



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Издательство МИСИ – МГСУ

ТЕПЛОВЫЕ АГРЕГАТЫ И УСТАНОВКИ

Рекомендовано

*Учебно-методическим советом НИУ МГСУ в качестве учебного пособия
для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство*

ISBN 978-5-7264-2178-0

© Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет, 2020

Москва
2020

УДК 621.1
ББК 31.36
Т34

Авторы:

О.Ю. Баженова, С.И. Баженова, Д.А. Зорин, И.В. Козлова, К.С. Стенечкина

Рецензенты:

кандидат технических наук *И.В. Бессонов*,
главный научный сотрудник НИИСФ РААСН,
руководитель испытательного центра «Стройфизика-ТЕСТ»;
кандидат технических наук *М.Г. Бруяко*,
доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов НИУ МГСУ

Т34 **Тепловые агрегаты и установки** [Электронный ресурс] : [учебное пособие для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство] / [О.Ю. Баженова и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра технологии вяжущих веществ и бетонов. — Электрон. дан. и прогр. (3,3 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. — Режим доступа: <http://lib.mgsu.ru/>. — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7264-2178-0 (сетевое)

ISBN 978-5-7264-2177-3 (локальное)

В учебном пособии представлены основные схемы, дано описание конструкций и принципов работы тепловых агрегатов для тепловлажностной обработки бетона и сушки строительных материалов, а также приведены расчеты параметров установок и их тепловые балансы.

Для обучающихся бакалавриата по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, профиль подготовки «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций».

Учебное электронное издание

© Национальный исследовательский
Московский государственный
строительный университет, 2020

Редактор, корректор *М.Ю. Ледовский*
Компьютерная верстка *О.В. Суховой*
Дизайн первого титульного экрана *Д.Л. Разумного*

Для создания электронного издания использовано:
Microsoft Word 2010, ПО Adobe Acrobat

Подписано к использованию 25.03.2020. Объем данных 3,3 Мб,

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет»
129337, Москва, Ярославское ш., 26

Издательство МИСИ – МГСУ
Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75, (499) 183-97-95
E-mail: ric@mgsu.ru, rio@mgsu.ru

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
1. УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА.....	6
1.1. Ямная пропарочная камера	6
1.2. Кассетная установка	7
1.3. Пакетная установка.....	8
1.4. Щелевая пропарочная камера.....	9
1.5. Вертикальная пропарочная камера	11
2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР	13
2.1. Ямная камера.....	13
2.2. Кассетная установка	14
2.3. Щелевая камера непрерывного действия	15
2.4. Вертикальная камера	17
3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР	19
3.1. Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры (теплоноситель — влажный пар) ...	21
3.2. Тепловой баланс напольной рециркуляционной ямной камеры (теплоноситель — продукты сгорания природного газа)	28
3.3. Тепловой баланс напольной щелевой камеры при установившемся режиме работы (теплоноситель — влажный пар)	33
3.4. Тепловой баланс напольной щелевой рециркуляционной камеры (теплоноситель — продукты сгорания природного газа)	37
3.5. Тепловой баланс кассетной установки (теплоноситель — влажный пар)	41
3.6. Тепловой баланс пакета термоформ (теплоноситель — влажный пар)	45
3.7. Тепловой баланс вертикальной камеры непрерывного действия (теплоноситель — влажный пар)	48
4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЛЯ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР	53
4.1. Расчет и подбор диаметров паропроводов, отверстий дроссельных диафрагм	53
4.2. Расчет вентиляторов для охлаждения изделий в камере	53
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ АВТОКЛАВА.....	56
5.1. Автоклавные установки	56
5.2. Выбор автоклава и автоклавных вагонеток. Определение размеров и массы форм.....	58
5.3. Определение толщины, площади и массы ограждающих конструкций автоклава	60
5.4. Определение температуры на границе слоев ограждающих конструкций автоклава и средней температуры в слоях	62
5.5. Тепловой баланс автоклава	63
6. АГРЕГАТЫ ДЛЯ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ.....	68
6.1. Барабанные сушилки	68
6.2. Камерные сушилки	70
6.3. Туннельные сушильные камеры	71
7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ	72
7.1. Сушильный барабан	72
7.2. Камерная сушилка с полками	73
7.3. Камерная сушилка с вагонетками	74
7.4. Туннельная сушильная камера	76
8. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ	78
8.1. Теплотехнический расчет камерной сушилки с однократным использованием сушильного агента.....	78
8.2. Теплотехнический расчет туннельного сушила	84
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	89
Приложения.....	91

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие написано в соответствии с направлением подготовки 08.03.01 Строительство и рассчитано на студентов бакалавриата по профилю подготовки «Производство и применение строительных материалов, изделий и конструкций».

Создание и усовершенствование прогрессивных технологий производства строительных материалов и изделий путем оптимизации материальных и энергетических затрат по-прежнему являются важными задачами, без решения которых невозможно развитие самых разных отраслей экономики.

При производстве строительных изделий, деталей и материалов почти всегда для перевода сырья в новое качество — готовую продукцию — применяют тепловую обработку. В большинстве случаев тепловая обработка дает возможность придать сырью новые, качественно другие свойства, необходимые в строительстве. Это происходит за счет физических и физико-химических превращений в обрабатываемом материале, течение которых зависит от воздействия тепла.

Известно, что около трети от стоимости строительных материалов составляют затраты на их тепловую обработку, которая потребляет почти четыре пятых всех топливно-энергетических ресурсов, идущих на получение материала.

Вопросам, возникавшим при рассмотрении различных аспектов работы тепловых установок, уделяли внимание (и проводили соответствующие научные изыскания) такие выдающиеся ученые, как М.В. Ломоносов, В.Е. Грум-Гржимайло, Д.И. Менделеев, М.В. Кирпичёв, а исследовательские коллективы ряда НИИ совместно с сотрудниками проектных организаций создали и внедрили в промышленность тепловые установки с высокой производительностью.

При производстве бетонных и железобетонных изделий важную роль играет тепловлажностная обработка, а поскольку она непосредственно влияет на все технологические этапы структурообразования, это сказывается на качестве готового изделия. Данные зависимости были отмечены в работах Ю.М. Баженова.

Основные положения тепловлажностной обработки в технологии бетона и производстве строительных материалов были сформулированы А.В. Волженским, С.А. Мироновым, Н.Б. Марьямовым и др. На развитие науки о сушильных процессах, а следовательно, и на проектирование необходимого оборудования большое влияние оказали работы А.П. Ворошилова, М.И. Лурье, М.Ф. Казанского, П.Г. Романкова и А.В. Лыкова. Процессы, проходящие в материалах при обжиге, описаны в трудах Д.С. Белянкина, П.Г. Будникова, К.А. Нохратяна, О.П. Мчедлова-Петросяна.

Накопленные знания о тесной взаимосвязи тепловых процессов в установках с процессами, происходящими в материалах, обширный экспериментальный материал, обобщенный на основе законов физики, химии и математики, создают основу для перехода к созданию моделей этих взаимосвязанных процессов и, следовательно, к решению конкретных задач по оптимизации тепловой обработки.

В учебном пособии «Тепловые агрегаты и установки» описываются конструкции и принципы работы тепловых установок и рассматриваются технологические и теплотехнические расчеты тепловых агрегатов. Это дает возможность обучающемуся ознакомиться с теоретическими основами и получить необходимые знания для проектирования и анализа работы современных, наиболее экономичных автоматизированных тепловых агрегатов в производстве строительных материалов и изделий.

1. УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

Установки для тепловлажностной обработки (ТВО) предназначены для ускоренного твердения изделий. В зависимости от технологической схемы производства, объема и типа выпускаемых изделий применяется та или иная тепловая установка. При поточно-агрегатном способе изготовления изделий с использованием в качестве теплоносителя пара применяются установки периодического действия (ямные камеры, кассетные установки, термоформы и др.), а при использовании продуктов сгорания природного газа — рециркуляционные ямные камеры.

На заводах, работающих по конвейерной технологической схеме производства, тепловлажностная обработка железобетонных изделий производится в установках непрерывного действия (щелевая камера, вертикальная камера непрерывного действия и др.).

1.1. Ямная пропарочная камера

В зависимости от условий эксплуатации, уровня грунтовых вод ямную камеру либо заглубляют в землю так, чтобы ее края для удобства эксплуатации возвышались над полом цеха не более чем на 0,6–0,7 м, либо устанавливают на уровне пола. В этом случае для обслуживания устраивают специальные площадки.

Камеры, которые изготавливают из железобетона (рис. 1), имеют прямоугольную форму, их стены снабжают теплоизоляцией 17 для снижения уровня потерь теплоты. Пол камеры 1 делают с уклоном для стока конденсата. Для вывода конденсата в полу предусмотрен трап 2. В прямке трапа, куда стекает конденсат, делают конденсатоотводящее устройство 3 — чаще всего ставят водоотделительную петлю.

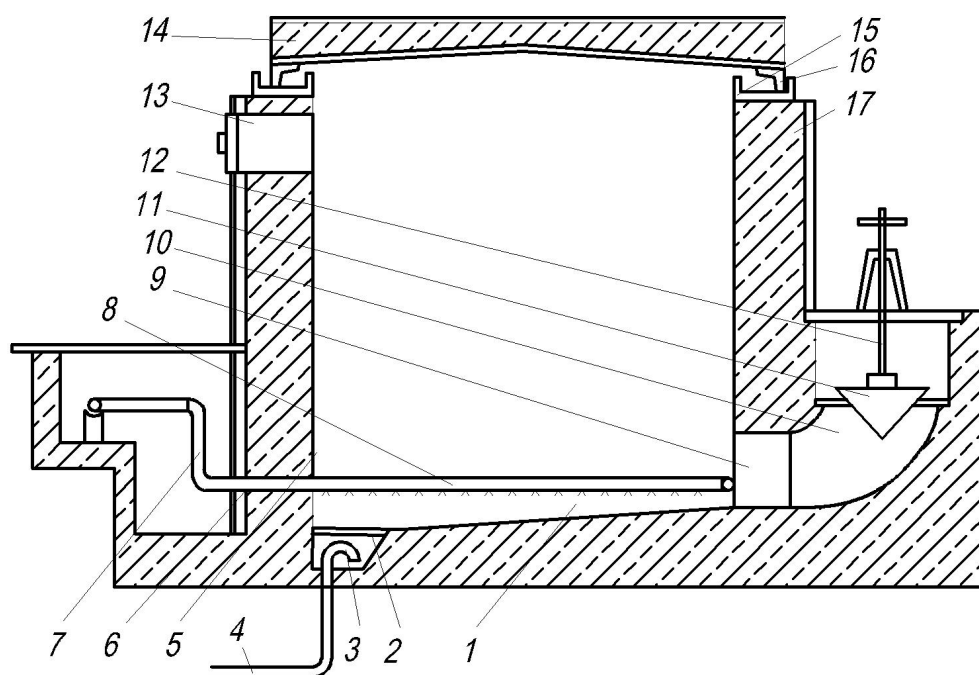


Рис. 1. Схема пропарочной камеры ямного типа:

1 — пол камеры; 2 — трап для вывода конденсата; 3 — конденсатоотводящее устройство; 4 — система отвода конденсата; 5 — стены камеры; 6 — отверстие для ввода пара; 7 — трубопровод; 8 — трубы с отверстиями; 9 — отверстие для вентиляции; 10 — канал; 11 — герметизирующий конус; 12 — червячный винт; 13 — приточный затвор; 14 — крышка; 15 — водяной затвор; 16 — упоры крышки; 17 — теплоизоляция

Назначение конденсатоотводящего устройства — выпускать конденсат в систему отвода конденсата 4 и не пропускать пар. Стены камеры 5 имеют отверстие 6 для ввода пара, который подается в низ камеры по трубопроводу 7 от сети. Трубопровод заканчивается уложенными по периметру камеры трубами 8 с отверстиями — перфорациями, через которые пар поступает в камеру. Кроме отверстия для ввода пара, в стене камеры делают отверстие 9 для вентиляции в период охлаждения. Оно соединяется каналом 10 с вентилятором, который отбирает паровоздушную смесь

из камеры. Для изоляции камеры во время подогрева и изотермической выдержки от системы вентиляции устраивают герметизирующий конус 11, который с помощью червячного винта 12, снабженного маховиком, может подниматься и опускаться. При поднятом конусе происходит вентиляция, при опущенном камера надежно изолирована от этой системы. Кроме герметизирующего конуса, в этих же целях могут применяться различные затворы.

В камеру с помощью направляющих, в качестве которых используют опорные стойки, краном загружают изделия в формах. Каждая форма изолируется от следующей прокладками из металла, чтобы пар обогревал формы со всех сторон. Высота камеры достигает 2,5–3 м, ширину и длину обычно выбирают с учетом размещения в камере двух штабелей изделий в формах. Между штабелями изделий и между штабелем и стенками камеры устраивают зазоры, чтобы обеспечить захват изделий автоматическими траверсами при загрузке и разгрузке камеры.

После загрузки камера закрывается крышкой 14, представляющей собой металлический каркас, заполненный теплоизоляционным материалом. Низ и верх крышки изолируют металлическим листом. Крышку, как и пол, делают с уклоном $i = 0,005–0,01$ для стока конденсата. Для герметизации крышки служит водяной затвор.

Работа камеры заключается в следующем. После разгрузки ее чистят и проверяют работу вентиляцией подачи пара, а также надежно ли закрывается герметизирующий конус. После проверки камеру загружают изделиями, закрывают крышкой и включают подачу пара. Пар, поступая снизу в камеру, где находится воздух, поднимается вверх, смешивается с воздухом и нагревает его, образуя паровоздушную смесь. Одновременно пар конденсируется на изделиях, стенах, крышке, нагревает их, а сам в виде конденсата стекает в конденсатоотборное устройство.

Далее изделия выдерживают в камере при достигнутой температуре, при этом в материале продолжают химические реакции и структурообразование, а также снимается напряженное состояние. При изотермическом прогреве, как только температура в камере достигает максимальной, количество подаваемого пара уменьшают, ибо потребность в нем снижается. После изотермической выдержки начинают охлаждение. Для этого отключают подачу пара, поднимают конус и соединяют вентиляционный канал камеры с вентиляционной системой. Пар из камеры и с поверхности материала вместе с воздухом удаляется в вентиляционную сеть, а крышка камеры начинает пропускать воздух из цеха благодаря испарению влаги из швеллера в камеру. Кроме того, в камерах, в стенке, противоположной каналу 10, выводящему паровоздушную смесь, иногда устраивают приточный затвор 13 для впуска воздуха в камеру во время охлаждения. Увеличивая или уменьшая отбор паровоздушной смеси через канал 10, изменяют темп охлаждения продукции.

Ямная камера работает по циклу порядка 12–15 часов. Он включает в себя время на загрузку, на разогрев изделий, на изотермическую выдержку и охлаждение, а также на выгрузку материала. Удельный расход пара в таких камерах 200–300 кг/м³ бетона.

1.2. Кассетная установка

Эти установки применяются для формирования и тепловлажностной обработки панелей, плит, лестничных маршей и некоторых других изделий. Как формирование, так и тепловлажностная обработка осуществляется в кассетах в вертикальном положении. Масса сформованного бетона находится в кассете в замкнутом пространстве, что способствует более интенсивной тепловлажностной обработке. Форма-кассета (рис. 2) состоит из ряда отсеков, образованных стальными вертикальными стенками, причем отсеки, используемые для формирования бетона, чередуются с отсеками для пара (паровая рубашка). Крайние отсеки теплоизолируют. Бетон подают в отсеки 4 и после уплотнения подвергают тепловой обработке. Для тепловой обработки пар подают в отсеки 2 и прогревают с двух сторон сразу два изделия, разделенные стальной перегородкой 3.

Тепловлажностная обработка состоит из двух этапов: первый — прогрев, второй — изотермическая выдержка, после чего кассету разбирают, а изделия распалубливают. В кассетах изделия не охлаждают. Время тепловой обработки бетона в кассетах составляет 6–8 ч, поэтому выгружают изделия с прочностью 50–60 % проектной. Отправлять такие изделия на стройку невозможно, однако дальнейшая выдержка в кассетах приводит к снижению их оборачиваемости. Поэтому распалубливаемые изделия ставят в специальную яму-камеру вертикально, вплотную друг к другу. При

этом изделия охлаждаются очень медленно и продолжают в течение 15–18 ч добирать прочность. К концу такого добора они имеют такие же параметры, как и изделия, выгружаемые из ямных камер, и, согласно принятым нормам, могут быть отправлены на строительные площадки.

