилок представляет большие затруднения, так как они могут прогнуться даже в холодном состоянии. Поэтому в пазы, подобные описанным выше, укла-

двигаются рельсы, по которым передвигаются тележки с передвижной по высоте платформой. После введения изделия в печь, платформа или части ее опускаются и тележка разгружается. Тележка

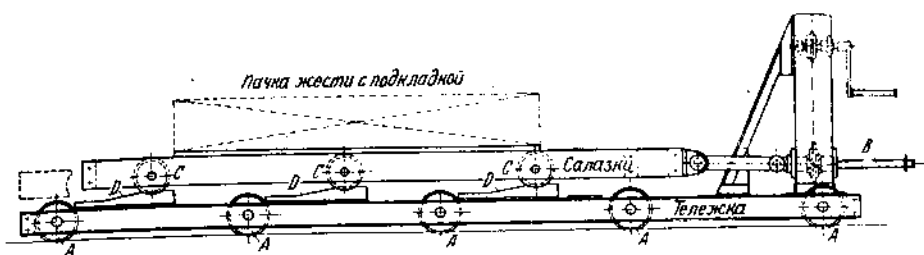


Рис. 146. Тележка с подъемной платформой. Колеса А въезжают в пазы пода печи. При вращении винта В салазки скатываются с точки С на D, и изделие остается в печи.

состоит обычно либо из кузова и собственно тележки, причем более легкий кузов остается в печи, либо из платформы при подъеме выступают кулачки, снимающие изделие с пода. На рис. 146 изображена тележка с подъемной платформой.

с) Загрузочная грейферная машина

Грейферная машина рабочей частью двигается в печь и, ухватив изделие, приподнимает его и вытаскивает наружу. Вполне понятно, что изделие должно быть в состоянии выдержать такое обращение (рис. 147) (Тринкс, К 25).

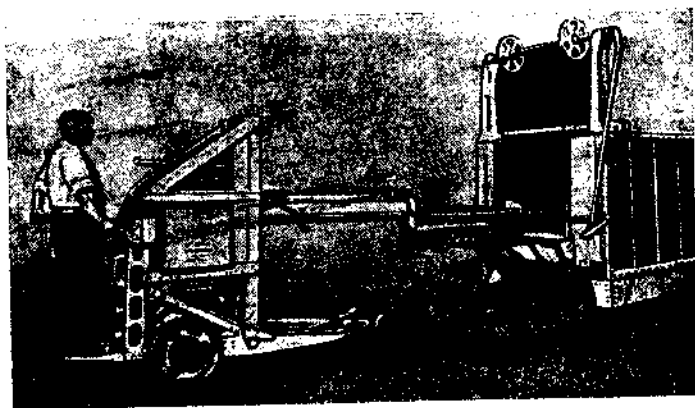


Рис. 147. Загрузочная грейферная машина для погрузки изделий, не боящихся повреждений (по Тринксу, К 25).

Аналогичное загрузное устройство но без грейферных захватов изображено на фиг. 147а.

д) Сравнение приспособлений этой группы

На основании сравнения загрузочных приспособлений этой группы можно наметить такие области применения. Загрузочные вилки особенно дешевы, весьма надежны в работе и потому находят самое широкое распространение. Применение их затруднено и даже совсем невозможно при очень глубоких печах, в которых пользуются тележками с подъемными платформами. Третья группа (грейферные загрузочные машины) при описываемых в настоящей книге печах употребляются реже вследствие возможности сильного повреждения изделий.

4. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ, НАХОДЯЩИЕСЯ В ПЕЧИ ОДИНАКОВОЕ С ИЗДЕЛИЯМИ ВРЕМЯ

а) Цепные транспортеры

Цепи, проходящие через печь, либо непосредственно несут на себе изделия, либо косвенно, и протягиваются через печь при помощи расположенного снаружи привода. При конструировании привода и всех частей цепи необходимо учесть условия работы материала и изменении его длины (вследствие влияния температуры). Привод или

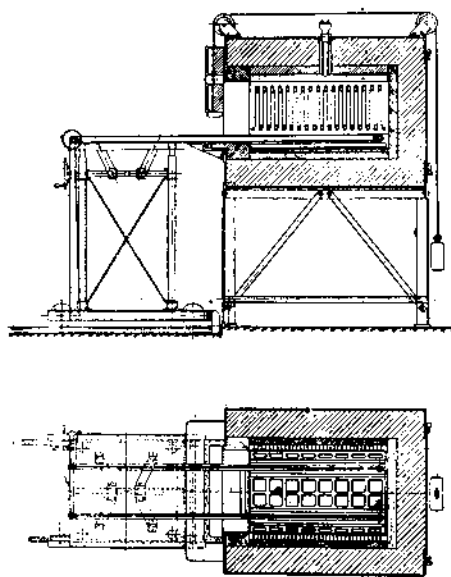


Рис. 147а. Камерная электрическая печь с загрузочной тележкой.

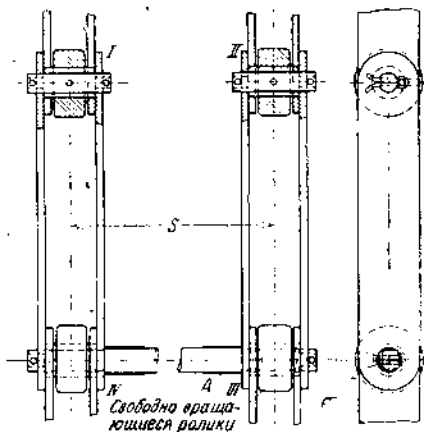


Рис. 148. Цепь для вертикальной печи низкой температуры.

же противоположный вал должны быть установлены на салазки и натяжение цепи должно поддерживаться постоянным при помощи груза или пружины. Между отдельными деталями цепи необходимо давать достаточную игру. Расположение самой цепи полностью зависит от температуры и от подлежащих передвижению изделий.

Часто применяется ряд параллельных цепей (рис. 148).

В местах *A* подвешиваются стеллажи шириною *S*. При применении такого типа цепей в горизонтальных печах можно путем закладывания проволочных сеток либо сплошной или перфорированной жести, между точками *I*, *II*, *III*, *IV* получить цепной стол. Следует обратить внимание на то, чтобы отдельные листы жести не мешали друг другу при прохождении цепи по зубчатым колесам.

При таком устройстве существует опасность неравномерного растяжения отдельных цепей, вследствие чего они приобретают склонность к деформациям. Если же учесть возможность разного расширения каждой цепи, то возникает

опасность относительного смещения одной из цепей по отношению к изделию, вследствие чего последнее может быть повреждено. Применение простых цепей—типа Галля—в большинстве случаев ограничивается печами низкой температуры и даже, несмотря на улучшение качества цепей

за последние годы, благодаря использованию жароустойчивых материалов, редко употребляются при более высоких температурах. При более или менее значительной длине печи вызываемые сильным трением растягивающие усилия в цепи настолько увеличиваются, что при небольшом сопротивлении металла ползучести и высоких температурах можно пользоваться исключительно тяжелыми цепями, которые весьма неэкономичны, вследствие большого теплосодержания, а также дороги.

Из тех же соображений в электрических печах едва ли могут получить применение цепи, футерованные огнеупорным кирпичом.

При более высоких температурах, наоборот, вместо цепей берутся бесконечные ленты из жароустойчивого материала, полученные путем соединения концов листового металла; эта лента настолько тонка, что она может облетать ролики¹.

Особенного внимания заслуживает устройство обратно идущего конца цепи. Если изделие помещается на цепь и снимается с цепи непосредственно около печи, так что цепь находится очень мало времени в холодном воздухе мастерской, то помещение обратного конца цепи в рабочей камере печи выгодно. Потеря температуры в местах оборота так мала, что обратному концу цепи приходится сообщать дополнительно очень малое количество тепла. Если же, наоборот, из эксплуатационно-технических соображений приходится пропускать цепь на большое расстояние через помещение мастерской, то тепло, заключающееся в цепи, пропадает и проведение обратного конца цепи через печь влечет за собою бесполезное вторичное нагревание ее. В то же время рекомендуется слегка изолировать обратный конец цепи, проходящий под печью, для сохранения хотя бы некоторого количества заключающегося в ней тепла (рис. 149). Часто бывает доста-

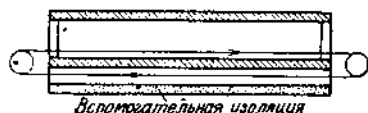


Рис. 149. Вспомогательная теплоизоляция обратного конца цепи.

¹ Швейц. пат. 133 855.

точно предохранения хотя бы от сквозняка. Такая изоляция будет тем более уместна, чем тяжелее цепь, как абсолютно, так и по отношению к полезному весу.

б) Тележки

Изделие помещается на тележке, вдвигающейся вместе с ним в печь. Для низких температур можно пользоваться простыми железными тележками без футеровки, а при более высоких температурах платформа тележки должна быть закрыта соответствующей футеровкой, в зависимости от температуры печи и времени прогрева изделия. Так как вес изделия, которое вдвигается в печь на тележке, обычно значителен, то материалы футеровки должны обладать достаточной прочностью; однако прочные огнеупорные керамические материалы, как об этом сказано выше, обычно также тяжелы и являются хорошими проводниками тепла, а это связано с большими потерями холостого хода, и большим мертвым весом.

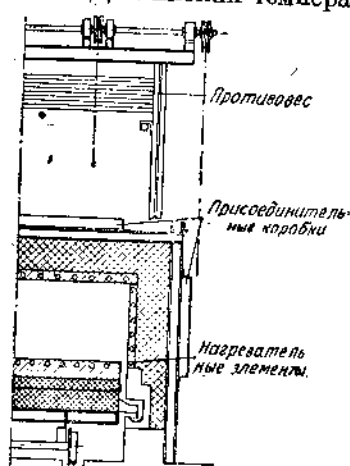


Рис. 150. Печь с выдвижным подом (тележкой).
Заслуживает внимания лабиринтовое уплотнение подовой тележки и печи при помощи песочного кармана

Если тележки для печей низкой температуры часто въезжают на рельсах внутрь печи, так что нет необходимости в специальных уплотнениях (рис. 168), то футерованные тележки для более высоких температур образуют собой под печи, и приходится прибегать

к уплотнению промежутка между ними и боковыми стенками. Для этой цели применяются лабиринтообразные уплотнения (сальники) (рис. 150). Применяются также песочные затворы, подобные тем, какие применяются при дверцах, причем, однако, необходимо предотвратить высыпание песка из желобка. Особенно трудно уплотнить ту часть тележки, которая глубже всего входит в печь¹. Для этой части тележки применяют откидные планки, автоматические входящие в жолоб с песком при вдвигании тележки в печь. Передвижение тяжелых футерованных тележек требует большой затраты сил, хотя они, естественно, всегда передвигаются по рельсам. Передвижение и управление затрудняется, если печь должна быть опорожнена в горячем состоянии, т. е. если раскаленная тележка должна быть выдвинута из печи. В этом случае необходима применять специальные механические средства для передвижения тележки. Можно передвигать или при помощи специального мотора или канатом при помощи мостового крана мастерской, или же, наконец, обслуживая тележки электрокаррой (рис. 151).

¹ Амер. патент 1 691 368.

с) Подвесные дорожки

К потолку печей низкой температуры часто укрепляется шина, служащая рельсом подвесной дорожки, по которому изделие проезжает на тележках по всей печи (рис. 152).

Применение подвесной дорожки особенно уместно в тех случаях, когда изделие проходит печь, как очередную операцию в процессе поточного производства, и непосредственно из печи направляется к последующим рабочим местам. Если изделия следует распределять таким образом, чтобы их можно было доставлять в различные места предприятия, то должны быть сооружены специальные конструкции, во избежание устройства стрелок. Например, подвесной дорожкой



Рис. 151. Втапливание подовой тележки при помощи электрокары.

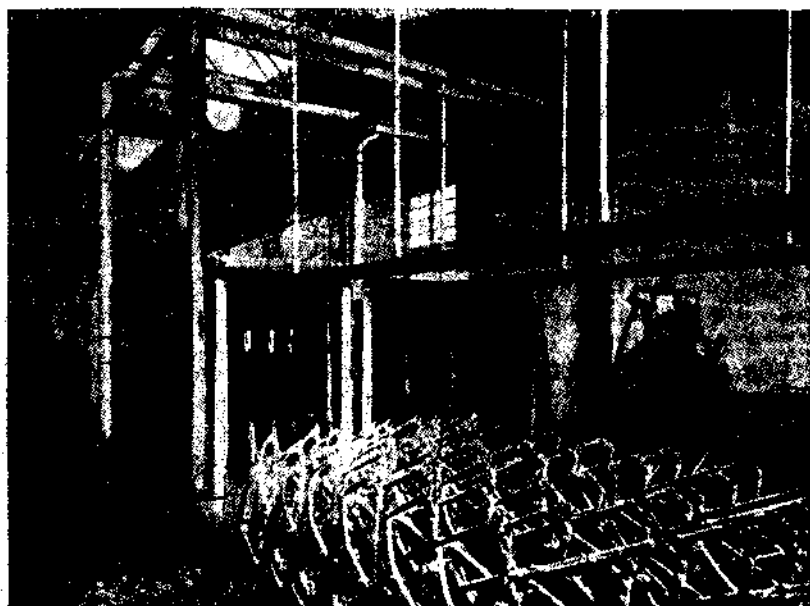


Рис. 152. Сушильная печь для велосипедных рам. Загрузка при помощи кошек на подвесной дороге (монорельсе).

можно пользоваться только в печи, а убирать от нее изделие приходится при помощи тележек или электрокары. Последние рекомен-

дуются делать в виде этажерки; в верхней ее части устанавливают рельсы, на которые тележка подвесной дорожки переходит по выходе из печи ¹.

5. ПРИСПОСОБЛЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА

Некоторые части многих транспортных приспособлений проходят через печь вместе с изделием, другие же части тех же устройств находятся в печи лишь короткое время, как об этом уже говорилось.

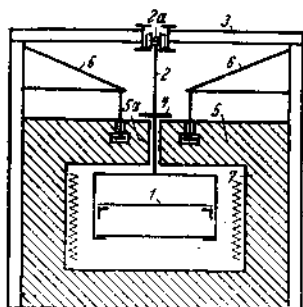


Рис. 153. Подвесная дорога для обслуживания печи, расположенная снаружи.

Например, в печах с подвижными секциями пода мелкие изделия можно транспортировать, наложив их на листы, остающиеся в печи столько же времени, сколько и само изделие; сами же подвижные секции пода постоянно находятся в печи. При подвесных дорожках, расположенных вне печи, само изделие будет попадать в печь на подвесках или стеллажах. Мы опускаем подробное описание этих транспортных приспособлений и еще упомянем только о тех загрузочных приспособлениях, которые находятся либо под, либо над печью и только часть которых находится внутри печи. На рис. 153 изображена схема такой печи.

1 — стеллажи для изделий; 2 — подвеска для стеллажей, висят на тележке 2а, передвигающейся по рельсам, которые поддерживаются при помощи конструкции 3; подвески 2 снабжены уплотнениями 4 и таким образом закрывают прорез 5а в своде печи 5, поддерживаемом консолями 6; 7 — стенки печи. Стеллажи 1 находятся в печи столько же времени, сколько и изделия, и вызывают тепловые потери соответственно своему теплосодержанию; с другой стороны, подвеска 2 и тележки 2а не влияют на расход тепла. Подвески рекомендуются делать, хотя бы частично, из материала, плохо проводящего тепло. Особенное внимание должно быть обращено на соединение частей, расположенных вне печи, с частями, проходящими печь вместе с изделиями. Необходимо включать в эти соединительные детали, слабо проводящие тепло, и, кроме того, позаботиться об уплотнении прорезов (пазов), по которым проходят эти соединительные части.

6. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ЗАГРУЗОЧНЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ ПЕЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

В заключение сравним между собой эти пять групп загрузочных и транспортных приспособлений. При выборе системы приспособления, естественно, следует руководствоваться, главным образом, соответствием данного приспособления условиям технологического

¹ Герм. пат. 484 425.

процесса, что в значительной мере зависит от местных условий; таким образом, правильный выбор может быть сделан лишь при знании всех условий работы. Для того, чтобы выбрать наилучшее устройство для определенных условий работы, необходимо своего рода техническое чутье. С другой стороны, конструктор печи не должен отказывать в содействии при выборе: во-первых, потому что загрузочное приспособление печи теснейшим образом связано с ее тепловым хозяйством, во-вторых, потому что во многих случаях, внося различные предложения, он может указать потребителю на преимущества электрических печей для эксплуатации предприятия. При сравнении нам придется основываться на теплотехнических свойствах, однако не упуская все время из виду того, что соответствие приспособления условиям эксплуатации является чрезвычайно важным моментом.

Загрузочные приспособления, совсем не входящие в печь, могут применяться без приспособлений, проходящих печь совместно с изделиями, — только при обработке грубых нечувствительных к обращению изделий. При всем этом с теплотехнической точки зрения они очень желательны. Приспособления, остающиеся в печи постоянно, увеличивают потери холостого хода и этот недостаток, насколько автору известно, пока устранить не удалось.

При более высоких температурах от затруднений в эксплуатации может предохранить только исключительно тщательная конструкция и большой опыт. Загрузочные приспособления, попадающие в печь только на короткое время, так как они полностью не прогреваются, могут быть большими и тяжелыми. В большинстве случаев они делаются из стали, и нет надобности применять дорогие жароустойчивые материалы. Несмотря на их большой вес, тепловой баланс печи почти не нарушается; потери холостого хода повышаются только незначительно, потому что загрузочное приспособление требует мало места, однако некоторого небольшого повышения потерь холостого хода никоим образом избежать нельзя.

С увеличением глубины (длины) печи сильно возрастают капитальные затраты, а также и место, потребное для загрузочных приспособлений, которые должны стоять около печи в полной готовности в течение всего времени прохода партии через печь.

Загрузочные приспособления, остающиеся в печи столько же времени, сколько само изделие, конструктивно, относительно просты, однако влияют исключительно неблагоприятно не только в отношении мертвого веса, но также и в смысле увеличения потерь холостого хода. Употребление их может быть оправдано лишь в особых случаях, например, когда путем рекуперации тепла может быть использована значительная часть их теплосодержания, либо, если иным путем нельзя избежать применения других способов обращения с изделием перед нагреванием или после такового (перегрузка на другие транспортные приспособления), либо, наконец, когда при наличии особых обстоятельств вес загрузочного приспособления по отношению к весу изделия может быть взят очень малым.

Д. УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВКИ

1. ИЗМЕРЕНИЕ И РЕГУЛИРОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрение всех приборов для измерения температуры не может входить в задачу настоящего раздела; интересующихся этим вопросом отсылаем к специальным трудам (Кейнат, К 24; Райт и Шропф К 26). Здесь же мы дадим лишь краткий обзор тех приборов, которые находят преимущественное применение в электропечах в качестве регуляторов температуры, а также укажем на те их свойства, от которых может зависеть точность регулировки.

Как для измерения температуры, так и для регулировки ее, прежде всего необходимо контрольное устройство. С ним соединено *передаточное устройство*, которое в измерительных приборах может быть одновременно использовано для отсчета температуры, а в регулирующих приборах передает температурные импульсы *переключающему устройству*. Измерительные (контрольные) приборы и регуляторы (передаточные устройства) в зависимости от температуры, для которой они предназначаются, имеют весьма различную конструкцию (особенно это относится к контрольному устройству). От конструкции контрольного зависит конструкция передаточного устройства, так что это последнее может быть сооружено также различно в зависимости от температуры печей. Конструкция же переключающих устройств наоборот, зависит практически только от мощности и напряжения нагревательных элементов, но не от температуры печи.

Б) Контрольные и передаточные устройства

Действие контрольных устройств, служащих для измерения температуры, т. е. пирометров, основано на различных свойствах материала, зависящих от температуры. В качестве таких свойств могут быть использованы:

Тепловое удлинение	}	материала контрольного устройства
Электрическое сопротивление		
Термоэлектрическая сила	}	материала контрольного устройства или изделия
Магнитная проницаемость		
Лучеиспускание		

В качестве передаточного средства для регулирования могут быть применены: электрический ток, газы (особенно сжатый воздух), пары, жидкости, в частности вода и масло.

Наиболее важным передаточным средством, служащим для передачи регулирующих импульсов, в настоящее время является электрический ток, в то время как в первых технически применявшихся регуляторах употреблялись вода и сжатый воздух. Последнее гораздо сложнее и потому в настоящее время в качестве передаточного средства применяется почти исключительно электричество.

а) *Температура до 600°*. Этот предел почти совпадает с областью печей низкой температуры.

Пирометры, основанные на тепловом расширении, состоят из двух материалов с различным тепловым расширением: либо из двух твер-

дых тел (рис. 154), либо из твердого и жидкого или газообразного тела. Обычно применяются следующие пары материалов: для низких температур (приблизительно 220°) — никелевая сталь—латунь; для средних температур ($220—600^{\circ}$) — никелевая сталь—кварц.

Регулятор температуры, изображенный на рис. 154, состоит из контрольной и переключающей частей. Контрольное устройство представляет собой трубку из материала с большим коэффициентом расширения 2 и мало расширяющегося стержня 1, соприкасающихся в конце трубки 3. Трубка 2 укреплена в корпусе 5. Стержень 1 на верхнем своем конце несет установочный винт, снабженный гайкой 6 со шкалой 7.

Переключающее приспособление состоит из опирающегося на призмы рычага 9, несущего на себе контакт 10, против которого на основной плите 4 укреплен неподвижный контакт 11. Пружина 12 удерживает контакты 10 и 11 в замкнутом положении. Тепловое расширение частей контрольного органа 1 и 2 вызывает соответственное движение детали 6, передающееся на рычаг 9 через кольцо 13 и, противодействуя пружине 12, размыкает контакты 10 и 11.

Внутри кладки печи температура ниже, чем в печи. Тепловое расширение заложенной в стенку части трубы 2 с большим линейным удлинением должно быть поэтому компенсировано, что может быть достигнуто, например, таким путем: в трубку вместо стержня 1 на длине ее, соответствующей стенке печи, закладывается вспомогательный стержень 1 из того же материала, что и трубка 2, так что на рассматриваемой длине трубка и стержень расширяются одинаково.

В таких контрольно-регулирующих приборах непосредственный отсчет температуры печи невозможен. Это является недостатком, потому что регулирование температуры контрольным устройством и измерение температуры отдельным прибором создает неуверенность в работе печи. Преимуществом же данного типа регулятора является его низкая цена.

Ртутные термометры применяются прямые и согнутые под углом. При более высоких температурах употребляются ртутные термометры. В последних ртуть находится только в измерительном устройстве, а передача на температурную шкалу происходит по принципу манометра: в полости спиральной пружины, удерживающей движениями стрелки, и в соединительной трубке находится газ, сжимающийся под влиянием расширения ртути. Увеличение давления

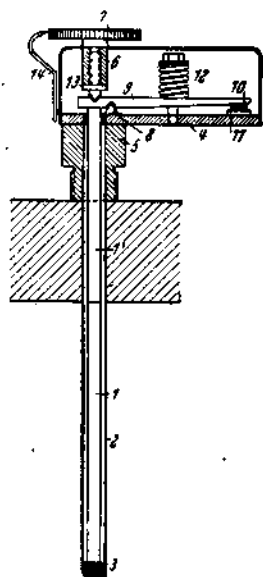


Рис. 154. Регулятор температуры.

повышает точку кипения ртути. Собственно говоря, этим прибором измеряется давление только пересчитанное на температуру.

Необходимо принять специальные меры во избежание неправильных показаний при прохождении соединительной трубки (передаточного органа) через зону повышенной температуры (стенка печи); ошибка в показаниях может быть вызвана дополнительным повышением давления газа, происходящего вследствие нагревания самого газа. Устройство ртутного пружинного термометра показано на рис. 155:

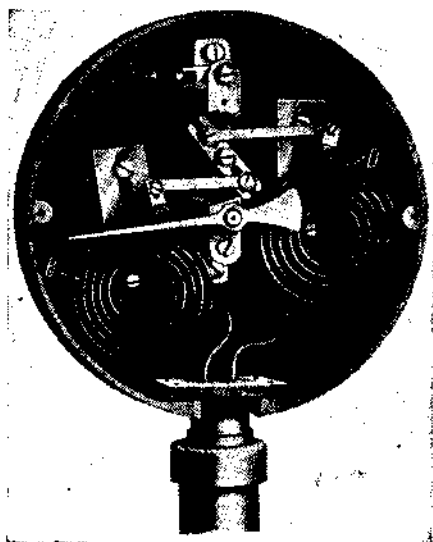


Рис. 155. Ртутный пружинный термометр с температурной компенсацией.

А — главная трубка с ртутью; В — управляющая пружина к ней; С — вспомогательная трубка; с ртутью; D — вспомогательная пружина, действующая через рычаги G, H в направлении, обратном действию пружины В; E — стрелка; F — установка на пуль.

Для устранения вышеуказанных неточностей применяется вспомогательная компенсационная пружина, соединенная со вспомогательным контрольным органом, расположенным рядом с главным и находящимся в области повышенной температуры, не подлежащей измерению, например, в помещении над ванной, в стенке печи и т. д. Действие вспомогательной

пружины направлено против действия главной пружины.

При применении регуляторов, основанных на разнице теплового расширения двух металлов, некоторые затруднения создают контакты. Разница в расширении металлов, применяемых для этих регуляторов, имеет исключительно малую величину. Для того, чтобы передвижение контактов было достаточно велико, необходимы очень большие механические передачи (порядка 1 : 30). Благодаря этому действующие на контакты усилия, которыми можно было бы воспользоваться для регулирования, становятся весьма малыми. Наряду с этим большая передача вызывает сильное трение, и поэтому особенно необходимо, чтобы на контактах регулятора были получены наименьшие отключаемые мощности, т. е. применять реле с малым расходом энергии.

Постоянные замыкания и размыкания контактов влекут за собою неправильную работу реле, заключающуюся в том, что реле замыкает контакты не мгновенно, а после некоторого дрожания. На рис. 156 изображена осциллограмма, регулятора, основанного на принципе расширения; на ней видно, насколько часто цепь

замыкается и размыкается, прежде чем устанавливается окончательное замыкание, действующее на реле: *a* — процесс включения; *b* — процесс выключения. Линия 1 дает такт времени (50 периодов/сек); 2 — ток реле; 3 — напряжение на зажимах реле. Вследствие недостаточного давления контактов, окончательное включение после некоторых циклов тока (*I, I'* и т. д.) происходит только в точке *II*. При выключении (по кривой *b*) перерыв тока также происходит не мгновенно, а с предварительными выключениями в точках *I, II, III* и т. д.

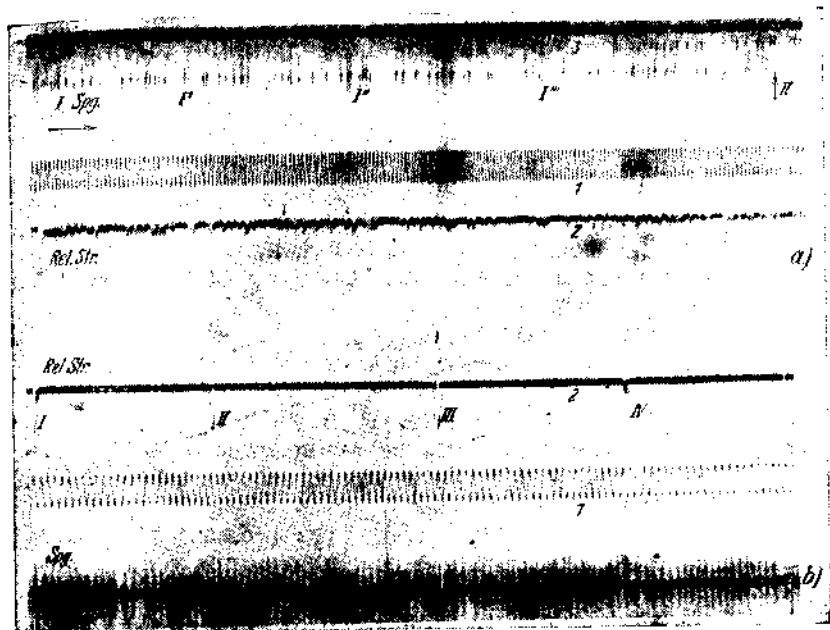


Рис. 156. Осциллограмма процессов включения и выключения регулятора.

В ртутных термометрах избегают замыкания тока для регулировки в самом ртутном столбе, вследствие слишком большой частоты включений, и вместо этого пользуются уже описанным пружинным термометром, производящим достаточное давление на контакты, так что последние могут быть включены непосредственно в цепь.

Из регуляторов, основанных на принципе расширения, необходимо упомянуть еще о регуляторах биметаллических. В качестве контрольного устройства служит биметаллическая пружина. Так называются листовые пружины, состоящие из двух листов различного материала с разными коэффициентами теплового расширения. Эти два листа прочно связаны между собой. Если такая биметаллическая пружина подвергается нагреванию, то длина составит из них χ — листов изменится различно, что возможно лишь в том случае, если пружина изогнется (так как оба листа прочно соединены между собой). При

изгибании они прикасаются к контакту и таким образом производят включение. Форма пружины изменяется постепенно, контакт устанавливается также постепенно, если только не будут применены специальные приспособления для осуществления моментального действия контакта.

В указанных пределах температуры в качестве контрольных устройств употребляются также термометры, основанные на принципе электрического сопротивления, т. е. термометры и пирометры сопротивления. До 150° в качестве материала для них применяется никель, а приблизительно до 600° — платина. Так же, как и описываемые ниже термоэлементы, термометры и пирометры сопротивления заключаются в предохранительную трубку, которая, помимо защиты от механических повреждений, имеет целью предохранить материалы от преждевременного окисления, что повлекло бы за собою грубые ошибки при измерениях. Сопротивление можно измерять любым из известных способов. В большинстве случаев измеряется ток, а напряжение поддерживается постоянным от особого источника тока. В последнее время стало возможно питать термометр также непосредственно от сети, применяя в качестве индикатора приборы с крестообразно расположенными катушками. Колебания напряжения сети в пределах до 20% не влияют на точность измерений. Арматура подобных термометров сопротивления в большинстве случаев такая же, как арматура термоэлементов, которые будут описаны в следующем разделе.

Для измерения низких температур до 600° употребляются также термопары, главным образом, железо-константановые.

β) *Температура до 1000° .* Этот предел соответствует приблизительно печам средней температуры.

В этой области температур часто употребляются регуляторы, основанные на принципе расширения (дилатометрические); при температурах свыше 600° в качестве материала применяется исключительно пара: нихром — керамический материал. О преимуществах и недостатках таких регуляторов достаточно подробно сказано в предыдущем разделе.

Термометры сопротивления из платины при температурах свыше 600° применяются случайно и редко.

В этих пределах температур ($600—1000^{\circ}$) употребляются главным образом термоэлементы, из которых наибольшую роль играют никель-нихромовые. Наряду с ними, для более низких температур в этой же области, примерно до 750° , применяются железо-константановые и серебро-константановые термопары.

Большинство металлов, из которых изготавливаются термоэлементы, при высокой температуре подвергаются после сравнительно короткого срока службы коррозии; поэтому их помещают в предохранительные трубки, препятствующие воздействию печной атмосферы на термоэлементы. Эти предохранительные трубки изготавливаются либо из керамических масс, либо из жароустойчивых металлов. Недостаток таких предохранительных трубок заключается в том, что они неиз-

бежно снижают точность регулировки, вследствие повышения значений характерной кривой (стр. 111).

Для того, чтобы защитить термоэлемент, не ухудшая в то же время чрезмерно его характеристику, изготавливаются так называемые трубчатые термопары (рис. 157), из которых один электрод, а именно, обладающий большей устойчивостью против коррозии, облегают в виде

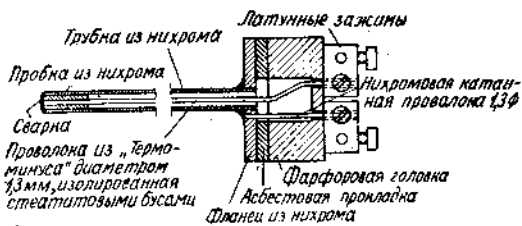


Рис. 157. Трубчатая термопара. Нихром устойчивее против окисления, чем «термоминус».

трубки другой электрод со всех сторон. При никель-нихромовых элементах, в соответствии с изложенным, трубка делается из нихрома.

Работающие с термоэлементами измерительные приборы интересуют нас здесь прежде всего со стороны их контактных устройств.

Контакты можно расположить непосредственно на пути стрелки, которая по достижении определенной температуры упирается в контакт и задерживается им. При этом следует учесть, что, если по какой-либо причине температура все же продолжает повышаться, то это повышение прибором не указывается; даже, наоборот, получается обманчивое впечатление, что повышение температуры прекратилось. Так как взаимодействие между стрелкой и неподвижным контактом

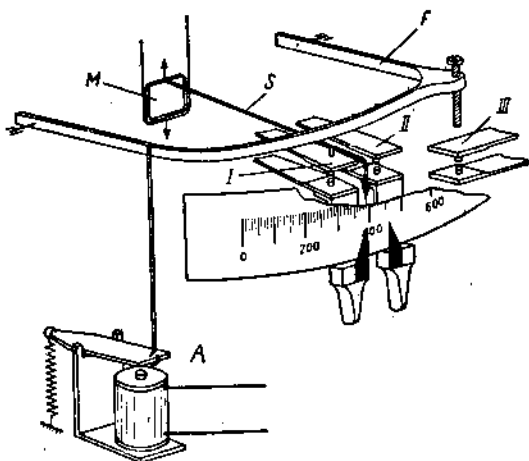


Рис. 158. Схема терморегулятора с падающей скобой.

в момент соприкосновения может быть ненадежно, то необходимо принять меры, чтобы на время усилить давление на контакт. Равным образом, следует позаботиться о мгновенном размыкании контакта. Фирма Гереус, например, разрешает эту задачу, накладывая через равномерные промежутки времени на термоэлектрический ток вспомогательную электродвижущую силу, направленную в сторону за-

мыкания или размыкания контактов. Регулировка такта этой вспомогательной электродвижущей силы происходит при помощи нагреваемой биметаллической пружины.

Особенно часто применяется так называемая падающая скоба (рис. 158). Термозлемент (не показанный на рисунке) включен на вращающуюся катушку *М*, расположенную между полюсами постоянного магнита. Вследствие этого происходит отклонение связанной с катушкой *М* стрелки *С*. Электромагнит возбуждается периодически специальным переключателем и притягивает якорь *А*, отрываемый после выключения тока пружиной. Якорь *А* отжимает падающую скобу *В* вниз. Если стрелка *С* находится над одним из контактов *I* или *II*, то она прижимается к находящемуся под ней контакту и тем самым замыкает цепь соответственного реле. Контакты *I* и *II*, каждый в отдельности, устанавливаются на определенную степень чувствительности, и оба вместе — на предел регулировки. *III* — нормальный контакт, замыкающийся, когда стрелка находится между контактами *I* и *II*. В этой конструкции такты не нахо-

дятся на пути стрелки, а расположены под ним. Через равномерные промежутки времени, от 5 до 50 сек., стрелка при помощи падающей скобы отжимается вниз и, в зависимости от своего положения касается какого нибудь из контактов. Если же температура достигла предела, при котором соприкосновения не происходит, то стрелка опускается в промежуток между контактами. Частота опускания падающей скобы — ее ритм — регулируется биметаллической пружиной, часовым механизмом или же, наконец, маленьким электромотором. Управление скобой при помощи часового механизма может производиться или непосредственно, или через промежуточный магнит. На рис. 159 изображен внешний вид механизма терморегулятора с падающей скобой. Скоба —

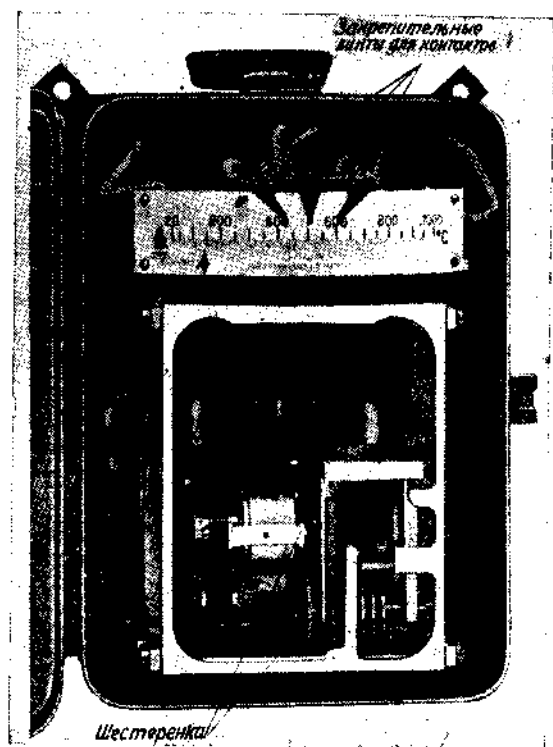


Рис. 159. Внешний вид механизма терморегулятора с падающей скобой.

дятся на пути стрелки, а расположены под ним. Через равномерные промежутки времени, от 5 до 50 сек., стрелка при помощи падающей скобы отжимается вниз и, в зависимости от своего положения касается какого нибудь из контактов. Если же температура достигла предела, при котором соприкосновения не происходит, то стрелка опускается в промежуток между контактами. Частота опускания падающей скобы — ее ритм — регулируется биметаллической пружиной, часовым механизмом или же, наконец, маленьким электромотором. Управление скобой при помощи часового механизма может производиться или непосредственно, или через промежуточный магнит. На рис. 159 изображен внешний вид механизма терморегулятора с падающей скобой. Скоба —

в данном случае подъемная — приводится механическим способом (мотор, передача). Когда стрелка находится под одним из держателей контакта, последний приподнимается и наклоняет находящуюся на нем трубку, наполненную ртутью. Контакты после освобождения соответственных виптов могут быть взаимно передвинуты, чем регулируется степень чувствительности регулятора.

Переключение должно происходить с блокировкой реле или замыкателей, т. е. только противоположный импульс может изменить установленное положение выключателя. По

поводу выбора ритма падающей скобы даны некоторые указания в главе «Расчет». При коротком ритме (частом падении скобы) достигается высокая точность регулировки, но это связано с частыми включениями, а следовательно и большой нагрузкой регулировочных приборов. Наименьший промежуток определяется временем, необходимым для того, чтобы стрелка, пришедшая в колебание вследствие нажима скобы, могла успокоиться. Так как требования к точности регулировки весьма различны, то рекомендуется делать частоту падения скобы переменной, если только уход за печью настолько тщательный, что ритм может быть установлен в соответствии с требуемой точностью. Наличие падающей скобы делает эти регуляторы сравнительно дорогими.

В американской практике привилась также потенциометрические регуляторы, в которых электродвижущая сила термоэлемента определяется не милливольтметром, а потенциометром (по пудевому методу). На рис. 160 дана схема такого регулятора, а на рис. 161 представлен его общий вид.

В рабочем положении переключатель I (рис. 160) прилегает к a . Гальванометр устанавливается на 0 в том случае, когда напряжение термоэлемента M как раз равно падению напряжения при прохождении тока от элемента A на участке DG реохорда ED (цепь $AFEDCBR+$). Если падение напряжения на DG больше или меньше чем термоэлектродвижущая сила, то гальванометр отклоняется, в результате чего замыкается контакт, вызывающий либо нагрев, либо охлаждение печи. В положении b переключателя I рабочий элемент $\pm$ проверяется путем сравнения с неизменным нормальным элементом SC . Переменное сопротивление R служит для юстировки.

Контрольные устройства, основанные на измерении магнитных свойств, до настоящего времени не употреблялись. Однако в соединении с печами, автоматически указывающими достижение материальными изделений критических точек, эти регуляторы играют некоторую роль и будут описаны ниже (стр. 242).

Контрольные устройства, основанные на измерении лучеиспускания, в печах средней температуры не употребляются.

Различные реле, которые приходится применять при включениях,

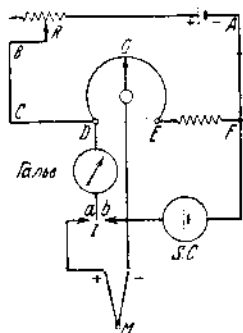


Рис. 160. Схема потенциометрического регулятора.

можно отнести как к передаточным, так и к переключающим органам. Мы будем рассматривать их вместе с последними, так как они не зависят от температуры.

γ) *Температура свыше 1000°.* Этот предел почти соответствует так называемым печам высокой температуры. Для нижней части этой области температур еще могут употребляться регуляторы, основанные на принципе расширения и описанные в предыдущем разделе. Применение их ограничивается лишь прочностью металлической трубки контрольного органа.

В рассматриваемой области температур в качестве контрольных устройств употребляются исключительно термоэлементы; до 1100°

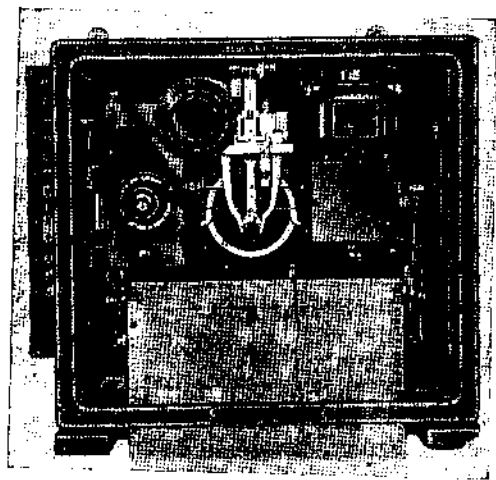


Рис. 161. Потенциометрический термо-регулятор.

еще могут иметь применение никель-нихромовые элементы. За пределом этой температуры должны применяться термопары из благородных металлов. До последнего времени пользовались только платина-платинородневыми термопарами; однако несколько лет тому назад фирма Гереус разработала термоэлемент из благородных металлов для температур до 1200°, имеющий чрезвычайно большую электродвижущую силу и вследствие этого не требующий таких высокочувствительных измерительных приборов, как термопара платина-платинородий.

Для температур свыше 1200°, помимо названных термоэлементов, применяются только оптические пирометры. Пирометры частичного лучеиспускания (т. е. оптические в настоящем смысле) допускают только субъективный отсчет температуры и потому не могут употребляться для автоматической регулировки температуры. Для измерения температуры они, конечно, могут применяться. Они основаны на сравнении цвета накала нити лампочки, находящейся в приборе, с цветом накала изделия. Силу тока, накаливающего нить, можно изменять, так что цвет ее накала соответственно изменяется. Сила тока, при котором нить имеет тот же цвет каления, что и изделие, определяет температуру изделия. Шкала прибора, измеряющего этот ток, в большинстве случаев градуирована непосредственно в единицах температуры.

При пирометрах полного лучеиспускания визируют место, подлежащее измерению. Лучи всего диапазона частот направляются оптикой прибора на находящийся в нем термоэлемент. Нагревание термоэлемента измеряется при помощи соответственно градуирован-

ного прибора, что дает возможность судить о температуре в измеряемом месте.

Этот отсчет объективен и потому им можно пользоваться для автоматической регулировки температуры. Приборы необходимы также, что и для печей средней температуры.

б) *Регулировка «температура-время».* В соответственных случаях следует регулировать температуру, не поддерживая ее на постоянном уровне, а изменяя температуру согласно намеченной программе; эту регулировку можно называть регулировкой по программе. К ней рекомендуется прибегать в тех случаях, когда технологический процесс требует определенного изменения температуры во времени, как, например, при термической обработке стекла и стали, отжиге ковкого чугуна и т. д. Принцип действия заключается либо в том, что контакты регулятора температуры управляются механически по определенной кривой время-температура (система Гарманн и Браун), либо в том, что для программной регулировки на электродвижущую

силу термоэлемента накладывается переменная электродвижущая сила, изменяющаяся в соответствии с желательным порядком изменения температуры (система Сименс и Гальске).

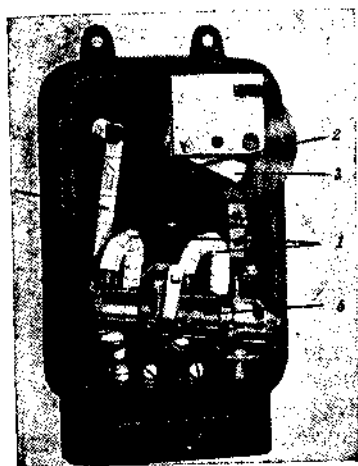


Рис. 162. Ртутное реле.

1—подвод тока; 2—магнитная катушка; 3 — поворачивающийся якорь; 4 — рычаг; 5 — трубка с ртутью. При возбуждении катушки 2 якорь 3 притягивается к сердечнику катушки и при помощи рычага 4 опрокидывает трубку 5.

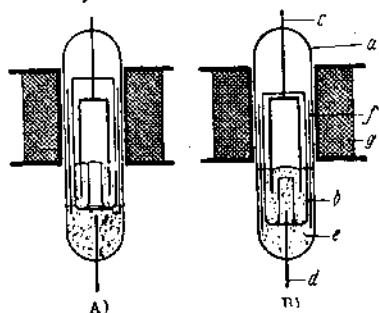


Рис. 163. Реле «кутако» (ртутное поплавковое реле); выполнение для постоянного тока.

б) Переключающие устройства

Переключающие устройства осуществляют импульсы, отданные контрольными устройствами и переданные передаточными устройствами. Количество промежуточных устройств между первым передаточным и последним включающим зависит от мощности печи и разрывной мощности контактов регулятора. Выше мы уже отметили, что все эти промежуточные реле будут рассмотрены вместе.

Почти все виды реле могут иметь применение; особенно часто употребляются так называемые ртутные реле (рис. 162).

На рис. 163 изображен ртутный выключатель, отличающийся своей конструкцией от других подобных выключателей и весьма надежный. Как видно из рисунка, это не наклоняющийся выключатель, а поплавковый.

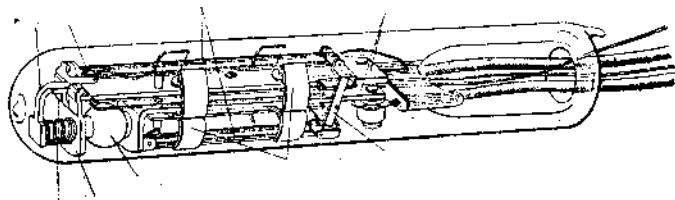


Рис. 164. Тепловой вакуумный контактор.
Максимальная мощность 1 200 в, 17 а, 20 квт.

Принятые на рис. 163 обозначения:

a — стеклянная трубка; *b* — поплавок; *c* и *d* — верхний и нижний подводы тока; *e* — ртуть; *f* — пояс; *g* — катушка. Когда ток проходит по катушке (*A*), поплавок приподнят и в центральном отверстии поплавок нет ртути, *c* и *d* не соединены друг с другом. Как

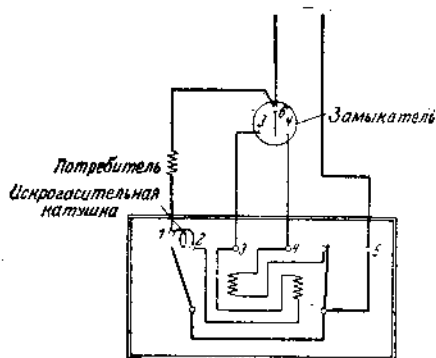


Рис. 165. Реле Фогт и Геффнера.

только ток перестает проходить по катушке (*B*), поплавок под влиянием веса пояска погружается в ртуть; последняя наполняет центральное отверстие поплавок и восстанавливает соединение между *c* и *d*.

На рис. 164 показан выключатель для сравнительно больших разрывных мощностей без ртутных контактов: тепловой вакуумный выключатель. Для регуляторов с падающей скобой применяются реле, подобные изображенным на рис. 165. Установленное однажды поло-

жение включения реле может меняться только под действием противоположного импульса.

При замыкании контактов замыкателя возбуждается соответственная катушка и включается «потребитель» (например, печной контактор). Одновременно, вследствие блокировки между катушками, падает якорь второй катушки, так что ток, проходивший перед этим через якорь этой катушки, прерывается. При помощи защелки якорь, включенный в катушку, удерживается в этом положении, пока замыкатель не даст противоположного импульса.

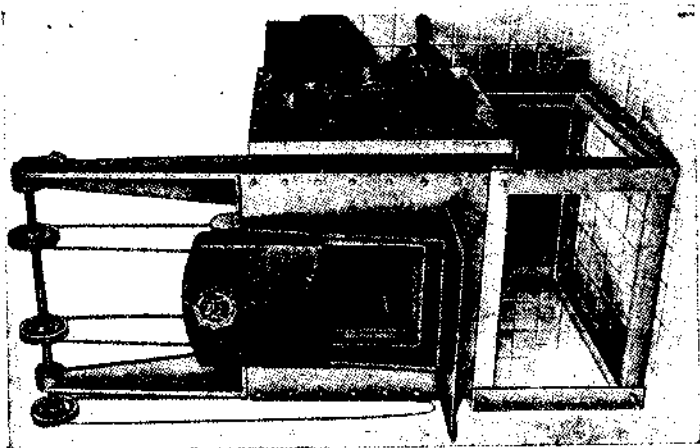


Рис. 166. Муфельная печь.

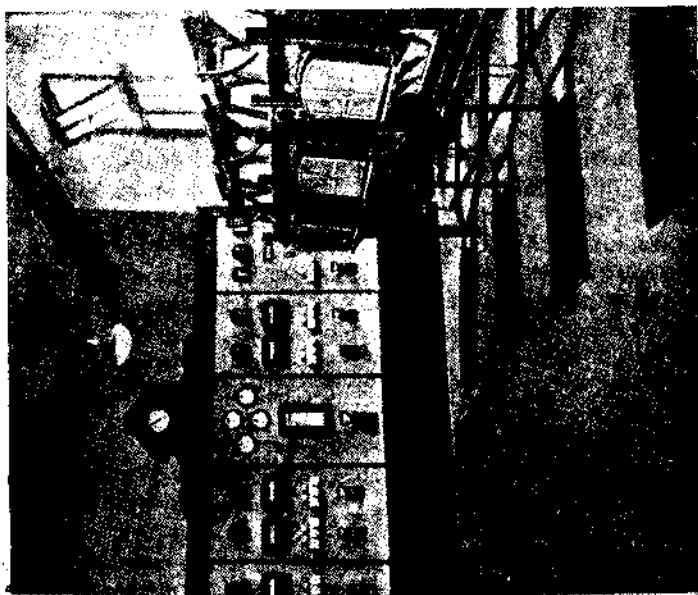


Рис. 165а. Термический цех, оборудованный электрическими печами с автоматическим регулированием температуры.

Прочие переключающие приборы, не употребляемые для регулировки температуры, кроме вышеописанных реле, не отличаются сколько-нибудь значительно от приборов, обычно применяемых в электротехнике. Поэтому мы не будем здесь на них останавливаться. Распределительное устройство со всеми необходимыми его деталями иногда пристраивается к самой печи, как это показано, например, на рис. 166. Часто применяются отдельные распределительные щитки или настенные доски, а в больших установках — целые распределительные устройства, состоящие из панелей. Тамеле (Ж 65) описывает значительное количество конструкций печи, соединенных с разнообразнейшего вида распределительными устройствами.

На рис. 165 а изображено термическое определение, оборудованное электропечами и устройствами для автоматического регулирования температуры печей.

II. ОПИСАНИЕ ПЕЧЕЙ РАЗНЫХ ТИПОВ

Ниже рассмотрены различные типы печей; вследствие большого разнообразия конструкций, исчерпывающее описание печей всех типов не может быть дано. Так как печи одной и той же конструкции часто применяются для различных целей, то, во избежание повторений, печи группируются при рассмотрении по конструктивным признакам, а не по области применения.

А. ПЕЧИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Печи низкой температуры применяются прежде всего для сушки и для термической обработки металлов. Кроме того, они служат как нагревательные печи, например, для изготовления пластических материалов из искусственных смол и т. п. По конструктивным признакам они могут быть разделены на две большие группы: более простые печи, без обмена воздуха, применяемые для нагрева с самыми различными целями, а также при термической обработке стали и цветных металлов, и печи с обменом воздуха, служащие для сушки материалов.

1. ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА И ОТПУСКА

а) Печи с периодической загрузкой

а) *Печи без циркуляции воздуха.* В простейшей своей форме эти печи предназначаются, например, для подогревания составных частей бумажной массы. В изолированном обычном образом полезном пространстве печи нагревательные элементы расположены рядами. Над каждым рядом нагревательных элементов может быть вдвинут лист, несущий на себе сыпучие вещества; тепло от листов передается веществу, находящемуся на нем, вследствие теплопроводности (рис. 167). Передача же тепла от нагревательных элементов листам происходит

за счет лучеиспускания и при некоторых обстоятельствах может быть улучшена путем непосредственной установки листов на нагревательные элементы. Для равномерного распределения температуры материал берется слоями небольшой толщины, а для предохранения слоя вещества от действия лучеиспускания расположенных над ним нагревательных элементов, между ними вставляется экран. По возможности, следует изолировать опоры нагревательных элементов снизу (а на рис. 167).

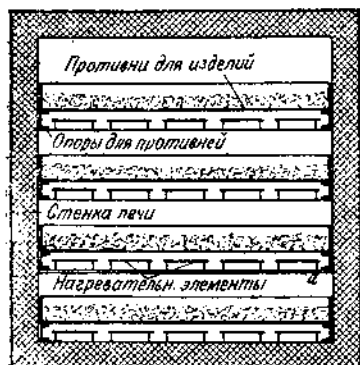


Рис. 167. Нагревательная печь с передачей тепла при помощи теплопроводности.]

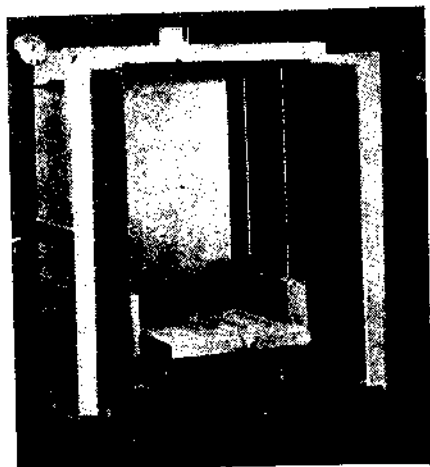


Рис. 168. Печь для подогрева форм. Печь — без движения воздуха для отпуска — годна только для нечувствительных к неравномерному нагреву изделий.

Эту же конструкцию печей (без обмена воздуха) применяют также для тепловой обработки изделий большего размера по традиции пламенных печей. Типичная конструкция такой печи показана на рис. 168, где изображена печь для подогревания литейных форм. И в данном случае тепло передается путем лучеиспускания, но неравномерно, так как между изделиями средней величины, которые нагреваются в печах такого типа, имеются промежутки; по существу только крайние изделия подвергаются действию лучеиспускания. Поэтому печи без движения воздуха могут успешно применяться для больших изделий только тогда, когда не требуется особенно большой равномерности в распределении температуры, как, например, при нагревании форм для изготовления прессованного стекла. Только наружная поверхность форм и прилегающие к ним слои материала должны быть нагреты до необходимой минимальной температуры; глубина же нагревания внутрь формы совершенно безразлична.

3) *Печи с циркуляцией воздуха.* При более или менее чувствительных к неравномерному нагреву изделиях теплопередача в нагревательных печах всегда улучшается в случае циркуляции воздуха, если только это не противоречит специальным условиям, как напри-

мер, в конвейерных печах для отпуска полотен пил. изображенных на рис. 175.

Нагревательные печи с циркуляцией воздуха бывают двух типов: печи, в которых воздух приводится в движение внутри печи (рис. 169), и печи, в которых воздух нагревается снаружи (рис. 170).

Насколько автору известно, преимущества движения воздуха внутри печи впервые были учтены кампанией Leeds-Northrup Co и применены в печи для отпуска, получившей название «Номо». На рис. 169 показан вертикальный разрез такой печи.

Обозначения на рисунке: 1 — крышка; 2 — чугунное установочное кольцо; 3 — кирпич кольцевой формы; 4 — песочное уплотнение; 5 — штепсельная розетка; 6 — 6а — подвод тока; 7 — тепловая изоляция; 8 — коробка для изделий; 9 — ребра для усиления коробки; 10 — нагревательные элементы;

11 — внутренний кожух печи; 12 — вентилятор; 13 — конус, направляющий воздух; 14 — штепсельная розетка для мотора вентилятора; 15 — опоры внутреннего кожуха печи; 16 — мотор вентилятора; 17 — консоль мотора; 18 — внутреннее дно печи; 19 — проход вала; 20 — подшипник вала; 21 — вал вентилятора; 22 — сальник; 23 — термозлемент; 24 — рычаг для подъема крышки.

Расположенный в нижнем конце печи вентилятор гонит воздух мимо нагревательных элементов; нижняя часть крышки отклоняет и направляет воздух, который проходит сквозь слой изделий, расположенных в корзине, после чего снова направляется к вентилятору. Между нагревательным элементом и корзиной находится экран, препятствующий непосредственной передаче тепла лучеиспусканием от нагревательных элементов изделиям. Равномерное повышение температуры в слое изделий достигается также тем, что направление движения воздуха через небольшие промежутки времени изменяется.

Аналогичные печи изготовляет фирма Гереус. Она, однако, отказалась от изменения направления движения воздуха. Кривые подъема температуры изделий в такой печи показаны на рис. 16.

Для больших печей конструкция рис. 169 непригодна, потому что управление движением воздуха затрудняется и становится ненадежным. Если взять один вентилятор, то обтекание воздухом изделий получается неравномерным; при нескольких вентиляторах, расположенных непосредственно в печи, во-первых, будут мешать друг другу различные потоки воздуха, а, во-вторых, расположенный в середине вентилятор будет подавать всегда более холодный воздух, чем расположенные по сторонам. Поэтому для больших печей рекомендуется применять нагревание циркулирующего воздуха снаружи, согласно рис. 170 и 171.

В камеру печи *A* (рис. 170) помещаются изделия (на этажерках, тележках и т. д.). При помощи вентилятора воздух подается в калорифер *B* и оттуда нагнетается в *A*, откуда снова попадает в вентилятор. Распределительный лист *C* из перфорированного железа обеспе-

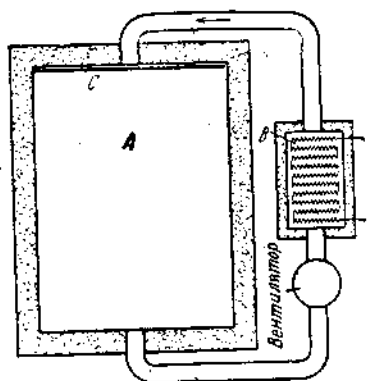


Рис. 170. Схема печи для отпуски с циркуляцией воздуха.

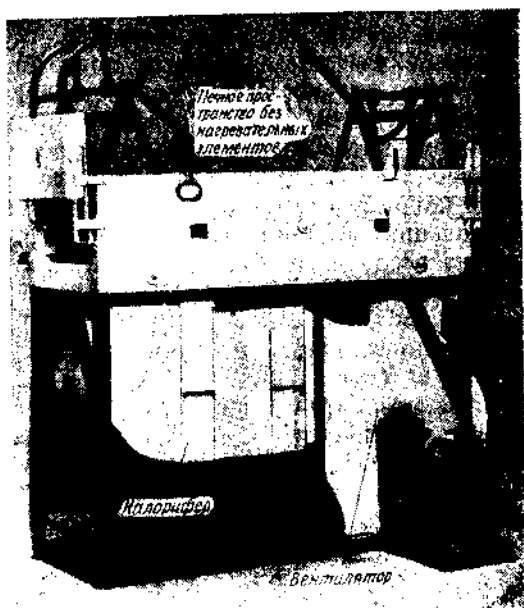


Рис. 171. Печь для отпуски с циркуляцией воздуха.

чивает равномерное распределение воздуха. Иногда такой же листимется и у нижнего конца печи.

В отношении печи рис. 171 попутно следует обратить внимание на изгиб *a* направляющих для дверцы, гарантирующий хорошее уплотнение. Дверца без противовеса может удерживаться в открытом положении путем закладывания рукояток в зацепы *b*.

Нагрев воздуха вне печи дает возможность достигнуть равномерного и сильного воздушного потока.

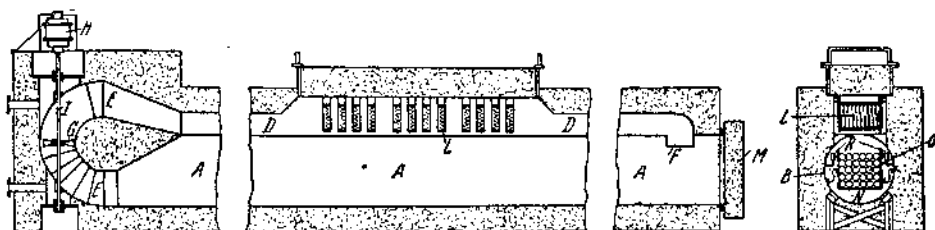


Рис. 172. Печь для отпуска медных и латунных труб.

Изделия *O* укладываются в короб *N*, передвигающийся на роликах *R* по укрепленной на внутренней стене реторты рельсам *S*.

Эта конструкция целесообразна только в печах очень большого сечения и при необходимости удовлетворить одновременно высоким требованиям, предъявляемым к равномерности нагрева изделия; равномерность нагрева изделий зависит от коэффициента теплопередачи, на который очень сильно влияет скорость движения воздуха. Последняя при данном вентиляторе, в свою очередь, определяется протекаемым сечением, которое, наконец, является функцией количества и распределения изделий. Для того, чтобы, тем не менее, достигнуть хорошего нагрева в очень больших печах, даже при неравномерном распределении изделий, часто прибегают к разделению движущегося потока воздуха на несколько частей, подводя и отводя его одновременно в нескольких местах. Если сечение печи невелико, то эта мера не является необходимой и при больших печах, как это видно на примере очень длинных, но узких печей для отпуска труб с циркуляцией воздуха (рис. 172).

Полезное пространство этой печи состоит из трубообразного пространства *A* длиной 7 м и диаметром 400 мм. Это пространство загружается с одного конца *M*, а другим концом упирается в колено *E*, соединенное с пространством, где помещен вентилятор. Над ретортой находится воздушный канал *D*, в котором установлены нагревательные элементы *L*. Вентилятор *G*, приводимый в движение мотором *H* через ось *I*, переключается, примерно, через пять минут, так что горячий воздух попеременно входит в трубу то с одной, то с другой стороны через концы *E* и *F*. Загрузка происходит при помощи специальной машины. Посредством циркуляции воздуха осуществляется хорошая теплопередача, благодаря чему достигаются большая производительность и малый расход энергии.

Можно также применять выдвижной под, ввиду того, что, учитывая низкую температуру, нет надобности в футеровке или изоляции тележек, которые обычно въезжают в печь (см. сушильную печь рис. 168).