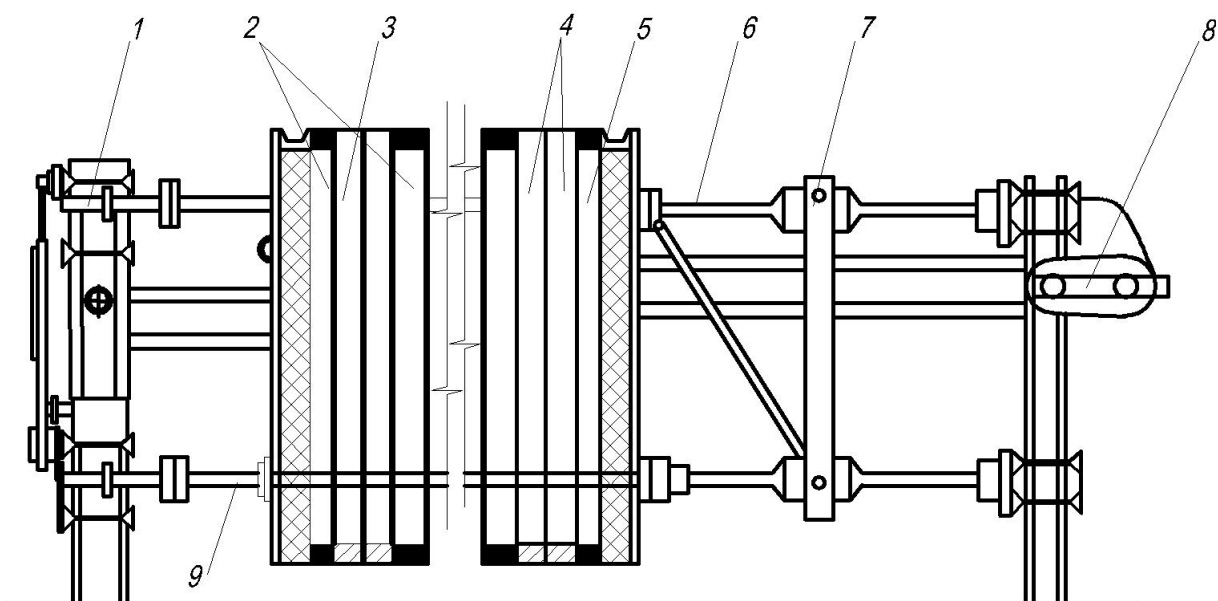


Рис. 2. Схема кассетной установки:

1 — станина; 2 — отсеки для подачи пара; 3 — разделительная стенка; 4 — отсеки для формования изделий; 5 — теплоизолирующие стенки; 6 — фиксирующие упоры; 7 — механизм сжатия; 8 — приводной механизм; 9 — упорный дожимной винт

Прогрев изделий через стенку в кассетах паром из-за большого расслоения температур по высоте в 30–40 °С затруднен, поэтому применяют эжекторное пароснабжение кассетных установок. Это дает возможность сократить расхождение между температурами верха и низа кассет до 5–7 °С, что вполне приемлемо для тепловлажностной обработки.

Обогревают изделия в кассетах через металлическую разделительную стенку, верх изделия на время тепловой обработки изолируют. Таким образом массообмена между теплоносителем и материалом и материалом и окружающей средой практически не происходит. Поэтому с теоретической точки зрения такой прогрев может быть отнесен к прогреву в закрытой форме.

Нагреть тепловые отсеки кассет по тем же причинам можно любыми источниками тепла. Так, в промышленности, кроме пара, можно применять обогрев горячим воздухом или дымовыми газами, высококипящими жидкостями, масляным теплоносителем и электронагревателями. Наиболее выгоден и прост в исполнении электрообогрев. В этом случае в паровые отсеки вместо подачи пара монтируют ТЭНы или любые другие электронагреватели и уже ими через стенку нагревают бетон. При любом способе изделия из бетона нагревают до 80–90 °С в течение 1,5–2 ч и далее выдерживают при этой температуре 4–6 ч. Расход в кассетах пара или любого другого источника теплоты в пересчете на теплоту, выделяемую паром, составляет 150–250 кг на 1 м³ бетона.

1.3. Пакетная установка

Для бескамерной тепловой обработки бетона наиболее широко применяют пакеты, установленные в штабель на специальном устройстве — пакетировщике (рис. 3). Он состоит из подъемного стола-траверсы 1, четырех гидродомкратов 2, направляющих колонн 3 и четырех упоров-отсекателей 4.

Работа пакетировщика заключается в следующем. На стол-траверсу ставят термоформу со сформованным изделием 7, готовую к тепловой обработке. Включают гидродомкраты и поднимают стол-траверсу немного выше упоров-отсекателей, которые во время прохождения формы утапливаются. После того как форма поднялась вверх, упоры-отсекатели под действием эксцентрично приложенной силы собственной массы возвращаются в нормальное положение. Далее стол опускается, а форма с изделием остается на упорах и подключается к системе пароснабжения. Следующая фор-

ма с изделием поднимается аналогичным образом, только форма, стоящая на упорах, оказывается над уже поднятой. Пакетировщик рассчитан на одновременную обработку шести форм.

Термоформу пакетировщика переоборудуют из обычной, жесткой стальной формы посредством приварки к каркасу поддона формы стального листа. Образующуюся под формой полость используют как нагревательный отсек. В нее подают пар и из нее отбирают конденсат.

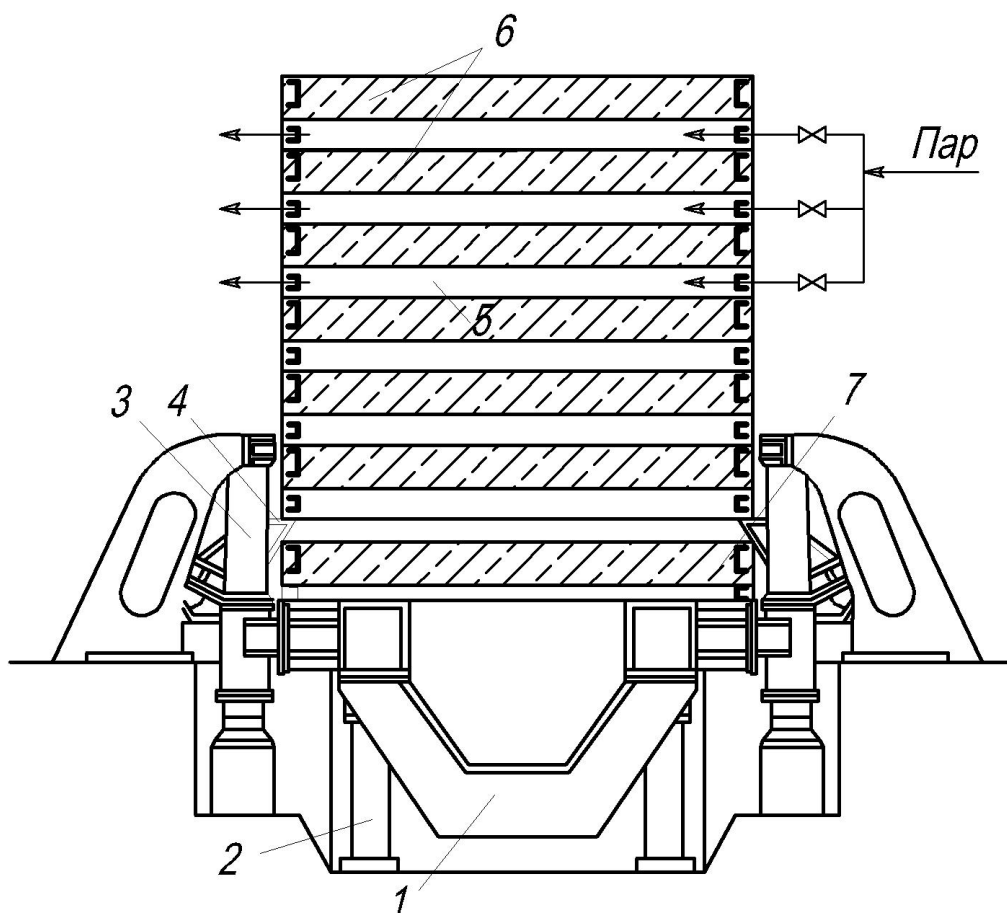


Рис. 3. Схема пакетировщика:

1 — подъемный стол-траверса; 2 — гидродомкраты; 3 — направляющие колонны; 4 — упоры-отсекатели; 5 — паровые отсеки форм; 6 — нагреваемые изделия; 7 — изделие в форме, подготовленное к загрузке

Тепловую обработку изделий проводят без предварительной выдержки. Каждое изделие, кроме верхнего, обогревается с двух сторон. Чтобы обеспечить оптимальные режимы тепловой обработки, на пакетировщике устанавливают регулятор программного регулирования температуры. Температуру поднимают до 90–95 °С за 2 ч. Однако прогрев изделий в таких формах неравномерен. В местах, удаленных от подачи пара, температура бетона в течение первых 2–3 ч меньше на 30–40 °С. Поэтому прочность на сжатие изделий, прошедших тепловую обработку в пакетировщиках, в разных точках бывает разной.

Для нагрева в пакетных установках применяют пока только пар. Наиболее выгоден и целесообразен переход на эжекционное пароснабжение с рециркуляцией части паровоздушной смеси, применяемое для нагрева кассетных установок. Расход пара на обогрев термоформ составляет 200–300 кг на 1 м³ бетона.

1.4. Щелевая пропарочная камера

В конвейерной технологии производства сборного железобетона в сочетании с вертикально-, наклонно- и горизонтально-замкнутыми тележечными конвейерами применяют одно- или многоярусные горизонтальные камеры тепловой обработки. Изделия, находящиеся на поддонах-вагонетках, проходят тепловлажностную обработку в камерах, расположенных параллельно формовочному кон-

вейеру на уровне пола цеха, ниже или выше его, а подаются в камеру соответственно передаточной тележкой, снижателем или подъемником. Изделия, прошедшие обработку в горизонтальных камерах непрерывного действия, отличаются равномерностью обработки. Камеры по длине разделены на три следующие зоны: нагрева, изотермического выдерживания и охлаждения.

Горизонтальная щелевая пропарочная камера представляет собой туннель длиной 80–100 м. Ширина его проектируется в расчете на движение через него одного-двух изделий, загружаемых в один ряд на каждой форме-вагонетке, и составляет 5–7 м; высота туннеля 1–1,5 м. В зависимости от длины камеры в ней размещается 12–25 вагонеток с изделиями.

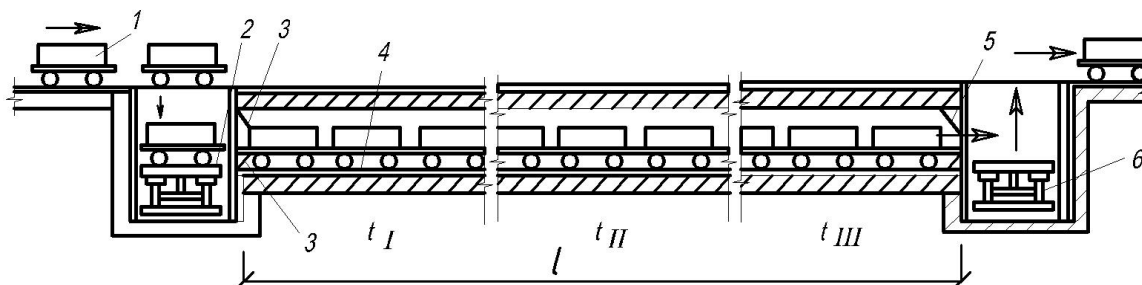


Рис. 4. Схема горизонтальной щелевой пропарочной камеры:

1 — форма-вагонетка; 2 — снижатель; 3 — механическая штора; 4 — камера; 5 — герметизирующая штора; 6 — подъемник

Горизонтальная щелевая пропарочная камера работает по следующему принципу (рис. 4). Форма-вагонетка с отформованным изделием поступает на снижатель, который опускает ее на уровень рельс, проложенных в камере. Камера в целях уменьшения площади цеха, занятой под технологический процесс, заглублена в землю. Снижатель оборудован толкателем вагонетки в камеру. Вагонетка проходит под механической шторой и проталкивает весь поезд вагонеток по камере на одну позицию. Вагонетка, находившаяся на последней позиции, поднимает герметизирующую штору и выкатывается на подъемник, который поднимает вагонетку с готовой продукцией на уровень пола цеха и скатывает ее на рельсовый путь. Загрузка и выгрузка вагонеток происходят с интервалом.

Время нахождения вагонетки в щелевой пропарочной камере соответствует времени тепловой обработки. Изменяя интервал загрузки, можно менять время тепловой обработки изделий. По длине l камеру условно делят на три зоны. Первая, начиная от места загрузки, является зоной нагревания l_1 , вторая зона, где материал выдерживается при достигнутой в зоне нагревания температуре, называется зоной изотермической выдержки l_2 , в третьей зоне l_3 материал охлаждается. В зоне нагревания и зоне изотермической выдержки в качестве теплоносителя используется пар. Зоны отделены одна от другой воздушными завесами, которые устанавливаются и на торцах камер. Назначение воздушных завес — предотвращать переход паровоздушной смеси из одной зоны в другую и выход смеси в цех или засасывание в камеру холодного воздуха из цеха. Ограждения камер выполняют из кирпича и железобетона. Торцы закрывают гибкими шторами: брезентовыми, резиновыми, пластиковыми и др. Изделия охлаждают наружным воздухом. Для движения наружного воздуха зона охлаждения с каждой стороны оборудуется дополнительными каналами. Схема зоны охлаждения, отличающаяся только наличием боковых каналов, показана на рис. 5.

В одном из боковых каналов 3 зоны охлаждения устраивают две-три заборные шахты 2, снабженные жалюзийными решетками 1 для регулирования количества забираемого наружного воздуха. Воздух через шахты 2 поступает в канал 3, откуда через окна 4 поступает в зону охлаждения и отбирает теплоту от изделий 5. Отработанный (нагретый) воздух через окна 6 попадает в канал 7, из которого через патрубок 8 забирается вентилятором 9 и через трубу 10 выбрасывается в атмосферу.

При использовании пара для его подачи применяют двусторонние стояки-коллекторы, причем их первая пара размещена на расстоянии 18–20 м от входа в камеру.

Кроме того, на заводах применяют щелевые камеры с расположенными на разных уровнях зонами тепловой обработки. На рис. 6 показана щелевая камера, где изделие на вагонетке 1 входит в зону подогрева I, подогревается и попадает на снижатель 2. Снижатель спускает изделие на уровень рельсов зоны изотермической выдержки II, которая отделена от зоны подогрева глухим перекрытием. После зоны II вагонетка с изделием попадает в зону III, где охлаждается за счет просасывания холод-

ного воздуха, и через подъемник 3 транспортируется на пост распалубки. Принцип подачи и отбора воздуха аналогичен принятому для горизонтальной щелевой камеры (рис. 5). Тепловлажностная обработка в камерах, расположенных на разных уровнях, может осуществляться паром или ТЭНами. Такая камера занимает меньше места и легче компокуется с остальным оборудованием.

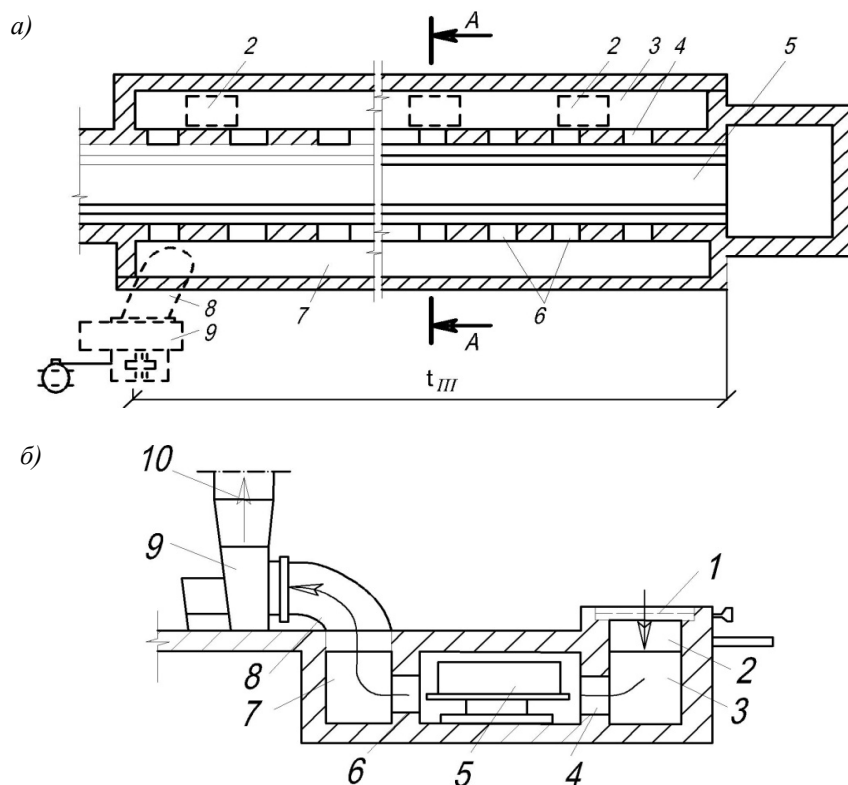


Рис. 5. Схема зоны охлаждения горизонтальной щелевой пропарочной камеры (*а* — план; *б* — разрез):

1 — жалюзийная решетка; 2 — заборная шахта; 3, 7 — каналы;
4, 6 — окна; 5 — изделие; 8 — патрубок; 9 — вентилятор; 10 — труба

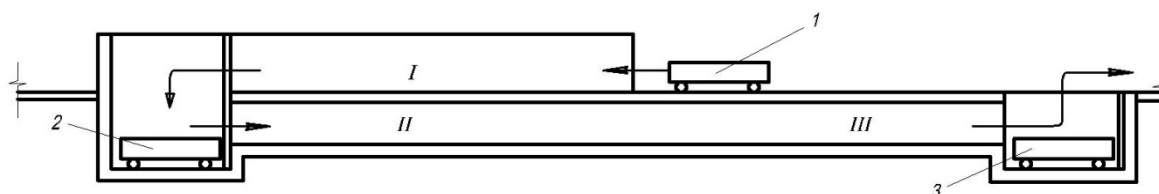


Рис. 6. Схема двухъярусной пропарочной камеры:

1 — вагонетка; 2 — снижатель; 3 — подъемник

К недостаткам щелевых камер можно отнести сложность подачи кондиционированной паровоздушной смеси; необходимость нижнего подогрева камер глухим паром для устранения недогрева изделий, расположенных внизу; недостаточную защиту торцовых проемов камер от выброса греющей среды вверх и засоса холодного цехового воздуха снизу, что увеличивает затраты тепла.