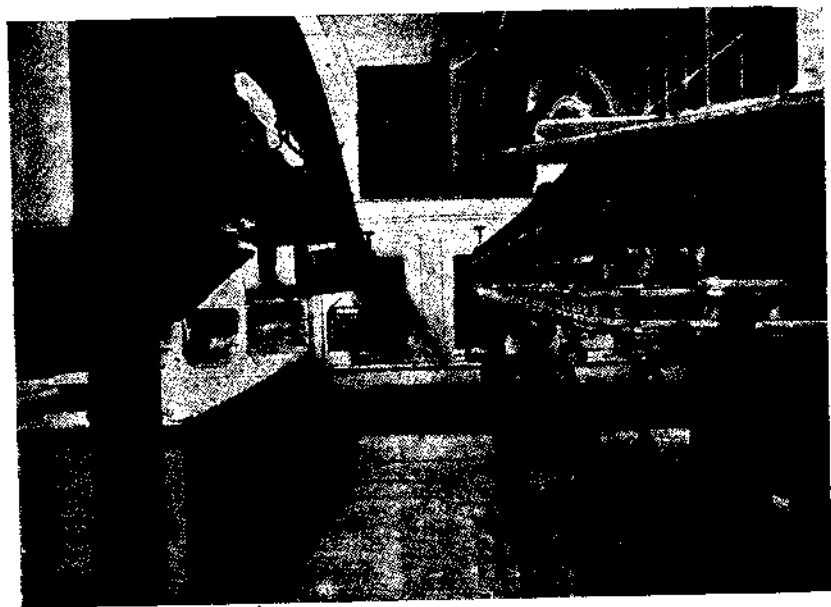


Рис. 173. Печь непрерывного действия для отпуска.

б) Печи непрерывного действия

Для тех же пределов температуры изготавливались также печи с цепями, остающимися в печи одинаковое с изделиями время (рис. 173). В этой печи очень ясно видны преимущества подвесной цепи: цепь обслуживает не только продвижение изделий в печи, но и транспорт их к другим рабочим местам. Установленная мощность изображенной на рисунке печи составляет 90 квт (схема движения цепи — см. рис. 174). Размер полезного сечения печи равен 305 мм × 710 мм. Максимальная температура 235° (Шмидт, Ж 66).

На рис. 175 изображена печь, в которой применялся цепь, не выходящая из печи. На рисунке видна вытяжка, служащая для удаления газов, образующихся от сгорания остатков масла при температуре отпуска в 300°. Печь предназначена для отпуска ножей косилки; ножи поступают

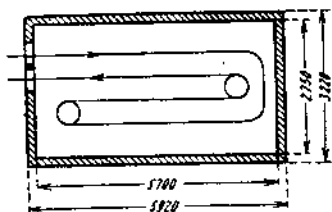


Рис. 174. Схема прохождения цепи в печи, изображенной на рис. 173.

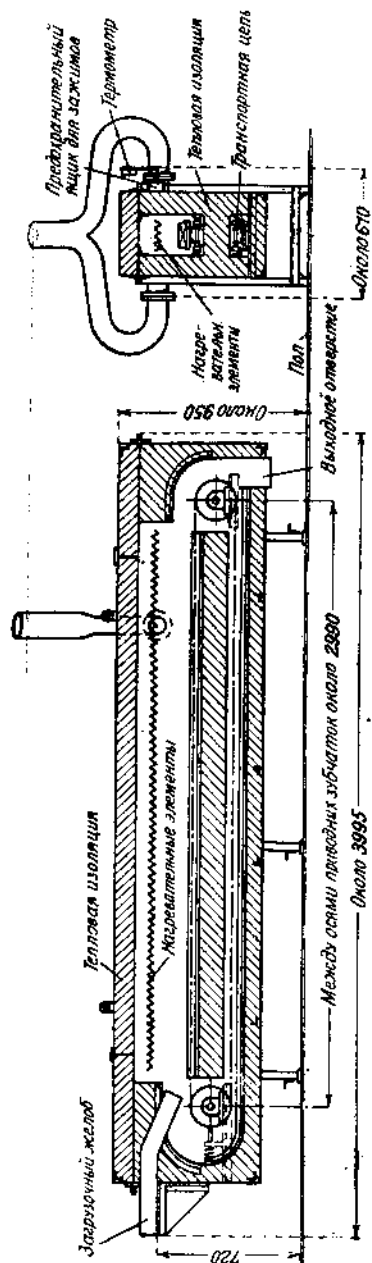


Рис. 175. Поточная печь для отпущки полотен нил.

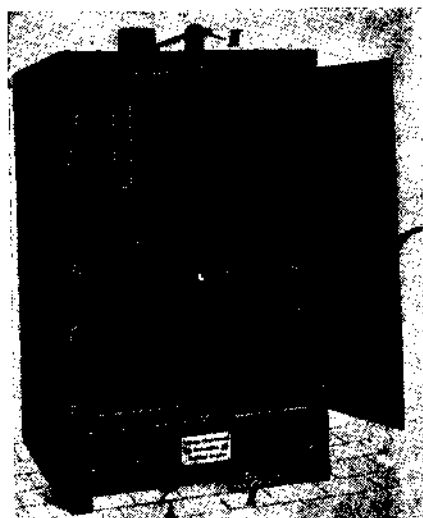


Рис. 176. Сушильный шкаф.

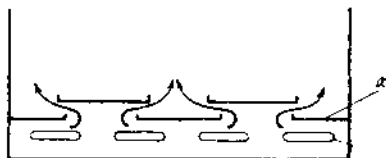


Рис. 177. Схема предохранения нагревательных элементов от падающих капель лака.

а - покрывные листы, защищающие от капающего лака и в то же время пропускающие воздух;
 б - нагревательные элементы.

на цепь поодиночке и благодаря этому нагреваются равномерно, не вуждаясь в движении воздуха. При производительности в 130 кг/час, нагреваемых с 90 до 300°, печь расходует 140 квтч на тонну изделий (Ж 67).

2. СУШИЛА

Каждый процесс сушки требует притока свежего воздуха: при настоящей сушке (которую следует рассматривать как процесс испарения) воздух нужен для отвода паров жидкости, по крайней мере, в конце периода сушки, а при сложной сушке (например, сушка лака) — для окисления лака.

Обмен воздуха характерен для сушильных печей.

Количество свежего воздуха, нужного для сушки, в абсолютных количествах в большинстве случаев невелико; однако, практически приходится работать с большим избытком воздуха, так как необходимы большие скорости воздуха. В противном случае вокруг некоторых частей изделия может образоваться неподвижная воздушная «пленка», так что в этих местах будет замечаться недостаток свежего воздуха.

Усиленный обмен воздуха, однако, влечет за собою значительные потери тепла. Обойти оба эти затруднения можно двумя способами: сушкой с замкнутым кругооборотом воздуха и сушкой в протитокоте.

В простых сушильных шкафах малых размеров приходится отказываться от обоих этих способов экономии тепла во избежание чрезмерного удорожания печей.

а) Печи с периодической загрузкой

На рис. 176 изображена камерная сушильная печь обычной конструкции. В дне камеры проделаны отверстия, через которые может быть подведен свежий воздух; при помощи клапанов нижних (рукоятка I—I') и верхних (рукоятка III) открытие отверстий можно регулировать в зависимости от потребности в свежем воздухе. Нагревающие элементы (в большинстве случаев рамочные) расположены в данном случае на дне, а часто также и по стенам. Отверстия для воздуха в дне камеры при сушке огнеопасных лаков должны быть устроены таким образом, чтобы капли горючей жидкости не попадали на нагревательные элементы (рис. 177). При расчете напряжения поверхности нагревательных элементов в печах, предназначенных для работы с горючими материалами, надо быть особенно осторожным и в случае надобности применять тщательно заделанные — утопленные нагревательные элементы (стр. 171).

Важной специальной областью сушки является сушка под вакуумом (рис. 178), которая применяется очень часто в соединении с пропиткой, особенно в электротехнической промышленности. На рисунке изображена полная установка, состоящая из двух агрегатов по два резервуара. Один из них предназначен для сушки под вакуумом и мог бы быть в таком же виде применен для сушильных целей без последую-

щей пропитки. Во втором резервуаре нагревается пропитывающее вещество. Интересующихся рабочим процессом всей установки мы отсылаем к работе Бервига и Тамеле (Ж 68).

Образец сушильной печи с циркуляцией воздуха изображен на рис. 179. При помощи вентилятора засасывается воздух из сушильного помещения (штуцер *A*) и свежий воздух (штуцер *B*). Через каналы *C* воздух подается к нагревательным элементам *D*, откуда поступает в сушильное помещение. Таким образом, часть воздуха описывает один и тот же путь, в то время как часть его выходит наружу через штуцер *E*.



Рис. 178. Вакуумная сушильная и пропиточная установка.

В случае обычного процесса сушки (удаление влаги) подведение свежего воздуха может автоматически устанавливаться при помощи измерения влажности отходящего воздуха; в случае соединения процессов сушки и окисления (сушка лаков) при очень чувствительных изделиях и при определенных сортах лака следует опасаться загрязнения изделий и насыщения воздуха горючими парами. Если в этом случае вместо обыкновенной циркуляции воздух, уходящий из печи, прогонять через камеру сгорания, в которой пары лака воспламеняются раскаленными электрическими сопротивлениями, то опасность воспламенения их существенно уменьшается¹ и даже удается использовать теплотворную способность паров лака. В зависимости от требований, предъявляемых к чистоте изделий, воздух из этой камеры сгорания можно снова отводить в печь или же, пропуская его через рекуператор, нагревать его теплотой свежий воздух, направляющийся в печь.

¹ Герм. пат. 501 174.

При процессах сушки с целью удаления влаги подведение свежего воздуха может автоматически регулироваться путем измерения влажности воздуха.

При очень большом содержании влаги доля теплоты испарения в общем балансе потребного тепла так велика, что даже минимальное содержание паров в отходящем воздухе очень невыгодно для термического хозяйства печи. Поэтому иногда применяется конденсатор, включенный в противоток свежего воздуха, в котором отходящий воздух охлаждается ниже точки росы, благодаря чему значительная часть скрытой теплоты парообразования утилизируется.

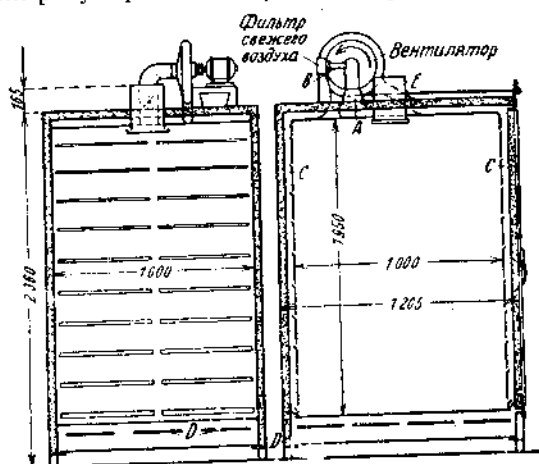


Рис. 179. Камерная сушильная печь с циркуляцией воздуха.

б) Непрерывно действующие сушила

На рис. 180 изображена сушильная печь непрерывного действия, обогреваемая циркулирующим воздухом, которая предназначена для сушки корпусов счетчиков. Вентилятор забирает около 20% свежего воздуха и около 80% оборотного. Выходящие из печи



Рис. 180. Сушильная печь непрерывного действия.

изделия и воздух через промежуточную стенку передают тепло проходящим над ней холодным изделиям и воздуху. При установленной мощности 78 квт расход энергии на 1 000 кожухов колеблется от 44 до 55 квтч. Вес изделий колеблется от 240 до 2 800 г; суточная производительность составляет от 8 до 10 тыс. штук, температура сушки около 200°. Собственно сушильный канал расположен сверху,

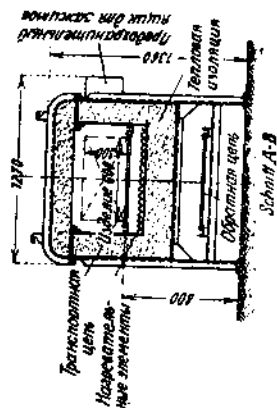
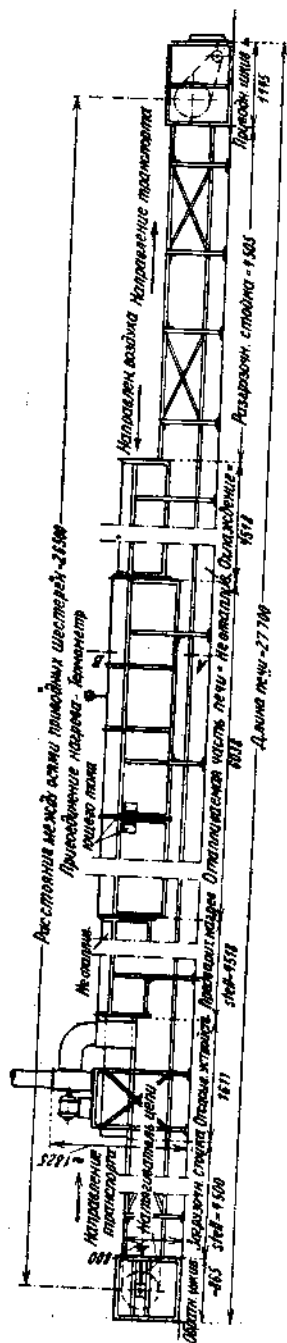


Рис. 181. Поточная сушильная печь, сконструированная по принципу противотока.

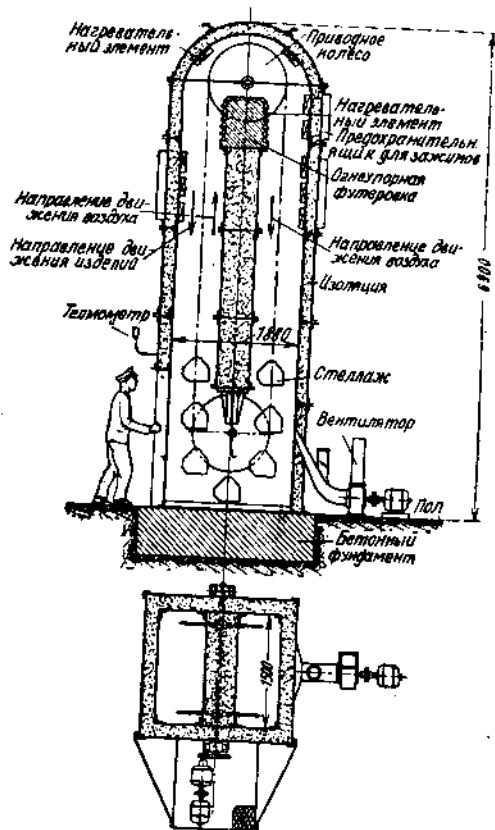


Рис. 182.5 Поточная сушильная печь для литейных шпих.

так что получается экономия в площади мастерской. К длинному горизонтальному каналу примыкает короткий вертикальный канал, в котором производится загрузка и разгрузка печи на уровне пола мастерской.

На рис. 181 изображена другая конструкция конвейерной печи для подобных же целей. Это — печь с рекуперацией тепла по принципу противотока; цепь принимает изделия либо непосредственно, либо уложенные на подставках — лакированные корпуса телефонов и т. д. Нагревательные элементы находятся только в средней части печи, а воздух просасывается в направлении, противоположном движению изделий. Расход энергии составляет при производительности сушики в 1 ч и производительности 400 кг/час—28 квт. Нормальная рабочая температура — около 200°. Следует обратить внимание на легкую доступность внутренности печи, свод печи спускается.



Рис. 183. Сушильная печь для автомобильных кузовов.

По рис. 182 можно получить представление о применении того же принципа к вертикальным печам (Пашкис, Ж 52)¹. Печь предназначена для сушки шишек в литейных. Шишки укладываются на подвешенные к цепи решетчатые полки, которые протягиваются при помощи цепи через печь; воздух же направляется навстречу движению шишек. Установленная мощность печи составляет 90 квт; печь расходует, в зависимости от загрузки и количества воздуха, от 0,06 до 0,10 квтч/кг приведенного веса (стр. 161).

На рис. 152 изображена конвейерная печь полунепрерывного действия для сушки лакированных велосипедных рам, подвешенных к тележкам, проходящим по монорельсовому пути через двойную печь. После открытия закрытой во время работы дверцы велосипедные рамы по окончании процесса сушки могут быть вынуты с противоположной стороны печи. Расход энергии в печи составляет около 200 квтч при производительности 140 кг/ч; установленная мощность обеих камер 120 квт. Учитывая опасность взрыва при сушке лака

¹ Эта конструкция применима для очень многих назначений и потому здесь опускается.

необходимо работать с большим избытком воздуха, чем и объясняется большой расход тепла.

На рис. 183 изображена самая большая в мире электрическая сушильная установка: эта печь имеет в ширину 2 650 мм, 2 000 мм в высоту и 91 500 мм в длину (размеры в свету); рабочее отверстие 1830 × 1830 мм, так что обрызганные лаком кузова автомобилей проходят в печь целиком. Установленная мощность составляет 1000 квт. Производительность достигает 25 кузовов в час со средним весом 500 кг/час, причем установленная мощность используется приблизительно на 70%.

В. ВАННЫ

(для низких, средних и высоких температур)

Аналогично печам низкой температуры построены и некоторые ванны, могущие служить для самых разнообразных целей (ванны

для отпуска, для закатки, для горючего освидетствования, оцинкования и лужения, ванны для плавки металлов). Ниже будет рассмотрена конструкция ванны в общих чертах.

Идеальными нагревательными элементами для ванн являются погружаемые в них нагреватели (рис. 184), которые могут быть получены готовыми, или нагревательные элементы заделывают в трубку, химически устойчивую по отношению к жидкости ванны. При этом следует обращать внимание на хорошую теплопередачу между нагревательным элементом и трубкой, так как при плохой теплопередаче нагревательный элемент может нагреться до более высоких температур, что угрожает повреждением как нагревательного элемента, так и трубки, вследствие окисления.

В нагревателе рис. 184 сопротивление

представляет собой слюдяной элемент, вследствие чего применение его ограничивается температурой 350°. Элемент сгибается и помещается в металлический кожух.

На рис. 185 показан общий вид такого прибора, сконструированного фирмой «Прометеус». Кольцеобразный миканитовый нагревательный элемент (рис. 185, а) вводится в нагреваемую трубу, после этого шарнир разжимается при помощи рычага, вследствие чего нагревательный элемент плотно прижимается к внутренней стенке трубы. На рис. 185, б изображен вырез нагреваемой трубы с находящимся в ней элементом. Над шарниром видны клеммы для подвода тока.

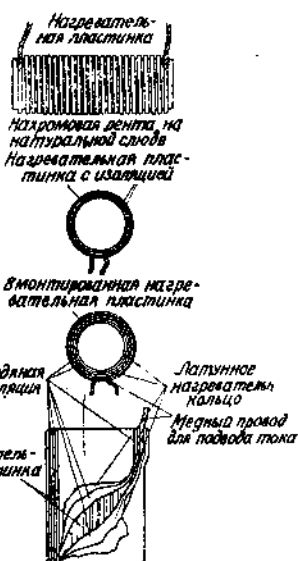


Рис. 184. Погружаемый нагреватель.

Часто такое внутреннее нагревание ванны невозможно либо вследствие того, что ванна разъедает нагревательные элементы или их предохранительные трубки, либо потому, что вследствие паличия выступов, необходимых по эксплуатационным соображениям, не остается места для погружаемых элементов.

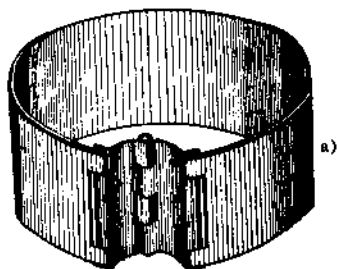
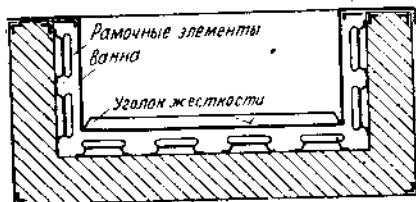


Рис. 185. Нагревательный элемент фирмы «Прометеус».

В этих случаях рекомендуется обогревать ванну при помощи нагревательных элементов, спирально намотанных непосредственно на стенку сосуда. С этой целью берутся пластинчатые или гибкие элементы, которые могут быть приспособлены к форме тигля. Для этого же могут служить и заделанные в миканит элементы. (стр. 171). Часто применима очень простая конструкция: вблизи стенки печи низкой температуры укрепляются рамочные или какие-либо другие элементы, отдающие стенке тигля тепло, вследствие лучеиспускания и конвекции (в большинстве случаев естественной).



На рис. 186 показана такая ванна в разрезе, а на рис. 187 изображен ее внешний вид с вытяжкой для паров, которая обычно необходима.

Рис. 186. Ванна для низких температур.

Для более высоких температур вместо железной внутренней стенки применяется обычная огнеупорная кладка для печей средней температуры, которая окружает тигель, как это видно из рис. 188.

Приваренное к тигелю кольцо А должно улавливать соль, вынимаемую вместе с изделиями из ванны; капающая соль затвердевает и не может поэтому попасть в нагревательное пространство. Заслуживает внимания также регулировка температуры, представляющая обычно затруднения в тиглях, нагреваемых снаружи, так как тигель и масса ванны, вследствие их большой инертности, повышают разность регулировки. Здесь для регулировки температуры используется тепловое расширение тигеля, сравниваемое с находящимся вне печи стержнем,

имеющим малый коэффициент линейного расширения. Печь, предназначенную для плавки, т. е. в которой должен быть получен металл в жидком виде, можно сделать опрокидывающейся (рис. 189).

На рис. 189 изображена печь, в которой ось вращения проходит через сливной нос тигля, так что точка вытекания металла во время опрокидывания тигля все время остается на одном месте. Благодаря этому литейные формы можно подводить к печи совсем близко, вследствие чего сильно уменьшается окисление льющейся струи металла.

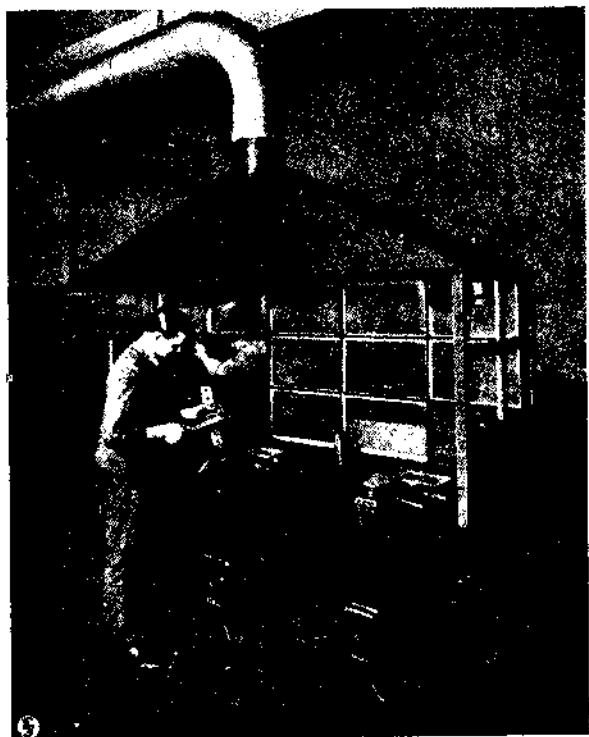


Рис. 187. Котел для плавки олова, вделанный в вентиляционный шкаф.

При опрокидывании мотор приводит в движение при помощи передачи цепь, опрокидывающую, в свою очередь, соединенный с нею рычагом тигель. Температура регулируется в нагревательном пространстве и в ванне. Во избежание попадания при отливке шлака в форму, в тигель вделана разделительная стенка, так что к носику металл поступает со дна тигля. Объем тигля 27 л; установленная мощность 28 квт.

Многие жидкие (расплавленные) ванны действуют химически на стенки тиглей или на нагревательные элементы. Интенсивность этого

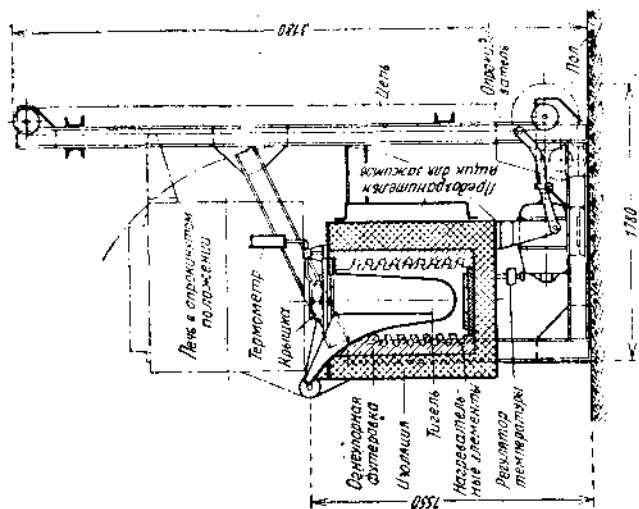


Рис. 199. Опронизывающаяся печь для наварки металлов.

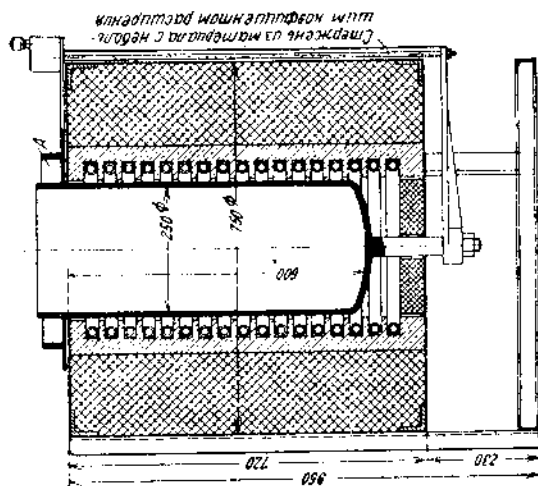


Рис. 188. Тягловая печь для соляной ванны.

воздействия в значительной мере зависит от температуры, которая, вследствие температурного перепада, с наружной стороны стенки тигля выше температуры ванны. Так как многие материалы, идущие на изготовление тиглей при различных жидкостях ванны, работают почти на пределе применимости, необходимо следить, чтобы жидкость ванны не попадала в нагревательное пространство. Эта задача затрудняется тем обстоятельством, что многие соли обладают свойством проникать сквозь самые мелкие отверстия, вследствие законов капиллярности.

Уплотнением тигля по отношению к нагревательному пространству в первую очередь занялись американские конструкторы, которые и нашли ряд соответственных конструкций. Часто достаточно устроить тигель с бортом (рис. 190).

Литое железо особенно устойчиво по отношению ко многим солям, главным образом к цинкистым. Однако в качестве материала для тигля оно не подходит, потому что на внешней стороне тигля образуется окалина. Поэтому изготовленные из литого железа тигли покрываются снаружи жароустойчивым материалом.

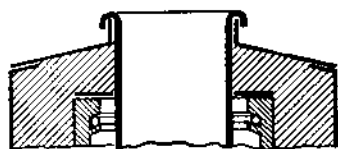


Рис. 190. Специальная форма тигля для соляных ванн, предохраняющая от попадания соли на нагревательные элементы.

За последнее время в Америке были разработаны печи с соляными ваннами, в которых соль, попавшая через борт тигля или сквозь трещины в нагревательное пространство, обезвреживается, проходя сквозь окисляющую

струи воздуха (Джемс и Кеми, Ж 69).

Если тигель протекает либо жидкость ванны попадает в нагревательное пространство вследствие капиллярности, то повреждаются также и нагревательные элементы. Многие тигли, особенно литые, имеют в некоторых местах поры (раковины); сварные тигли также могут иметь щели в сварных швах. Поэтому были сделаны попытки, кроме описанных средств, применить предохранительные сетки, оказывающие своего рода поверхностное действие, для предохранения тигля и нагревательных элементов от преждевременного разрушения. Наряду с этим были построены указатели, замыкаемые накоротко попадающей на них жидкостью ванны. В основном они состоят из двух электродов, установленных в наиболее глубоком месте нагревательного пространства, которые при замыкании приводят в действие сигнальный гудок.

Соляные ванны, нагреваемые снаружи, при более высоких температурах (свыше 950°) часто нагреваются также и при помощи силитовых стержней, как это видно на рис. 191; однако такие конструкции встречаются редко. Силитовые стержни, прилегающие к боковым

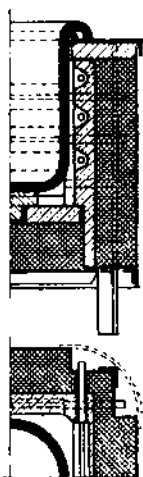


Рис. 191. Соляная ванна для высоких температур.

ступкам, смещены один по отношению к другому. Тигель стоит на дне, вследствие чего он механически разгружается. Внешний кожух вырезан у концов силитовых стержней для того, чтобы соединения стержней не требовали много места; это достигается ценою несколько повышенных тепловых потерь. Вместо ванн с силитовыми стержнями для высоких температур гораздо чаще применяются ванны прямого нагрева (стр. 275).

С. ПЕЧИ ДЛЯ СРЕДНИХ ТЕМПЕРАТУР

1. ПЕЧИ С ЕСТЕСТВЕННОЙ АТМОСФЕРОЙ

а) Печи не имеющие загрузочных и транспортных приспособлений

а) Обычные печи с дверцей, расположенной в вертикальной плоскости. На рис. 192 изображена переносная печь. В закрытом состоя-

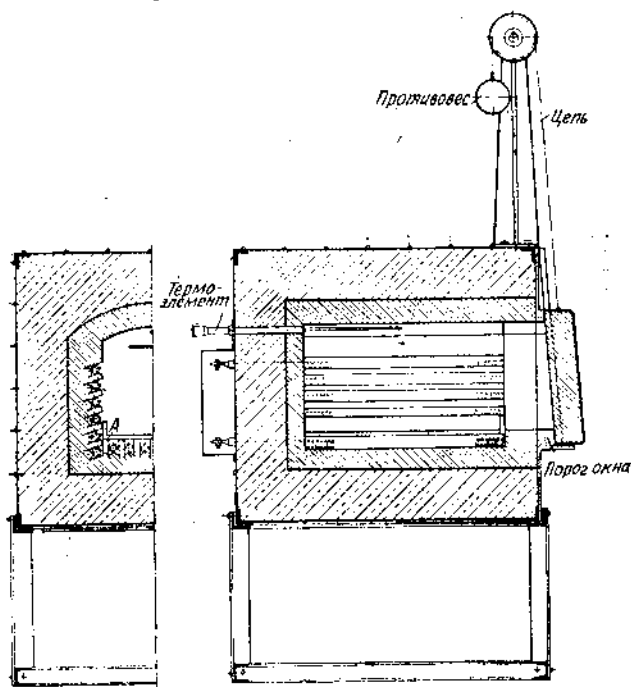


Рис. 192. Передвижная камерная печь для отжига. Плотное закрытие дверцы достигается за счет ее веса.

нии дверца печи опирается на порог окна. Движение сообщается дверце при помощи цепи, причем вес дверцы сбалансирован с противовесом. Подовые нагревательные элементы закрыты плитой из жароустойчивого литья. Если эту плиту покоробит (в литой плите это мало вероятно; загруженная же холодными изделиями по-

довая плита из прокатного материала легко коробится, а потому таких плит следует избегать), так что окалина может упасть за пределы плиты, то последняя первое время попадает не на подовые нагревательные элементы, а в пространство *A* (рис. 192). И только когда это пространство будет заполнено окалиной, если печь не чистить, то могут пострадать подовые нагревательные элементы.

Внутренний вид камерной печи уже показан на приведенном выше рис. 98. В конструкции, изображенной на рис. 193, защищающее от окалины приспособление сделано особенно тщательно; подовая плита изогнута вверх (*A*), благодаря чему боковые нагревательные элементы предохранены от попадания на них окалины. Кроме того, подовая плита специальными ребрами *B* входит в оставленный для этого паз. Благодаря такому расположению гарантируется некоторое минимальное

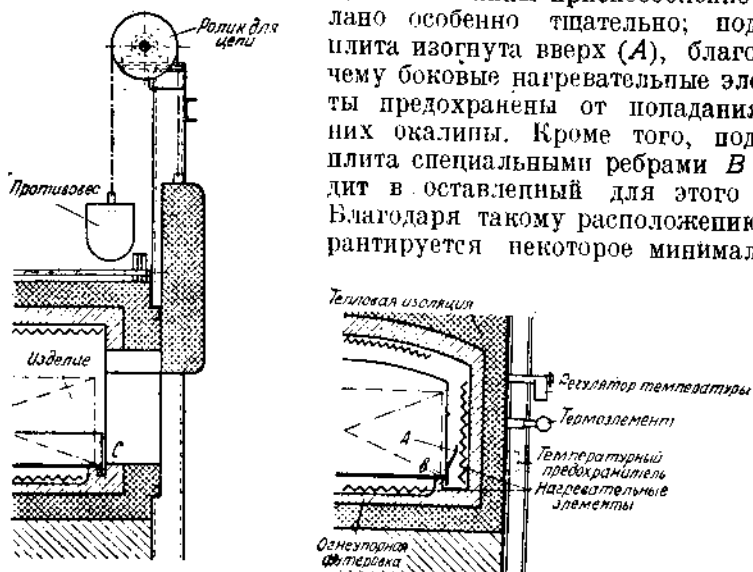


Рис. 193. Камерная печь для отжига.

расстояние между изделием и нагревательными элементами; даже при цементации в железных коробках (как это часто случается на практике) откакивающая окалина падает не за подовую плиту, а на нее; если, тем не менее, грязь попадет за плиту, то она собирается возле ребер *B* и не может повредить нагревательных элементов. Обращает на себя внимание конструкция перекрытия подовой плитой места *C* у переднего и заднего конца печи (задний конец на рисунке не показан), благодаря чему окалина не может попадать под подовую плиту и через эти места.

Американская практика разрешила вопрос о защите от окалины несколько иначе¹. Подовые плиты делаются не из одного куска, а из нескольких частей. Концы отдельных плит входят в желоба для окалины из жароупорного металла; в эти желоба падает окалина и через равномерные промежутки времени может быть удалена (ср. с этим также конструкцию фирмы Гергеус, описанную выше).

¹ Амер. пат. 1 647 726 и 1 731 166.

На рис. 194 изображено другое устройство для удаления окалины. В керамических опорах 1, поддерживающих подовые нагревательные сопротивления, имеются отверстия 3, сквозь которые окалина может попадать в желоба, лежащие под подом в пазах 5, откуда ее можно легко удалять.

В) Обычные печи с горизонтальной дверцей (крышкой). Для многих целей более подходят печи, в которых отверстие находится не в боковой стенке, а сверху или внизу печи; печи с крышкой наверху называются вертикальными (шахтными) печами или нагревательными колодцами, печи второго типа не имеют специального названия.

На рис. 195 изображен разрез вертикальной печи (колодца). Вес нормальной загрузки (орудийные стволы) составляет от 480 до 500 кг. Глубина 4000 мм; полезный диаметр 375 мм. Установленная мощность 80 квт. Печь служит для нагрева труб, предназначенных для закалки. Трубы подвешиваются на специальном приспособлении под крышкой и вынимаются при помощи крана вместе с этим приспособлением. Обращает на себя внимание уплотнение крышки и наблюдательного отверстия (глазка) при помощи песочных карманов. Когда печь предварительно разогрета, для прогрева изделий требуется три часа при расходе тока около 470 квтч. Крышка этой печи поднимается при помощи крана и кладется на сторону. Прочность крышки такой конструкции быстро понижается с увеличением размера печи, и потому крышки большего размера делаются отъемными. При помощи специальной лебедки они поднимаются на предназначенную для этой цели тележку и откатываются в сторону (рис. 196). Таким способом удается обслуживать крышки круглых печей с диаметром свыше 3 м.

Нагревательные колодцы и шахтные печи можно помещать непосредственно в грунт, и в этом случае они имеют очень малые тепловые потери, так как окружающий их грунт принимает участие в изоляции. С другой стороны, теплосодержание таких печей очень велико, что влечет за собою большую продолжительность полного остывания разогретой печи — часто в течение нескольких дней. Загрузка в печи массивных изделий несложной формы очень проста: она может происходить, например, при помощи цепей. Правда, если нужно расположить на поде такой печи несколько изделий рядом, то правильное распределение таковых едва ли удастся, так как нет никакой возможности наклониться над открытой горячей печью. Выемка нагретых изделий из такой печи иногда представляет трудности, так как при высоких температурах изделие часто не обладает

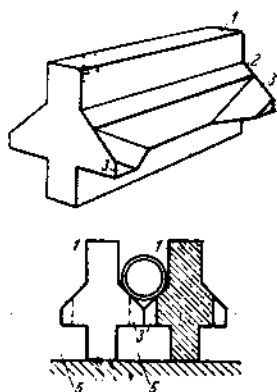


Рис. 194. Приспособление для защиты нагревательных элементов от падающей окалины.

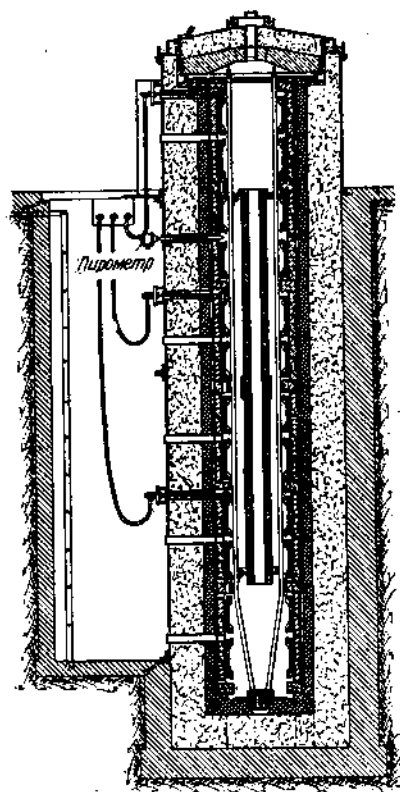


Рис. 195. Шахтная печь.

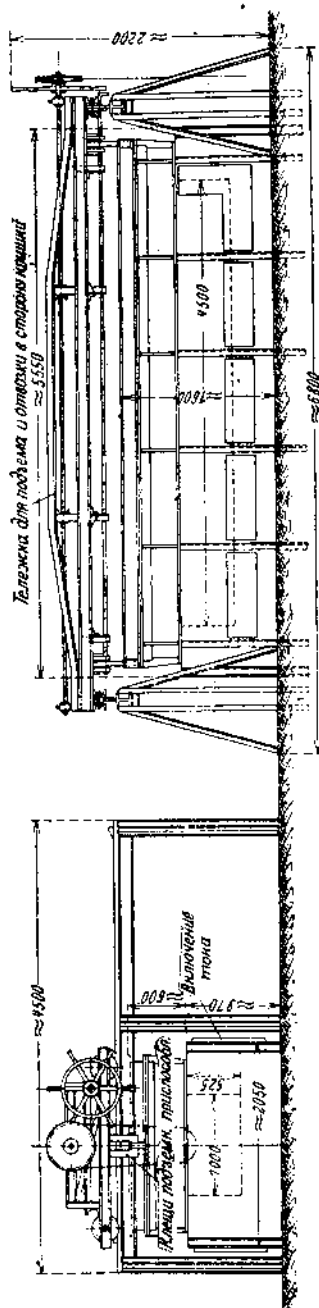


Рис. 196. Механизм для подъема крышки большой шахтной печи.

достаточной прочностью и может подвергнуться деформации. По той же причине подставки, которые поддерживают нагреваемые трубы или стержни для достижения надлежащей прочности в нагретом виде, должны быть весьма массивными, что увеличивает мертвый вес.

Герметичность горизонтального затвора в вертикальных, а также в съемных печах (т. е. в печах со съемными стенками и сводом) более надежна, чем в вертикальных дверцах обычных камерных печей; в результате снижаются потери холостого хода.

На рис. 197 схематически изображено устройство печи со съемным корпусом. Шамотная кладка с вделанными в нее нагревательными элементами, а также тепловая изоляция скреплены прочным металлическим кожухом. Сквозные тяги связывают падающие сверху прутья для подъема с нижней опорной конструкцией рамного типа из швеллерного железа. Изделия устанавливаются на нагреваемый под-цоколь, причем укладка может быть выполнена тщательно и аккуратно. После этого съемная часть печи (свод и стенки), которая также снабжается нагревательными элементами, опускается на цоколь, после чего можно начать нагревание печи. В это время на соседнем поде-цоколе устанавливается следующая партия изделий. В результате съемная часть печи, накапливающая большое количество тепла, практически не охлаждается, и только накопившееся в массе пода-цоколя тепло теряется вместе с теплом, поглощенным изделиями. Для того, чтобы продлить срок службы съемной части, за печью такого типа должен быть тщательный уход. Однако они дешевле чем печи со опускающимся подом (последние печи работают на обратном принципе и будут рассмотрены в разделе «Печи с загрузочными приспособлениями»).

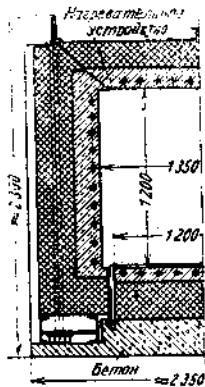


Рис. 197. Печь со съемным корпусом.

В печах меньшего размера съемная часть часто может только подниматься и опускаться. После подъема съемной части печи изделие может быть снято с фундамента, играющего роль пода печи. В этом случае съемная часть испытывает меньшие напряжения, чем при конструкции, изображенной на рисунке.

У) *Закалочные печи с автоматическим определением температуры критической точки.* Для того, чтобы закалить сталь, ее, как известно, нужно нагреть до критической точки и затем быстро охладить.

Изделия нагреваются до необходимой температуры закалки в большинстве случаев таким образом. Температуру в печи доводят до уровня возможно более близкого к желаемой температуре закалки, и нагревают изделие до температуры печи; определение времени пребывания изделия в печи обычно предоставляется усмотрению обслуживающего персонала. Учитывая неизбежное охлаждение

за время, протекающее от момента выемки из печи до момента закали, изделие должно быть нагрето на несколько градусов выше температуры критической точки. При этом можно только примерно определить температуру поверхности изделия. В электрических печах были сделаны попытки уменьшать эту неточность работы при помощи разного рода специальных устройств. Эти методы основаны на том, что внутренние превращения в стали обычно сопровождаются термическими и магнитными явлениями, которые и могут быть использованы для определения критических точек.

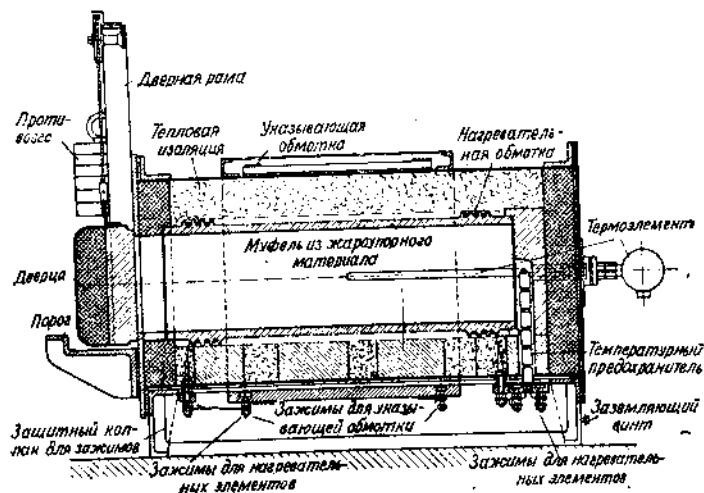


Рис. 198. Разрез печи Вильд-Барфилда.

На рис. 198 изображен разрез печи Вильд-Барфилда, в основу устройства которой положены магнитные явления, сопровождающие внутренние превращения в стали. На рис. 199 приведена схема соединений:

O — печь с нагревательной обмоткой H , являющейся одновременно первичной обмоткой «печного трансформатора»; S — вторичная обмотка трансформатора (индикаторная обмотка); D — конденсационный трансформатор; D_1 — его первичная обмотка; D_2 — вторичная обмотка; I — ваттметр; T — температурный предохранитель; L — сигнальная лампа, загорающаяся, когда T перегорает; R — регулировочный реостат.

С электротехнической точки зрения такая печь представляет собою трансформатор без железного сердечника (нагревающая обмотка и индикаторная обмотка), включенный своей вторичной обмоткой навстречу вспомогательному трансформатору, имеющему железный сердечник, и первичной своей обмоткой включенному параллельно «печному» трансформатору. При пустой печи выдвижной сердечник вспомогательного трансформатора (компенсатор) устанавливается таким

образом, что по вторичной обмотке не протекает никакого тока; это может быть определено при помощи магнитным материалом, то связь «печного трансформатора» улучшается, вторичное напряжение повышается, и во вторичной цепи протекает ток, который можно учесть при помощи ваттметра. Когда в результате нагревания материал изделий теряет магнитные свойства, то ваттметр возвращается снова в нулевое положение и таким образом показывает обслуживающему персоналу, что материал изделия достиг температуры критической точки.

Эти печи применимы для тех сортов стали, у которых критические точки, определяемые термическим методом, совпадают с критическими точками, определяемыми магнитными методами, что относится прежде всего к нелегированным сталям с содержанием углерода свыше 0,66%.

Для специальных сортов стали критические точки, определяемые магнитным и термическим методом, обычно не совпадают, почему печь Вильд-Барфилда для этих сталей неприменима. Эти печи делаются емкостью примерно до 0,1 м³; за этими пределами применение выпл:

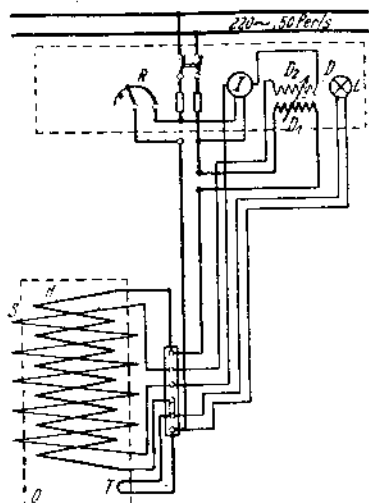


Рис. 199. Схема соединений печи Вильд-Барфилда.

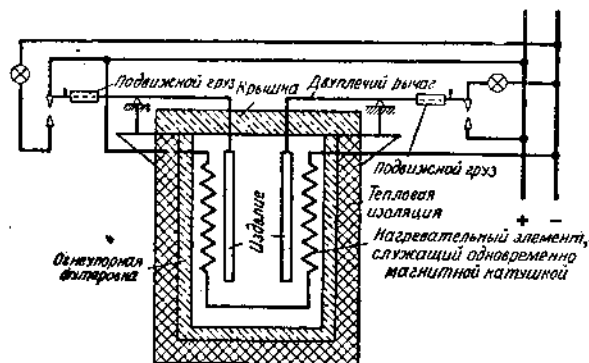


Рис. 200. Закалочная печь с автоматическим указанием момента нагрева материала до критической точки.

описанной конструкции встречает больше затруднения. Безукоризненной работы печи можно ожидать только в том случае, если изделия одинаковы как по величине, так и по качеству материала, по-

тому что ваттметр покажет отсутствие тока лишь в том случае, когда все изделия, находящиеся в печи, станут немагнитными; точно также равномерный и одновременный прогрев до критической точки даже при одинаковом материале зависит от размеров изделий.

Конструкция печи Инфра основана также на изменении магнитных свойств стали при температуре критических точек. Изделия подвешиваются к коромыслу (двушечий рычаг, рис. 200). Последний приводится в равновесие с учетом магнитного действия нагревающей обмотки, которое вытягивает изделие в печь. Как только изделия становятся немагнитными, противовес на коромысле перевешивает и поднимает изделие, замыкая при этом контакт (Ж 70 и Пат-кис, Ж 71).

Эта печь французского изобретения¹ до настоящего времени не получила распространения. Во Франции она была вытеснена одной из разновидностей индукционных печей (стр. 278). Причины этого автору неизвестны. Печь проста по конструкции и имеет то преимущество, что при применении нескольких коромысел для подвешивания изделий, возможно нагревание нескольких штук с различным временем прогрева.

Устройство, подобное печи Инфра, имеет немецкая печь следующей конструкции². Изделие удерживается в печи благодаря его магнитным свойствам и при исчезновении их падает сквозь отверстие в дне печи. Путем передвижения изделия по наклонной плоскости время его нагрева удлиняется настолько, насколько это необходимо по требованиям технологического процесса.

Работа печей «Гумп» основана на очень тщательном измерении температуры при помощи точного измерительного прибора (потенциометрический регулятор) (стр. 215) с автоматической регистрацией кривой: время — температура. Печь работает без автоматической регулировки температуры с непрерывным подводом тепла; так как процессы внутренних превращений являются эндотермическими, то на кривой температура — время они выражаются в виде перегиба (по-английски Hump, т. е. горб). Нагревательные элементы в этой печи утоплены в керамическую массу, как это показано, например, выше на рис. 134. Само собой разумеется, что эта печь работает вполне надежно только тогда, когда в нее помещаются изделия одинаковых размеров и симметрично по отношению к стенкам печи; в противном случае отдельные выступающие части изделия могли бы достигнуть критической точки раньше, чем находящиеся в «тепловой тени», и в этом случае получился бы неясный, искаженный излом кривой. На рис. 201 изображена такая печь, а на рис. 202 показана типичная кривая температура — время. Обозначения к рис. 201:

1 — крышка из двух половинок; 2 — штепсельная розетка; 3 — верхний провод для тока; 4 — нижний провод для тока; 5 — изделие; 6 — консоль для подвески изделий; 7 — опора для изделий; 8 — нагревательные элементы; 9 — термоэлементы; 10 — выводы термоэлемента.

¹ Брит. пат. 297 826.

² Герман. пат. 464 838.

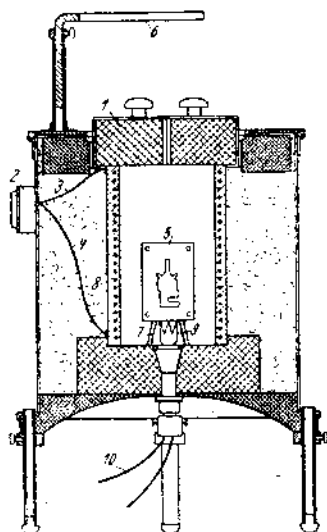


Рис. 201. Разрез печи «ГУМП» Лидс-Нортроп.

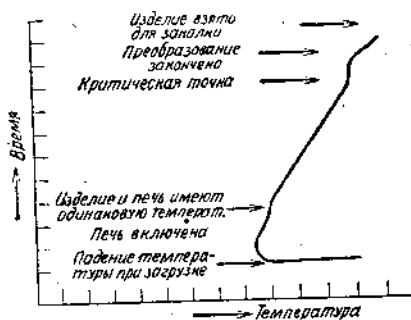


Рис. 202. Кривая «время — температура» Лидс-Нортроп.

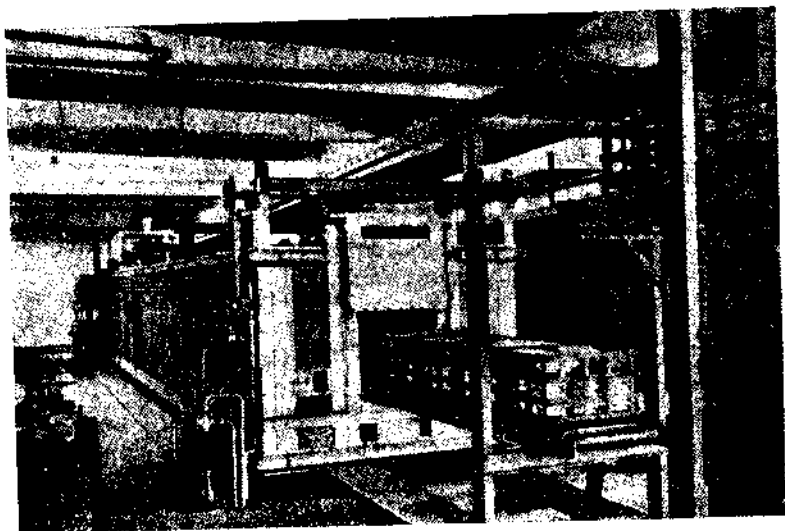


Рис. 203. Печь для обжига фарфора.

б) Печи со специальными загрузочными и транспортными приспособлениями

а) Печь с толкателем для обжига фарфора (без рекуперации тепла) (рис. 203). Наполненные фарфором коробки вдвигаются в

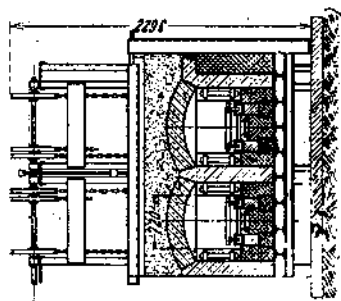
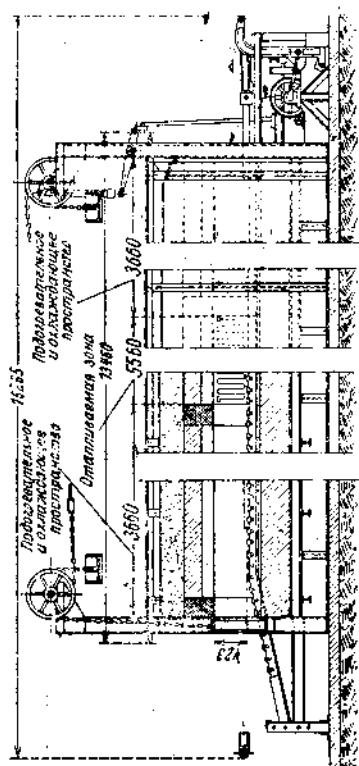


Рис. 204. Четырехкамерная цементировочная печь.

печь одна за другой при помощи гидравлического толкателя и передвигаются внутри печи на роликах. Пустые коробки поднимаются также гидравлическим устройством на рольганг, находящийся над печью, и возвращаются к месту загрузки, где они опускаются также гидравлическим подъемником для того, чтобы вновь загрузиться фарфором. Управление дверцей также гидравлическое. Длина печи 14 м, из которых на собственно нагревательную зону приходится только 2 м, а на зону предварительного нагрева 5,5 м и на зону охлаждения 6,5 м. В нагревательной зоне находятся две отдельно регулируемые линии нагревательных сопротивлений по 65 квт каждая. Наибольшая производительность печи 3—4 т фарфора в сутки. При суточной производительности в 2,8 т (117 кг/ч) расход тока составляет 76 квтч/100 кг.

Печь, предназначенная для аналогичных целей, но с рекуперацией тепла, описана Алма-ном (Ж, 72).

б) Печь с толкателем для цемента, работающая по принципу противотока. На рис. 204 изображена четырехкамерная печь для цементации (925°). В разрезе указаны только две камеры.

Изделия продвигаются в четных и нечетных камерах во взаимно противоположных направлениях.

С двух сторон печи находятся рольганги для обратного направления пустых цементировочных коробок. Коробки подаются в печь

¹ Эта установка является одной из самых больших цементировочных печей в Европе.

при помощи толкателей. Длина каждой камеры 13,5 м, ширина 600 мм, высота 300 мм; установленная мощность каждой камеры равна 80 квт и может регулироваться отдельно. Длина собственно нагревательной зоны составляет только 5,5 м.

Так как цементировочные коробки передвигаются при помощи толкателей, они должны быть достаточно прочными и тяжелыми. Их вес составляет приблизительно 2,5 полезного веса изделий. К этому необходимо добавить вес цементировочного порошка, так что отношение веса брутто к весу нетто равно 4 : 1. При суточной производительности брутто в 8 т на камеру, т. е. 32 т в сутки на всю установку, расход энергии составляет около 220 квтч нетто или около 880 квтч брутто. При оценке этих цифр следует принять во внимание, что изделие должно очень медленно охлаждаться. Время прохождения через зоны подогрева, нагрева и охлаждения составляет 12 час.

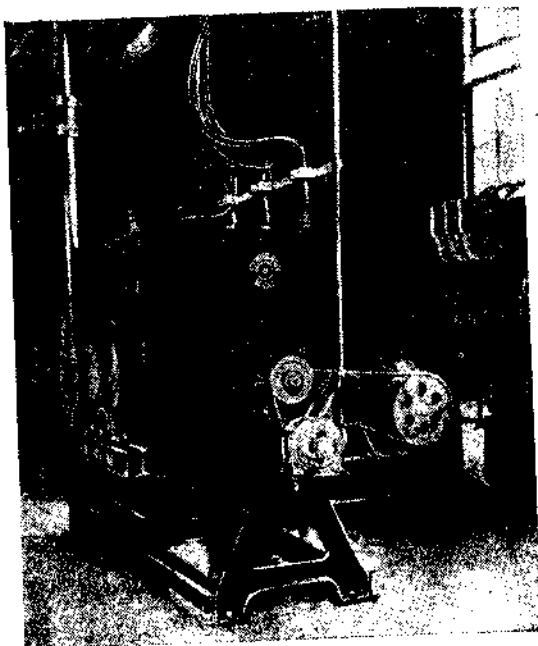


Рис. 205. Барабанная печь для цементации.

γ) *Барабанные печи для цементации.* Как известно, при цементации изделия, укладываемые в коробки, окружаются веществами, способными отдавать свой углерод, и затем в этих коробках вводится в печь для цементации. Продолжительность цементации зависит от потребной глубины цементированного слоя. Начало цементации считается с момента, когда изделие достигло необходимой для цементации температуры, что продолжается достаточно долго, так как цементующий состав является плохим проводником тепла; вследствие этого, экономичность такого процесса весьма проблематична. Были произведены попытки повысить экономичность цементации путем отказа от коробок и помещения изделий вместе с цементующим составом непосредственно в нагреваемый барабан.

На рис. 205 изображена такая барабанная печь для цементации. Диаметр барабана равен 460 мм, длина его составляет 920 мм, а установленная мощность 70 квт. Загрузка и разгрузка печи производится через завинчиваемую крышку. На рисунке спереди мотор, опрокидывающий печь, справа—мотор для вращения барабана печи. Обращает на себя внимание способ подвода тока через свод печи: просто и прочно.

Расход тока, который, вполне естественно, зависит от глубины цементации и веса загруженных изделий, весьма сильно колеблется, составляя в среднем около 710 квтч нетто (при 6-часовой операции). Эту продолжительность цементации в барабанных печах нельзя непосредственно сравнивать с продолжительностью цементации в обычных камерных печах с коробками, так как прогревание барабанной печи

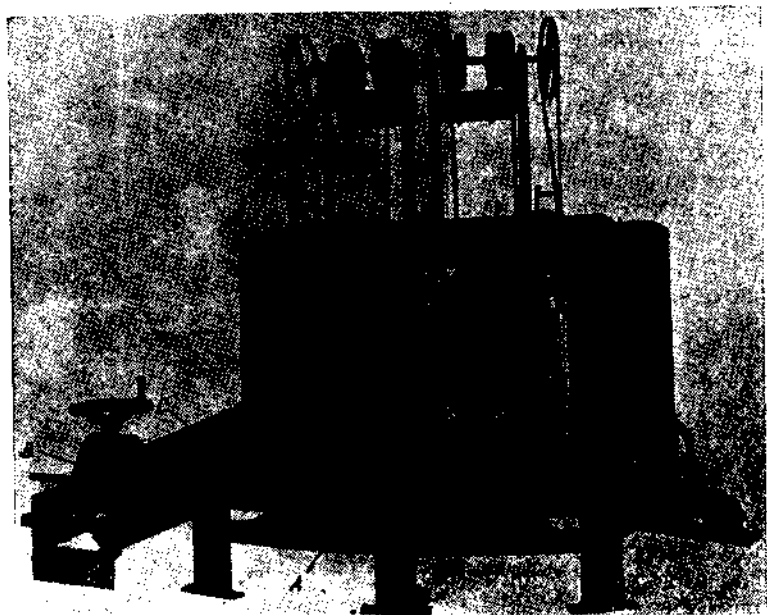


Рис. 206. Печь с вращающимся подом.

происходит значительно быстрее, чем камерной¹. Расход тока не очень значительно отличается от такового в камерной печи, однако составляет достаточно большую цифру. Тем не менее можно рекомендовать пользоваться барабанными печами для цементации, так как отпадает вся работа по упаковке изделий в коробки, а также весьма значительный расход на их изготовление. Точно также, вследствие небольшой продолжительности цементации, до 75% цементирующего порошка можно употреблять вновь.

б) *Печь с вращающимся подом для подогревания нежелезных металлов* (рис. 206). Площадь пода такой печи равна 5,34 м². Загрузка и разгрузка через две дверцы производится при помощи передвигающейся по окружности печи консоли А, по которой движется

¹ Продолжительность цементации в барабанной печи также меньше, потому что в барабанной печи изделие непрерывно приходит в соприкосновение с новыми массами активного угля благодаря вращению барабана.

загрузочная тележка В, хватающая болванку при помощи двух рычагов С. Такие печи получили особенно большое распространение в американской автомобильной промышленности; они, однако, весьма пригодны и для прокатных заводов (температура 500—950°).

в) *Печи с опускающимся подом или элеваторные печи* (рис. 207). Печи эти пригодны для отжига листовой стали и железа, для отжига бунтов проволоки и ленты, стержней, а также для термической обработки некоторых тяжелых деталей. Для отжига листового материала печь эта применялась неоднократно. Тепловые потери точно так же, как и в съёмных печах, меньше, чем в печах с боковыми дверцами. Песочное уплотнение или водяной затвор делают проникновение воздуха внутрь печи совершенно невозможным. Изображенная на рис. 214 печь имеет нагревательные элементы по стенкам и на поду. Стенки и под соединяются уплотняющим затвором. Под поднимается элеваторическим или гидравлическим путем, причем в поднятом положении для разгрузки подъемного приспособления под удерживается клиньями. После опускания под может быть отодвинут в сторону, что и осуществлено в данной конструкции, так что вместо него может быть вставлен другой заранее загруженный под, или же загрузка и разгрузка пода производится при помощи одного из загрузочных приспособлений, описанных на стр. 199.

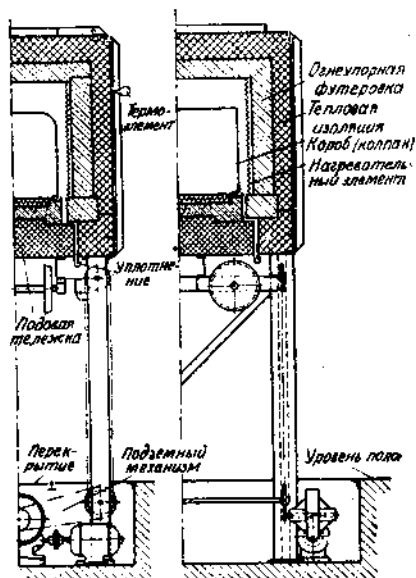


Рис. 207. Печь с опускающимся подом (элеваторная).

В этом случае печь работает исключительно экономично, так как отпадают потери на новый нагрев пода, потери холостого хода малы, а загрузка и разгрузка печи может происходить очень быстро. Такая печь с размером пода в 2,1 × 0,6 м (Пашкис, Ж 73) имеет только 12,2 кВт потерь холостого хода и отжигает при установленной мощности 130 кВт от 3,0 до 3,5 т листового материала за 8 ч.

г) *Камерная печь с боковой дверцей для отжига труб* (рис. 208). Эта печь применяется для отжига труб, бунтов проволоки и ленты, а также полосового материала (Тама, Ж 63). Загрузка производится при помощи крана, имеющего ряд рычагов, входящих в соответственные вырезы в поде печи. Поперек этих рычагов лежат изделия. Рычаги опускаются и укладывают трубы на столбики (мосты), находящиеся в печи. Дверца опускающаяся. Если изделия не слишком

тяжелы, то, вследствие достаточной поддержки самими столбиками, обычно применяемые для предупреждения деформации изделий специальные подкладки становятся излишними. При латунных трубах, отжигаемых в течение 1 ч при температуре в 600° , расход энергии составляет 127 квтч. Длина печи 7 м, ширина 2,2 м, установленная мощность 240 квт; на печи можно достигнуть производительности в 1 т в час. Печь снабжена подвесным сводом, описанным выше (стр. 184) и изображенным также на рис. 209. Нагревательные элементы висят на изоляторах, лежащих в верхних жолобах сводового кирпича. Кирпичи свода подвешены к железным двутавровым балкам, концы которых видны на рисунке. В поду видны прорезы для загрузочной машины.