1.5. Вертикальная пропарочная камера

В поисках способа более рационального использования теплоты и уменьшения площади цеха была предложена вертикальная пропарочная камера, схема которой дана на рис. 7.

Принцип работы такой камеры следующий. Изделие в форме 1 по приводному рольгангу 2 проходит до положения 3, показанного пунктиром, в камеру 4, состоящую из бетонной коробки 5, покрытой теплоизоляционным слоем 6. Сверху бетонную коробку покрывают герметичной стальной крышкой 7. В положении 3 изделие останавливается концевым выключателем. Он же включает в работу загрузочные гидродомкраты 14, которые поднимают изделие из положения 3, форма

с изделием утапливает защелки 13, а штабель оказывается выше защепок. При этом защелки вновь занимают положение, показанное на схеме. После выхода защепок гидродомкраты начинают опускаться, проходят между защелками, оставляя штабель изделий на защелках. Сами гидродомкраты уходят в крайнее нижнее положение и выключаются, включая другим концевым выключателем передаточную тележку 8, расположенную в верхней части камеры. Передаточная тележка захватами 9 забирает верхнее изделие из штабеля, передвигается по ходу камеры и ставит изделие на верх другого — разгрузочного — штабеля. Выгрузив изделие, передаточная тележка возвращается в исходное положение, где и выключается. Одновременно с выключением тележки включаются разгрузочные гидродомкраты 11. Гидродомкраты идут в верхнее положение, при этом поднимают штабель над защелками 12, находящимися на выгрузочной стороне; они освобождаются и под действием привода убираются, отводятся в сторону, после чего гидродомкраты начинают опускаться, пока нижняя форма, находящаяся в штабеле, полностью не пройдет вниз и не станет ниже защепок. В этот момент гидродомкраты останавливаются. Защелки встают на свое место, попадают в пазы 10 между нижней формой и всем остальным штабелем, отсекая его от нижней формы, после чего гидродомкраты с одним изделием начинают опускаться дальше, а остальной штабель остается на защелках. Пройдя в крайнее нижнее положение, гидродомкраты оставляют форму с изделием на выгрузочном роликовом конвейере, который включается после того, как гидродомкраты займут крайнее нижнее положение. Затем этот конвейер выкатывает изделие из камеры.

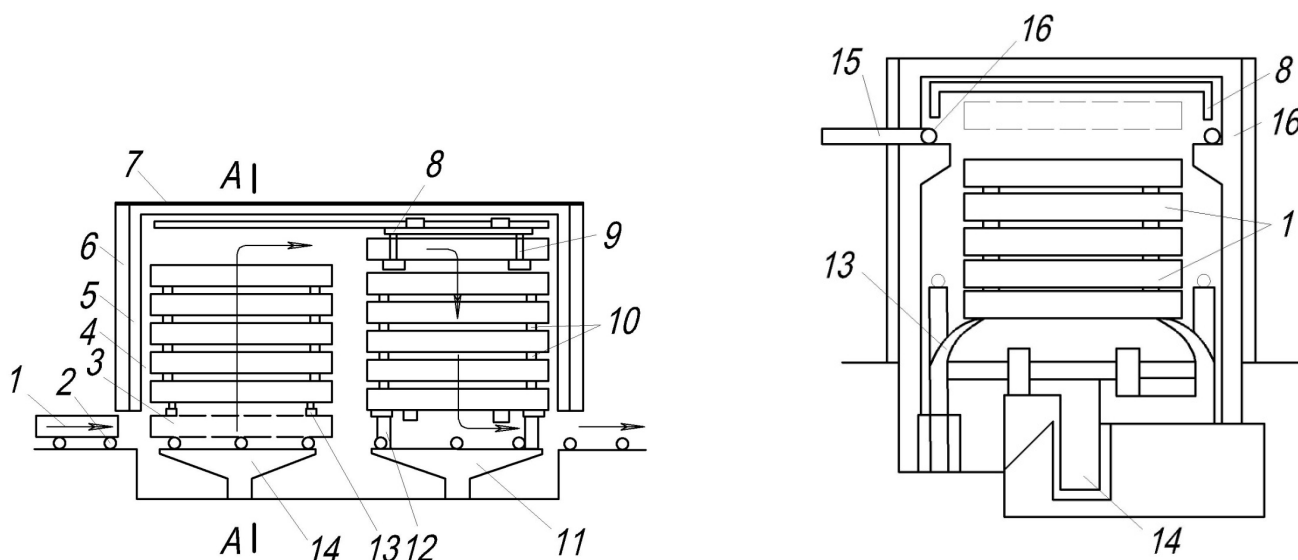


Рис. 7. Схема вертикальной пропарочной камеры

1 — форма; 2 — рольганг; 3 — положение формы; 4 — камера; 5 — бетонная коробка; 6 — теплоизоляция; 7 — стальная крышка; 8 — передаточная тележка; 9 — захваты; 10 — пазы; 11 — разгрузочные гидродомкраты; 12, 13 — защелки; 14 — загрузочные гидродомкраты; 15 — трубопровод; 16 — перфорированная труба

Такие камеры применяются лишь на ограниченном числе предприятий. Тепловлажностная обработка в них осуществляется просто. Пар через трубопровод 15 подается в перфорированную трубу 16, расположенную в верхней части по всему периметру камеры. В момент пуска камеры в ней находится воздух, пар смешивается с ним, образуя паровоздушную смесь. Новые порции пара, который непрерывно подается в камеру и легче паровоздушной смеси, занимают верхнюю часть камеры, вытесняя паровоздушную смесь книзу.

Таким образом, в верхней части камеры образуется и все время поддерживается среда чистого пара с температурой 100 °С. Ниже в камере есть паровоздушная смесь с меньшей температурой. Таким образом, изделия, проходя путь по камере, показанный стрелками на рис. 7, сначала нагреваются, потом выдерживаются при 100 °С, а затем, опускаясь вниз, охлаждаются. Режим, созданный в камере, экономичен. Расход пара в вертикальных камерах 100–150 кг/м³, что в 1,5–2 раза меньше, чем в ямных камерах.

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР

В качестве теплоносителя для этих камер может применяться влажный пар, ТЭНы и продукты сгорания природного газа (ПСПГ). Применение последнего более эффективно, так как позволяет увеличить коэффициент использования теплоты топлива и уменьшить расход топлива — природного газа в 5 раз, а также уменьшить технологические затраты по сравнению с пропариванием.

Исходные данные для расчета камер включают следующие параметры: тип конструкции установки и используемый теплоноситель; производительность цеха; конструкция ограждения; вид бетона, подвергаемого ТВО; номенклатура выпускаемой продукции (тип изделия, его масса и объем, объем бетона в изделии, расход арматуры, габаритные размеры изделия, марка бетона) — принимаются самостоятельно по альбомам, каталогам, ТУ и ГОСТам или даются преподавателем; расход материалов (цемент, крупный и мелкий заполнители, вода) — принимается на основании расчетов, справочных данных, реальных рецептов, используемых на заводах ЖБИ и т. д.; температура окружающей среды (цеха или атмосферного воздуха для условий полигона); режим ТВО (по справочным материалам).

Ниже приведены расчеты размеров и необходимого количества тепловых установок, обеспечивающих требуемую производительность цеха.

2.1. Ямная камера

Габариты камеры определяются типоразмерами изделий, которые будут в ней пропариваться. При этом следует стремиться к максимальной загрузке камеры, что выражается коэффициентом загрузки K_3 .

$$K_3 = \frac{V_6}{V_K}, \quad (1)$$

где V_6 — объем бетона в плотном теле в камере, м^3 ;
 V_K — объем камеры, м^3 .

Величина коэффициента загрузки камеры зависит от формы и габаритов изделий и составляет для панелей перекрытий 0,22–0,35, для лестничных площадок, прогонов, балконных плит — 0,14–0,23.

Изделия в формах следует устанавливать в камерах таким образом, чтобы была обеспечена наибольшая равномерность ТВО во всем объеме камеры.

Камеру можно проектировать для размещения в плане двух, трех или более изделий, однако ее площадь должна быть такой, чтобы грузоподъемность крана обеспечивала подъем крышки камеры. Высота камеры проектируется такой, чтобы в ней разместилось определенное число форм с изделиями при установке их в штабель на прокладки, образующие зазор между формами. Камера может быть напольной или заглубленной в землю так, чтобы ее стены выступали над поверхностью пола цеха на высоту не менее 0,7 м.

Расчет размеров ямной камеры

Длина камеры (L):

$$L = L_{\text{изд}} + 2B_3 + 2B_6, \quad (2)$$

где $L_{\text{изд}}$ — длина изделия, м;

B_3 — величина зазора между формой и стенкой камеры (при использовании влажного пара B_3 составляет 0,20–0,25 м, при использовании ПСПГ — 0,4–0,5 м);

B_6 — толщина борта формы, равная 0,1–0,15 м.

Ширина камеры (B):

$$B = B_{\text{изд}} + 2B_3 + 2B_6, \quad (3)$$

где $B_{\text{изд}}$ — ширина изделия, м;

B_3 — величина зазора между формой и стенкой камеры (величину зазора B_3 принимают равной 0,2–0,25 м);

B_6 — толщина борта формы, равная 0,1–0,15 м.

В ряде случаев в форме может одновременно формироваться два и более изделий. Кроме ширины и длины всех изделий, необходимо учесть и толщину разделяющих их вкладышей, которая обычно равна 0,10–0,20 м.

Высота камеры (H):

$$H = nH_{\phi} + (n - 1) H_3 + H_1 + H_2, \quad (4)$$

где n — количество форм в камере по высоте, шт.;

H_{ϕ} — высота формы, которая складывается из толщин изделия и поддона, м;

H_3 — величина зазора между формами (принимается при использовании пара равной 0,05–0,1 м, при использовании ПСПГ — 0,1 м);

H_1, H_2 — величины зазоров между нижней формой и дном камеры и между верхним изделием и крышкой камеры, м (принимаются соответственно равными 0,15–0,2 м и 0,05–0,1 м).

Расчет количества камер

Годовая производительность камеры (Q_k):

$$Q_k = \frac{V_k T_{\phi} K_3}{\tau_{\text{ц}}}, \quad (5)$$

где V_k — объем пропарочной камеры, м³;

T_{ϕ} — годовой фонд времени работы камеры, ч;

K_3 — коэффициент загрузки камеры, доли ед.;

$\tau_{\text{ц}}$ — продолжительность полного цикла работы камеры, ч.

Объем пропарочной камеры (V_k):

$$V_k = LBH. \quad (6)$$

Продолжительность полного цикла работы камеры $\tau_{\text{ц}}$:

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{загр}} + \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{из}} + \tau_{\text{охл}} + \tau_{\text{выгр}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{загр}}$ и $\tau_{\text{выгр}}$ — продолжительность загрузки и выгрузки камеры, ч;

$\tau_{\text{нагр}}, \tau_{\text{из}}, \tau_{\text{охл}}$ — соответственно продолжительность нагрева, изотермической выдержки и охлаждения, ч.

Необходимое количество камер с учетом одной-двух резервных (N):

$$N = \frac{G_{\Gamma}}{Q_k} + (1 \div 2), \quad (8)$$

где G_{Γ} — заданная годовая производительность завода, м³/год;

Q_k — годовая производительность одной камеры, м³/год.

Толщина стен и пола, выполняемых из бетона, обычно составляет 300–350 мм.

При монтаже стен камеры с использованием теплоизоляции наиболее распространена следующая конструкция: внутри камеры металлический лист толщиной 2–3 мм, служащий паро- и гидроизоляцией, теплоизоляционный слой толщиной 100–150 мм (минераловатные плиты или теплостойкий, до 120–150 °С, пенопласт), несущий наружный слой толщиной 100–150 мм из тяжелого бетона или керамзитобетона. При проектировании камеры с применением теплоизоляции надо помнить, что теплозащитный слой устанавливается только на внутреннюю поверхность несущей стенки, так как в противном случае расход теплоты не уменьшается, а, наоборот, увеличивается.

2.2. Кассетная установка

Размеры установки (ширина и высота), как правило, выбираются исходя из размеров формируемого изделия (длины и ширины).

Длина кассетной установки складывается из суммы толщин формируемых изделий и суммы толщин отсеков, в которые подают теплоноситель (тепловые отсеки). Обычно одновременно в кассетной ус-

тановке формуют 8–10 изделий толщиной более 200–250 мм или 16–20 изделий толщиной 100–180 мм. Возможно формование в одной кассете изделий разной толщины. Для изготовления изделий небольшой толщины между двумя тепловыми отсеками размещают два формовочных, между которыми устанавливают разделительный стальной лист. Крайние (торцевые) отсеки в кассете — тепловые. Они, как правило, защищаются теплоизоляцией. Боковые стенки кассеты (по которым производится ее разборка), днище и верх ввиду сложности монтажа такой теплоизоляции не имеют.

Толщина тепловых отсеков, в зависимости от используемого источника теплоты составляет 100–200 мм.

Далее представлен расчет размеров и количества установок.

Длина кассеты (L_k):

$$L_k = n_1 \cdot \Pi + n_2 \cdot \Phi, \quad (9)$$

где n_1, n_2 — количество тепловых и формовочных отсеков, шт.;

Π — толщина тепловых отсеков, м;

Φ — толщина формовочных отсеков, равная толщине формуемого изделия, м.

Высота кассеты (H_k) и ее ширина (B_k) равны высоте и ширине формуемых изделий.

Годовая производительность кассетной установки (Q):

$$Q = V \cdot n \cdot K_{\text{исп}} \cdot \frac{T_{\Phi}}{\tau_{\text{об}}}, \quad (10)$$

где V — объем одного изделия, м³;

n — количество изделий в кассете, шт.;

$K_{\text{исп}}$ — коэффициент использования кассеты, равный 0,9;

T_{Φ} — годовой фонд времени работы установки, ч;

$\tau_{\text{об}}$ — продолжительность одного цикла работы (оборота) кассеты, ч.

Продолжительность одного цикла работы кассеты складывается из времени распалубки, подготовки к формованию (чистка, смазка, установка арматуры и закладных деталей, сборка кассеты), укладки и уплотнения бетонной смеси и продолжительности ТВО (нагрев, изотермическая выдержка, охлаждение).

Количество кассетных установок (N):

$$N = \frac{G_r}{Q} + (1 \div 2), \quad (11)$$

где G_r — заданная годовая производительность завода, м³/год;

Q — производительность одной кассетной установки, м³/год.

2.3. Щелевая камера непрерывного действия

Число камер определяется в зависимости от производительности формовочной линии (линий) и продолжительности цикла ТВО. Если камеры размещены под формовочной линией, их длина, как правило, равна длине формовочной линии, что связано с работой передаточных тележек, которые перемещают изделия от формовочной линии к камерам. В этом случае в камерах можно производить часть предварительной выдержки до ТВО продолжительностью 1–2 ч. Если камеры размещены в стороне от формовочной линии, например вынесены из пространства цеха, их длина может отличаться от длины формовочного конвейера (в меньшую сторону) и определяться исходя из технологических соображений. Однако в любом случае длина камеры должна обеспечивать принятый режим ТВО.

Размеры щелевой камеры

Часовая производительность всех камер ($N_{\text{ч}}$):

$$N_{\text{ч}} = \frac{G}{(T_{\Phi} \cdot V)}, \quad (12)$$

где G — годовая производительность, м³/год;

T_{Φ} — годовой фонд времени работы камер, ч;

V — объем одного изделия, м³.

T_{ϕ} определяют как произведение числа рабочих дней в году, числа смен, работающих в сутки, и продолжительности смены.

Количество изделий, размещаемых в камерах:

$$N = N_{\text{ч}} \cdot \tau, \quad (13)$$

где $N_{\text{ч}}$ — часовая производительность, шт/ч;

τ — продолжительность ТВО, ч.

Продолжительность ТВО (τ) равна сумме продолжительностей ее периодов:

$$\tau = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{изот}} + \tau_{\text{охл}}, \quad (14)$$

где $\tau_{\text{нагр}}$, $\tau_{\text{изот}}$, $\tau_{\text{охл}}$ — соответственно продолжительность нагрева, изотермической выдержки и охлаждения, ч.

Габаритные размеры камеры должны выбираться на основании количества ярусов (щелей) и размеров форм-вагонеток.

Рабочая длина камеры (L):

$$L = N \cdot \frac{L_{\phi}}{n}, \quad (15)$$

где N — количество изделий, размещаемых в камере;

L_{ϕ} — длина формы-вагонетки, м;

n — количество ярусов (щелей) многощелевой камеры, шт.

Длина формы-вагонетки складывается из длины (ширины) изделия, толщины двух бортов по 100–200 мм каждый и длины упоров по 100 мм каждый.

Длина одной камеры зависит от длины формовочного конвейера или длины цеха и принимается равной 100–120 м. Исходя из этого определяется необходимое количество камер.

Ширина камеры (B) зависит от ширины изделия:

$$B = B_{\text{изд}} + 2B_{\text{б}} + 2B_{\text{з}}, \quad (16)$$

где $B_{\text{изд}}$ — ширина изделия, м;

$B_{\text{б}}$ — толщина борта формы, м;

$B_{\text{з}}$ — зазор между формами и стенкой камеры, м.

Толщина борта форм принимается равной 100 мм, зазор между формой и стенкой камеры — 200 мм.

Высота камеры (H):

$$H = nH_{\phi} + H_1 + H_2 + H_3, \quad (17)$$

где n — количество ярусов;

H_{ϕ} — высота формы вагонетки, м;

H_1 — расстояние от пола до верха головки рельса, м;

H_2 — расстояние от верхней поверхности формы-вагонетки до перекрытия камеры, м;

H_3 — зазор между формами по высоте, м.

H_{ϕ} складывается из толщины изделия, толщины поддона и высоты ходовой части вагонетки. Последняя принимается равной 200–250 мм. H_1 принимается равным 80–100 мм, H_2 — 100–150 мм, H_3 — 300–450 мм.

Конструкции стен, пола и перекрытия щелевой камеры аналогичны конструкциям ямной камеры.

Количество щелевых камер

Годовая производительность одной камеры ($G_{\text{к}}$):

$$G_{\text{к}} = N_{\text{к}} \cdot V \cdot \frac{T_{\phi}}{\tau}, \quad (18)$$

где $N_{\text{к}}$ — количество изделий, размещаемых в одной камере;

V — объем одного изделия, м³;

T_{ϕ} — фонд рабочего времени за год, ч;

τ — продолжительность ТВО, ч.

Требуемое количество камер (n_k):

$$n_k = (1 \div 2) + \frac{G}{G_k}, \quad (19)$$

где G — годовая производительность цеха, м³/год;
 G_k — годовая производительность одной камеры.

Размеры зон камеры

Длина зоны нагрева (L_1):

$$L_1 = L \cdot \frac{\tau_1}{\tau}. \quad (20)$$

Длина зоны изотермической выдержки (L_2):

$$L_2 = L \cdot \frac{\tau_2}{\tau}. \quad (21)$$

Длина зоны охлаждения (L_3):

$$L_3 = L \cdot \frac{\tau_3}{\tau}. \quad (22)$$

Здесь L — длина камеры, м; τ_1 , τ_2 , τ_3 — продолжительности нагрева, изотермической выдержки и охлаждения, ч.

2.4. Вертикальная камера

Расчет размеров вертикальной камеры аналогичен расчету применительно к щелевой камере. При этом необходимо помнить, что зоны ТВО в вертикальной камере, в отличие от щелевой, расположены не по горизонтали, а по вертикали, что уменьшает размеры камеры в плане, но увеличивает ее высоту. Исходя из производительности вертикальной камеры, продолжительности цикла ТВО, высоты производственного корпуса изделия могут располагаться в 2, 4, 6 штабелей, обычно по 8–15 изделий в каждом.

Далее приводится расчет размеров и количества камер.

Длина камеры (L_k) определяется по уравнению:

$$L_k = n_{ш} \cdot L_{\phi} + 2l_1 + (n - 1) \cdot l_2, \quad (23)$$

где $n_{ш}$ — количество штабелей;

L_{ϕ} — длина формы, м;

l_1 — расстояние между стенкой и формами, м;

l_2 — расстояние между штабелями форм, м.

l_1 и l_2 можно принять соответственно равными 0,40–0,45 и 0,30–0,35 м.

Ширина камеры (B_k):

$$B_k = B_{\phi} + 2B, \quad (24)$$

где B_{ϕ} — ширина формы, м;

B — расстояние между ограждениями камеры и формой, равное 0,40–0,45 м.

Высота камеры (H_k):

$$H_k = \frac{\left[n_{ш} \cdot H_1 + N \cdot h_{\phi} + (n_{\phi} - 1) \cdot H_2 \right]}{n_{ш}} + H_3, \quad (25)$$

где $n_{ш}$ — количество штабелей;

h_{ϕ} — высота формы с изделиями, которая складывается из толщины изделия, равной 250–400 мм

и толщины поддона с ходовой частью, м;

H_1 — высота рельса над уровнем пола, принимается равной 0,1 м;

n_{ϕ} — количество форм в штабеле по высоте, шт.;

H_2 — зазор между формами в штабеле, равный 0,2 м;

H_3 — зазор между верхней формой и перекрытием камеры, равный 1,0 м;

N — количество форм с изделиями, равное:

$$N = N_{\text{час}} \cdot \tau, \quad (26)$$

где $N_{\text{час}}$ — часовая производительность, шт/ч;

τ — продолжительность ТВО, ч.

Годовая производительность камеры (G_k):

$$G_k = N \cdot V_{\text{и}} \cdot \frac{T_{\phi}}{\tau}, \quad (27)$$

где N — количество изделий в установке ТВО, шт.;

$V_{\text{и}}$ — объем одного изделия, м³;

T_{ϕ} — годовой фонд времени работы, ч;

τ — продолжительность ТВО, ч.

Количество изделий в установке ТВО (N) равно:

$$N = n_{\phi} \cdot n_{\text{ш}}, \quad (28)$$

где n_{ϕ} — количество форм с изделиями в штабеле, шт.;

$n_{\text{ш}}$ — количество штабелей в камере.

Необходимое количество тепловых установок с учетом одной резервной (n_k):

$$n_k = \frac{G_{\text{год}}}{G_k} + (1 \div 2), \quad (29)$$

где $G_{\text{год}}$ — годовая производительность цеха, м³/год;

G_k — годовая производительность одной камеры, м³/год.

Ограждение камеры может быть выполнено как из тяжелого, так и из легкого бетона. Кроме этого, при сооружении вертикальных камер могут быть использованы конструкции ограждения с улучшенной теплоизоляцией, как и для ямных камер.

3. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР

Тепловой баланс камер ТВО бетона основан на законе сохранения энергии и позволяет, как отмечено выше, определить часовой расход теплоносителя, его удельный расход на 1 м³ бетона и другие показатели.

Ниже приведена методика составления теплового баланса для различных установок ТВО бетона. Полная расшифровка принятых обозначений дана в методике расчета теплового баланса ямной камеры, в остальных расчетах приведены лишь уточнения, если они требуются. Режимы тепловой обработки изделий из тяжелого и легкого бетона приведены в табл. 1 и 2, теплотехнические свойства некоторых строительных материалов, необходимых для расчетов, показаны в табл. 3, а тепловыделение цемента при твердении дано в табл. 4.

Таблица 1

Режим тепловой обработки изделий из тяжелого бетона при температуре изотермической выдержки 80–85 °С

Класс (марка) бетона	Режим тепловой обработки, ч, при толщине бетона в изделии, мм:		
	до 160	до 300	более 300
B15 (M200)	11 (3,5 + 5,5 + 2)	12 (3,5 + 6,5 + 2)	13 (3,5 + 6,5 + 3)
B22,5 (M300)	9 (3 + 4 + 2)	10 (3 + 5 + 2)	11 (3,5 + 5 + 2,5)
B30 (M400)	8,5 (3 + 3,5 + 2)	9,5 (3 + 3,5 + 2)	10 (3 + 4,5 + 2,5)
B37,5 (M500)	8 (3 + 3 + 2)	9 (3 + 4 + 2)	10 (3 + 3,5 + 2,5)
B45 (M600)	7 (3 + 2 + 2)	8 (3 + 3 + 2)	8 (3 + 3,5 + 2,5)

Таблица 2

Режимы тепловой обработки изделий из легких бетонов

Класс (марка) бетона	Способ тепловой обработки	Толщина изделий, мм	Режим тепловой обработки, ч
B3,5–B7,5 (M50–M100)	Сухой прогрев при 120–150 °С	До 300	9 (2 + 5 + 2)
		300 и более	10 (2 + 6 + 2)
	Прогрев в термоформах или в камерах «глухим» паром при температуре 90–95 °С	До 300	9 (3 + 5 + 1)
		300 и более	11 (3 + 6 + 2)
B3,5–B15 (M50–M200)	Тепловлажностная обработка при температуре 80–85 °С	До 200	10 (3 + 6 + 1)
		200–300	12 (3 + 7 + 2)
		Более 300	13 (3 + 8 + 2)
B22,5–B30 (M300–M400)	Тепловлажностная обработка при температуре 80–85 °С	До 200	9,5 (2,5 + 5 + 2)

Таблица 3

Теплотехнические свойства некоторых материалов. Характеристика материала

Материал	В сухом состоянии			Во влажном состоянии	
	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, кДж / (кг · °С)	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °С)	Влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °С)
Железобетон	2500	0,84	1,69	3	2,04
Бетон	2400	0,84	1,51	3	1,86
Керамзитобетон на керамзитовом песке	1600	0,84	0,58	10	0,79
	1400	0,84	0,47	10	0,65
	1200	0,84	0,36	10	0,52
	1000	0,84	0,27	10	0,41

Материал	В сухом состоянии			Во влажном состоянии	
	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, кДж / (кг · °С)	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °С)	Влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м · °С)
Керамзитобетон на кварцевом песке с поризацией	1200	0,84	0,41	8	0,58
	1000	0,84	0,33	8	0,47
	800	0,84	0,23	8	0,35
Маты минераловатные, прошивные	125	0,84	0,056	5	0,07
	75	0,84	0,052	5	0,064
	50	0,84	0,048	5	0,06
Плиты минераловатные, мягкие, полужесткие и жесткие	300	0,84	0,084	5	0,09
	200	0,84	0,07	5	0,08
	100	0,84	0,056	5	0,07
	50	0,84	0,048	5	0,06
Пенополистирол (температура применения до 80 °С)	150	1,34	0,05	5	0,06
	100	1,34	0,041	10	0,052
	40	1,34	0,038	10	0,05
Плиты из фенольного пенопласта (прим. до 150 °С)	100	1,68	0,047	5	0,052
	75	1,68	0,043	5	0,05
	50	1,68	0,041	5	0,05
Газопенобетон	1000	0,84	0,29	15	0,47
	800	0,84	0,21	15	0,37
	400	0,84	0,11	12	0,15
Засыпка — гравий керамзитовый	800	0,84	0,18	3	0,23
	600	0,84	0,14	3	0,20
	400	0,84	0,12	3	0,14
	200	0,84	0,099	3	0,12
Засыпка — вермикулит вспученный	200	0,84	0,076	3	0,11
	100	0,84	0,064	3	0,08
Засыпка — грунт (песок)	1600	0,84	0,35	2	0,58
Листы асбоцементные плоские	1800	0,84	0,35	3	0,52
	1600	0,84	0,23	3	0,41
Сталь	7800	0,48	50	—	—
Грунт (супесь плотная)	1900	0,62	0,7	7	0,8

Переходные коэффициенты из CGS в системе измерения СИ даны в прил. 1, значения функции Фурье — в прил. 2. Рекомендуемые режимы тепловлажностной обработки для кассет приведены в прил. 3, а среднее значение коэффициента загрузки камер по некоторым изделиям — в прил. 4.

Таблица 4

Тепловыделение цемента при твердении за 28 суток в нормальных условиях

Марка цемента	500	400	300
$q_{экз}$, ккал/кг	120	100	80
$q_{эк}$, кДж/кг	502	419	335

3.1. Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры (теплоноситель — влажный пар)

Ямная пропарочная камера является установкой периодического действия, поэтому ее тепловой баланс составляется на весь объем бетона в камере для каждого полного периода активного подвода теплоты.

Период нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{б.с} \cdot c_{б.с} \cdot (t_k - t_n), \quad (30)$$

где $M_{б.с}$ — общая масса бетонной смеси, находящейся в камере, кг;

$c_{б.с}$ — удельная теплоемкость бетонной смеси;

t_k и t_n — соответственно конечная и начальная температуры бетонной смеси в период нагрева.

1.2. Нагрев форм и конструкций пакетировщика (Q_2)

$$Q_2 = M_{\phi} \cdot c_m \cdot (t_k - t_n), \quad (31)$$

где M_{ϕ} — общая масса металла, находящегося в камере (формы, конструкции пакетировщика и т. д.), кг;

c_m — удельная теплоемкость металла;

t_k и t_n — соответственно конечная и начальная температуры металла в период нагрева.

1.3. Теплота, аккумулированная ограждениями камеры (Q_3)

Расход теплоты на нагрев ограждений складывается из теплоты, требуемой для нагрева стен, пола и крышки камеры. Однако, учитывая, что на практике крышка на камеру, в которой начинается процесс ТВО, устанавливается с камеры, в которой процесс ТВО уже закончился, т. е. крышка имеет достаточно высокую температуру, расход теплоты на нагрев крышки незначителен, им можно пренебречь и учесть его в неучтенных потерях.

Таким образом, расход теплоты на нагрев ограждений камеры (Q_3) будет равен:

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3, \quad (32)$$

где Q'_3 — расход теплоты на нагрев пола;

Q''_3 — расход теплоты на нагрев стен камеры.

1.3.1. Расход теплоты на нагрев пола (Q'_3)

$$Q'_3 = 0,85 \cdot (t_{из} - t_{о.с} - 35) \cdot F_n \cdot \sqrt{\lambda_{огр} \cdot c_{огр} \cdot \rho_{огр} \cdot \tau}, \quad (33)$$

где $t_{из}$ — температура изотермической выдержки;

$t_{о.с}$ — температура окружающей среды;

$c_{огр}$, $\lambda_{огр}$, $\rho_{огр}$ — соответственно удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность материала, из которого выполнен пол;

F_n — площадь пола по внутреннему обмеру, м²;

τ — продолжительность рассчитываемого периода, в данном случае продолжительность периода нагрева.

1.3.2. Расход теплоты на нагрев стен камеры (Q''_3)

Стены камеры можно выполнять однослойными (из тяжелого бетона или керамзитобетона) и трехслойными (металлический лист толщиной 2–3 мм, теплоизоляционный слой из теплостойкого, до 150 °С, пенопласта или минеральной ваты и наружный несущий слой из тяжелого бетона или керамзитобетона толщиной 100–150 мм). Можно выбрать и другие материалы.

а) Если стены однослойные, выполнены из тяжелого бетона или керамзитобетона, то расход теплоты на их нагрев (Q''_3) рассчитывают по формуле:

$$Q''_3 = 0,85 \cdot (t_{из} - t_{о.с} - 35) \cdot F_{ст} \cdot \sqrt{\lambda_{огр} \cdot c_{огр} \cdot \rho_{огр} \cdot \tau}, \quad (34)$$

где $F_{ст}$ — площадь стен по внутреннему обмеру.

Остальные обозначения см. в п. 1.3.1.

- б) Если стены трехслойные, то расход теплоты на их нагрев рассчитывают следующим образом. Сначала находят распределение температур на границах слоев при условии, что средняя температура внутри тепловой установки ($t_{\text{ср}}^{\text{БН}}$) максимальна и равна температуре изотермической выдержки ($t_{\text{из}}$).

Порядок расчета следующий.

1. Произвольно задаются температурой наружной поверхности ограждения (t_4) и определяют коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду (α_2):

$$\alpha_2 = A \cdot \sqrt[4]{t_4 - t_{\text{о.с}}} + \frac{C}{t_4 - t_{\text{о.с}}} \cdot \left[\left(\frac{273 + t_4}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{о.с}}}{100} \right)^4 \right], \quad (35)$$

где A — коэффициент, учитывающий расположение теплопередающей поверхности (для горизонтальной верхней 2,6; для горизонтальной нижней 1,8; для вертикальной 2,2);

$t_4, t_{\text{о.с}}$ — соответственно температуры на наружной поверхности и окружающей среды;

C — излучательная способность серого тела, которая может быть принята равной 4,6.

2. Вычисляют коэффициент теплопередачи через ограждение (K):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (36)$$

где δ_i, λ_i — соответственно толщина в метрах и коэффициент теплопроводности i -го слоя ограждения; α_1, α_2 — соответственно коэффициент тепловосприятия внутренней поверхностью и коэффициент теплоотдачи наружной поверхностью;

n — количество слоев ограждения.

Так как при пропаривании α_1 велик, то $1 / \alpha_1 \rightarrow 0$.

3. Определяют величину удельного теплового потока (q), проходящего через ограждение:

$$q = K \cdot (t_1 - t_{\text{о.с}}), \quad (37)$$

где $t_1 = t_{\text{ср}}^{\text{БН}}$ — средняя за период нагрева температура внутренней поверхности ограждения.

4. Проверяют правильность принятого значения температуры наружной поверхности ограждения t_4 :

$$t_4 = t_1 - q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (38)$$

Если ошибка между принятым и расчетным значениями превышает 1 %, то задают новое значение t_4 и весь расчет повторяют. В качестве нового значения t_4 можно принять среднее между принятым и вычисленным.