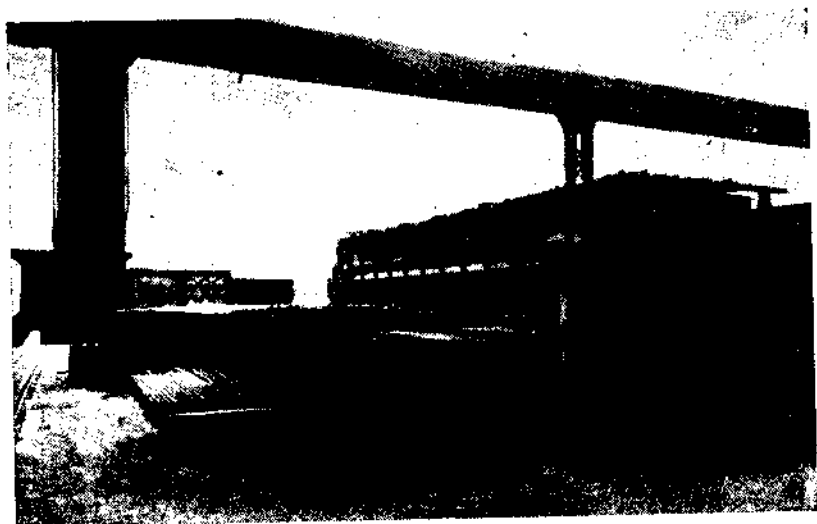


Рис. 208. Печь для отжига труб.

г) *Камерная печь с загрузочной машиной* (рис. 210). Печь предназначена для подогревания латунных болванок перед прокаткой. Болванки весом по 300 кг вводятся в печь при помощи загрузочной машины по 4 и более штук; для этой цели открываются видимые на рисунке нижние маленькие дверцы для машины. Несущие балки загрузочной машины въезжают в пазы в поду, после чего опускаются, и изделие остается на неподвижных столбиках в печи. Для достижения плотности затвора дверца прижимается нажимными винтами. Установленная мощность печи составляет 160 квт; нагревательные элементы равномерно распределены по стенкам, потолку и поду печи; площадь пода составляет $2 \times 1,5 \text{ м}^2$, полезная высота камеры 0,6 м (Тамеле, Ж 74). Загрузочное приспособление подобно описанному на стр. 200 и изображенному на рис. 146.

в) *Эмальировочные печи с загрузочной машиной.* Описанная выше конструкция печи и загрузочной машины является, можно сказать, классической для камерных эмальировочных печей. Изображенная на рис. 211 печь в принципе очень схожа с только что описанной. Изделия должны приходить в соприкосновение с возможно меньшим количеством точек пода печи и потому устанавливаются на специальных подставках с применением соответствующих опор и подпорок и вместо с последними вводятся в печь. Изделия находятся в печи очень непродолжительное время (от 1,5 до 5 мин.), поэтому вдвигание и выдвигание подставок должно быть возможно упрощено. Для облегчения обслуживания во время передвижения подставок вилка удерживается при помощи обратных роликов и только в конечном положении опускается вместе с подставками при помощи перекидывания рычага А.

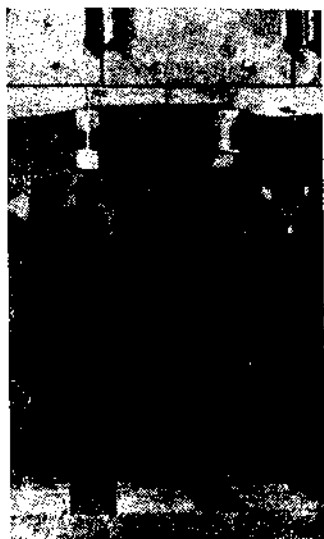


Рис. 209. Внутренний вид печи для отжига труб.

В Германии электрические эмальировочные печи не могли получить сколько-нибудь значительного применения; в Америке же они очень распространены, что объясняется тем, что в Соединенных Штатах употребляются более легкоплавкие сорта эмали. Более благоприятное в Соединенных Штатах соотношение заработной платы

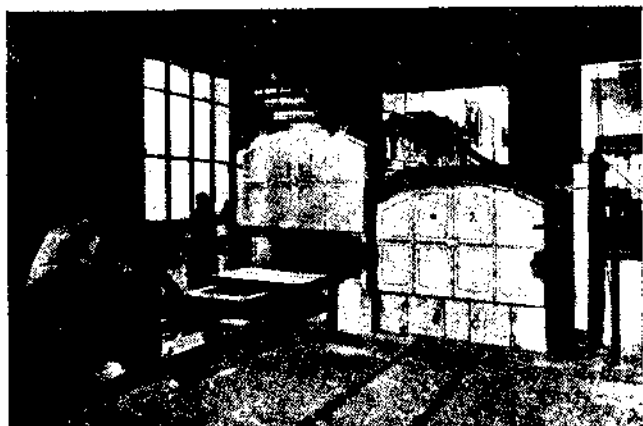


Рис. 210. Двухкамерная печь для отжига латуни.

и стоимости энергии, по всей видимости, также отразилось на развитии этих печей.

1) Эмальировочные конвейерные печи (рис. 212). На рисунке изображена эмальировочная печь для поточного производства, напри-

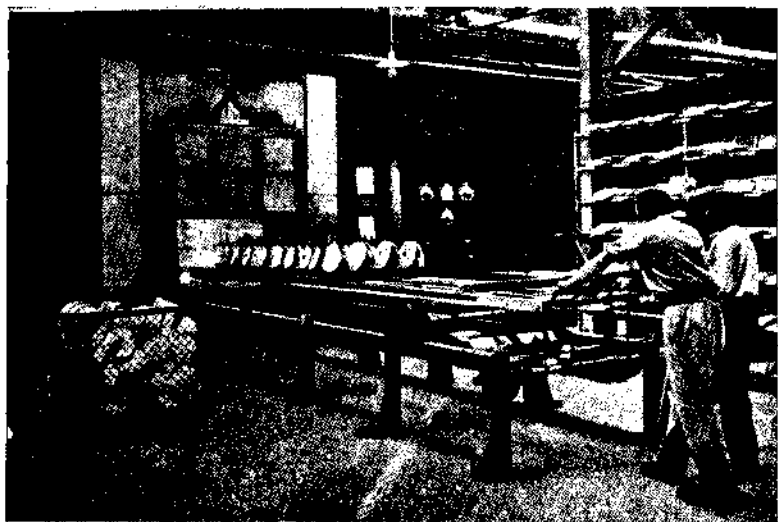


Рис. 211. Эмальировочная печь.

мер, для эмальировки кожухов ледоделательных машин. Печь сделана в виде конвейерной с проходящей над ней цепью, к которой подвешены стеллажи с укрепленными на них эмальировочными штифтами,

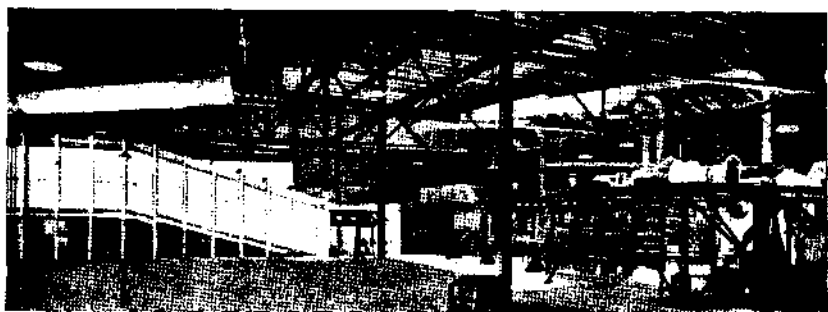


Рис. 212. Туннельная эмальировочная печь.

на которых находятся изделия. Изделия движутся в печи по U-образной траектории, причем зона нагревания поднята настолько высоко, что низ ее выше, чем отверстие выхода (рис. 213). Таким образом,

предупреждается конвекция, а лучеиспускание в зоне нагрева полностью используется. Входящий и выходящий потоки изделий в смысле обмена тепла расположены рядом. Средняя линия нагревающей зоны несколько более 10 м длиной. Скорость цепи колеблется между 0,9 и 5,4 м/мин. При нормальной температуре около 920° и максимальной рабочей температуре 950° производительность составляет от 15 до 17 т в 23 ч. Средний вес штуки составляет 0,5 кг. Второй и третий обжижки производятся при более низких температурах ($815-850^{\circ}$). В среднем изделие находится в нагревательной зоне около 3 мин. Установленная мощность составляет 450 кВт (Ж 75).

у) Печь с вращающимися дисками (рис. 214). Для равномерного прогрева изделий и в камерных печах, особенно же для того, чтобы быстро и надежно прогреть изделия, лежащие в плоскости симметрии печи, построены печи, в которых изделие во время прогрева медленно вращается вокруг собственной оси. Этот принцип, вполне естественно, применим только для изделий, форма которых более или менее симметрична по отношению к оси вращения. Привод вращающихся дисков расположен вне горючей зоны и, конечно, требует некоторого ухода; точно также следует позаботиться о правильном его охлаждении. В изображенной на рисунке печи устроены четыре вращающихся диска, каждый диаметром в 1 м. Такая печь загружается машинами, подобными применяемым при печи, изображенной на рис. 208 (Пашкис, Ж 73).

л) Печь с выдвижным подом для нагрева и отжига стальных слитков (рис. 215). Нагрев тяжелых изделий составляет специальную задачу в том отношении, что передвижение тяжелых изделий при высоких температурах связано со значительными трудностями. Под, загружаемые и транспортные приспособления должны удовлетворять требованиям высокой прочности. Размер пода печи, изображенной на рис. 215, равен 14 м^2 ; при загрузке в 20 т печь эта расходует 250 кВт при температуре нагрева до 800° и медленном охлаждении изделий в печи. Так как изделие должно медленно охлаждаться в изображенной на рисунке печи, то теплота, поглощенная кладкой печи (теплосодержание) так или иначе теряется; поэтому применение выдвижного пода в виде тележки не представляет собою особого недостатка. Потеря аккумулированной печью теплоты могла бы быть устранена применением конвейерной печи с зонами различной температуры, которая, однако, потребовала бы значительно больше места. Так как описываемая печь почти все время может работать на ночном и праздничном токе, то, несмотря на более высокий расход такового по сравнению с конвейерными печами, ток иногда может обойтись дешевле.

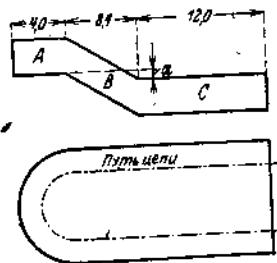


Рис. 213. Схема туннельной эмалировочной печи (рис. 212). А — зона нагрева; В — наклонный подъем (наклон выбран таким образом, что расстояние a больше нуля); С — подогревательное и охлаждающее пространство.

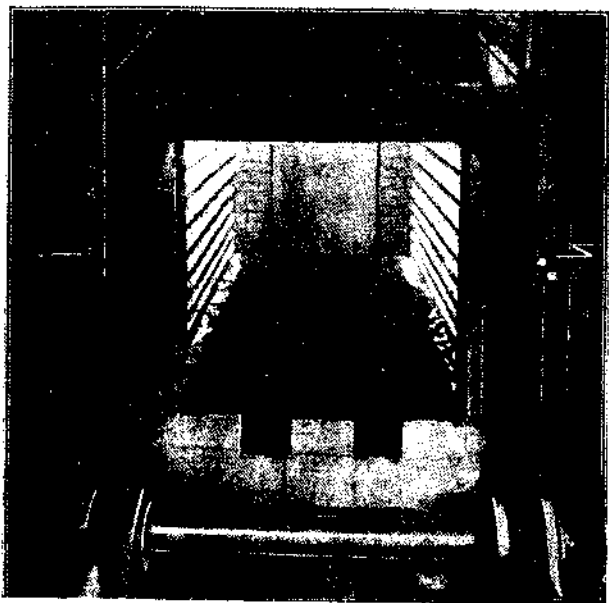


Рис. 214. Печь с вращающимися дисками.

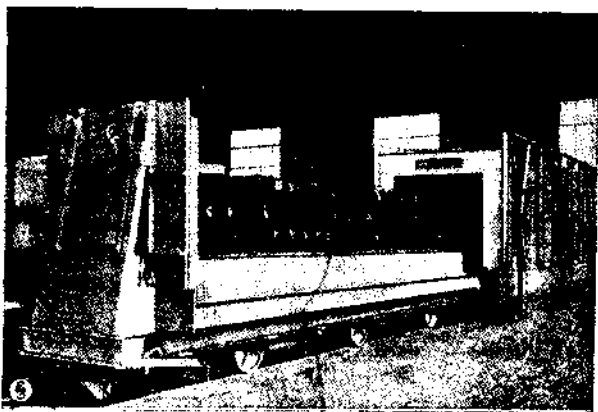


Рис. 215. Печь с выдвижным подом для отжига стальных слитков.

Нагревательные элементы расположены со всех сторон, даже в подвижном полу. Тут нагревательные элементы закрыты жароупорными металлическими пластинами и соединяются с гибкими кабелями. Дверца сделана стоячей, установлена на подовой тележке и отодвигается параллельно своей плоскости. Установленная мощность такой печи составляет 350 квт (Ж 76).

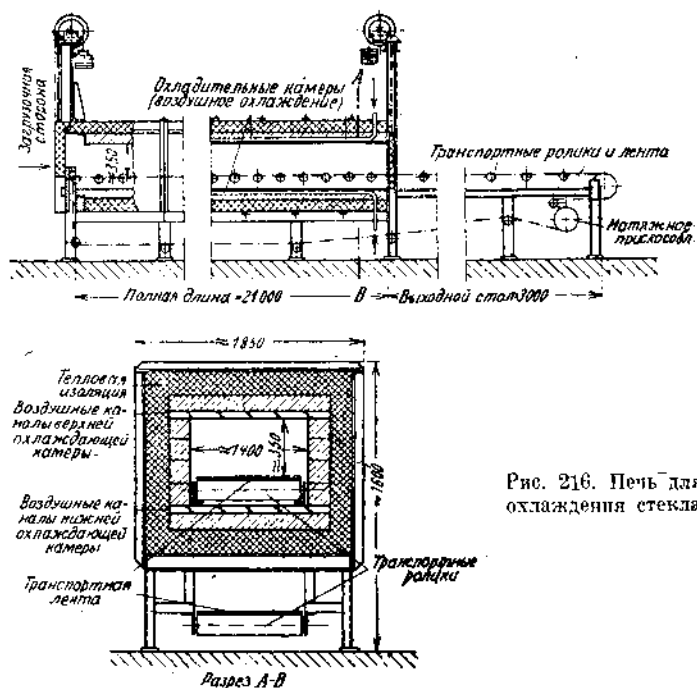


Рис. 216. Печь для охлаждения стекла.

р) Печь для закалки стекла (рис. 216). Как известно, стеклу после нагревания должно медленно остывать, следуя вполне определенной температурной кривой (Тамеле, Ж 77). Такого падения температуры можно достигнуть в неподвижной печи путем соответственного изменения подводимой мощности. Можно сделать и так, как в вышеописанной печи, а именно: поддерживать температуру в каждом месте печи постоянной, однако изменять ее в каждом сечении. Изделие — стекло, выходящее из-под пресса или из стеклотрубки, проходит 24-метровую печь при помощи цепи в течение приблизительно 3 ч. Обогревается только первая часть печи — от дверцы на 6 м в длину. В остальной части печи изделие охлаждается воздухом, притекающим по каналам в кладке. Отопление в первой части печи служит для того, чтобы замедлить охлаждение стекла: оно имеет свою цель — покрыть разницу между потерями холостого хода и потребностями цепи в тепле, с одной стороны, и введенной в печь теплотой вместе со стеклом, — с другой.

Здесь на первый взгляд получается как бы противоречие, когда с увеличением производительности расход тока понижается не

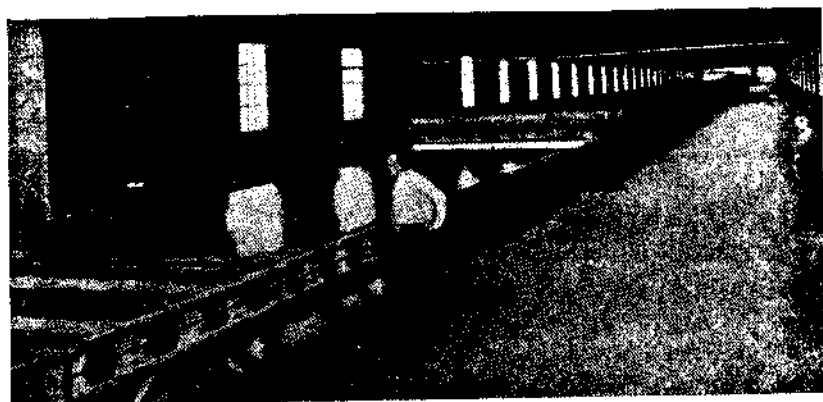


Рис. 217. Печь для охлаждения стекла.

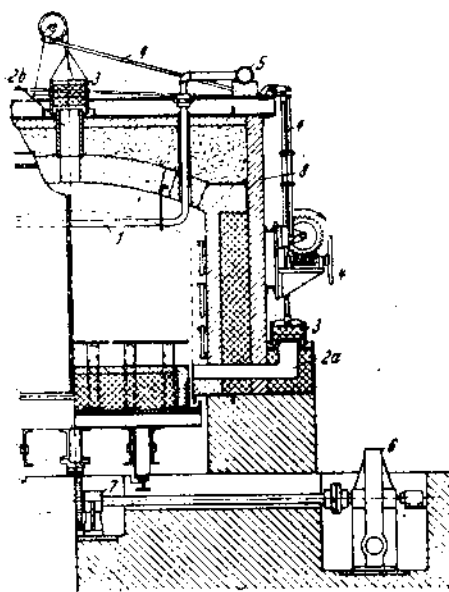


Рис. 218. Печь с искусственным охлаждением.

только удельно (т. е. отнесенный к единице продукции), но также и абсолютно, так как с увеличением производительности увеличивается также и количество тепла, вносимого в печь стеклом.

Отапливаемая зона разделена на два отсека, управляемых одним регулятором температуры. Общая установленная мощность составляет 60 квт. В случае непрерывной работы и при производительности в 10 т на цепь, расход энергии составляет около 70 квтч на тонну стекла.

На рис. 217 изображена американская печь для охлаждения листового стекла. Эта печь общей длиной 220 м является самой большой в мире. Ширина ее свыше 4 м. При установленной мощности в 1600 квт производительность ее составляет 12 т стекла в час.

у) Печи с искусственным охлаждением. Искусственное охлаждение печи рекомендуется в тех случаях, когда нужно иметь возможность быстро понизить температуру. На рис. 218 изображена такая печь

Обозначения к рисунку: 1 — охлаждающие трубы, 2a — труба, подводящая воздух; 2b — труба, отводящая воздух; 3 — крышка, снабженная тепловой изоляцией; 4 — маховичек с рычажным механизмом; 5 — выпуск воздуха (косвенное охлаждение); 6 — мотор для передвижения тележки; 7 — передача к нему; 8 — кладка из красного кирпича (внешняя стенка печи). Существует два способа охлаждения: косвенное охлаждение — при помощи охлаждающих труб, и прямое охлаждение путем продувания воздуха. Трубы для выпуска воздуха могут закрываться теплоизолированными крышками, управляемыми посредством маховичка общим подъемным приспособлением. Под и стенки печи состоят из полуготеупорного материала, благодаря чему теплосодержание печи сильно уменьшается. Под выдвижной, приводится в движение мотором и передачей, расположенными вне печи (Ж 78).

2. ПЕЧИ С ИСКУССТВЕННОЙ АТМОСФЕРОЙ

а) Печи для светлого отжига

Светлый или блестящий отжиг, т. е. отжиг без получения окалины, при котором даже имеющаяся уже окалина восстанавливается, является одной из первых областей, где была использована электрическая энергия для нагрева промышленных печей. Разработано много способов применительно к различным металлам и к разным требованиям такого отжига. Так как вследствие большого разнообразия, исчерпывающее описание методов и печей, применяемых в этой области, не представляется возможным, то ниже дается только краткий обзор наиболее важных способов.

а) *Светлый отжиг по Стассине* (рис. 219). Печи этого типа строятся для выполнения светлого отжига по способу, разработанному Роном (Ж 79).¹ По этому способу герметически закрытая печь после загрузки сначала промывается углекислотой, после чего наполняется водородом. Обращает на себя внимание подвод водорода через крышку печи и подогрев штуцера для выходящего водорода внизу, а также малая толщина шамотной стенки и изоляции. По окончанию отжига печь с загрузкой охлаждается настолько, что не приходится опасаться покрытия изделий окалиной. Так как печь нагревается и охлаждается наполненной нейтральной атмосферой, то могут получить применение нагревающие элементы из ленточного железа. Печь конструкции Рона, вместимостью 4 т, с расходом энергии от 240 до 260 квтч, была исследована Стассине (Ж 14) и на основании результатов эксплуатации коренным образом переконструирована. Толщина шамота была значительно уменьшена², а емкость увеличена почти на 30%. Вследствие уменьшения теплосодержания печи, значительно понизился и расход тока, а самое главное — производительность печи возросла более

¹ Герм. пат. 389 249.

² Герм. пат. 40 909.

чем в 10 раз (60—70 т в месяц против 5—5,5 т в месяц до переделки). Затем обнаружилась возможность искусственно повысить скорость охлаждения, не опасаясь неблагоприятных последствий. Для этой цели внутри печи, в которой до настоящего времени отжигались почти исключительно бунты ленточной стали, было введено охлаждающее приспособление. Расход газа может быть значительно ограничен, если выходной патрубок газа изолирован или же поддерживается при помощи дополнительного отопления¹ настолько теплым, что

его температура все время выше точки кипения той составной части атмосферы печи, которая имеет наивысшую точку кипения. В состав печной атмосферы входит не только чистый водород, но также впесенные изделиями пары масла и воды. Подробный обзор работы вторично переделанной печи дан Стассине (Ж 17), который указывает, что была установлена батарея из одиннадцати печей.

На рис. 220 показана обычная в настоящее время форма этой печи. Устройство под крышками печей это выдвигаемое во время нагрева печи охлаждающее приспособление. Сзади печи распределительное устройство, заключенное в общий кожух. Спереди слева при каждой печи водяное охлаждение уплотнения крышки. Подходящим материалом для сопротивления оказалось 29-процентное никелевое железо. Так как печи могут нагреваться и охлаждаться попеременно, то электрическая часть необходима только для некоторой части этих печей. При установленной мощности каждой печи в 110 квт, для всех печей, например, может быть установлен только один трансформатор мощностью в 400 квт. Расход тока колеблется в пределах

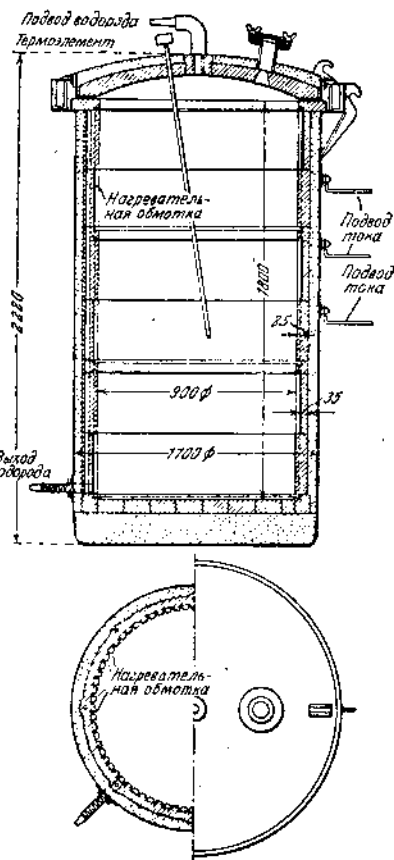


Рис. 219. Печь для светлого отжига (Стассине, Ж 14).

от 186 до 224 квтч изделия при среднем весе загрузки 2440 кг и месячной продукции 52 т на печь.

На рис. 221 изображена схема газопроводов. Водород получается электролитическим путем (выделяющийся одновременно кислород

¹ Брит. пат. 262 803.



Рис. 220. Печь для светлого отжига.

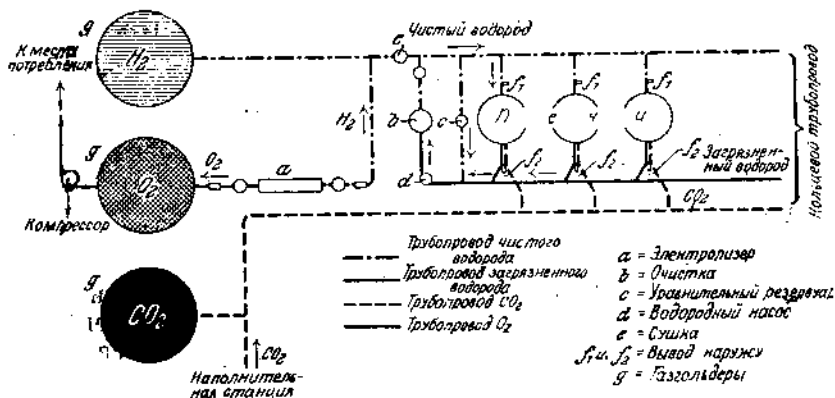


Рис. 221. Схема газопровода печи для светлого отжига (Стасинне, ЖК 17).

используется для автогенной сварки); расход водорода составляет 0,5—1 м³ продукции.

Особенное внимание должно быть обращено на устранение посторонних примесей из защитного газа. Для этой цели, между прочим, должна быть удалена при пуске в эксплуатацию сырость, введенная в стенки печей при постройке ¹.

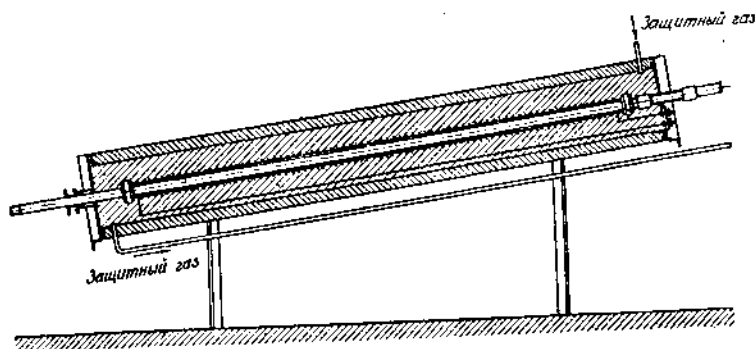


Рис. 222. Печь для светлого отжига труб (Рон. Ж 80).

Если изделие чистое, так что защитный газ после прохождения через печь содержит в себе только воду, то его можно пропускать через конденсационный аппарат, где выпадают водяные пары ². Можно также «вымывать» загрязняющие примеси, пропуская через сеть усиленный поток защитного газа; для того чтобы экономить газ, это следует производить только тогда, когда печь разогрета; в периоды же разогрева и охлаждения печи работают на особой подаче газа ³. В рабочее пространство печи кроме изделий можно поместить какое-нибудь вещество, связывающее загрязняющие газ примеси (водяной пар и т. д.); в этом случае можно работать с очень умеренным расходом водорода ⁴.

Особенно существенным недостатком описанного способа светлого отжига является то обстоятельство, что для получения безукоризненной продукции необходимо охлаждать изделия в печи. Вполне понятно, что были испытаны самые разнообразные способы, чтобы сократить срок охлаждения ⁵.

3) Печи для светлого отжига герметически незакрываемые. Как постройка, так и эксплуатация печей описанного выше типа для светлого отжига представляют значительные затруднения; прежде всего нужно отметить, что процесс необходимо вести непрерывно. Поэтому были сделаны попытки сконструировать для светлого от-

¹ Брит. пат. 262 766.

² Амер. пат. 1 691 259.

³ Герм. пат. 487 729.

Герм. пат. 476 513.

⁵ Швейц. пат. 128 083; герм. пат. 433 279 и 440 938; Австр. пат. 113 665 и 116 048;

Брит. пат. 262 433. j.

жиги герметически незакрываемые печи. Если, например, примененный защитный газ легче воздуха, то нижняя часть такой печи не требует герметически плотного закрытия, так как более легкий газ (водород) держится вверху печи. Не приходится опасаться потерь газа и в том случае, если работают с углекислотой (тяжелее воздуха) и оставляют печь открытой в верхней части. ¹ Этот принцип уже очень давно известен. Он был применен также и для светлого отжига длинных прутков (рис. 222) (Рон, Ж 80). Трубообразный металлический муфель обогревается сопротивлениями снаружи и покоится в газоплотном изоляционном кожухе; проход сквозь внешний кожух печи выполнен при помощи сальника. Струя предохранительного газа проходит сперва через муфель и затем омывает его поверхность снаружи (для защиты нагревательных элементов).

Вполне понятно, что в таких печах расход газа несколько выше, чем в герметически закрытых, однако они имеют большие преимущества, представляя удобства для ведения непрерывной работы; теплосодержание печи не теряется при каждой новой загрузке, и печь можно должным образом изолировать. Точно также для того, чтобы предохранить нагревающие сопротивления от окисления, поток газа можно направлять сначала через камеру печи (состоящую из газоплотного металлического ящика), а затем проводить через то пространство, в котором находятся нагревательные сопротивления.

7) *Печи для светлого отжига с предохранительным колпаком.* Наличие кожуха следует рассматривать как дальнейшее развитие светлого отжига в коробках: изделия устанавливаются на под, который затем накрывается колпаком, имеющим соответственное уплотнение. Колпак из жароупорной стали может быть сделан значительно тоньше, чем коробки: поэтому прогревание происходит много быстрее.

Печь с выдвижным подом и с колпаком изображена на рис. 223. Основное внимание следует обратить на затвор, который расположен в горячей зоне.

Обращают на себя внимание отдельные уплотнения колпака со стенкой и с тележкой. Под тележкой два баллона с защитным газом. Для того, чтобы сделать более безопасными неплотности в соедине-

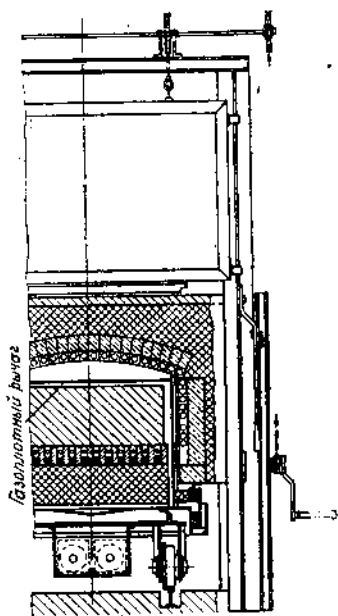


Рис. 223. Печь для отжига с выдвижным подом и предохранительным колпаком.

¹ Амер. пат. 868 185; практически этот принцип был применен в герм. пат. 464 330, 480 038 и 480 691

ний колпака с подом, пространство между кожухом и стенкой печи наполняется газом, не вступающим в реакцию с защитным газом

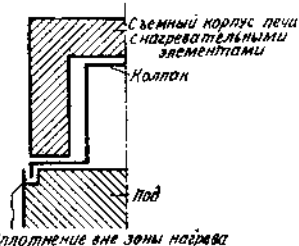


Рис. 224. Уплотнение по Тирре (печь для светлого отжига).

внутри кожуха, например, при отжиге в присутствии водорода — азотом. Таким образом одновременно увеличивается срок службы сопротивлений. Правда, внешний кожух печи в этом случае должен быть сделан также газоплотным. Затвор можно делать или песочным или же, если он выведен из пределов горячей зоны — водяным (рис. 224). В последнем случае весьма важно предусмотреть возможность выравнивания уровней жидкости снаружи и внутри уплотняющего жолоба.