При допустимом совпадении вычисленного и принятого значений определяют температуры на границах слоев:

- так как величина α_1 большая, температура внутренней поверхности камеры в конце периода нагрева равна температуре среды: $t_1 = (t_{\text{ср}}^{\text{БН}}) = t_{\text{из}}$;
- так как коэффициент теплопроводности металла велик, температуры на внутренней и наружной поверхностях металлической стенки равны: $t_1 = t_2$;
- температура на границе теплоизоляции — наружный бетонный слой:

$$t_3 = t_1 - q \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right); \quad (39)$$

- температура наружной поверхности камеры определена выше при проверке.

После того как определены температуры на границах слоев ограждения, определяют расход теплоты на нагрев каждого слоя, что в сумме дает расход теплоты на нагрев стенки в целом:

$$Q_3'' = Q_{\text{вн}} + Q_{\text{изол}} + Q_{\text{нар}}. \quad (40)$$

Слагаемые в этом уравнении определяют по приведенным ниже формулам. Расход теплоты на нагрев внутренней металлической обшивки ($Q_{\text{вн}}$):

$$Q_{\text{вн}} = M_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_1 - t_{\text{нач}}), \quad (41)$$

где $M_{\text{м}}, c_{\text{м}}$ — соответственно масса и удельная теплоемкость металлической внутренней обшивки; $t_{\text{нач}}$ — начальная температура обшивки, которая может быть принята равной температуре окружающей среды $t_{\text{о.с.}}$.

Расход теплоты на нагрев теплоизоляционного слоя ($Q_{\text{изол}}$):

$$Q_{\text{изол}} = M_{\text{изол}} \cdot c_{\text{изол}} \cdot (0,5 \cdot (t_1 + t_3) - t_{\text{нач}}), \quad (42)$$

где $M_{\text{изол}}, c_{\text{изол}}$ — соответственно масса и удельная теплоемкость теплоизоляционного слоя; t_2, t_3 — температуры на внутренней и наружной поверхностях слоя теплоизоляции, определенные ранее.

Расход теплоты на нагрев наружного бетонного слоя ($Q_{\text{нар}}$):

$$Q_{\text{нар}} = M_{\text{б}} \cdot c_{\text{б}} \cdot (0,5 \cdot (t_3 + t_4) - t_{\text{нач}}), \quad (43)$$

где $M_{\text{б}}, c_{\text{б}}$ — соответственно масса и удельная теплоемкость бетона наружной несущей стенки; t_3, t_4 — температуры на внутренней и наружной поверхностях несущей стенки, определенные ранее.

1.4. Потери теплоты через ограждения (Q_4)

Данная расходная статья складывается из трех составляющих: потери через крышку в цех (Q_4'), потери через стенки камеры в цех (Q_4'') и потери через пол и стены (если камера заглублена) в землю (Q_4''').

Методика расчета первых двух составляющих такова. Задаются температурой наружной поверхности ограждения (крышки или стен). По принятым значениям температур наружной поверхности и окружающей среды (цеха) определяют коэффициент теплоотдачи от ограждения камеры в цех (α_2). Затем определяют величину теплопередачи (K) при данном значении α_2 и термическом сопротивлении ограждения и величину удельного теплового потока (q), проходящего через ограждение. После этого проверяется правильность задания в начале расчета температуры наружной поверхности ограждения. Если ошибка между принятым значением и значением, полученным при проверке, превышает 1 %, то задаются новым значением температуры наружной поверхности и весь расчет повторяют. Если проверка подтвердит правильность принятой температуры, то по полученному значению удельного теплового потока определяют общие теплотери через ограждение площадью F за время τ .

1.4.1. Потери теплоты через крышку камеры (Q_4')

$$Q_4' = F_{\text{кр}} \cdot q \cdot \tau, \quad (44)$$

где $F_{\text{кр}}$ — площадь крышки по наружному обмеру, м^2 ;
 q — удельный тепловой поток, проходящий через крышку;
 τ — продолжительность теплопередачи (в данном случае время нагрева).

Порядок определения τ следующий.

1. Задаются произвольно температурой наружной поверхности ($t_{\text{нар}}$) на 3–5 °С выше температуры окружающей среды ($t_{\text{о.с.}}$).

2. Определяют коэффициент теплоотдачи (α_2):

$$\alpha_2 = A \cdot \sqrt[4]{t_{\text{нар}} - t_{\text{о.с.}}} + \frac{c}{t_{\text{нар}} - t_{\text{о.с.}}} \cdot \left[\left(\frac{273 + t_{\text{нар}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{о.с.}}}{100} \right)^4 \right], \quad (45)$$

где $t_{\text{нар}}$ — принятая температура наружной поверхности.

Остальные обозначения см. в п. 1.3.2 (б).

3. Определяют коэффициент теплопередачи через ограждение (K):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (46)$$

Обозначения см. в п. 1.3.2 (б).

4. Определяют величину удельного теплового потока через ограждение (q):

$$q = K \cdot (t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - t_{\text{о.с.}}), \quad (47)$$

где K — коэффициент теплопередачи через ограждение;

$t_{\text{ср}}^{\text{вн}}$ — среднее значение температуры внутренней поверхности ограждения за период нагрева:

$$t_{\text{ср}}^{\text{вн}} = 0,5 \cdot (t_{\text{н}} + t_{\text{из}}), \quad (48)$$

где $t_{\text{н}}$ и $t_{\text{из}}$ — соответственно температуры начальная и изотермической выдержки.

5. Проверяют правильность принятого значения температуры наружной поверхности ограждения ($t_{\text{нар}}$):

$$t_{\text{нар}} = t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - q \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right). \quad (49)$$

При допустимом совпадении вычисленного и принятого значений температур вычисленную величину теплового потока подставляют для определения общих теплопотерь через ограждение, в данном случае Q_4' .

Потери теплоты в окружающую среду через стены камеры, выступающие из земли (Q_4''):

$$Q_4'' = q \cdot F_{\text{ст}} \cdot \tau, \quad (50)$$

где q — удельный тепловой поток, проходящий через ограждение (методика расчета q приведена в п. 1.4.1);

$F_{\text{ст}}$ — площадь стен (по наружному обмеру), выступающих из земли, м²;

τ — продолжительность теплопередачи.

1.4.2. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q_4''')

$$Q_4''' = F_{\text{п}} \cdot \frac{\lambda_{\text{огр}}}{\delta_{\text{огр}}} \cdot (t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - t_{\text{гр}}) \cdot \tau, \quad (51)$$

где $F_{\text{п}}$ — площадь пола по наружному обмеру, м²;

$\lambda_{\text{огр}}$, $\delta_{\text{огр}}$ — соответственно коэффициент теплопроводности и толщина ограждения;

$t_{\text{ср}}^{\text{вн}}$ — средняя температура внутренней поверхности ограждения за период (в данном случае) нагрева;

τ — продолжительность периода нагрева;

$t_{\text{гр}}$ — температура на границе ограждение — земля.

$t_{\text{гр}}$ определяется следующим образом. Через ограждение проходит удельный тепловой поток, величина которого равна

$$q = \frac{\lambda_{\text{огр}}}{\delta_{\text{огр}}} \cdot (t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - t_{\text{гр}}). \quad (52)$$

Этот тепловой поток уходит в прилегающий грунт, и на расстоянии 2 м от границы раздела пол — земля температура остается практически постоянной и равной 6 °С. На этом участке массива бетон — земля величина теплового потока будет равна

$$q = \frac{\lambda_3}{2} \cdot (t_{\text{гр}} - 6). \quad (53)$$

Решая уравнения (52) и (53) совместно (количество теплоты, проходящее границу раздела, равно количеству теплоты, уходящему в грунт), можно определить температуру на границе раздела бетон — земля.

Общие потери теплоты через ограждения камеры составляют

$$Q_4 = Q_4' + Q_4'' + Q_4''' \quad (54)$$

1.5. Неучтенные потери теплоты (Q_5)

Кроме перечисленных производственных и непроизводственных статей расхода теплоты, при работе любой тепловой установки имеет место целый ряд дополнительных расходных статей, которые с точностью учесть сложно (выброс пара в цех через неплотности камеры, неисправности пароподводящих систем и т. д.). Поэтому в расходную часть теплового баланса работы установки вводят дополнительную статью — так называемые неучтенные потери, которые составляют 10–20 % учтенных статей расхода теплоты. В неучтенные потери могут быть также включены затраты на незначительный догрев крышки и теплосодержание пара, занимающего свободный объем камеры.

$$Q_5 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4), \quad (55)$$

где μ — коэффициент неучтенных потерь, равный 0,1–0,2.

1.6. Общий расход теплоты за период нагрева (Q_{06}^H)

$$Q_{06}^H = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (56)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q_1')

Известно, что процесс твердения бетона сопровождается выделением теплоты, связанным с гидратацией цемента. Поэтому часть расхода теплоты компенсируется за счет ее внутреннего источника — экзотермических реакций цемента.

$$Q_1' = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{\text{экз}}, \quad (57)$$

где V_6 — общий объем бетона, находящегося в камере;

Π — расход цемента на 1 м³ бетона, кг/м³;

$q_{\text{экз}}$ — тепловыделение 1 кг цемента в процессе ТВО, которое было определено при расчете продолжительности периода нагрева и равно $q_{1ч} + q_{2ч} + \dots + q_{nч}$.

Если режим ТВО не рассчитывался, а назначался на основании нормативной документации, то $q_{\text{экз}}$ может быть определено по формуле

$$q_{\text{экз}} = 0,0023 \cdot q_{28} \cdot t_{\text{ср}}'' \cdot (B/\Pi)^{0,44} \cdot \tau, \quad (58)$$

где q_{28} — тепловыделение 1 кг цемента за 28 суток твердения в нормальных условиях (прил. 4);

$t_{\text{ср}}''$ — средняя температура бетона за период (в данном случае) нагрева;

B/Π — водоцементное отношение, доли ед.;

τ — продолжительность тепловыделения за период (в данном случае) нагрева.

2.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q_2'')

Так как других, кроме тепловыделения цемента, внутренних источников поступления теплоты в установку нет, вся остальная теплота, требуемая для обеспечения заданного режима нагрева бетона, должна быть подведена извне, т. е. с теплоносителем:

$$Q_2' = Q_{06}^H - Q_1. \quad (59)$$

3. Расход теплоносителя (влажного пара) за период нагрева

3.1. Общий расход пара за период нагрева (M_{06}^H)

$$M_{06}^H = \frac{Q_2'}{(i'' - i')}, \quad (60)$$

где Q_2'' — подводимое извне количество теплоты;

i'' , i' — соответственно теплосодержание 1 кг пара и конденсата.

3.2. Часовой расход пара за период нагрева ($M_{\text{ч}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{ч}}^{\text{H}} = \frac{M_{\text{об}}^{\text{H}}}{\tau}, \quad (61)$$

где τ — продолжительность подвода теплоносителя, в данном случае продолжительность нагрева.

3.3. Удельный расход пара за период нагрева ($M_{\text{уд}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{уд}}^{\text{H}} = \frac{M_{\text{об}}^{\text{H}}}{V_{\text{б}}}, \quad (62)$$

где $V_{\text{б}}$ — общий объем бетона, находящийся в установке.

Период изотермической выдержки

Методика составления теплового баланса для периода изотермической выдержки аналогична приведенной для периода нагрева. При этом некоторые начальные параметры режима тепловой обработки несколько изменяются (продолжительность периода, значения средних температур внутренних поверхностей установки, начальная и конечная температура бетона и металла форм и т. д.). Кроме этого, необходимо учитывать, что в тепловом балансе периода изотермической выдержки могут отсутствовать некоторые статьи расхода теплоты.

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

Формула для определения этой статьи расхода теплоты аналогична приведенной в п. 1.1 (см. выше о периоде нагрева). Однако данная статья может и отсутствовать, так как бетонное изделие, особенно имеющее небольшую толщину (до 200 мм), уже на стадии нагрева приобретает максимальную температуру, и, следовательно, дальнейшего его нагревания не происходит, а значит, и не затрачивается теплота.

4.2. Нагрев форм (Q_2)

Данная статья также может в тепловом балансе периода изотермической выдержки отсутствовать по той же причине, что и предыдущая. При учете этой статьи в расчет принимается только масса форм.

4.3. Нагрев ограждений камеры (Q_3)

Как и для периода нагрева, данная статья складывается из двух составляющих: расход теплоты на нагрев пола (Q_3') и стен камеры (Q_3''):

$$Q_3 = Q_3' + Q_3''. \quad (63)$$

4.3.1. Нагрев пола (Q_3')

$$Q_3' = 0,85 \cdot (t_{\text{из}} - t_{\text{о.с}} - 35) \cdot F_n \cdot \sqrt{\lambda_{\text{огр}} \cdot c_{\text{огр}} \cdot \rho_{\text{огр}} \cdot \tau}, \quad (64)$$

где τ — продолжительность рассчитываемого периода (в данном случае) изотермической выдержки. Остальные обозначения см. в п. 1.3.1.

4.3.2. Нагрев стен (Q_3'')

Данная статья расхода теплоты учитывается для однослойных стен, выполненных из тяжелого бетона или керамзитобетона. Для трехслойных стен данная статья не учитывается.

$$Q_3'' = 0,85 \cdot (t_{\text{из}} - t_{\text{о.с}} - 35) \cdot F_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\lambda_{\text{огр}} \cdot c_{\text{огр}} \cdot \rho_{\text{огр}} \cdot \tau}, \quad (65)$$

где $F_{\text{ст}}$ — площадь стен по внутреннему обмеру, м^2 ;
 τ — продолжительность периода изотермической выдержки.
Остальные обозначения см. в п. 1.3.1.

4.4. Потери теплоты в окружающую среду (Q'_4 и Q''_4)

Методика расчета потерь теплоты через крышку камеры и стены, выступающие из земли, аналогична описанной в п. 1.4 для периода нагрева. Однако необходимо иметь в виду, что время теплопередачи при расчете принимается равным продолжительности изотермической выдержки; кроме того, средняя температура внутренней поверхности ограждений камеры (крышка и стены) принимается равной температуре изотермической выдержки. Необходимо также иметь в виду, что начальное значение температуры наружной поверхности ограждения в период изотермического прогрева принимается несколько бóльшим, чем в период нагрева.

Расчет теплопотерь в землю с учетом предыдущих замечаний аналогичен приведенному в п. 1.4.3.

4.4.1. Потери теплоты в окружающую среду через крышку камеры

$$Q'_4 = q \cdot F_{кр} \cdot \tau, \quad (66)$$

где τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

Потери теплоты в окружающую среду через стены, выступающие из земли (Q''_4):

$$Q''_4 = q \cdot F_{ст} \cdot \tau. \quad (67)$$

Потери теплоты через пол камеры в землю (Q'''_4):

$$Q'''_4 = F_n \cdot \frac{\lambda_{огр}}{\delta_{огр}} \cdot (t_{сп}^{вн} - t_{гр}) \cdot \tau,$$

где τ — продолжительность изотермической выдержки,

$t_{сп}^{вн}$ — средняя температура внутренней поверхности ограждения за период, в данном случае может быть принята равной температуре изотермической выдержки $t_{из}$;

$t_{гр}$ — температура на границе ограждение – земля.

Итого, потери теплоты в окружающую среду будут равны:

$$Q_4 = Q'_4 + Q''_4 + Q'''_4. \quad (68)$$

4.5. Неучтенные потери (Q_5)

$$Q_5 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4). \quad (69)$$

Общий расход теплоты в период изотермической выдержки ($Q_{об}^{из}$):

$$Q_{об}^{из} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (70)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{экз}, \quad (71)$$

где $q_{экз}$ — тепловыделение 1 кг цемента в процессе ТВО за период изотермической выдержки, равное

$$q_{экз} = 0,0023 \cdot q_{28} \cdot t''_{сп} \cdot (B/\Pi)^{0,44} \cdot \tau, \quad (72)$$

где $t''_{сп}$ — средняя температура бетона, равная температуре изотермической выдержки;

τ — продолжительность тепловыделения, в данном случае продолжительность периода изотермической выдержки.

Другие обозначения см. в п. 2.1.

При этом необходимо иметь в виду, что максимальное количество теплоты, выделенное цементом, составит величину, равную q_{28} , поэтому $q_{нагр} + q_{из} \leq q_{28}$.

5.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_{об}^{из} + Q'_1. \quad (73)$$

6. Расход теплоносителя (влажного пара) за период изотермической выдержки

6.1. Общий расход пара за период изотермической выдержки ($M_{об}^{из}$)

$$M_{об}^{из} = \frac{Q_2'}{(i'' - i')} \quad (74)$$

6.2. Часовой расход пара за период изотермической выдержки ($M_{ч}^{из}$)

$$M_{ч}^{из} = \frac{M_{об}^{из}}{\tau}, \quad (75)$$

где τ — продолжительность изотермической выдержки.

6.3. Удельный расход пара за период изотермической выдержки ($M_{уд}^{из}$)

$$M_{уд}^{из} = \frac{M_{об}^{из}}{V_6}. \quad (76)$$

7. Расход теплоносителя (влажного пара) за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход пара ($M_{об}$)

$$M_{об} = M_{об}^{нагр} + M_{об}^{из}. \quad (77)$$

7.2. Среднечасовой расход пара ($M_{ч}$)

$$M_{ч} = \frac{M_{об}}{\tau_{нагр} + \tau_{из}}. \quad (78)$$

7.3. Удельный расход пара ($M_{уд}$)

$$M_{уд} = M_{уд}^{нагр} + M_{уд}^{из}. \quad (79)$$

8. Расход топлива (природного газа), необходимый для получения требуемого количества пара

8.1. Среднечасовой расход природного газа ($X_{ч}$)

$$X_{ч} = M_{ч} \cdot \frac{i'}{\varepsilon q_{г}}. \quad (80)$$

8.2. Удельный расход природного газа ($X_{уд}$)

$$X_{уд} = M_{уд} \cdot \frac{i'}{\varepsilon q_{г}}, \quad (81)$$

где i' — теплосодержание влажного пара;

ε — коэффициент использования теплоты топлива при производстве пара, доли ед., может быть принят равным 0,3;

$q_{г}$ — низшая теплотворная способность газа, может быть принята равной 35 600 кДж/м³ (8500 ккал/м³).

3.2. Тепловой баланс напольной рециркуляционной ямной камеры (теплоноситель — продукты сгорания природного газа)

Методика составления теплового баланса рециркуляционной ямной камеры аналогична приведенной выше для ямной камеры с использованием в качестве теплоносителя влажного пара. Однако в структуре теплового баланса рециркуляционной камеры есть некоторые отличия, связанные с особенностями в работе камеры и с особенностями используемого теплоносителя. Основные обозначения расчетных величин приведены в тепловом балансе ямной камеры.

Период нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{б.с} \cdot c_{б.с} \cdot (t_k - t_n). \quad (82)$$

1.2. Нагрев форм и металлических конструкций (Q_2)

$$Q_2 = M_{\phi} \cdot c_m \cdot (t_k - t_n). \quad (83)$$

1.3. Аккумуляция теплоты ограждениями камеры (Q_3)

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3. \quad (84)$$

1.3.1. Нагрев пола (Q'_3)

$$Q'_3 = 0,85 \cdot (t_{из} - t_{о.с} - 35) \cdot F_n \cdot \sqrt{\lambda_{огр} \cdot c_{огр} \cdot \rho_{огр} \cdot \tau}. \quad (85)$$

1.3.2. Нагрев стен (Q''_3)

а) Стены однослойные (тяжелый бетон или керамзитобетон):

$$Q''_3 = 0,85 \cdot (t_{из} - t_{о.с} - 35) \cdot F_{ст} \cdot \sqrt{\lambda_{огр} \cdot c_{огр} \cdot \rho_{огр} \cdot \tau}. \quad (86)$$

б) Стены трехслойные (металл — теплоизоляция — бетон):

$$Q''_3 = Q_{вн} + Q_{изол} + Q_{нар}. \quad (87)$$

Детально методику расчета см. в п. 1.3.2 (б) раздела 4.1 «Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры» (период нагрева).

1.4. Потери теплоты через ограждения (Q_4)

Подробно методика определения теплопотерь через крышку и стены в окружающую среду и через пол в землю изложена в п. 1.4 раздела 3.1 «Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры». Ниже приведены лишь основные формулы для определения теплопотерь через ограждения.

1.4.1. Потери теплоты через крышку камеры (Q'_4)

$$Q'_4 = F_{кр} \cdot q \cdot \tau. \quad (88)$$

1.4.2. Потери теплоты в окружающую среду через стены камеры, выступающие из земли (Q''_4)

$$Q''_4 = q \cdot F_{см} \cdot \tau. \quad (89)$$

1.4.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q'''_4)

$$Q'''_4 = F_n \cdot \frac{\lambda_{огр}}{\delta_{огр}} \cdot (t_{ср}^{вн} - t_{гр}) \cdot \tau, \quad (90)$$

$$Q_4 = Q'_4 + Q''_4 + Q'''_4. \quad (91)$$

1.5. Расход теплоты на испарение воды затворения из бетона (Q_5)

Среда продуктов сгорания природного газа имеет среднюю относительную влажность меньше 50 %. Поэтому на всех стадиях ТВО из бетона происходит испарение лишней влаги (ΔW), для чего требуется затрата теплоты, равная

$$Q_5 = \frac{M_{б.с} \cdot \Delta W \cdot i}{100}, \quad (92)$$

где $M_{б.с}$ — масса бетона в камере, кг;

ΔW — величина влагопотерь бетона за период нагрева, % (для тяжелого бетона 0,5–1 %, для керамзитобетона 1,5–2 %);

i — скрытая теплота парообразования.

1.6. Потери теплоты в теплогенераторе (Q_6)

$$Q_6 = 0,1Q_H^p \cdot X \cdot \tau, \quad (93)$$

где Q_H^p — теплотворная способность топлива (для природного газа может быть принята равной 8500 ккал/м³);

τ — продолжительность работы теплогенератора, в данном случае продолжительность периода нагрева;

X — часовой расход топлива в период (в данном случае в период нагрева).

Часовой расход топлива X является неизвестной величиной, для определения которой и составляется тепловой баланс.

1.7. Потери теплоты с отходящими продуктами сгорания (Q_7)

$$Q_7 = \alpha \cdot V_{п.с} \cdot c_{п.с} \cdot t_{п.с} \cdot X \cdot \tau, \quad (94)$$

где α — коэффициент избытка воздуха, равный 1,05–1,2;

$V_{п.с}$ — объем продуктов сгорания 1 м³ природного газа при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$;

$c_{п.с}$, $t_{п.с}$ — соответственно теплоемкость и температура отходящих из камеры продуктов сгорания природного газа;

X — часовой расход топлива;

τ — продолжительность работы теплогенератора.

Температура отходящих из камеры продуктов сгорания $t_{п.с}$ равна температуре среды в камере.

При сжигании 1 м³ газа при $\alpha = 1$ образуется 10–11 м³ продуктов сгорания (около 1 м³ CO₂, около 2 м³ H₂O и около 8 м³ N₂), т. е. $V_{п.с} = 10–11$ м³.

1.8. Неучтенные потери теплоты (Q_8)

$$Q_8 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7), \quad (95)$$

где μ — коэффициент неучтенных потерь, который может быть принят за 0,05–0,1.

1.9. Общий расход теплоты за период нагрева ($Q_{общ}^{нагр}$)

$$Q_{общ}^{нагр} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8. \quad (96)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{экз}, \quad (97)$$

где $q_{экз}$ — количество теплоты, выделенное 1 кг цемента, определяется по формулам теплового баланса ямной пропарочной камеры.

2.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем — ПСПГ (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_H^p \cdot X \cdot \tau, \quad (98)$$

где Q_H^p — теплотворная способность топлива;

τ — продолжительность работы теплогенератора во время периода нагрева, ч;

X — часовой расход топлива, м³/ч.

2.3. Общий приход теплоты за период нагрева ($Q_{пр}^{об}$)

$$Q_{пр}^{об} = Q'_1 + Q'_2. \quad (99)$$

3. Расход топлива (природного газа)

По условию теплового баланса, который основывается на законе сохранения энергии, сумма статей расхода теплоты должна быть равна сумме статей прихода теплоты, т. е.:

$$Q_{\text{общ}}^{\text{нагр}} = Q_{\text{пр}}^{\text{об}} \quad (100)$$

Решая это уравнение, определяют искомую величину часового расхода топлива (природного газа) $X^{\text{нагр}}$.

Затем определяют общий расход топлива за период и удельный расход топлива.

3.1. Общий расход топлива ($X_{\text{общ}}^{\text{нагр}}$)

$$X_{\text{общ}}^{\text{нагр}} = X^{\text{нагр}} \cdot \tau_{\text{нагр}} \quad (101)$$

3.2. Удельный расход топлива ($X_{\text{уд}}^{\text{нагр}}$)

$$X_{\text{уд}}^{\text{нагр}} = \frac{X^{\text{нагр}} \cdot \tau}{V_{\text{б.с}}} \quad (102)$$

Период изотермической выдержки

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

Формулу для расчета см. в п. 1.1, но, как и в тепловом балансе ямной пропарочной камеры данная статья расхода может отсутствовать.

4.2. Нагрев форм (Q_2)

Данная статья также может отсутствовать.

4.3. Нагрев ограждений камеры (Q_3)

$$Q_3 = Q_3' + Q_3'' \quad (103)$$

4.3.1. Нагрев пола (Q_3')

$$Q_3' = 0,85 \cdot (t_{\text{из}} - t_{\text{о.с}} - 35) \cdot F_n \cdot \sqrt{\lambda_{\text{огр}} \cdot c_{\text{огр}} \cdot \rho_{\text{огр}} \cdot \tau}, \quad (104)$$

где τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

4.3.2. Нагрев стен (Q_3'')

Данная статья учитывается лишь для однослойных стен, выполненных из тяжелого бетона или керамзитобетона. Для трехслойных стен она не учитывается.

$$Q_3'' = 0,85 \cdot (t_{\text{из}} - t_{\text{о.с}} - 35) \cdot F_{\text{ст}} \cdot \sqrt{\lambda_{\text{огр}} \cdot c_{\text{огр}} \cdot \rho_{\text{огр}} \cdot \tau}, \quad (105)$$

где τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

4.4. Потери теплоты в окружающую среду (Q_4)

$$Q_4 = Q_4' + Q_4'' + Q_4''' \quad (106)$$

4.4.1. Потери теплоты в окружающую среду через крышку камеры (Q_4')

$$Q_4' = F_{\text{кр}} \cdot q \cdot \tau, \quad (107)$$

где τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

Обозначения и методику расчета см. в п. 1.4.1 и 4.4 раздела 3.1 «Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры».

4.4.2. Потери теплоты в окружающую среду через стенки, выступающие из земли (Q_4'')

$$Q_4'' = q \cdot F_{cm} \cdot \tau, \quad (108)$$

где τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

4.4.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q_4''')

$$Q_4''' = F_n \cdot \frac{\lambda_{огр}}{\delta_{огр}} \cdot (t_{ср}^{вн} - t_{гр}) \cdot \tau. \quad (109)$$

Все обозначения и методика расчетов приведены в п. 1.4.3 раздела 3.1 «Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры».

4.5. Расход теплоты на испарение воды затворения из бетона (Q_5)

$$Q_5 = \frac{M_{б.с} \cdot \Delta W \cdot i}{100}, \quad (110)$$

где $M_{б.с}$ — общая масса бетонной смеси, находящейся в установке;

ΔW — масса воды, % от массы бетона, испарившейся из бетона в процессе ТВО, в данном случае на стадии изотермической выдержки;

i — количество теплоты, необходимое для испарения 1 кг воды.

Для расчета ΔW на стадии изотермической выдержки может быть принята для тяжелого бетона равной 1,0–1,5 %, для легкого — 3,0–4,0 %.

4.6. Потери теплоты в теплогенераторе (Q_6)

$$Q_6 = 0,1 Q_H^p \cdot X \cdot \tau, \quad (111)$$

где Q_H^p — теплотворная способность топлива;

τ — продолжительность работы теплогенератора в период изотермической выдержки;

X — часовой расход топлива в период (в данном случае в период изотермической выдержки).

4.7. Потери теплоты с отходящими продуктами сгорания (Q_7)

$$Q_7 = \alpha \cdot V_{п.с} \cdot c_{п.с} \cdot t_{п.с} \cdot X \cdot \tau, \quad (112)$$

где $t_{п.с}$ — температура отходящих из рабочего пространства камеры продуктов сгорания (учитывая, что при ТВО в среде продуктов сгорания вводится ограничение на максимальную температуру бетона, температура отходящих продуктов сгорания должна быть не более чем на 3–5 °С ниже той, с которой продукты сгорания поступают в камеру);

X — часовой расход топлива в период изотермической выдержки;

τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

4.8. Неучтенные потери (Q_8)

$$Q_8 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7). \quad (113)$$

4.9. Общий расход теплоты за период изотермической выдержки ($Q_{общ}^{из}$)

$$Q_{общ}^{из} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8. \quad (114)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{\text{ЭКЗ}}. \quad (115)$$

5.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем — ПСПГ (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot X \cdot \tau, \quad (116)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ — теплотворная способность топлива;

X — часовой расход топлива в период изотермической выдержки;

τ — продолжительность периода изотермической выдержки.

5.3. Общий приход теплоты за период изотермической выдержки ($Q_{\text{пр}}^{\text{об}}$)

$$Q_{\text{пр}}^{\text{об}} = Q'_1 + Q'_2. \quad (117)$$

6. Расход топлива (природного газа)

6.1. Общий расход топлива ($X_{\text{общ}}^{\text{из}}$)

$$X_{\text{общ}}^{\text{из}} = X^{\text{из}} \cdot \tau_{\text{из}}. \quad (118)$$

6.2. Удельный расход топлива ($X_{\text{уд}}^{\text{из}}$)

$$X_{\text{уд}}^{\text{из}} = \frac{X^{\text{из}} \cdot \tau_{\text{из}}}{V_{\text{б.с}}}. \quad (119)$$

7. Расход топлива (природного газа) за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход топлива ($X_{\text{об}}$)

$$X_{\text{об}} = X_{\text{общ}}^{\text{нагр}} + X_{\text{общ}}^{\text{из}}. \quad (120)$$

7.2. Удельный расход топлива ($X_{\text{уд}}$)

$$X_{\text{уд}} = X_{\text{уд}}^{\text{нагр}} + X_{\text{уд}}^{\text{из}}. \quad (121)$$

7.3. Среднечасовой расход топлива ($X_{\text{ч}}$)

$$X_{\text{ч}} = \frac{X_{\text{общ}}}{\tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{из}}}. \quad (122)$$

3.3. Тепловой баланс напольной щелевой камеры при установившемся режиме работы (теплоноситель — влажный пар)

В отличие от периодически действующих тепловых установок, как уже указывалось ранее, тепловой баланс непрерывно действующих установок составляется не на весь период тепловлажной обработки, а для каждой зоны подвода теплоты установки на 1 час работы. В остальном методика составления теплового баланса непрерывно действующей тепловой установки, в частности щелевой камеры, аналогична описанной ранее для ямной камеры с использованием в качестве теплоносителя влажного пара.

Обозначения переменных см. в формулах применительно к тепловому балансу ямной пропарочной камеры (раздел 3.1).

Период (зона) нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{б.с} \cdot c_{б.с} \cdot (t_k - t_n), \quad (123)$$

где $M_{б.с}$ — производительность щелевой камеры в час по массе бетона, кг;
 $c_{б.с}$ — удельная теплоемкость бетона;
 t_k и t_n — температуры бетонной смеси соответственно в конце и начале периода нагрева.

1.2. Нагрев металлических форм и вагонеток (Q_2)

$$Q_2 = M_{\phi} \cdot c_m \cdot (t_k - t_n), \quad (124)$$

где M_{ϕ} — масса металла (форм и вагонеток), соответствующая часовой производительности камеры;
 t_k и t_n — температура форм соответственно в конце и начале периода нагрева.

1.3. Потери теплоты в окружающую среду

Методика расчета теплопотерь в окружающую среду приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной камеры в период нагрева, но при этом необходимо помнить, что расчет ведется на 1 ч работы (Q_3).

1.3.1. Потери теплоты через перекрытие щелевой камеры (Q'_3)

$$Q'_3 = q \cdot F \cdot \tau, \quad (125)$$

где F — площадь перекрытия зоны нагрева, через которую происходят теплопотери;
 τ — продолжительность теплопередачи (в данном случае равна 1 ч);
 q — удельный тепловой поток, проходящий через ограждение, который равен:

$$q = K \cdot (t_{ср}^{вн} - t_{о.с.}), \quad (126)$$

где K — коэффициент теплопередачи (методика расчета приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной камеры в период нагрева);

$t_{ср}^{вн}$ — средняя температура среды в зоне нагрева.

1.3.2. Потери теплоты через стены напольной щелевой камеры (Q''_3)

$$Q''_3 = q \cdot F \cdot \tau, \quad (127)$$

где q — удельный тепловой поток, проходящий через ограждение (методика определения приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной пропарочной камеры в период нагрева);

F — площадь стен зоны нагрева, через которую происходят теплопотери;
 τ — продолжительность теплопередачи (в данном случае равна 1 ч).

1.3.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q'''_3)

$$Q'''_3 = F_n \cdot \frac{\lambda_{орг}}{\delta_{орг}} \cdot (t_{ср}^{вн} - t_{гр}) \cdot \tau, \quad (128)$$

где F_n — площадь пола зоны нагрева;

$t_{ср}^{вн}$ — средняя температура среды в зоне нагрева;

$t_{гр}$ — температура на границе ограждение (пол) — земля (методику определения см. в п. 1.4.3 теплового баланса ямной пропарочной камеры в период нагрева);

τ — продолжительность теплопередачи (в данном случае равна 1 ч).