б) Печи для темного отжига (рис. 225). Стассини (Ж 17) эксплуатировал печь с предохранительным кожухом без защитного газа

Обжигательная печь

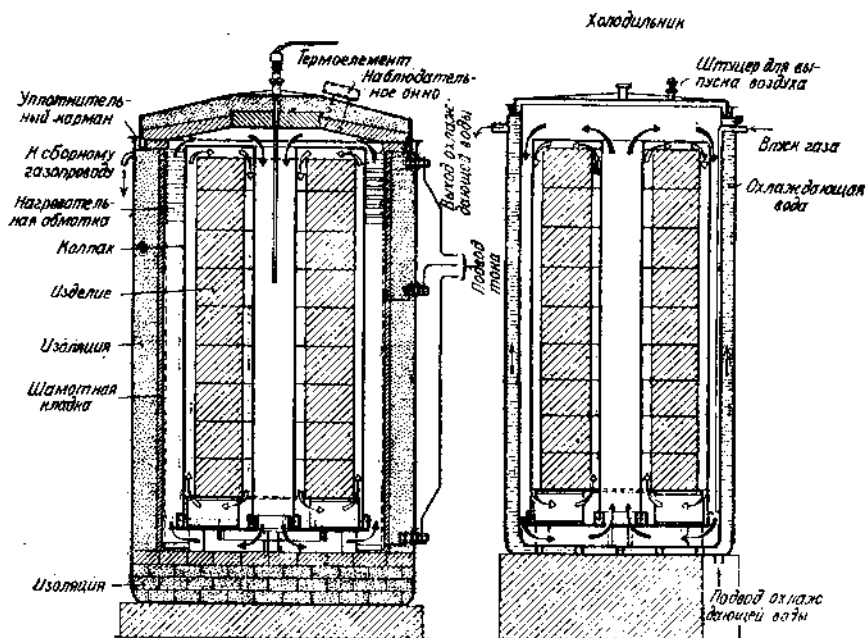


Рис. 225. Печь для темного отжига (Стассини, Ж 17).

и нашел, что устранения обмена кислорода во время охлаждения уже достаточно для получения блестящей поверхности, если требования к блеску изделий не слишком высоки. По сравнению с печами, в которых изделие охлаждается, в нейтральном газе, получается боль-

ное сокращение расхода тока (около 140 — 160 квтч/т при 180—220 квтч/т в случае отжига в нейтральной атмосфере.). По окончании нагревания (например, при нагревании ленточной стали в цилиндрических кожухах, сделанных таким образом, что через центральное отверстие может происходить циркуляция воздуха), кожух поступает в охлаждающую яму. Печи такого типа должны обслуживаться так же осторожно, как и печи с защитным газом, потому что образующиеся в них пары масла опасны в отношении взрыва. Обращает на себя внимание возможность циркуляции газа вокруг изделий, очень тонкий стальной намотной кладки, а также измерение температуры внутри загрузки. Присоединение печи к газовому коллектору дает возможность применять защитный газ в пространстве между защитным коллектором и нагревающими сопротивлениями для защиты последних.

е) *Печь Грюневальд-Броун-Бовери*. Так как все опытные данные свидетельствуют о том, что окисление изделий происходит почти исключительно во время охлаждения, то изделия помещаются в герметическом кожухе — муфеле, имеющем односторонне действующий вентиль. Во время нагревания воздух в муфеле расширяется и может выходить через этот вентиль. Часть заключающегося в муфеле кислорода затрачивается на сжигание остатков масла на изделиях, так что к началу охлаждения, когда вентиль автоматически запирается вследствие давления наружного воздуха, муфель практически не заключает в себе кислорода. Изделия подвешиваются в муфеле («горшок Грюневальда»), так как диск, на котором укладываются изделия, подвешивается к крышке при помощи троса. Точно также весь муфель не стоит в печи, а висит в ней на запечиках. Благодаря этому кожух муфеля может быть сделан очень тонким, что уменьшает как время прогрева, так и мертвый вес. Для того, чтобы использовать заключающуюся в муфеле и изделиях теплоту, эти муфеля иногда помещаются в охлаждающие ямы, где они медленно остывают в потоке воздуха, который подогревает подготовленные холодные муфели. На рис. 226 изображена такая установка со значительным числом мест для охлаждения. Расход тока при процессе Грюневальда составляет, например, для печи с полезным диаметром 700 мм и полезной высотой 1700 мм и суточной производительностью в 8500 кг без подогрева и 10 000 кг с подогревом — 180 квтч без подогрева, а с подогревом только около 150 квтч. Цифры относятся к отжигу ленточной стали при температуре около 700°C¹.

г) *Светлый отжиг в атмосфере водяных паров*. На рис. 227 изображена схема такой печи, которая впервые была сконструирована в Америке Кенворти. Этот метод применим для меди и латуни, которые не окисляются в водяных парах. Изделия устанавливаются на стеллаже, погружаемом в воду. После этого корпус печи надвигается на ванну, стеллаж поднимается и попадает таким образом внутрь печи. Сверху подводится водяной пар, выгоняющий воздух из рабо-

¹ Герм. пат. 454 609 и 477 178 (Ж 81).



Рис. 226. Установка печей Грюневальда с охлаждающими местами. Печи видны на заднем плане. Впереди муфеты.

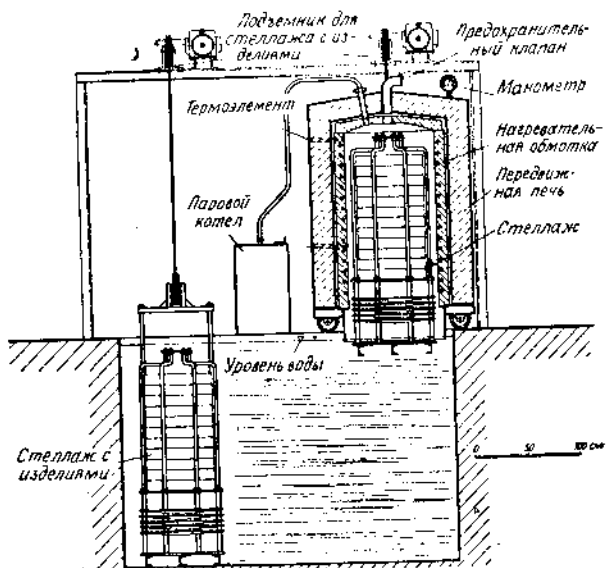


Рис. 227. Колокольная печь для светлого отжига.

чего пространства печи; по окончании отжига изделия можно без всякого для них вреда опускать в воду, печь перемещается на другую сторону ванны, и вторая заготовленная тем временем партия материала может быть поднята в печь. При загрузке около 800 кг медных изделий и при температуре каления в 500° расходуется около 90 кВтч/т (Тамеле, Ж 74); при загрузке же около 2000 кг (лента) расход падает даже до 70 кВтч/т.

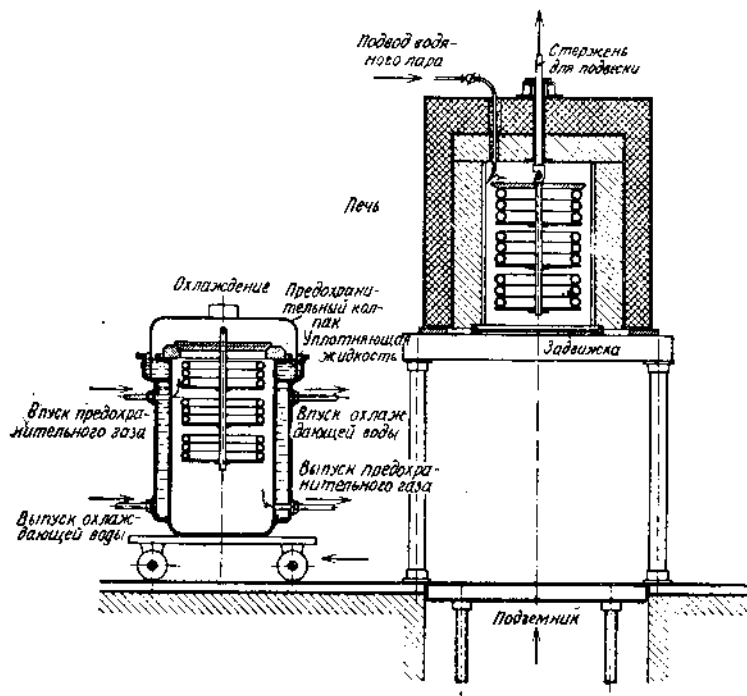


Рис. 228. Печь для светлого отжига нежелезных металлов. Нагрев производится в водяных парах; охлаждение — в защитном газе.

η) *Способ светлого отжига по Геддернгейму*¹. При отжиге очень тонкой медной проволоки присутствие водяного пара в период охлаждения может быть вредным. Кроме того возможна его конденсация. Поэтому, в отличие от только что описанного способа, в период охлаждения в печь должен поступать защитный газ, а пар вводится в печь только во время самого процесса отжига (Натувус, К 27).

На рис. 228 изображена такая печь, не расположенная над ванной, в противоположность печи, изображенной на рис. 234.

Этот принцип, предусматривающий вместо светлого отжига только такие условия охлаждения, которые обеспечивают достаточно блестящую поверхность, получил самое различное применение (Тамеле, Ж 74).

¹ Герм. пат. 499 936, 512 173, 524 753 и 533 650.

9) *Элеваторные печи для светлого отжига* (с опускающимся подом) (рис. 207). Печи такого типа очень распространены в Америке (Ж 82), но без изображенного на рисунке предохранительного кожуха. По окончании отжига изделия быстро транспортируются в воздухе и после этого снова охлаждаются в нейтральной атмосфере. В Америке такие печи строились емкостью до 16 т. Расход тока будто бы составляет около 250 квтч/т стали. В качестве защитного газа применяется водород; его высокая пена и опасности, связанные с его применением, послужили причиной поисков газа, который мог бы его заменить. Были попытки применить азот, однако последний должен быть предварительно очищен от остатков кислорода. Были предложения пользоваться смесью водорода и азота, которую можно получить путем расщепления аммиака. Затем были сделаны попытки применить пары спирта либо в чистом виде, либо в смеси с водородом (электропеч, Ж 82).

б) Печи для азотирования

Под названием азотирования фирма Крупп разработала способ поверхностной закалки, применяемый только к специальным сортам

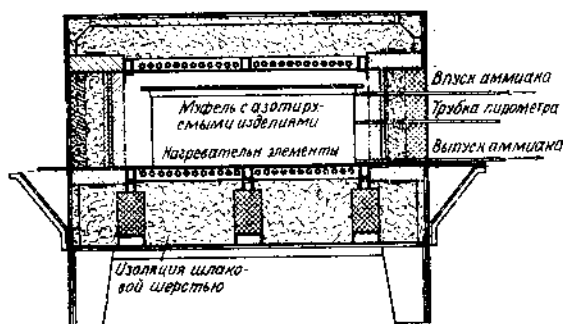


Рис. 229. Печь для азотирования.

стали и основанный на поглощении азота поверхностью стали (Фри, Ж 84 и Врюль Ж 85). С целью проведения этого процесса изделие помещается в муфель для азотирования (рис. 229), устанавливаемый в электропечь, и через него медленно пропускается ток аммиака. Температура доводится до уровня около 500° , и после выдержки (до 100 час) происходит медленное охлаждение.

В сравнении с обыкновенной цементацией фирма Крупп приводит следующие преимущества этого процесса: большая твердость азотированных изделий, меньший процент брака (так как отпадает закалка, а благодаря этому и опасность коробления), твердость азотированного слоя до 500° (между тем как слой, цементированный углеродом, сохраняет твердость только до 150°). Печь, изображенная на рис. 229 с рабочей камерой $1750 \times 1250 \times 500$ мм и вмещающая муфель размером максимально $1500 \times 1100 \times 350$ мм имеет потери

холостого хода 7,2 квт. Продолжительность азотирования зависит от требуемой толщины азотированного слоя, например, при глубине в 0,25 мм составляет около 10 час., при глубине 0,5 мм — около 42 час., а при глубине 0,75 мм — около 100 ч.

е) Печи для пайки медью

Для пайки железа медью подлежащие спайке места должны быть абсолютно чистыми. Если оба подлежащие спайке куска железа положить один на другой, а над стыком поместить полоску меди, то при



Рис. 230. Печь для пайки медью.

нагревании в восстановительной атмосфере железо освобождается от окалины, а медь при плавлении заполнит место стыка, благодаря явлениям капиллярности. Таким образом получаются исключительно аккуратные и прочные соединения. Однако при этом способе охлаждение изделия должно также происходить в восстановительной атмосфере.

Для средней и большой производительности построены печи непрерывного действия, образец которой изображен на рис. 230 (Ж 82).

Поставленная на кленовые опоры печь длиною около 18 м. отапливается примерно только на $\frac{1}{3}$ своей длины, остальные $\frac{2}{3}$ служат для охлаждения. Изделия, в описываемом случае — корпуса ледоделательных машин — помещаются в коробки и поднимаются в печь при помощи подъемника, расположенного у передней ее стороны. При помощи толкателя, работающего в направлении оси печи, коробки вдавливаются в печь, и изделие передвигается в ней, как это было описано выше. На выходном конце печи коробки выдвигаются на второй подъ-

емник, который опускает их на уровень пола мастерской. Во время загрузки и выгрузки коробок печь открывается на короткое время, в течение которого защитный газ (в большинстве случаев водород) сгорает и должен быть возобновлен.

д) Цементация газообразными карбуризаторами

Несмотря на то, что цементации в газовой среде посвящено большое число работ, тем не менее об этом методе известно еще немного. Прежде всего была изучена цементация твердыми карбуризаторами; после этого применили жидкие цементирующие вещества, причем удалось достигнуть только сравнительно очень небольшой глубины цементации; но зато достигнут весьма незначительный расход тепла, обуславливаемый отпадением медленного прогресса до температур цементации и отсутствием большого мертвого веса. Полагают, что при цементации газообразными карбуризаторами можно получить те же преимущества без упомянутых недостатков. В электрических печах, работающих с газообразными карбуризаторами, часто изделиям во время цементации сообщается движение, хотя это и не является абсолютно необходимым. Газ может вводиться в печь в готовом виде или же получаться путем испарения соответственной жидкости. В описанной в литературе установке (Ж 86 и 87) изделие помещается в барабаны диаметром 375 мм и длиной 2100 мм; вес загрузки составляет от 450 до 900 кг. Загрузка весом в 450 кг может быть нагрета до температуры 950° приблизительно в течение 4 часов, а за следующие 4 часа достигается цементация на глубину от 1,25 до 1,50 мм. При обычном способе цементации такая же глубина потребовала бы 24 часа.¹ Установленная мощность печи составляет 90 квт. Защитный газ (в упомянутых литературных источниках нет более точного обозначения) получается в жидком состоянии и после распыления в воздухе вводится в печь при избыточном давлении около 0,7 кг/см².

3. ПРОТЯЖНЫЕ ПЕЧИ

Затруднительность равномерного нагрева изделий в муфельных печах побудила сконструировать протяжные или каналные печи, получившие особенно большое распространение при производстве проволоки и ленты. Незначительная толщина их и отсутствие воздушных промежутков между отдельными частями изделий допускают необыкновенно короткое время обработки. Таким образом, несмотря на то, что печи в объемном отношении очень плохо используются, гарантируется высокая производительность и экономичность и исключительная равномерность температуры нагрева.

а) Протяжная печь для металлической ленты; применены утопленные в стенках нагревательные элементы (стр. 185). На рис. 231 изображен продольный разрез через такую печь. Во избежание повреждения ленты о под печи — жароупорный металл или

¹ Это мнение автора, неверно. Достаточно 8—12 ч. Прим. ред.

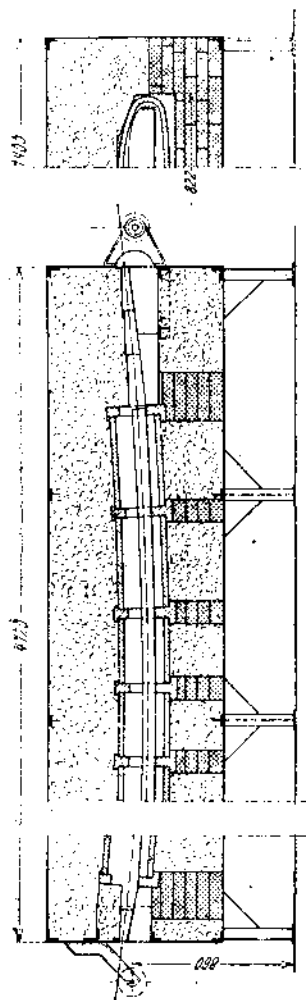


Рис. 231. Прогревающая печь для латуновой ленты.

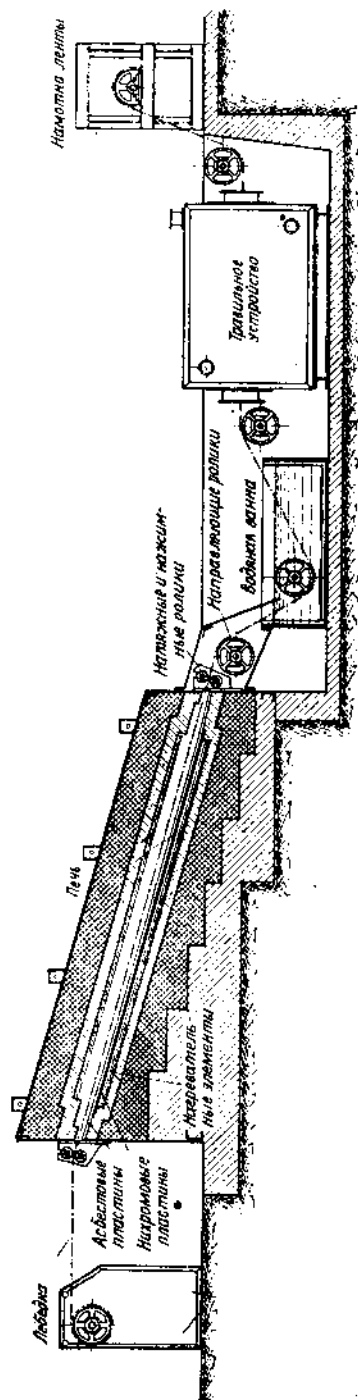


Рис. 232. Прогревающая печь для латуновой ленты.

керамический материал — изделие проходит через печь в свободно подвешенном состоянии (Гама, Ж 63). Для этого движение ленты, протягиваемой через печь мотовилом и сматываемой таким образом с барабана, должно замедляться тормозом. Общее устройство печи описано, между прочим, Юнкером (Ж 7). Обращает на себя внимание форма муфеля, который изогнут по форме висящей ленты.

б) *Протяжная печь для металлической ленты, протягиваемой непосредственно по поду.* На рис. 232 изображена установка, в которой лента проходит последовательно через канал наклонной протяжной печи, травильный бак, мойку и сушильную печь. Лента скользит по выложенному асбестом поду муфеля¹. Печь имеет в длину 8 м, производительность ее 625 кг/час и при ширине ленты в 730 мм она расходует около 100 квтч. Мягкая подкладка на поду предупреждает порчу металлической ленты.

Описанный непрерывный рабочий процесс влечет за собой значительную экономию в работе. Нагревательные элементы распределены по длине печи отдельными группами, регулируемые независимо одна от другой. Так как муфель печи установлен в наклонном положении, то сила, необходимая для протягивания ленты, невелика; наряду с этим сохраняется и лента, несмотря на значительную длину печи (Русс, Ж 88).

Изготавливались также печи с подом из гладкой жароупорной жести (Гамеле, Ж 74).

в) *Протяжные печи с роликами для обработки металлических лент* (Русс, Ж 88). Эти печи представляют собою средний между двумя последними печами тип. В протяжных печах с опорными роликами печное пространство может быть сделано ниже, чем в печах со свободно провисающей лентой; можно также отказаться от наклонной установки печи. Опорные ролики из жароупорного металла приводятся во вращение снаружи таким образом, что окружная их скорость равна скорости прохода ленты через печь. Расход тока, примерно, тот же, что и в вышеописанных печах.

д) *Протяжные печи для проволоки.* Конструирование протяжных печей для проволоки затрудняется прежде всего тем, что проволоку необходимо пропечь в закалочную ванну таким образом, чтобы она не приходила в соприкосновение с воздухом, так как при незначительной толщине проволоки и более длинном пути последовало бы слишком сильное охлаждение, могло бы произойти, наконец, окисление, и в результате не удалось бы получить закалки требуемого качества.

На рис. 233 изображен разрез через протяжную печь для проволоки. Обращает на себя внимание расположение стержневых нагревательных элементов, установленных перпендикулярно направлению движения ленты. Это дает возможность работать с определенным температурным режимом по длине печи. Проволоки уложены каждая отдельно в узкую трубку; поэтому при обрыве проволоки не приходится опасаться аварий печи из-за коротких замыканий и т. д.

¹ Герм. пат. 464829 и 465883.

В целях правильного использования, вполне естественно, необходимо, чтобы через печь прошло более или менее значительное количество проволок (многоканальные печи), и поэтому принято пропускать проволоки поодиночке в жароупорных трубах, так как при том натяжении материала, с которым проволоки протаскиваются через печь, некоторые из них иногда могут разорваться. Кроме того, на проволоках часто оказываются остатки масла, продукты сгорания которого (частички углерода) могут попадать на нагревательные элементы и повлечь за собою короткие замыкания. Наконец, нежелательно

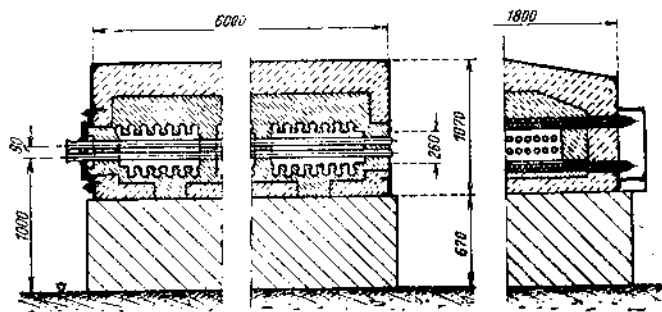


Рис. 233. Протяжная печь для проволоки.

также соприкосновение паров, выходящих из закалочной ванны, с нагревательными элементами. Поэтому проволоки обычно ведутся в трубах до самой закалочной ванны. В этом случае нагревательные элементы печи могут быть расположены в пространстве, заполненном воздухом, как в обычной нагревательной печи.

Из изображенной на рисунке 233 многоканальной печи для одновременного протягивания 24 проволок в два слоя—один над другим—расходуется при длительной работе 180 квтч/т стальной проволоки диаметром 3,5 мм при производительности в 0,45 т/час при рабочей температуре в 850°C.

На рис. 234 показано наружное устройство выходного конца подобной печи, в которой обрабатываются одновременно 12 проволок в один ряд. Здесь отчетливо видно препятствующее доступу воздуха переводное приспособление, направляющее проволоки в закалочную ванну. Свинцовая закалочная ванна в этом случае является одновременно и ванной для отпуска, и, следовательно, температура в ней постоянно поддерживается на уровне 500°, причем нагревательные сопротивления должны покрыть только разницу между потерями холостого хода ванны и теплотой, подведенной проволоками. При производительности 0,15 т/час., т. е. равной $\frac{1}{3}$ производительности печи, изображенной на рис. 233, расход энергии составляет около 300 квтч/т; больший расход объясняется меньшей производительностью печи (Шау, Ж 76).

е) *Протяжная печь для ленточной стали.* Подобного рода маленькие печи (Шау, Ж 76) имеют муфель, служащий нагреватель-

ным пространством и получающий ток пониженного напряжения от трансформатора, установленного под корпусом печи. При установленной мощности в 10 квт могут быть нагреты до температуры 850°C 25 кг/час. стальной ленты. Муфель газоплотен, так что можно пользоваться защитным газом. Расход энергии составляет 250—300 квтч/т.



Рис. 234. Протяжная печь для проволоки.

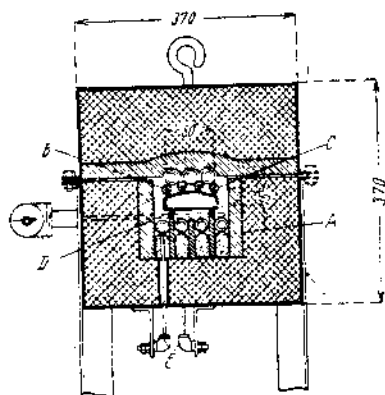


Рис. 235. Печь для закали стальной ленты.

Печь для закали стальной ленты, изображенная на рис. 235, имеет независимые от муфеля нагревательные элементы. Лента проходит через металлический муфель, имеющий паружные ребра *B*, на которых укреплены изоляторы *C*, поддерживающие верхние нагревательные элементы. Муфель и элементы окружены огнеупорной кладкой *A*. *D* — автоматический терморегулятор температуры; *E* — включение нагревательных спиралей. Длина печи 5 м; установленная мощность в 18 квт регулируется четырьмя самостоятельными регуляторами температуры. Производительность ее составляет около 15 кг/час., почему расход энергии значительно выше, чем в вышеописанной печи и составляет около 530 квтч/т.

Д. ПЕЧИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Применяемые для печей с высокой температурой конструкции подобны печам средней температуры. Различие заключается только в том, что более высокая температура требует иной конструкции стенок и нагревательных элементов (стр. 175 и 191).

1. КУЗНЕЧНАЯ ПЕЧЬ

На рис. 236 изображен разрез кузнечной печи. Обращает на себя внимание наличие двух рядов верхних нагревательных элементов *C*, расположенных один над другим, так как необходимое число стерж-

ней не могло быть уложено в один ряд. Затем следует обратить внимание на относительно сложную конструкцию стенок, обуславливаемую высокими температурами печи (помимо шамота В сделан ряд слоев 1—4 тепловой изоляции А). Эта печь предназначена для кузнечной работы, а потому должна быть все время открыта с одной стороны. Отверстие должно быть возможно малым, во избежание слишком больших потерь тепла. Дно печи покрыто угольной мелочью D, чтобы изделия не окислялись.

На рис. 237 показана кузнечная печь американской конструкции, принятая на заводах Форда, с размерами щели 450×50 мм и глубиной пода 250 мм.

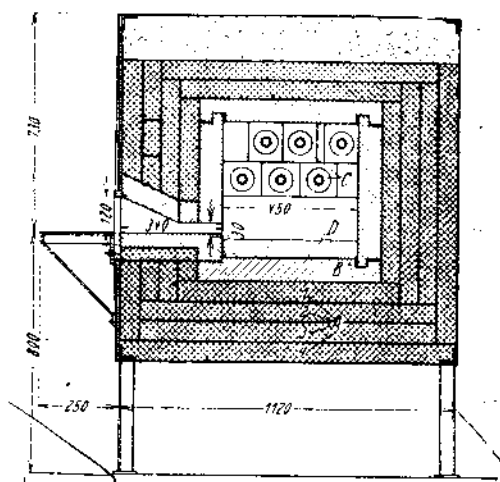


Рис. 236. Кузнечная печь для максимальной температуры до 1400° .

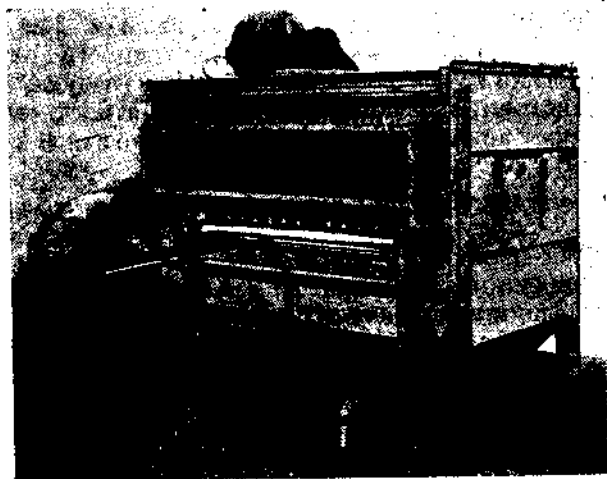


Рис. 237. Кузнечная печь на 300 квт; рабочая температура до 1350° .

При 1250° С потери холостого хода печи составляют 5—6 квт. Так как печь предназначена для работы по шесть месяцев без перерыва, то применены стержни Глобар, заменяемые во время работы.

2 ПЕЧИ С ИСКУССТВЕННОЙ АТМОСФЕРОЙ

Для закалки быстрорежущей стали, которая до последнего времени обрабатывалась в соляных ваннах, легко при этом подвергаясь обезуглероживанию, в Америке, а в последнее время и в Европе, получили распространение печи с защитной газовой атмосферой. Такая печь изображена на рис. 238. Обозначения: 1 — пространство для сжигания защитного газа; 2 — подвод газа; 3 — прорез для выхода защитного газа; 4 — нагревательные стержни; 5 — охлаждаемые водою концы стержней; 6 — огнеупорная футеровка; 7 — тепловая изоляция; 8 — специальные кирпичи для установки нагрева-

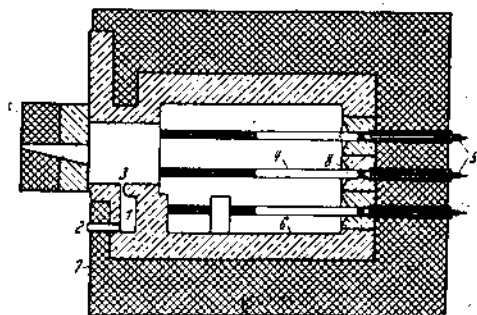


Рис. 238. Схема устройства печи для высокой температуры с защитной газовой атмосферой.

тельных стержней. В печь, нагреваемую силитовыми стержнями Глобар, вблизи дверцы подается под давлением защитный газ. Он получается путем неполного сжигания светильного газа в камере сгорания, расположенной под дверцей таким образом, что всегда имеется желательное соотношение количеств окиси углерода и углекислоты. Подведение газа и воздуха могут регулироваться отдельно от руки или автоматически; в зависимости от сорта стали

необходимо то или другое соотношение в смеси воздуха, окиси углерода и углекислоты. Правильность состава атмосферы печи может быть проверена аппаратом Орса или аналогичными приборами¹ (Таур, Ж 89).

3. СОЛЯНЫЕ ВАННЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО НАГРЕВА

Электродные печи сопротивления

Единственными представителями непосредственно нагреваемых печей сопротивления, применяемых для технологических надобностей, являются давно известные, непосредственно нагреваемые соляные ванны. Ток подводится к соли при помощи электродов. Соль (хлористый калий KCl , хлористый барий $BaCl_2$ или же смесь таковых²) передает тепло изделию и одновременно предохраняет металлы от окисления. Большие сечения ванны в сочетании с малым удельным сопротивлением расплавленных солей требуют, чтобы для нагрева ванны было применено низкое напряжение. Поэтому все подобного рода ванны должны работать с трансформаторами при напряжении от 10 до 30 в. Пользование постоянным током исключается, вследствие не-

¹ Амер. пат. 1 724 583.

² Температура испарения: хлористый калий — около 880°, хлористый барий — от 1150 до 1350°; смеси обоих — при промежуточных температурах.

избежных при этом электролитических явлений. Если изделие является проводником, то оно действует как автоматический регулятор, так как при погружении изделия в ванну уровень жидкости повышается; в результате этого увеличивается токопроводящее сечение, а следовательно повышается расход тока. Главными трудностями, с которыми сопряжена работа с соляными ваннами, являются: пуск в ход и неплотность футеровки; к этому следует прибавить еще необходимость бороться с получением на изделиях внешнего слоя пониженной твердости из-за обезуглероживания металла ванный.

Так как соль в твердом состоянии не является проводником, то для пуска печи в ход необходимы какие-то средства, чтобы довести ванну до температуры, при которой соль сама может принять на себя преобразование электрической энергии в тепловую.