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3 + Q'''_3. \quad (129)$$

1.4. Расход теплоты на нагрев ограждений щелевой камеры

Данный вариант теплового баланса справедлив в случае, когда щелевая камера вышла на постоянный тепловой режим работы, т. е. температуры среды и ограждения в одних и тех же участках камеры стабилизировались. Если тепловой баланс камеры составляется на момент ее пуска, то должна быть введена дополнительная статья расхода теплоты, связанная с затратой последней на нагрев ограждений камеры. Методика ее расчета аналогична приведенной в п. 1.3 теплового баланса ямной пропарочной камеры в период нагрева. При этом необходимо иметь в виду, что площадь, аккумулирующая теплоту, равна площади ограждений зоны нагрева или изотермической выдержки, а также из формулы (34) исключается величина «35». Данная статья учитывается как в зоне нагрева, так и в зоне изотермической выдержки. Кроме того, она должна быть включена с соответствующим коэффициентом в сумму неучтенных потерь и в общий расход теплоты. В приводимом варианте теплового баланса щелевой камеры данная статья не учтена и в расчеты не входит.

1.5. Неучтенные потери теплоты (Q_4)

$$Q_4 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (130)$$

где μ — коэффициент неучтенных потерь, учитывающий потери теплоносителя в паропроводах, через открытые торцы щелевой камеры, теплосодержание пара, занимающего свободный объем камеры. Для расчета может быть принят равным 0,05–0,1.

1.6. Общий расход теплоты в зоне нагрева ($Q_{об}^H$)

$$Q_{об}^H = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4. \quad (131)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q_1')

$$Q_1' = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{экз},$$

где V_6 — производительность щелевой камеры в час по объему бетона;

Π — расход цемента на 1 м^3 бетона;

$q_{экз}$ — тепловыделение 1 кг цемента в процессе ТВО, которое определяется по формулам, приведенным в тепловом балансе ямной пропарочной камеры, при этом $\tau = 1 \text{ ч}$.

2.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q_2')

$$Q_2' = Q_H^{об} - Q_1'. \quad (132)$$

3. Расход теплоносителя в зоне нагрева (влажного пара)

3.1. Часовой расход пара в зоне нагрева ($M_{ч}^{нагр}$)

$$M_{ч}^{нагр} = \frac{Q_2'}{(i'' - i')}. \quad (133)$$

3.2. Общий расход пара в зоне нагрева ($M_{общ}^{нагр}$)

$$M_{общ}^{нагр} = \frac{Q_2' \cdot \tau}{(i'' - i')}, \quad (134)$$

где τ — продолжительность периода нагрева.

3.3. Удельный расход пара в зоне нагрева ($M_{уд}^{нагр}$)

$$M_{уд}^{нагр} = \frac{M_{ч}^{нагр}}{V_{б.с.}}, \quad (135)$$

где $V_{б.с.}$ — производительность щелевой камеры в час по объему бетона.

Период (зона) изотермической выдержки

Структура теплового баланса зоны изотермической выдержки аналогична структуре теплового баланса ямной пропарочной камеры, работающей с использованием влажного пара. Отдельные статьи расхода и прихода теплоты рассчитываются по формулам, приведенным в указанном выше

тепловом балансе. При этом необходимо помнить, что расчет ведется на 1 час работы установки, т. е. как и для зоны нагрева. Отличие от расчета зоны нагрева заключается в том, что изменяются значения температур и размеры зоны.

Исходя из сказанного выше в расходную часть теплового баланса зоны изотермической выдержки щелевой камеры входят следующие статьи расхода теплоты.

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Потери теплоты в окружающую среду (Q_1)

Методика расчета теплопотерь (q) в окружающую среду приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной пропарочной камеры в период нагрева, но при этом необходимо помнить, что расчет ведется на 1 час работы и средняя температура внутренней поверхности ограждения камеры принимается равной температуре изотермической выдержки.

4.1.1. Потери теплоты через перекрытие щелевой камеры (Q_1')

$$Q_1' = F \cdot q \cdot \tau, \quad (136)$$

где F — площадь перекрытия зоны изотермической выдержки;
 q — удельный тепловой поток, проходящий через ограждение (методика расчета приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной камеры в период нагрева).

4.2.2. Потери теплоты через стены напольной щелевой камеры (Q_1'')

$$Q_1'' = q \cdot F \cdot \tau, \quad (137)$$

где q — удельный тепловой поток, проходящий через ограждения — стены камеры (методика расчета q приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной камеры в период нагрева);
 F — площадь стен зоны изотермической выдержки.

4.1.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q_1''')

$$Q_1''' = F_n \cdot \frac{\lambda_{огр}}{\delta_{огр}} \cdot (t_{ср}^{вн} - t_{гр}) \cdot \tau, \quad (138)$$

где F_n — площадь пола зоны изотермической выдержки;
 $t_{ср}^{вн}$ — средняя температура среды зоны изотермической выдержки;
 $t_{гр}$ — температура на границе ограждение — земля (методику определения см. в п. 1.4.3 теплового баланса ямной камеры в период нагрева).

$$Q_1 = Q_1' + Q_1'' + Q_1''' \quad (139)$$

4.2. Неучтенные потери теплоты (Q_2)

$$Q_2 = \mu \cdot (Q_1' + Q_1'' + Q_1'''), \quad (140)$$

где μ — коэффициент неучтенных потерь, который может быть принят равным 0,03–0,05.

4.3. Общй расход теплоты в зоне изотермической выдержки ($Q_{об}^{из}$)

$$Q_{об}^{из} = Q_1 + Q_2. \quad (141)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q_1')

$$Q_1' = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{экз}, \quad (142)$$

где V_6 — объем бетона, равный часовой производительности камеры;
 $q_{экз}$ — тепловыделение 1 кг цемента в процессе ТВО (расчет см. в тепловом балансе ямной камеры).

5.2. Теплота, подводимая с теплоносителем (Q_2')

$$Q_2' = Q_{из}^{об} - Q_1' \quad (143)$$

6. Расход теплоносителя в зоне изотермической выдержки

6.1. Часовой расход пара в зоне изотермической выдержки ($M_{ч}^{из}$)

$$M_{ч}^{из} = \frac{Q_2'}{(i'' - i')} \quad (144)$$

6.2. Общий расход пара в зоне изотермической выдержки ($M_{об}^{из}$)

$$M_{об}^{из} = M_{ч}^{из} \cdot \tau \quad (145)$$

6.3. Удельный расход пара в зоне изотермической выдержки ($M_{уд}^{из}$):

$$M_{уд}^{из} = \frac{M_{ч}^{из}}{V_6} \quad (146)$$

где V_6 — часовая производительность камеры по объему бетона.

7. Расход теплоносителя за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход пара ($M_{об}$)

$$M_{об} = M_{об}^{нагр} + M_{об}^{из} \quad (147)$$

7.2. Среднечасовой расход пара ($M_{ч}$)

$$M_{ч} = \frac{M_{об}}{\tau_{нагр} + \tau_{из}} \quad (148)$$

7.3. Удельный расход пара ($M_{уд}$)

$$M_{уд} = M_{уд}^{нагр} + M_{уд}^{из} \quad (149)$$

8. Расход топлива (природного газа), необходимый для получения требуемого количества пара

8.1. Среднечасовой расход природного газа ($X_{ч}$)

$$X_{ч} = \frac{M_{ч} \cdot i^1}{\varepsilon \cdot q_{г}} \quad (150)$$

8.2. Удельный расход природного газа ($X_{уд}$)

$$X_{уд} = \frac{M_{уд} \cdot i^1}{\varepsilon \cdot q_{г}} \quad (151)$$

где i^1 — теплосодержание влажного пара;

ε — коэффициент использования теплоты топлива при производстве пара, доли ед., может быть принят равным 0,3;

$q_{г}$ — низшая теплотворная способность газа, может быть принята равной 35 600 кДж/м³ (8500 ккал/м³).

3.4. Тепловой баланс напольной щелевой рециркуляционной камеры (теплоноситель — продукты сгорания природного газа)

В основном методика составления теплового баланса щелевой рециркуляционной камеры аналогична той, что приведена для щелевой пропарочной камеры, где в качестве теплоносителя используется пар. Но, как и в случае с пропарочной и рециркуляционной ямными камерами, у ще-

левой рециркуляционной камеры по сравнению с пропарочной есть ряд отличий, связанных с особенностями работы.

Обозначения переменных приведены в предыдущих тепловых балансах.

Период (зона) нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{б.с} \cdot c_{б.с} \cdot (t_k - t_n), \quad (152)$$

где $M_{б.с}$ — часовая производительность щелевой камеры по массе бетона.

1.2. Нагрев форм и вагонеток (Q_2)

$$Q_2 = M_{\phi} \cdot c_m \cdot (t_k - t_n), \quad (153)$$

где M_{ϕ} — общая масса металла, соответствующая часовой производительности камеры.

1.3. Потери теплоты в окружающую среду (Q_3)

Методика расчета удельных теплопотерь (q) изложена в п. 1.4 теплового баланса ямной камеры в период нагрева, но при этом необходимо помнить, что расчет ведется на 1 час работы, т. е. $\tau = 1$ ч, а площади ограждения принимаются для всей зоны нагрева.

1.3.1. Потери теплоты через перекрытие щелевой камеры (Q'_3)

$$Q'_3 = q \cdot F_{пер} \cdot \tau. \quad (154)$$

1.3.2. Потери теплоты через стены напольной щелевой камеры (Q''_3)

$$Q''_3 = q \cdot F_{ст} \cdot \tau. \quad (155)$$

1.3.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q'''_3)

$$Q'''_3 = F_{пола} \cdot \frac{\lambda_{огр}}{\delta_{огр}} \cdot (t_{ср}^{вн} - t_{гр}) \cdot \tau, \quad (156)$$

где $t_{гр}$ — температура на границе ограждение (пол) — земля (методику определения см. в п. 1.4.3 теплового баланса ямной пропарочной камеры в период нагрева).

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3 + Q'''_3. \quad (157)$$

1.4. Расход теплоты на испарение воды затворения из бетона (Q_4)

$$Q_4 = \frac{M_{б.с} \cdot \Delta W \cdot i}{100}, \quad (158)$$

где $M_{б.с}$ — производительность камеры в час по массе бетона, кг;

ΔW — количество воды, в % от массы бетона, испарившейся из бетона в процессе ТВО на данной стадии (для расчета может быть принято для тяжелого бетона 0,5–1,0 %, для керамзитобетона 1,5–2 %).

1.5. Потери теплоты в теплогенераторе (Q_5)

$$Q_5 = 0,1Q_H^p \cdot X \cdot \tau, \quad (159)$$

где τ — продолжительность работы теплогенератора (для непрерывно работающей установки принимается равной 1 ч).

Остальные обозначения см. в п. 1.6 теплового баланса ямной рециркуляционной камеры.

1.6. Потери теплоты с отходящими продуктами сгорания (Q_6)

$$Q_7 = \alpha \cdot V_{\text{п.с}} \cdot c_{\text{п.с}} \cdot t_{\text{п.с}} \cdot X \cdot \tau, \quad (160)$$

где τ — продолжительность работы теплогенератора (принимается равной 1 ч).

Температура отходящих из камеры продуктов сгорания $t_{\text{п.с}}$ равна температуре среды в камере. Остальные обозначения см. в п. 1.7 теплового баланса ямной рециркуляционной камеры.

1.7. Неучтенные потери теплоты (Q_7)

$$Q_7 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6), \quad (161)$$

где μ — коэффициент неучтенных тепловых потерь, который может быть принят равным 0,05–0,07.

1.8. Общий расход теплоты за период нагрева ($Q_{\text{общ}}^{\text{нагр}}$)

$$Q_{\text{общ}}^{\text{нагр}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7. \quad (162)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = V_6 \cdot \text{Ц} \cdot q_{\text{экз}}, \quad (163)$$

где $q_{\text{экз}}$ — тепловыделение 1 кг цемента, определяемое по формуле из теплового баланса ямной пропарочной камеры.

2.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем — ПСПГ (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \tau \cdot X, \quad (164)$$

где τ — продолжительность работы теплогенератора (принимается равным 1 ч).

2.3. Общий приход теплоты за период нагрева ($Q_{\text{пр}}^{\text{об}}$)

$$Q_{\text{пр}}^{\text{об}} = Q'_1 + Q'_2. \quad (165)$$

3. Расход топлива (природного газа)

Расход топлива вычисляют с помощью уравнения теплового баланса. Решая это уравнение, определяют часовой расход природного газа $X^{\text{нагр}}$, затем определяют удельный расход газа в зоне нагрева $X_{\text{уд}}^{\text{нагр}}$ и общий расход топлива.

3.1. Общий расход топлива ($X_{\text{общ}}^{\text{нагр}}$)

$$X_{\text{общ}}^{\text{нагр}} = X^{\text{нагр}} \cdot \tau_{\text{нагр}}. \quad (166)$$

3.2. Удельный расход топлива ($X_{\text{уд}}^{\text{нагр}}$)

$$X_{\text{уд}}^{\text{нагр}} = \frac{X^{\text{нагр}}}{V_{\text{б.с}}}, \quad (167)$$

где $V_{\text{б.с}}$ — часовая производительность камеры по объему бетона.

Период (зона) изотермической выдержки

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Потери теплоты в окружающую среду (Q_1)

Методика расчета удельных теплопотерь (q) изложена в п. 4.1 теплового баланса ямной камеры в период нагрева, но при этом необходимо иметь в виду, что расчет ведется на 1 час работы, т. е. $\tau = 1$ ч,

площадь ограждения принимается равной для всей зоны изотермической выдержки, а средняя температура внутренней поверхности ограждения камеры принимается равной температуре изотермической выдержки.

4.1.1. Потери теплоты через перекрытие камеры (Q_1')

$$Q_1' = q \cdot F_{\text{пер}} \cdot \tau. \quad (168)$$

4.1.2. Потери теплоты в окружающую среду через стены напольной камеры (Q_1'')

$$Q_1'' = q \cdot F_{\text{ст}} \cdot \tau. \quad (169)$$

4.1.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q_1''')

$$Q_1''' = F_{\text{пол}} \cdot \frac{\lambda_{\text{огр}}}{\delta_{\text{огр}}} \cdot (t_{\text{ср}}^{\text{вн}} - t_{\text{гр}}) \cdot \tau, \quad (170)$$

где $t_{\text{гр}}$ — температура на границе ограждение — земля (методику определения см. в п. 1.4.3 теплового баланса ямной камеры в период нагрева).

$$Q_1 = Q_1' + Q_1'' + Q_1''' . \quad (171)$$

4.2. Расход теплоты на испарение воды затворения из бетона (Q_2)

$$Q_2 = \frac{M_{\text{б.с}} \cdot \Delta W \cdot i}{100}, \quad (172)$$

где ΔW — количество воды, в % от массы бетона, испарившейся из бетона в процессе ТВО на данной стадии — изотермической выдержки (для расчета может быть принято для тяжелого бетона 1,0–1,5 %, для керамзитобетона 3–4 %).

4.3. Потери теплоты в теплогенераторе (Q_3)

$$Q_3 = 0,1 Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot X \cdot \tau. \quad (173)$$

4.4. Потери теплоты с отходящими продуктами сгорания (Q_4)

$$Q_4 = \alpha \cdot V_{\text{п.с}} \cdot c_{\text{п.с}} \cdot t_{\text{п.с}} \cdot X \cdot \tau. \quad (174)$$

4.5. Неучтенные потери теплоты (Q_5)

$$Q_7 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4). \quad (175)$$

4.6. Общй расход теплоты в зоне изотермической выдержки ($Q_{\text{общ}}^{\text{из}}$)

$$Q_{\text{общ}}^{\text{из}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (176)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q_1')

$$Q_1' = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{\text{экз}}. \quad (177)$$

5.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем — ПСПГ (Q_2')

$$Q_2' = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot X \cdot \tau. \quad (178)$$

5.3. Общий приход теплоты за период изотермической выдержки ($Q_{\text{пр}}^{\text{об}}$)

$$Q_{\text{пр}}^{\text{об}} = Q'_1 + Q'_2. \quad (179)$$

6. Расход топлива (природного газа)

Расход топлива вычисляют с помощью уравнения теплового баланса. Решая это уравнение, определяют часовой расход природного газа $X^{\text{изот}}$.

6.1. Общий расход топлива ($X_{\text{общ}}^{\text{изот}}$)

$$X_{\text{общ}}^{\text{из}} = X_{\text{час}}^{\text{из}} \cdot \tau_{\text{из}}. \quad (180)$$

6.2. Удельный расход топлива ($X_{\text{уд}}^{\text{из}}$)

$$X_{\text{уд}}^{\text{из}} = \frac{X_{\text{общ}}^{\text{из}}}{V_{\text{б.с}}}, \quad (181)$$

где $V_{\text{б.с}}$ — часовая производительность камеры по объему бетона.

7. Расход топлива за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход природного газа ($X_{\text{об}}$)

$$X_{\text{об}} = X_{\text{общ}}^{\text{нагр}} + X_{\text{общ}}^{\text{из}}. \quad (182)$$

7.2. Удельный расход природного газа ($X_{\text{уд}}$)

$$X_{\text{уд}} = X_{\text{уд}}^{\text{нагр}} + X_{\text{уд}}^{\text{из}}. \quad (183)$$

7.3. Среднечасовой расход природного газа ($X_{\text{ч}}$)

$$X_{\text{ч}} = \frac{X_{\text{общ}}}{\tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{из}}}. \quad (184)$$

3.5. Тепловой баланс кассетной установки (теплоноситель — влажный пар)

Методика составления теплового баланса кассетной установки аналогична описанной ранее для ямной пропарочной камеры. Однако есть и ряд отличий, связанных с особенностями конструкции кассетной установки. Например, отсутствует расход теплоты на нагрев ограждений, потери в землю и т.п.