На рис. 239 изображено довольно распространенное приспособление, состоящее в том, что двух-или трехполюсные вспомогательные электроды устанавливаются на твердую соль. К полюсам прижимается проводник, чаще всего кусок угля, нагревающийся при прохождении по нему тока и расплавляющий окружающую его соль¹. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не расплавится достаточно большой участок соли, могущий покрыть потребности в тепле, предъявляемые кладкой и еще не расплавленной соляной массой. Расплавление происходит довольно медленно, так как твердая соль является плохим проводником тепла. Однако повышение подвода энергии на вспомогательном электроде не может быть произведено, так как в противном случае соль начала бы испаряться в этом месте (здесь проведем аналогию с процессом нагревания изделий в печах сопротивления косвенного обогрева, где, как выше было указано, подведение энергии не может быть увеличено до бесконечности во избежание перегрева поверхности изделий). Равномерное распределение энергии во время разогрева печи по всей соляной ванне пытаются осуществить путем применения пускового приспособления («зажигающей клетки»), распределяющего энергию из расплавленного участка по всей ванне, а при выполнении его в виде сопротивления производящего даже тепло в самой ванне² (рис 240).

Показанные на рисунке трубки служат для непосредственного преобразования электрической энергии в тепловую, а также они отводят тепло из расплавленной части ванны в еще не расплавленную.



Рис. 239. Специальный пусковой электрод для разогрева соляной ванны. По окончании пуска ванны электрод может быть вынут из ванны.

¹ Герм. пат. 411 278 и 437 696.

² Герм. пат. 455 696.

На рис. 241 изображено другое устройство фирмы Сименс-Шукерт, при котором ванна разогревается погружаемым в нее специальным приспособлением¹.

Над тиглем с солью видно висящее пусковое приспособление. В отдельных трубках находятся сопротивления, при помощи которых разогревается соль.

Тигли этих соляных ванн футеруются кирпичом, подвергающимся химическому воздействию со стороны расплавленных солей. Неплотность кладки, особенно в швах, где раствор вымывается, поэтому является неизбежной; слой изоляции пропитывается солями прежде всего изнутри. Поэтому нет возможности работать с высококачественными изоляционными материалами, и приходится считаться, помимо тепловых потерь через лучеиспускание свободной поверхностью ванны, также и с относительно высокими потерями через кожух.

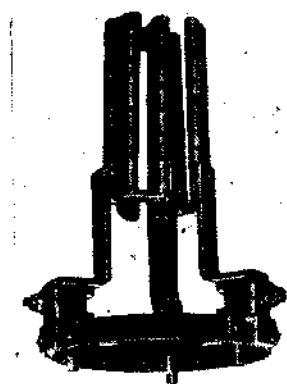


Рис. 240. Специальный пусковой электрод — клетка для разогрева соляной ванны.

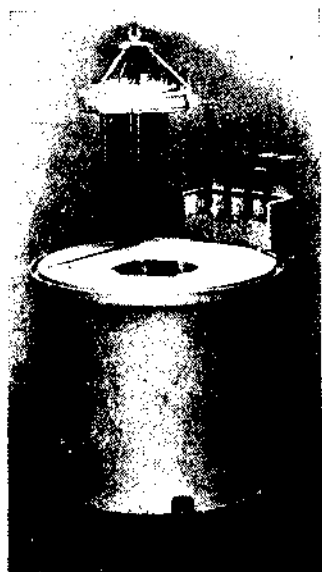


Рис. 241. Погружаемое пусковое приспособление для соляных ванн.

Во избежание этих недостатков, пытались работать с металлическими тиглями, служившими одним из электродов, в то время как второй электрод погружался непосредственно в ванну. Этот второй, часто центрально расположенный, электрод служит одновременно для регулировки температуры путем изменения глубины его погружения. Пуск таких печей производится при помощи погружаемого сопротивления, расположенного между электродом и стенкой тигля (рис. 242)². Так как тигель с наружной стороны покрыт изолирующими веществами, а с внутренней стороны его находится соль, то

¹ Швейц. пат. 138 138.

² Брит. пат. 347 238.

срок его службы, казалось бы, должен быть очень долгим. Во всяком случае, металлические тигли можно правильно изолировать.

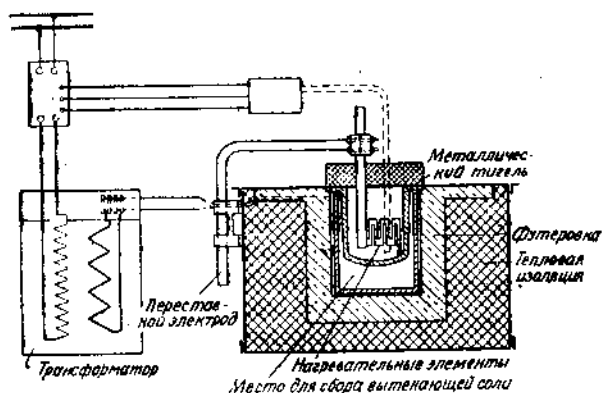


Рис. 242. Непосредственно нагреваемая соляная ванна с металлическим тиглем.

Аналогичная мысль положена в основу печи, изображенной на рис. 243, в которой три погружаемых электрода *В* входят в металлический тигель *А*, причем последний не принимает участия в процессе. Обозначения на рис. 243: *А* — металлический тигель; *В* — электрод; *С* — огнеупорная футеровка; *Д* — тепловая изоляция; *Е* — трансформатор.

Технологические затруднения основаны в первую очередь на том, что применяемые для ванны соли подвержены старению. При работе со старыми солями ванна действует на изделие обезуглероживающим образом (Ранати, Ж 90 и Кьерманн, Ж 91), вследствие чего поверхность изделия становится более мягкой — оно получает «мягкую кожу» вместо необходимой закалки. Последнее обстоятельство в случае закалки мелких высококачественных изделий (например, инструмент) очень отражается на качестве продукции. Были сделаны попытки применять угольные электроды, растворение которых в ванне должно было бы препятствовать обезуглероживанию поверхностного слоя металла (Улендорф, Берлин).

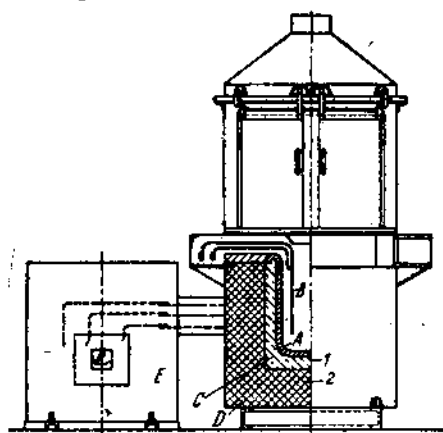


Рис. 243. Соляная ванна с металлическим тиглем.

Е. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПЕЧИ

Преимущества индукционного способа нагревания — получение тепла в самом изделии, казалось бы, делают этот способ нагревания особенно пригодным для технологических целей. Тем не менее такие печи насчитываются лишь единицами.

Принцип индукционного нагревания неоднократно излагался различными авторами, и потому мы опускаем здесь его описание. Отметим только, что каждую печь следует рассматривать как трансформатор, вторичную обмотку которого представляет собою изделие, в то время как первичной обмоткой является обмотка возбуждения. Различают печи с замкнутой магнитной цепью и с незамкнутой в зависимости

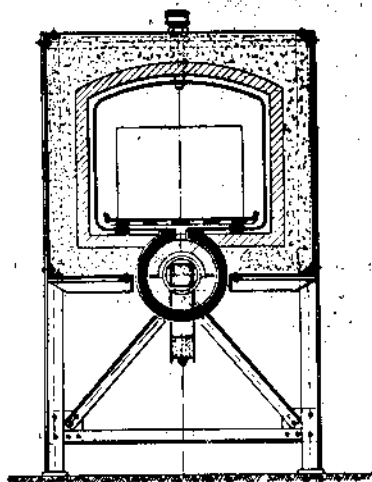


Рис. 243а.

от наличия или отсутствия в «трансформаторе сердечника». В печах без железного сердечника освобождающаяся в катушке энергия используется с тем более высоким коэффициентом полезного действия, чем совершеннее изделие заполняет площадь сечения первичной обмотки. Следовательно, форма обмотки должна соответствовать форме изделия. Поэтому такой способ будет выгоден только в тех случаях, когда печь предназначена для обработки большого количества одних и тех же изделий, так что процент амортизации распределяется на большое количество продукции. В печах с сердечником нагреваемые изделия должны образовать замкнутую кольцеобразную цепь, окружающую железный сердечник.

Применение индукционного нагревания описано, например, Тама (Ж 63), который сообщает об опытах нагрева бунтов ленты таким способом. Опыты эти привели к безукоризненным техническим результатам, однако испытанная им конструкция печи не обнаружила никаких экономических преимуществ по сравнению с методом косвенного обогрева при помощи нагревательных элементов. Не изученные еще условия соприкосновения между витками ленты делали нагревание этим методом слишком ненадежным, так что от него пришлось отказаться.

Известно также много попыток несколько изменить метод работы. Так, применялись печи с замкнутым железным сердечником, в которых кольца ленты надвигались на железный сердечник. Затем были попытки изолировать поверхность ленты при помощи какой-нибудь оболочки так, чтобы замыкание отдельных ее витков было бы совершенно исключено. Однако до сих пор не опубликовано никаких сведений о промышленном применении подобных печей.

Нагревание болтов в индукционном поле также не вышло до сих пор из стадии опытов.

[В настоящее время имеются повидимому, уже достаточно совершенные конструкции электрических печей для термообработки с индукционным способом нагрева рабочего пространства. Для примера даем краткое описание такой печи фирмы Русс (рис. 243а). В индукционных печах для плавления металла вторичной цепью является плавильное пространство, наполненное расплавленным металлом. В печах для термической обработки вторичный ток индуцируется в металлических замкнутых кольцах, которые заменяют нагревательные элементы электрических печей сопротивления. В печи, изображенной на рис. 243а, нагревательное тело образует стенку муфеля; она делается из тонкого листового нихрома, обладающего высоким электросопротивлением и жароустойчивостью. *Ред.*]

Индукционные плавильные печи (ванны) различного технологического назначения уже получили практическое применение (Тама, Ж 63). Однофазная с замкнутым железным сердечником индукционная плавильная печь с вертикальным плавильным жолобом (печь Виатта-Аякс) работает с открытой сверху ванной; расплавленная латунь покрыта бурой для предохранения от угара. В ванну погружаются предварительно очищенные велосипедные рамы для пайки латунию. Расход энергии составляет около 400 квтч на 240 рам при 7 местах пайки в каждой раме. Потери холостого хода составляют 8,5 квт, куда включено 0,5 квт — мощность вентилятора для охлаждения первичной катушки.

Наконец, следует упомянуть об опытах нагревания ленты индукционным способом в протяжных печах.

Вообще же имеется много патентных заявок на печи индукционного нагрева, осуществление которых не дошло даже до стадии опытов, не говоря уже о промышленном их применении.

* Остановимся еще на одном способе косвенного индукционного нагревания для технологических целей. Речь идет об усовершенствовании упомянутой уже выше системы Инфра. Новейшие печи этой фирмы имеют металлический муфель, вокруг которого устроена возбуждающая обмотка. Муфели изготавливаются из различных сплавов, имеющих разные температуры критических точек. В тот момент, когда муфель достигает критической точки, поглощаемая печью мощность несколько понижается, если, как это обычно бывает, отказываются от регулировки напряжения. Таким образом, температура муфеля автоматически удерживается на определенном уровне. Конструкция эта должна регулировать таким образом и температуру изделий. В полной мере этого, разумеется, достигнуть не удастся, так как передача тепла изделию — точно так же, как и в других печах сопротивления, описанных в настоящей книге, — происходит путем лучеиспускания (даже здесь можно использовать конвекцию). Таким образом, равномерность прогрева будет зависеть от всех названных пунктов, но не будет определяться законами индукционного

нагревания, так как непосредственное индукционное нагревание изделия задерживается муфелем, действующим как экран. Эта печь описана Перрином и Сорелем (Ж 92 и 93).

Г. ВЫБОР ПЕЧЕЙ

Большинство описанных типов печей может быть применено для самых разнообразных целей. Нет никакой возможности охватить все разнообразие случаев применения этих электрических печей. Однако ниже мы выскажем некоторые соображения, заслуживающие внимания при выборе типа печи. Этот, разумеется, также не исчерпывающий обзор должен прежде всего показать, как многогранны и разнообразны должны быть соображения, которыми можно и должно руководствоваться при выборе печи.

1. Во-первых, при выборе печи нужно выяснить, [будет ли] поточное производство или же печь будет работать периодически. Прежде всего надо учесть эксплуатационные моменты. Далее, нужно принять во внимание, что в тех случаях, когда необходим определенный температурный режим во времени (т. е. если изделие медленно нагревается и снова охлаждается), даже при отсутствии эксплуатационных преимуществ, поточное производство, по всем вероятностям, будет более благоприятно, потому что при работе кампаниями происходят потери тепла при каждой загрузке. Даже в предприятиях, где не установлено поточное производство, применение поточно работающих печей может дать положительный результат, если при их помощи удастся гарантировать определенную продолжительность и режим нагревания.

Если, наоборот, изделие требует быстрого нагрева и должно быть вынуто из печи в горячем состоянии, то с теплотехнической точки зрения периодическая загрузка печи равноценна поточной эксплуатации печи, и в этом случае решают вопрос только эксплуатационные соображения.

2. Во вторую очередь следует решить вопрос о том, каков будет суточный режим эксплуатации, что в сильнейшей мере влияет на экономичность и тип печи. При непрерывной трехсменной работе:

а) нужны меньшие печи; отсюда меньшие капиталовложения и меньший расход тепла;

б) уменьшается стоимость энергии (скидка на ночной ток, большее число часов использования).

Вполне естественно, что проверке подлежит работа вне «пииков» и работа печей в виде буфера; в последнем случае печь соответственно включается или выключается для выравнивания забираемой заводом определенной мощности. В этом случае сооружение печи для поточного производства осуществляется с очень большим трудом.

3. Третий вопрос — о способе загрузки. О выборе транспортных приспособлений были даны указания выше (стр. 206—207). Таким образом, остается только вопрос о выборе типа печи без загрузочных приспособлений. По этому поводу следует заметить, что печи с рабо-

чим отверстием в горизонтальной плоскости с теплотехнической точки зрения имеют преимущества, если продолжительность кампании не слишком мала. Однако посадка и выдача изделия в этих печах занимает несколько больше времени, чем в печах с вертикальной дверцей: следовательно, если изделия часто вынимаются из печи, то эта потеря времени, сопряженная с потерей тепла, приобретает большое значение. Наоборот, если нагревательные процессы более или менее продолжительны, то происходящее в этом случае снижение потерь холостого хода (например, в колодцах) будет иметь большее влияние на выбор типа печи.

4. Четвертый вопрос, который следует разрешить, это необходимость резерва. Если для каждой печи должен быть равноценный резерв, то, так как расходы на амортизацию повысятся вдвое, применять дорогостоящие поточные печи часто становится невозможным.

5. Пятый вопрос — потери холостого хода. Последние играют меньшую роль в печах, имеющих большую производительность, и большую в печах, стоящих наготове, так как процент потерь на единицу выхода в последних значительно больше. Влияние этого на выбор, например, типа печей поясним на следующем примере. Ванны (соляные или свинцовые) имеют при равном полезном объеме в большинстве случаев значительно более высокие потери холостого хода, чем обыкновенные камерные печи. С другой стороны, ванны гарантируют более быстрое прогревание изделия. Таким образом, если с металлургической точки зрения не ставится никаких особых требований, то в закалочных мастерских для производства следует применять ванны, а для ремонтов (когда печи в большинстве случаев должны быть наготове в течение всего дня) рекомендуются камерные печи.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Неоднократно указывалось, что конструктивное развитие электропечей ни в коей мере нельзя еще считать законченным. Было бы неуместно предсказывать, в каком направлении пойдет развитие электропечей в дальнейшем; тем не менее необходимо составить себе об этом некоторое представление, что мы и пытаемся сделать ниже. При этом следует различать развитие существующих конструкций и развитие их в новых областях применения.

1. ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

а) Повышение экономичности

Одним из наибольших препятствий к введению электрических печей для технологических процессов является недостаточная их экономичность во всех случаях. На ее повышение должно быть обращено особенное внимание, и в первую очередь нужно принять все меры для экономии тепла. Это может быть достигнуто посредством:

1) уменьшения тепловых потерь и

2) уменьшения полезной теплоты.

Потери (при той же производительности) в свою очередь могут быть понижены путем снижения теплоотдачи стенками печи за единицу времени (потери холостого хода) и сокращения времени, в течение которого происходят потери (время прогрева). Снижение потерь холостого хода потребует, с одной стороны, конструктивных мероприятий (максимальное ограничение числа мест теплового короткого замыкания, возможности обойтись минимальными расстояниями между нагревательными элементами без уменьшения надежности эксплуатации); с другой стороны, снижение потерь будет зависеть от улучшения качества материала. Возможность строить стенку печи из изоляционного материала устранит потери, возникающие при применении шамота; при более высоких температурах, когда шамот употребляется не только по соображениям прочности, но и для снижения температуры, действующей на изоляционные материалы, улучшение качества теплоизоляционных материалов также поможет делу, потому что предел их применения должен быть повышен для уменьшения таким образом необходимой толщины слоя шамота (Пашкис, Ж 13). Вместе с тем одновременно уменьшится теплосодержание печи, а также потери при работе печи с периодической загрузкой.

Время нагрева влияет на экономичность в двух отношениях. Прежде всего, при более короткой продолжительности нагрева для намеченной производительности капитальные затраты на приобретение печи меньше; кроме того, понижаются потери холостого хода. Более короткому времени нагрева способствуют, во-первых, соответственная укладка изделий в печи (так, чтобы время нагрева определялось минимальными размерами изделий), во-вторых, мероприятия для улучшения теплопередачи. По пути улучшения укладки идет развитие протяжных печей. До сих пор расход тока в них, примерно, такой же, как в других печах, служащих для той же цели; преимущество их заключается главным образом в исключительной равномерности прогрева. Для повышения эффективности их теплового хозяйства необходимы нагревательные сопротивления, выдерживающие большую нагрузку, что прежде всего достигается улучшением качества материалов сопротивлений. Одновременно должна быть улучшена также и техника регулировки, чтобы в случае внезапного удаления изделий (например, при обрыве проволоки или ленты в печи) не перегорали бы нагревательные элементы. Характеристика контрольного органа современных регуляторов еще слишком плоха для того, чтобы выключение печи в этом случае могло произойти достаточно быстро. Уменьшение времени нагрева могут дать также печи с относительным взаимным движением отдельных изделий (развитие барабанных печей).

Теплопередача улучшается как повышением коэффициента теплопередачи, так и приданием поверхности изделия или печи соответственной формы. Коэффициент теплопередачи можно повысить также, применяя конвекцию. Введение циркуляции воздуха в печах более высоких

температур чем те, в которых она до сих пор применяется, также является весьма актуальным вопросом для печей, нагреваемых сопротивлениями. Затем, без сомнения, область применения вана для термической обработки придется расширить, что, однако, потребует улучшения материала для вана и прежде всего защиты нагревающих элементов от проникновения жидкости ванны, и снижения тепловых потерь. Повышение теплопередачи путем лучеиспускания ограничивается пока известными пределами, переход через которые грозит перегревом поверхности изделия. Попытки применять в начале нагревания более высокие сверхтемпературы с тем, чтобы, по мере нагрева изделий, снижать сверхтемпературу печи, должны быть предварительно разработаны. При этом прежде всего должна быть обеспечена автоматическая регулировка.

Экономия в расходе тепла, за счет уменьшения полезной теплоты, может быть осуществлена посредством самого широкого применения установок для рекуперации тепла. Создание печей, работающих по этому принципу, окажет наряду с улучшением теплопередачи решающее влияние на дальнейшее распространение обработки в электропечах. Вполне понятно, что оба этих мероприятия могут найти себе применение и в пламенных печах. Однако со снижением стоимости тепла повышается значение накладных расходов в расчете экономичности, а эти накладные расходы для электропечей в громадном большинстве случаев ниже, чем для пламенных печей.

В ряду накладных расходов значительную роль играют капитальные затраты (амортизация и т. д.). Удешевление печей, без сомнения, способствовало бы их распространению. Этого можно было бы достигнуть путем нормализации отдельных деталей, подобно тому как в описанных выше американских сушильных печах, а также путем систематической разработки конструкций. Дальнейшим усовершенствованием автоматизации прочие накладные расходы, без сомнения, удастся снизить.

б) Повышение надежности в работе

Повышение надежности в эксплуатации является в первую очередь вопросом качества материалов; особенно важное значение имеет улучшение качества материала для нагревательных элементов. В отношении напряжения поверхности нагревательных элементов уже подошли вплотную к границе прочности, так что даже кратковременное нарушение регулировки может повлечь за собою слишком большое повышение температуры и повреждение нагревательных элементов. Однако улучшение других строительных материалов (теплоизоляционные материалы, жароустойчивые металлы и т. д.) сделало бы печи значительно более надежными в эксплуатации; особенно содействовало бы этому увеличение предела ползучести жароупорных металлов.

Измерительные и регулировочные схемы должны быть усовершенствованы, чтобы не подвергать опасности всю установку, если перестанут действовать отдельные аппараты.

Разработка нагревательных элементов, замена которых возможна во время работы, только начинается.

Весьма существенно для повышения надежности эксплуатации, прежде всего печей средней температуры, также предохранение от окалины, которая играет особенно большую роль для подовых и внизу расположенных боковых сопротивлений. Чтобы усовершенствовать защиту от окалины, подовые пластины должны подвергнуться дальнейшей разработке. В настоящее время существует два вида пластин: из прокатного металла, которые могут быть сделаны достаточно тонкими, что дает возможность получить более низкую сверхтемпературу подовых сопротивлений — и из литого металла, более надежного в смысле коробления. Подовые пластины из прокатного металла при загрузке их холодными изделиями склонны, как сказано выше, к короблению, вследствие чего затрудняется загрузка; сопротивления могут быть обжигены настолько, что не будут защищены от прикосновения и от окалины. Литые подовые пластины должны быть относительно толстыми и в этом случае оказывают довольно значительное сопротивление тепловому потоку от подовых нагревательных элементов к изделию. Кроме того, они трескаются при загрузке холодными изделиями.

Для дальнейшего улучшения плит нужно изыскать способы устранения обоих недостатков. Улучшения в этом направлении основаны на конструировании подовых пластин, разделенных на отдельные, более мелкие части. Каждая такая часть снабжена изогнутым краем, опущенным в песочный желоб. Отдельные желоба связывают рядом расположенные куски пода. Путем уменьшения размеров отдельных частей перекрытия пода достигается большая надежность против коробления, несмотря на уменьшение толщины перекрытия.

с) Прочие усовершенствования

Анализ возникающих при регулировке истинных разностей температуры и разностей между различными кажущимися кривыми, снятыми при помощи различных измерительных приборов, несомненно, поведет к изменению конструкции установок для измерения температур. Кроме того, и сама регулировка температуры нуждается в некоторых усовершенствованиях, именно, в направлении непрерывной плавной регулировки вместо скачкообразной. В данном случае речь идет о развитии электровакуумной техники. Однако еще прежде, чем последняя достаточно усовершенствуется, нужно достигнуть путем усовершенствования включающих приспособлений такого положения, чтобы с увеличением нагрева печи или изделия регулировка подвода энергии совершалась бы достаточно плавно.

2. ЗАВОЕВАНИЕ НОВЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

Распространение технологических электропечей в новых областях применения может быть достигнуто, главным образом, двумя способами: 1) путем увеличения применения индукционного нагревания

и 2) путем повышения предела температуры косвенно нагреваемых печей сопротивлений. Первый путь — более широкое применение индукционного нагрева — в настоящее время зависит от возможности измерения и регулировки температуры в этих печах. Такая регулировка в настоящее время еще настолько затруднительна, что ее можно считать еще практически не существующей. Другим затруднением для введения индукционного нагрева при технологических процессах является высокая цена преобразователей частоты (фрекенц-умформер). Каждый успех в этой области будет чрезвычайно благоприятствовать введению индукционного обогрева.

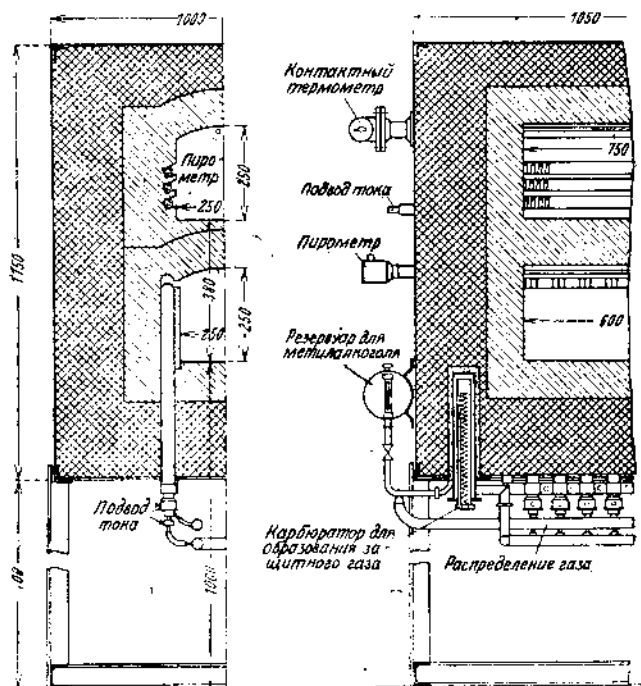


Рис. 244. Печь, нагреваемая молибденовыми нагревательными элементами.

Повышение пределов рабочей температуры печей сопротивления требует нагревательных элементов, выдерживающих более высокие температуры. Развитие может пойти по пути улучшения неметаллических стержневых сопротивлений, а затем создания новых металлических сплавов и, наконец, открытия совершенно новых форм сопротивлений.

О работах в первом направлении, насколько известно автору, до настоящего времени нет никаких данных.

Вторую задачу пытаются разрешить, например, при помощи молибденовых сопротивлений, причем молибден должен накаливаться в нейтральной атмосфере, а также применением сплавов мало окис-

ляющихся металлов. На рис. 244 изображена печь, нижняя камера которой снабжена молибденовыми нагревателями. Сопротивления из молибдена заделаны в цилиндрическое кольцо, состоящее из двух керамических трубок; по этому цилиндрическому кольцу протекают пары метилового спирта. Метиловый спирт расщепляется в испарителе, носящем название генератора защитного газа, на окись углерода и водород. Продукты испарения по выходе из нагревательного пространства проникают в стенку печи; наружный кожух печи плотно сварен и дает выход продуктам сгорания только через соответственную трубку. В таких печах могут быть достигнуты температуры до 1400° .

Над нижней камерой, нагреваемой молибденовыми элементами, находится камера для предварительного нагрева с обычным хромовым нагревательным элементом.

Примером попытки разрешения задачи в третьем направлении является печь Трюмплера¹. Он получает нагревательные элементы таким образом, что порошок из токопроводящего материала (например, уголь или пыль) приводится во вращение в барабане, причем вследствие центробежной силы этот материал осаждается на поверхности печи. После этого изделие либо (например, при химических реакциях) вводится в печь во время вращения, либо печь нагревается при непрерывном вращении пустою до спекания материала сопротивлений, так что печь служит только для формировки нагревательных элементов. После остановки нагревательные элементы могут быть применены в этой формовочной печи или в другом месте.

Чтобы повысить предел температуры печей сопротивления, требуется также изыскать новые теплоизоляционные материалы. Применение в настоящее время теплоизоляционных материалов для понижения температуры печей до пределов безопасности, потребовало бы настолько толстого слоя огнеупора (шамот), что это крайне неблагоприятно отразилось бы на экономичности печи. Поэтому во многих областях, требующих высоких температур, печи сопротивления не могли бы применяться.

Во время печатания этой книги в журнале «Zeitschr. für Metallkunde»² появилась работа Вагенера, в которой приведены результаты опытов по определению коэффициента теплопередачи. Поэтому высказанное утверждение, что коэффициент теплопередачи от печи к изделию путем лучеиспускания обычно точно неизвестен и что поэтому в большинстве случаев приходится принимать среднюю величину, равной 4,0, отпадает. В названной работе как раз приведены коэффициенты теплопередачи для некоторых цветных металлов.

Значение лучеиспускания при теплопередаче работой инж. Вагенера снова подтверждено. Попутно сообщается о производстве опытов, имеющих целью найти способы искусственного повышения теплопередачи путем лучеиспускания, посредством чернения изделий, подлежащих обработке, перед загрузкой их в печь. Эти сведения совпа-

¹ Герм. пат. 463 679.

² Т. 24, 1932 г., стр. 35.

Номограмма 1. Определение потерь холо-
стого хода пелей прямоугольной формы.

Формулы:

$$Q = \Phi_{F.s} \cdot \lambda \theta_c \cdot \eta_a$$

$$\Phi_{F.s} = \frac{F \cdot l}{s} \sqrt{1 + 12 \cdot \frac{s}{\sqrt{F \cdot l}} + 24 \left(\frac{s}{\sqrt{F \cdot l}} \right)^2}$$

Пример:

$$F \cdot l = 4,2 \text{ м}^2;$$

$$s = 0,35 \text{ м};$$

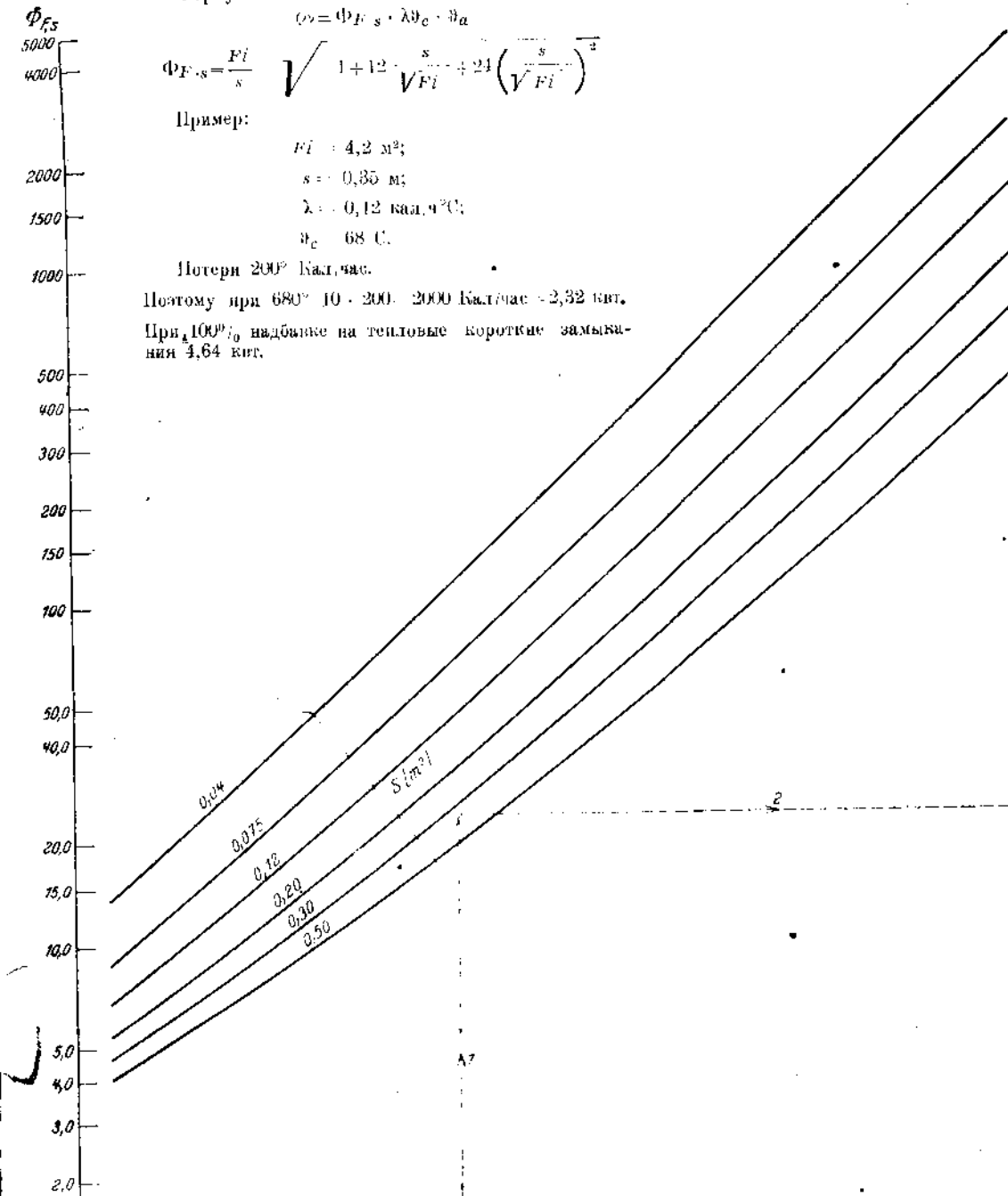
$$\lambda = 0,12 \text{ ккал/}^\circ\text{C};$$

$$\eta_a = 68 \text{ C}.$$

Потери 200° Кал/час.

Поэтому при 680° 10 · 200 · 2000 Кал/час = 2,32 кВт.

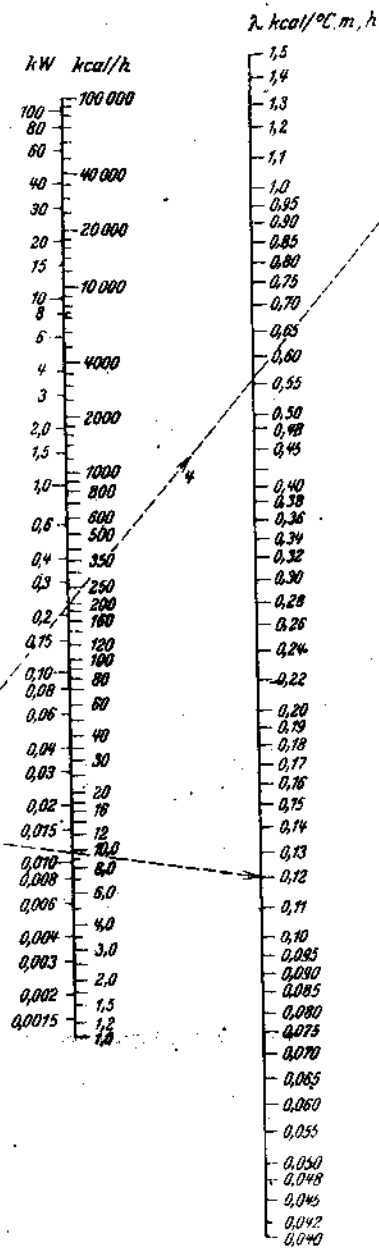
При 100% надбавке на тепловые короткие замыка-
ния 4,64 кВт.



α_1

α_2

Verl.



$\theta_c - \theta_a$
°C

Номограмма 2. Определение диаметра круглых металлических проволок для нагревательных элементов. Для прямоугольного сечения нагревательных элементов пересчет производится по рис. 39.

Примеры. Штриховой пунктир:

для $\gamma = 1,1 \text{ вт/см}^2$:

$U = 220 \text{ в}$;

$N = 13,3 \text{ кВт}$;

$\rho = 1,3 \text{ ом, мм}^2/\text{м}$.

Получаем: $d = 5,60 \text{ мм}$.

Линия из штрихов и точек:

для $d = 4,35 \text{ мм}$;

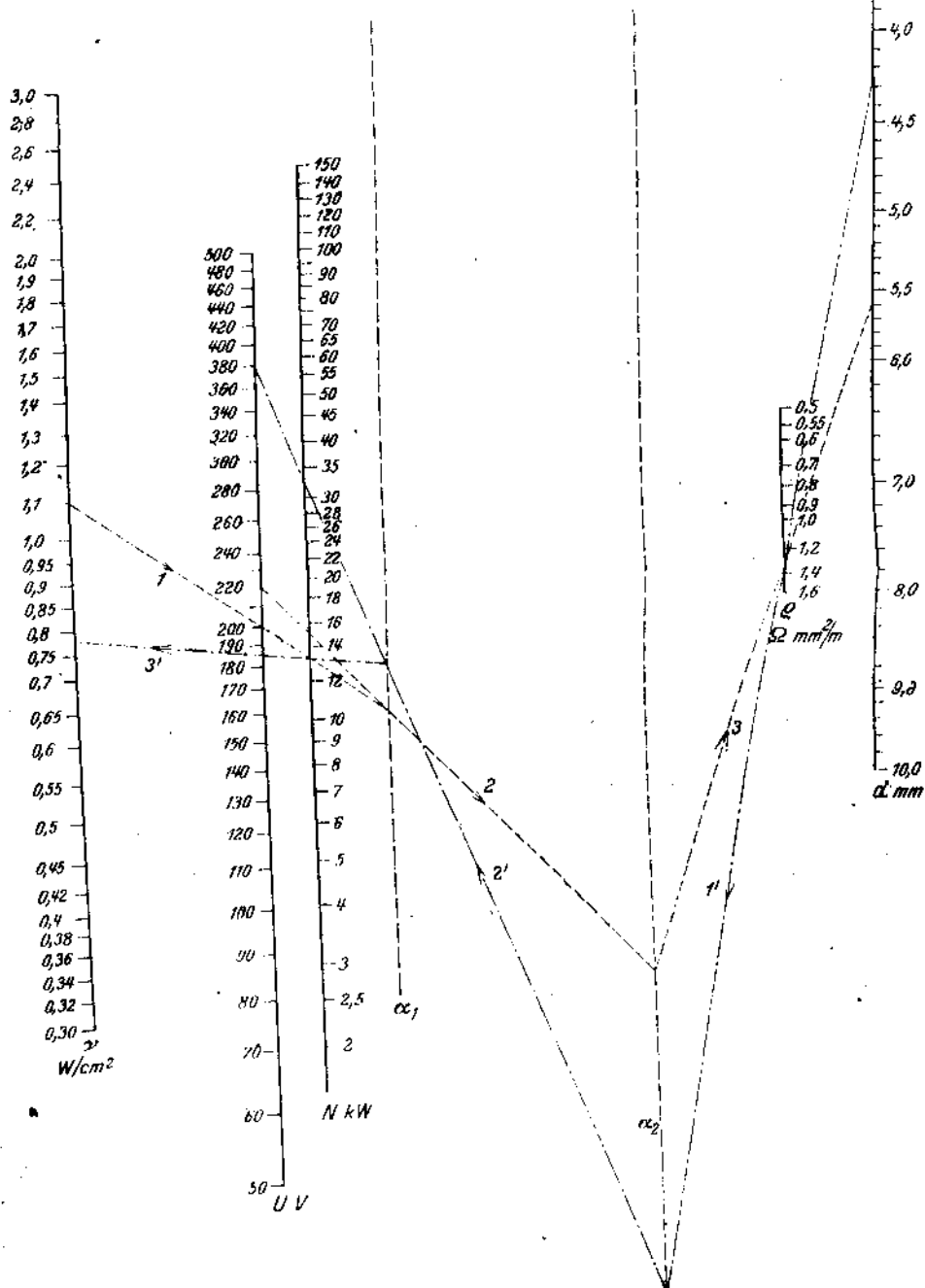
$U = 380 \text{ в}$;

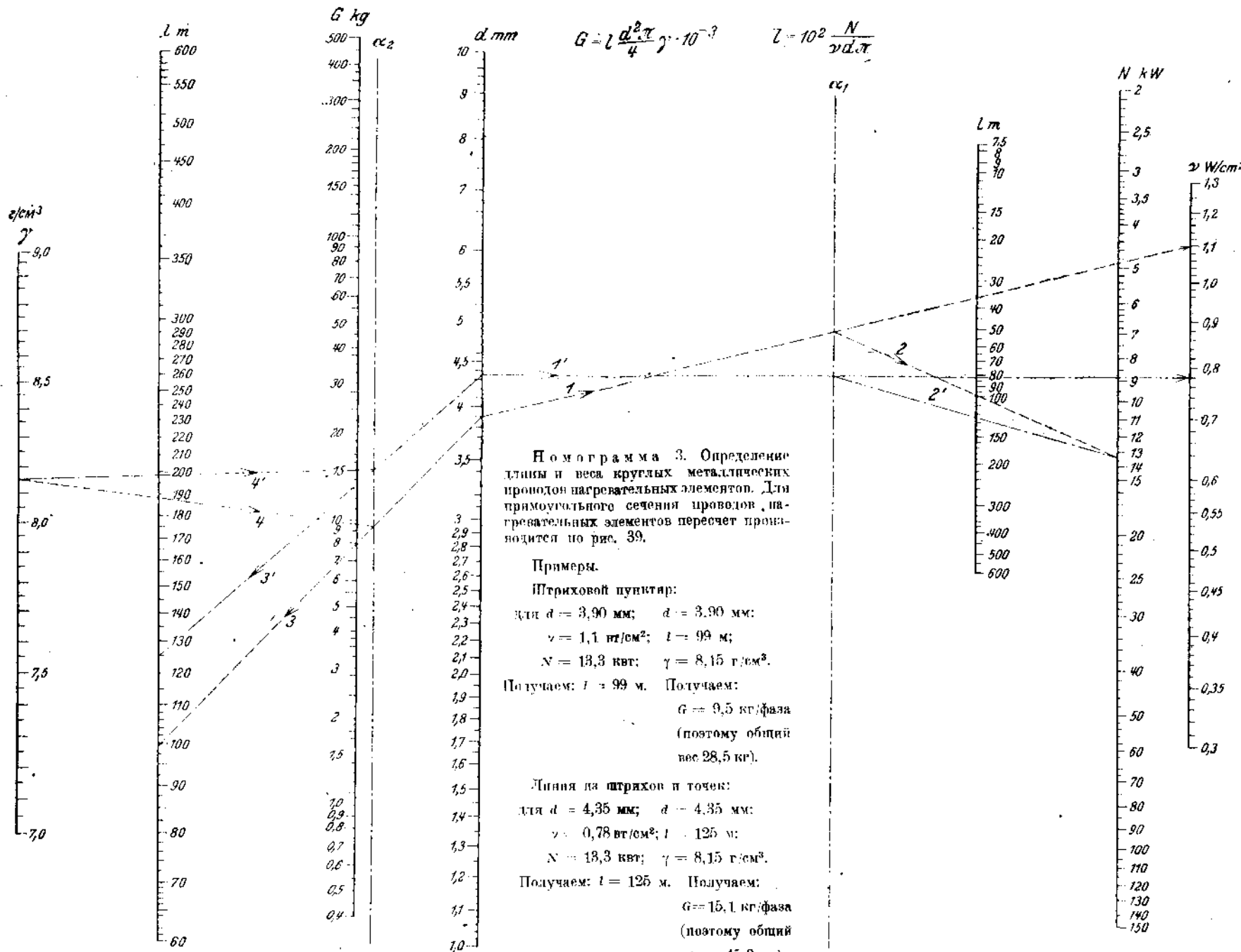
$N = 13,3 \text{ кВт}$;

$\rho = 1,3 \text{ ом, мм}^2/\text{м}$.

Получаем: $\gamma = 0,78 \text{ вт/см}^2$.

$$d = \sqrt[3]{\frac{10^3 N \rho}{U^2 \pi \gamma}}$$





дают с соображениями автора, высказанными весной 1930 г. Речь шла об исследовании возможностей уменьшить разность регулировки, причем автор выдвигал мысль, что этого возможно достигнуть путем улучшения теплопередачи между печью и предохранительной трубкой термоэлемента (значение K_2 ; стр. 110), для чего предлагал чернить наружную поверхность керамической предохранительной трубки термоэлемента, на что и заявил патент.

Высказанное на стр. 35 соображение, что улучшение коэффициента теплопередачи, а вместе с тем сокращение времени прогрева, практически может быть достигнуто только путем повышения конвекции, таким образом, как будто отпадает.

УКАЗАТЕЛЬ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bulle, Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 3 (1929/30), S. 693.
2. Paschkis, AEG-Werbedruck 1 6/1176, Juni 1930.
3. Schack, Stahl u. Eisen Bd. 50 (1930) S. 1289.
4. Paschkis, Arch. Warmewirtsch. Bd. 12 (1931) S. 356.
5. Nussbaum, Z. angew. Math. Mech. Bd. 8 (1928) 133.
6. Schack, Arch. Eisenhüttenwes. Bd. 4 (1930/31) S. 469.
7. Junker, Z. Metallkde. Bd. 23 (1931) S. 124 u. 158.
8. Stansel, Gen. electr. Rev. 1927 S. 488.
9. Stäbler, Stahl u. Eisen Bd. 50 (1930) S. 381.
10. Stassiniet, Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 74, 102, 128.
11. Hechler, Refrig. Eng. 13 (1926) S. 121 u. 141. Ref. v. Jacob: Z. ges. Kälteind. Bd. 34 (1927) S. 146.
12. Langmuir, Adams, Meikle, Trans. Amer. electrochem. Soc. Bd. 24 (1913) S. 53.
13. Paschkis, Elektrotechn. Z. 53 (1932) S. 25 u. 58.
14. Stassiniet, Stahl u. Eisen Bd. 46 (1926) S. 1537.
15. Belgeri, Schweiz. techn. Z. Bd. 24 (1927) S. 437 u. 749; Bd. 26 (1929) S. 573 u. 585. Ref. Elektrotechn. Z. Bd. 52 (1931) S. 213.
16. Stansel, Gen. electr. Rev. Dez. 1928 S. 670/71.
17. Stassiniet, Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 1509.
18. Mertens, Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 57.
19. Mertens, Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 92.
20. Paschkis, Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 33.
21. Paschkis, Forschung Bd. 2 (1931) S. 29 und 57.
22. Rohn, Elektrotechn. Z. Bd. 48 (1917) S. 227 u. 317.
23. Rohn, Z. Metallkde. Bd. 18 (1926) S. 387.
24. Klein, G., Elektrotechn. Z. Bd. 45 (1924) S. 300.
25. Hengstenberg u. Bornefeld, Kruppsche Mh. Bd. 12 (1931) S. 153.
26. Fritz u. Bornefeld, Kruppsche Mh. Bd. 12 (1931) S. 237.
27. Smithells, Williams u. Avary, J. Inst. Met., Lond. Bd. 40 (1928) S. 269.
28. Albers-Schönberg u. Bichowsky, Elektrotechn. Z. Bd. 50 (1929) S. 1837.
29. Ortel, W., Ber. Werkstoffaussch. Ver. dtsh. Eisenhüttenl. Nr. 26 (1922).
30. Pomp u. Dahmen, Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. Düsseld. Bd. 6 (1927) Lief. 3 S. 30 Ref. in Stahl u. Eisen Bd. 47. (1927) S. 414.
31. Pomp u. Enders, Mitt. Kais.-Wilh.-Inst. Eisenforsch. Düsseld. Bd. 12 (1930) Lief. 10, S. 127. Ref. Stahl u. Eisen Bd. 51 (1931) S. 157.
32. Lobley u. Betts, Engineering Bd. 128 (1929) S. 422.
33. Trans. Amer. ceram. Soc. Bd. 24 (1924/25) S. 199.
34. Hirsch H., Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 9 (1928) S. 577.
35. Hirsch H., Über das Erweichungsverhalten der in der feuerfesten Industrie benützten Rohstoffe, Berlin, Selbstverlag des Bundes feuerfester Erzeugnisse 1924.
36. Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 8 (1927) S. 44 u. 92.
37. Hirsch H., Tonind. Ztg. Bd. 54 (1930) S. 1273, 1303, 1330, 1356.
38. Raich, Arch. Warmewirtsch. Bd. 10 (1929) S. 369.
39. Schmidt u. Gehlhoff, Glastechn. Ber. Bd. 8 (1930) Heft 4 S. 206/28.
40. Pirani u. Wangenheim, Z. techn. Physik Bd. 10 (1929) S. 413.

41. Paschkis, Arch. Wärmewirtsch. Bd. 12 (1931) S. 9.
42. Norton, J. Amer. ceram. Soc. Bd. 8 (1925) S. 29.
43. Phillips, Tonind. Ztg. Bd. 54 (1930) S. 54 u. 75.
44. Steinhoff, Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 8 (1927) S. 137.
45. Schmidt, E., Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 71 (1927) S. 1395.
46. Cammerer, Hauszeitschrift d. V. A. W. u. d. Erftwerk AG. f. Aluminium Bd. 1 (1929) S. 221.
47. Guttmann A., Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 97.
48. Böhlender, Wärme Bd. 52 (1929) S. 492.
49. Günther, Feuerungstechn. Bd. 18 (1930) S. 194.
50. Steinhoff, Ber. Nr. 96 des Werkstoffaussch. Ver. dtsh. Eisenhüttenl.
51. Cammerer, Die Feuerung mit Sonderteil Industrieöfen Bd. 7 (1931) S. 1.
52. Paschkis, Giesserei Bd. 16 (1929) S. 693.
53. Walger u. Lorenz, F. R., Z. techn. Physik Bd. 11 (1930) S. 242.
54. Paschkis, Arch. Eisenhüttw. Bd. 2 (1928/1929) S. 487.
55. Paschkis, Elektr.-Wirtsch. Bd. 29 (1930) S. 474.
56. Paschkis, Elektrowärme Bd. 2 (1932) S. 54.
57. King M. F., Blast Furn. Steel Plant Bd. 14 (1926) S. 181.
58. Masukowitz, Z. Metallkde. Bd. 23 (1931) S. 306 u. 335.
59. Zepernick, Elektrowärme Bd. 1 (1931) S. 43.
60. Bulle u. Flössel, Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 865 u. 903.
61. Nathusius, Stahl u. Eisen Bd. 48 (1928) S. 694.
62. Brooke, Iron Trade Rev. Bd. 73 S. 111; Ref. Stahl u. Eisen Bd. 45 (1925) S. 193.
63. Tama, Z. Metallkde. Bd. 21 (1929) S. 77.
64. Tamele, Siemens-Z. 1928 S. 162 u. 266.
65. Tamele, Siemens-Z. 1929 S. 101.
66. Schmidt, E., AEG-Mitt. 1931 S. 638.
67. Werkst.-Techn. Bd. 24 (1930) S. 641.
68. Berwig u. Tamele, Siemens-Z. 1929 S. 765.
69. James u. Coley, Electr. Wld., N. Y. Bd. 97 (1931) S. 1057.
70. J. Four électr. Bd. 38 (1929) S. 189.
71. Paschkis, Mbl. Berlin. Bez.-Ver. dtsh. Ing. 1931 S. 49.
72. Aschmann, Keram. Rdsch. 1930 S. 171.
73. Paschkis, Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 1685.
74. Tamele, Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 75 (1931) S. 383.
75. Iron Age Bd. 124 (1929) S. 1581.
76. Schau, Siemens-Z. 1931 Heft 4.
77. Tamele, Glastechn. Ber. Bd. 6 (1928) S. 225.
78. Iron Age Bd. 124 (1929) S. 353.
79. Rohn, Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 68 (1924) S. 1101.
80. Rohn, Z. Ver. dtsh. Ing. Bd. 69 (1925) S. 1434.
81. BBC Nachr. Bd. 16 (1929) S. 162.
82. N. E. L. A. Publ. 141 (Juni 1931).
83. Cunningham, Iron Age Bd. 128 (1931) S. 112.
84. Fry, Kruppsche Mh. Bd. 7 (1926) S. 17 u. 179.
85. Brühl, Kruppsche Mh. Bd. 11 (1930) S. 287.
86. Fuels & Furn. Bd. 9 (1931) S. 609.
87. Iron Age Bd. 127 (1931) S. 1908.
88. Ruse, Metallwirtsch. Bd. 10 (1931) S. 495 u. 513.
89. Tour, Fuels & Furn. Bd. 8 (1930) H. 9.
90. Rapatz, Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 251.
91. Kjermaun, Jernkont. Ann. Bd. 112 (1928) S. 595. Ref. v. H. Petersen: Stahl u. Eisen Bd. 49 (1929) S. 773.
92. Perrin u. Sorrel, J. Four électr. Bd. 40 (1931) S. 168.
93. Perrin u. Sorrel, Usine 15. 5. 31 S. 29. Ref. Giesserei Bd. 18 (1931) S. 490

УКАЗАТЕЛЬ КНИГ

1. Kraus F., Die Grundgesetze der Wärmeleitung und ihre Anwendung auf plattenförmige Körper. Berlin: Julius Springer 1917.
2. Gröber H., Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeübergangs. Berlin Julius Springer 1921.
3. Gröber H., Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung. Berlin: Julius Springer 1926.
4. Schmidt E., August Föppl-Denkschrift S. 179. Berlin: Julius Springer 1924.
5. Hütte, Des Ingenieurs Taschenbuch Bd. 1 25. Aufl. Berlin: Wilhelm Ernst.
6. Paschkis V., Fachberichte 1931 des VDE; (Frankfurt/Main) S. 166. Berlin-VDE Verlag 1931.
7. Cammerer I. S., Der Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. Berlin: Julius Springer 1928.
8. Grünzweig u. Hartmann, Wärme- und Kälteverluste isolierter Rohrleitungen und Wände. Berlin: Julius Springer 1928.
9. Cammerer I. S., Mitteilungen des Forschungsheims für Wärmeschutz, Heft 2, 2. Auflage, S. 1. München 1928.
10. Cammerer I. S., Wirtschaftlichste Isolierstärke bei Wärme- und Kälteschutzanlagen und Wärmeabgabe isolierter Rohre bei unterbrochener Betriebsweise. Berlin: Industrieverlag Hermanns, AG.
11. Hütte, Taschenbuch f. Eisenhüttenleute. Berlin: Wilhelm Ernst 1930, 4. Aufl. S. 794 ff.
12. Rohn W., Festschrift z. 70. Geb. DrDr. W. Heraeus. S. 80. Hanau: Bruno Claus 1930.
13. Geiger-Scheel, Handb. Physik Bd. 10. Berlin: Julius Springer 1936.
14. Hiemenz H., Festschrift z. 70. Geb. DrDr. W. Heraeus. Hanau: S. 68. Bruno Claus 1930.
15. Gruber H., Festschrift z. 70. Geb. DrDr. W. Heraeus. Hanau: S. 45. Bruno Claus 1930.
16. Singer, Die Keramik im Dienst von Industrie und Volkswirtschaft. Braunschweig: Vieweg 1923.
17. Lunge-Berl, Chemisch-technische Untersuchungsmethoden Bd. 2 (1922) S. 764.
18. Cammerer J. S., Mitteilungen des Forschungsheims f. Wärmeschutz Heft 4, 2. Auflage, S. 5. München 1925.
19. Esser, Salmang, Schmidt-Ernsthäusen, Zur Kenntnis der Wärmeübertragung durch feuerfeste Baustoffe. Coburg: Verlag der Sprechsaal, Müller-Schmidt 1930, ausführlich besprochen in Stahl u. Eisen Bd. 61 (1931) S. 860.
20. Schmidt E., Mitteilungen des Forschungsheims f. Wärmeschutz Heft 5 S. 7. München 1924.
21. Kohlrusch F., Lehrbuch der praktischen Physik. Leipzig und Berlin: Teubner 1930.
22. Gramberg A., Technische Messungen. Berlin: Julius Springer 1923.
23. Knoblauch O., u. Hencky K., Anleitung zu genauen technischen Temperaturmessungen, München u. Berlin: Oldenbourg 1926.
24. Keimath G., Elektrische Temperaturmessgeräte. München u. Berlin: Oldenbourg 1924.
25. Trinks J. W., Industrieöfen Bd. 2. Berlin: VDI-Verlag 1931.
26. Raisch E., u. Schropp K., Mitteilung des Forschungsheims für Wärmeschutz Heft 8. München 1930.
27. Nathusius H., Fachberichte 1931 d. VDE (Frankfurt/Main) S. 174. Berlin. VDE. Verlag 1931.

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	3
Введение	7
I. Классификация электропечей	7
II. Основные части электропечей	9

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

I. Расчет	10
A. Общая схема расчета (для всех электрических промышленных печей)	10
B. Расчет печей сопротивления	16
1. Время нагрева	16
a) время нагрева без учета температурных потерь при загрузке изделий в печь	18
b) Время нагрева с учетом температурных потерь при загрузке изделий в печь	23
c) Влияние коэффициента теплопередачи и других величин, встречающихся в уравнениях, на время нагрева	24
d) Практическое применение формул и диаграмм	35
2. Размер и количество печей	39
3. Полезное тепло	41
4. Потери тепла	44
a) Потери при непрерывной работе печи (потери холостого хода)	47
b) Расчет теплосодержания	66
c) Потери при периодической работе печи	67
d) О наиболее экономичной толщине изоляции	68
5. Нагревающие элементы (сопротивления)	72
a) Установленная (номинальная) мощность	72
b) Типы нагревательных элементов	73
c) Определение размеров нагревательных элементов	74
6. Некоторые специальные случаи	90
a) Конвейерные печи	90
b) Эмалировочные печи	98
II. Включение и регулировка	100
1. Способы уменьшения потребляемой мощности	100
a) Изменение продолжительности включения	100
b) Изменение расхода тока	101
2. Точность регулировки	101
a) Истинная и кажущаяся разность регулировки	106
b) Нечувствительность регулятора (передаточного устройства)	106
c) Характеристика и кривая нарастания температуры	108
d) Определение разности регулировки	109
e) Замедление	111
f) Печи с косвенным управлением	111
g) Печи с наружным нагревом полезного объема (муфеля наружного нагрева)	113
g) Печи с наружным нагревом полезного объема (муфеля наружного нагрева)	115
3. Способы включения регуляторов	117

III. Строительные материалы для печей	117
A. Металлические строительные материалы	121
1. Обзор строительных материалов	121
2. Свойства материалов и их испытание	123
a) Устойчивость (неокисляемость) в атмосфере печи при рабочей температуре	123
b) Устойчивость по отношению к соприкасающимся материалам	126
c) Механическая прочность	127
d) Нечувствительность материала к грубому обращению	130
e) Минимальное старение материалов	131
f) Легкая обрабатываемость	131
g) Коэффициент теплового расширения	131
h) Удельное электросопротивление	132
i) Температурный коэффициент электросопротивления, равный нулю или положительный	133
k) Легкость изготовления	133
B. Неметаллические нагревательные элементы	134
a и b) Устойчивость по отношению к атмосфере печи и к опорным материалам при рабочей температуре	134
c) Механическая прочность	134
d) Нечувствительность к грубому обращению	135
e) Минимальное старение	135
f) Легкая обрабатываемость	135
g) Малый коэффициент теплового расширения	135
h) Удельное сопротивление	136
i) Температурный коэффициент сопротивления	136
k) Легкое изготовление	136
C. Керамические строительные материалы	137
1. Основные свойства керамических строительных материалов, их влияние на конструкцию печей, их испытание	137
a) Механические свойства	137
b) Теплотехнические свойства	142
c) Химические свойства	145
d) Электрические свойства	145
2. Обзор керамических строительных материалов	146
a) Огнеупоры	146
b) Полуогнеупоры и теплоизоляционные материалы	147
c) Электроизоляционные строительные материалы	153
V. Некоторые способы измерений, принятые в печной технике	153
1. Непосредственное определение полезного тепла	154
2. Исследование разогрева печи и потерь холостого хода	155
3. Анализ потерь холостого хода	157
4. Тепловой баланс печей с тепловым равновесием, зависящим от производительности	158
5. Измерение температуры	161
6. Исследование равномерности распределения температуры	162

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

КОНСТРУКЦИИ ПЕЧЕЙ

Детали печей	163
A. Нагревательные элементы	163
1. Металлические нагревательные элементы	164
a) Свободно излучающие элементы	164
b) Утопленные нагревательные элементы	166
c) Смена нагревательных элементов	172
2. Неметаллические нагревательные элементы	175
B. Стенки печей	179
1. Печи низкой температуры	180
a) Стенки и свод	180

b) Дверцы	181
2. Печи средней температуры	182
a) Стенки	182
b) Свод	183
c) Дверцы	187
3. Печи высокой температуры	191
C. Приспособления для обслуживания печей (загрузочные и транспортные устройства)	191
1. Приспособления, работающие вне печи	192
2. Загрузочные приспособления, постоянно находящиеся в печи	193
a) Под с казующимися секциями	193
b) Роликовый под	195
c) Печи с вращающимся подом	196
d) Барабанные печи	197
e) Ленточный транспортер (не выходящий из печи)	198
f) Сравнение загрузочных и транспортных приспособлений, постоянно находящихся в печи	199
3. Приспособления, находящиеся в печи короткое время	200
a) Загрузочные вилки	200
b) Тележки с подъемными платформами	200
c) Загрузочная грейферная машина	201
d) Сравнение приспособлений этой группы	202
4. Приспособления, находящиеся в печи одинаковое с изделиями время	202
a) Цепные транспортеры	202
b) Тележки	204
c) Подвесные дорожки	205
5. Приспособления смешанного типа	209
6. Сравнение различных загрузочных и транспортных печных приспособлений	206
D. Устройства для контроля и регулировки	208
1. Измерение и регулировка температуры	208
a) Контрольные и передаточные устройства	208
b) Переключающие устройства	217
2. Распределительные устройства	222
II. Описание печей разных типов	222
A. Печи низкой температуры	222
1. Печи для нагрева и отпуса	222
a) Печи с периодической загрузкой	222
b) Печи непрерывного действия	225
2. Сушила	227
a) Печи с периодической загрузкой	227
b) Непрерывно действующие сушила	229
B. Ванны	232
C. Печи для средних температур	237
1. Печи с естественной атмосферой	237
a) Печи с имеющими загрузочными и транспортными приспособлениями	237
b) Печи со специальными загрузочными и транспортными приспособлениями	246
2. Печи с искусственной атмосферой	257
a) Печи для светлого отжига	257
b) Печи для азотирования	266
c) Печи для пайки медью	267
d) Цементация газообразными карбуризаторами	268
3. Протяжные печи	268
D. Печи высокой температуры	272
1. Кузнечная печь	272
2. Печи с искусственной атмосферой	274
3. Соляные ванны непосредственного нагрева	274
E. Индукционные промышленные печи	278
F. Выбор печей	280

Послесловие	281
1. Пути дальнейшего развития существующих конструкций	281
а) Повышение экономичности	281
б) Повышение надежности в работе	283
в) Прочие усовершенствования	284
2. Завоевание новых областей применения	284
Указатель периодической литературы	288
Указатель книг	290

КНИГОСБЫТ ОНТИ

**ИМЕЕТ НА СВОИХ СКЛАДАХ И В МАГАЗИНАХ ИЗДАНИЯ
ОНТИ-ГНТИУ НА РУССКОМ И УКРАИНСКОМ ЯЗЫКАХ
ПО СЛЕДУЮЩИМ ВОПРОСАМ:**

Технико-теоретическая литература

(Математика, физика, механика, астрономия).

Энергетика

(Теплотехника, электротехника, гидротехника).

Машиностроение и металлообработка

(Теоретические вопросы; испытание материалов; машиностроение, тракторостроение; конструкция, расчет, использование станков, технология металлов, инструментальное, слесарное, кузнечное дело).

Металлургия

(Металловедение, металлургия чугуна, стали; ферросплавы, чугунолитейное дело, прокатка и волочение).

Горно-рудное дело

(Уголь, торф, руда; проходка шахт; эксплуатация месторождений; механизация горных работ; обогащение).

Строительное дело

(Стройматериалы, конструкции, основания и фундаменты, строительная механика, санитарная техника, водоснабжение).

Кокс и Химия

(Неорганическая, органическая, коллоидная, аналитическая химия; основная химическая промышленность; коксохимическая промышленность).

Транспорт

(Железнодорожный и безрельсовый транспорт-эксплуатация, ремонт, постройка дорог).

Связь

(Телеграф, телефон-эксплуатация, ремонт; линейные сооружения; радиотехника).

ЗАКАЗЫ НАПРАВЛЯТЬ В МЕСТНЫЕ ОТДЕЛЕНИЯ КНИГОСБЫТА ОНТИ

Киев, ул. Свердлова, № 2/9.

Харьков, Купеческий спуск № 5.

Сталино, 4-ая линия, № 83.

Днепропетровск, Проспект К. Маркса, № 49/51.

Одесса, ул. 10-лет. Красной Армии, № 23.