Основные обозначения приведены ранее, когда речь шла о тепловом балансе ямной пропарочной камеры.

Период нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{\text{б.с}} \cdot c_{\text{б.с}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}). \quad (185)$$

1.2. Нагрев металлической части кассетной установки (Q_2)

$$Q_2 = M_{\text{кас}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (186)$$

где $M_{\text{кас}}$ — масса кассетной установки.

1.3. Потери теплоты в окружающую среду через ограждения (Q_3)

Подробно методика определения теплотерь через ограждения в окружающую среду изложена в п. 1.4 теплового баланса ямной пропарочной камеры. Ниже приведены лишь основные формулы для определения теплотерь через ограждения.

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3 + Q'''_3 + Q''''_3. \quad (187)$$

1.3.1. Потери теплоты в окружающую среду через теплоизолированные стенки (Q'_3)

$$Q'_3 = F_{\text{т.ст}} \cdot q \cdot \tau_{\text{н}}. \quad (188)$$

1.3.2. Потери теплоты в окружающую среду через неизолированные стенки (Q''_3)

$$Q''_3 = F_{\text{н.ст}} \cdot q \cdot \tau_{\text{н}}. \quad (189)$$

Методика определения величины удельного теплового потока аналогична приведенной ранее. Однако, учитывая высокую теплопроводность металла, из которого выполнена стенка кассеты, формула принимает вид

$$q = \alpha_2 (t_{\text{ср}}^{\text{BH}} - t_{\text{о.с}}), \quad (190)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду, при этом $A = 2,2$.

1.3.3. Потери теплоты в окружающую среду верхом установки (Q'''_3)

$$Q'''_3 = F_{\text{верх}} \cdot q \cdot \tau_{\text{н}}, \quad (191)$$

где $q = \alpha_2 (t_{\text{ср}}^{\text{BH}} - t_{\text{о.с}})$, при этом $A = 2,6$.

1.3.4. Потери теплоты в окружающую среду низом установки (Q''''_3)

$$Q''''_3 = F_{\text{низ}} \cdot q \cdot \tau_{\text{н}}, \quad (192)$$

где $q = \alpha_2 (t_{\text{ср}}^{\text{BH}} - t_{\text{о.с}})$, при этом $A = 1,8$.

1.4. Теплосодержание пара в тепловых отсеках (Q_4)

$$Q_4 = V_{\text{пар}} \cdot i'' \cdot \rho'', \quad (193)$$

где $V_{\text{пар}}$ — внутренний объем тепловых отсеков, м^3 ;

i — теплосодержание пара;

ρ — плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$.

1.5. Неучтенные потери теплоты (Q_5)

$$Q_5 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4). \quad (194)$$

1.6. Общй расход теплоты за период нагрева ($Q_{\text{об}}^{\text{из}}$)

$$Q_{\text{об}}^{\text{из}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5. \quad (195)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = q_{\text{экз}} \cdot m_{\text{ц}}, \quad (196)$$

где $q_{\text{экз}}$ — тепловыделение 1 кг цемента, определяемое по формулам из теплового баланса ямной пропарочной камеры;

$m_{\text{ц}}$ — масса цемента, находящегося в кассетной установке.

2.2 Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q_2')

$$Q_2' = Q_H^{об} - Q_1'. \quad (197)$$

3. Расход теплоносителя (влажного пара) за период нагрева

3.1. Общий расход пара за период нагрева ($M_{об}^H$)

$$M_{об}^H = \frac{Q_2'}{(i'' - i')}. \quad (198)$$

3.2. Удельный расход пара за период нагрева ($M_{уд}^{нагр}$)

$$M_{уд}^H = \frac{M_{уд}^{нагр}}{V_{б.с}}, \quad (199)$$

где $V_{б.с}$ — общий объем бетона в установке.

3.3. Часовой расход пара за период нагрева ($M_ч^H$)

$$M_ч^H = \frac{M_{об}^H}{\tau_H}. \quad (200)$$

Период изотермической выдержки

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

Формула аналогична приведенной выше в п. 1.1, но, как и в тепловом балансе ямной пропарочной камеры, данная статья может отсутствовать.

4.2. Нагрев металлической части кассетной установки (Q_2)

Данная статья также может отсутствовать.

4.3. Потери теплоты в окружающую среду через ограждения (Q_3)

Подробно методика определения теплотерь через ограждения в окружающую среду изложена в тепловом балансе ямной пропарочной камеры (п. 1.4 раздела 3.1), а также в тепловом балансе кассетной установки (п. 1.3 раздела 3.1). При этом необходимо помнить, что $t_{сп}^{BH}$ в период изотермической выдержки практически равна $t_{изот}$, а время теплопередачи равно продолжительности изотермической выдержки $t_{изот}$.

$$Q_3 = Q_3' + Q_3'' + Q_3''' + Q_3'''' . \quad (201)$$

4.3.1. Потери теплоты в окружающую среду через теплоизолированные стенки (Q_3')

$$Q_3' = F_{т.с} \cdot q \cdot \tau_{из}. \quad (202)$$

4.3.2. Потери теплоты в окружающую среду через неизолированные стенки (Q_3'')

$$Q_3'' = F_{н.ст} \cdot q \cdot \tau_{из}. \quad (203)$$

4.3.3. Потери теплоты в окружающую среду верхом установки (Q_3''')

$$Q_3''' = F_{верх} \cdot q \cdot \tau_{из}. \quad (204)$$

4.3.4. Потери теплоты в окружающую среду низом установки (Q_3'''')

$$Q_3'''' = F_{низ} \cdot q \cdot \tau_{из}. \quad (205)$$

4.4. Теплосодержание пара в тепловых отсеках (Q_4)

В качестве самостоятельной данную статью расхода в период изотермической выдержки можно не учитывать и отнести к неучтенным потерям теплоты.

4.5. Неучтенные потери теплоты (Q_5)

$$Q_5 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3), \quad (206)$$

4.6. Общий расход теплоты за период изотермической выдержки ($Q_{об}^{из}$)

$$Q_{об}^{из} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5. \quad (207)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = q_{экз} \cdot m_{ц}. \quad (208)$$

5.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_{об}^{из} - Q'_1. \quad (209)$$

6. Расход теплоносителя (влажного пара) за период изотермической выдержки

6.1. Общий расход пара за период ($M_{об}^{из}$)

$$M_{об}^{из} = \frac{Q'_2}{(i'' - i')}. \quad (210)$$

6.2. Удельный расход пара за период ($M_{уд}^{из}$)

$$M_{уд}^{из} = \frac{M_{об}^{из}}{V_{б.с}}, \quad (211)$$

где $V_{б.с}$ — общий объем бетона, находящийся в установке.

6.3. Часовой расход пара за период ($M_{ч}^{из}$)

$$M_{ч}^{из} = \frac{M_{об}^{из}}{\tau_{из}}. \quad (212)$$

7. Расход теплоносителя (влажного пара) за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход пара ($M_{об}$)

$$M_{об} = M_{об}^H + M_{об}^{из}. \quad (213)$$

7.2. Удельный расход пара ($M_{уд}$)

$$M_{уд} = M_{уд}^H + M_{уд}^{из}. \quad (214)$$

7.3. Среднечасовой расход пара ($M_{ч}$)

$$M_{ч} = \frac{M_{об}}{\tau_H + \tau_{из}}. \quad (215)$$

8. Расход топлива (природного газа), необходимый для получения требуемого количества пара

8.1. Среднечасовой расход природного газа ($X_{ч}$)

$$X_{ч} = M_{ч} \cdot \frac{i}{\varepsilon q_{\Gamma}}. \quad (216)$$

8.2. Удельный расход природного ($X_{уд}$)

$$X_{уд} = M_{уд} \cdot \frac{i'}{\varepsilon q_{г}}, \quad (217)$$

где i' — теплосодержание влажного пара;

ε — коэффициент использования теплоты топлива при производстве пара, доли ед., может быть принят равным 0,3;

$q_{г}$ — низшая теплотворная способность газа, может быть принята равной 35 600 кДж/м³ (8500 ккал/м³).

3.6. Тепловой баланс пакета термоформ (теплоноситель — влажный пар)

Структура теплового баланса пакета термоформ практически не отличается от теплового баланса кассетной установки, а сам тепловой баланс может быть составлен по методике, описанной ранее для ямной пропарочной камеры. Однако, учитывая особенности конструкции термоформ, имеются и некоторые отличия. Основные обозначения приведены в разделе 3.1 «Тепловой баланс напольной ямной пропарочной камеры».

Период нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{б.с} \cdot c_{б.с} \cdot (t_{к} - t_{н}). \quad (218)$$

1.2. Нагрев термоформ (Q_2)

$$Q_2 = M_{ф} \cdot c_{м} \cdot (t_{к} - t_{н}), \quad (219)$$

1.3. Испарение воды затворения из бетона (Q_3)

$$Q_3 = \frac{m_{из} \cdot \Delta W \cdot i}{100}, \quad (220)$$

где $m_{из}$ — масса одного (верхнего) изделия;

ΔW — количество испарившейся воды в процентах от массы бетона на одно изделие;

i — количество теплоты, необходимое для испарения 1 кг воды.

Однако если поверхность верхнего изделия накрывают брезентом или специальной полимерной пленкой, исключающей испарение воды из бетона, то данная статья может быть исключена из теплового баланса. Этот вопрос должен быть освещен при описании установки.

1.4. Потери теплоты в окружающую среду (Q_4)

Подробно методика определения теплопотерь изложена в п. 1.4 теплового баланса ямной пропарочной камеры (раздел 3.1) и п. 1.3 теплового баланса кассетной установки (раздел 3.5). Ниже приведены лишь основные формулы.

1.4.1. Теплопотери верхом пакета (Q'_4)

$$Q'_4 = F_{верх} \cdot q \cdot \tau_{н}, \quad (221)$$

где q — удельные теплопотери: если верхнее изделие не закрыто брезентом, то $q = \alpha_2 (t_{ср}^{BH} - t_{о.с})$,
если верхнее изделие закрыто брезентом, то $q = K (t_{ср}^{BH} - t_{о.с})$.

1.4.2. Теплопотери боковой поверхностью пакета (Q_4'')

$$Q_4'' = F_{\text{бок}} \cdot q \cdot \tau_{\text{н}}, \quad (222)$$

где

$$q = \alpha_2 (t_{\text{ср}}^{\text{BH}} - t_{\text{о.с}}). \quad (223)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи наружной поверхностью (п. 1.3 раздела 3.5).

1.4.3. Теплопотери низом пакета (Q_4''')

$$Q_4''' = F_{\text{низ}} \cdot q \cdot \tau_{\text{н}}. \quad (224)$$

$$Q_4 = Q_4' + Q_4'' + Q_4'''. \quad (225)$$

1.5. Теплосодержание пара в тепловых отсеках (Q_5)

$$Q_5 = V_{\text{п.от}} \cdot i'' \cdot \rho'', \quad (226)$$

где $V_{\text{п.от}}$ — объем паровых рубашек (бортов) и отсеков (поддоны средних форм), м³;

i'' — теплосодержание пара;

ρ'' — плотность пара, кг/м³.

1.6. Неучтенные потери теплоты (Q_6)

$$Q_6 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5). \quad (227)$$

1.7. Общий расход теплоты за период нагрева ($Q_{\text{об}}^{\text{H}}$)

$$Q_{\text{об}}^{\text{H}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6. \quad (228)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q_1')

$$Q_1' = V_{\text{б.с}} \cdot \text{Ц} \cdot q_{\text{экз}}, \quad (229)$$

где $q_{\text{экз}}$ — тепловыделение 1 кг цемента при ТВО (см. тепловой баланс ямной камеры, раздел 3.1).

2.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q_2')

$$Q_2' = Q_{\text{H}}^{\text{об}} - Q_1'. \quad (230)$$

3. Расход теплоносителя (влажного пара) за период нагрева

3.1. Общий расход пара за период нагрева ($M_{\text{об}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{об}}^{\text{H}} = \frac{Q_2'}{(i'' - i')}. \quad (231)$$

3.2. Удельный расход пара за период нагрева ($M_{\text{уд}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{уд}}^{\text{H}} = \frac{M_{\text{ч}}^{\text{H}}}{V_{\text{б.с}}}. \quad (232)$$

3.3. Часовой расход пара за период нагрева ($M_{\text{ч}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{ч}}^{\text{H}} = \frac{M_{\text{об}}^{\text{H}}}{\tau_{\text{H}}}. \quad (233)$$

Период изотермической выдержки

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Испарение воды затворения из бетона (Q_1)

Условия учета или исключения данной статьи в тепловом балансе см. в п. 1.3.

4.2. Потери теплоты в окружающую среду (Q_2)

4.2.1. Теплопотери верхом пакета (Q_2')

$$Q_2' = F_{\text{верх}} \cdot q \cdot \tau_{\text{из}}. \quad (234)$$

4.2.2. Теплопотери боковой поверхностью пакета (Q_2'')

$$Q_2'' = F_{\text{бок}} \cdot q \cdot \tau_{\text{из}}. \quad (235)$$

4.2.3. Теплопотери низом пакета (Q_2''')

$$Q_2''' = F_{\text{низ}} \cdot q \cdot \tau_{\text{из}}. \quad (236)$$

$$Q_2 = Q_2' + Q_2'' + Q_2'''. \quad (237)$$

4.3. Теплосодержание пара в паровых отсеках

Так как в период изотермической выдержки свежий пар в паровые отсеки подается в малых количествах, данная статья может быть отнесена к неучтенным потерям.

4.4. Неучтенные потери тепла (Q_3)

$$Q_3 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2). \quad (238)$$

Значение μ по сравнению с периодом нагрева может быть увеличено.

4.5. Общий расход теплоты в период изотермической выдержки ($Q_{\text{обн}}^{\text{из}}$)

$$Q_{\text{обн}}^{\text{из}} = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (239)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q_1')

$$Q_1' = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{\text{экз}}. \quad (240)$$

5.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q_2')

$$Q_2' = Q_{\text{н}}^{\text{об}} - Q_1'. \quad (241)$$

6. Расход теплоносителя (влажного пара) за период изотермической выдержки

6.1. Общий расход пара за период изотермической выдержки ($M_{\text{об}}^{\text{из}}$)

$$M_{\text{об}}^{\text{из}} = \frac{Q_2'}{(i'' - i')}. \quad (242)$$

6.2. Часовой расход пара за период изотермической выдержки ($M_{\text{ч}}^{\text{из}}$)

$$M_{\text{ч}}^{\text{из}} = \frac{M_{\text{об}}^{\text{из}}}{\tau_{\text{из}}}. \quad (243)$$

6.3. Удельный расход пара за период изотермической выдержки ($M_{\text{уд}}^{\text{из}}$)

$$M_{\text{уд}}^{\text{из}} = \frac{M_{\text{об}}^{\text{из}}}{V_6}. \quad (244)$$

7. Расход теплоносителя (влажного пара) за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход пара ($M_{об}$)

$$M_{об} = M_{об}^{нагр} + M_{об}^{из}. \quad (245)$$

7.2. Среднечасовой расход пара ($M_{ч}$)

$$M_{ч} = \frac{M_{об}}{\tau_{нагр} + \tau_{из}}. \quad (246)$$

7.3. Удельный расход пара ($M_{уд}$)

$$M_{уд} = M_{уд}^{нагр} + M_{уд}^{из}. \quad (247)$$

8. Расход топлива (природного газа), необходимый для получения требуемого количества пара

8.1. Среднечасовой расход природного газа ($X_{ч}$)

$$X_{ч} = M_{ч} \cdot \frac{i}{\varepsilon q_{г}}. \quad (248)$$

8.2. Удельный расход природного газа ($X_{уд}$)

$$X_{уд} = M_{уд} \cdot \frac{i'}{\varepsilon q_{г}}, \quad (249)$$

где i' — теплосодержание влажного пара;

ε — коэффициент использования теплоты топлива при производстве пара, доли ед., может быть принят равным 0,1;

$q_{г}$ — низшая теплотворная способность газа, может быть принята равной 35 600 кДж/м³ (8500 ккал/м³).

3.7. Тепловой баланс вертикальной камеры непрерывного действия (теплоноситель — влажный пар)

Вертикальная камера относится к установкам непрерывного действия, поэтому тепловой баланс составляется на 1 час работы для каждой зоны подвода теплоты.

Тепловой баланс данной установки составляется по той же методике, что и тепловой баланс щелевой камеры с использованием в качестве теплоносителя влажного пара. Однако необходимо помнить, что зоны тепловой обработки в вертикальной камере располагаются не по длине, как в щелевой камере, а по высоте. Кроме того, металлоемкость вспомогательного оборудования в вертикальной камере значительно выше. Поэтому в структуре теплового баланса вертикальной камеры имеется ряд отличий от щелевой камеры. Все формулы, приведенные ранее в тепловом балансе щелевой камеры (раздел 3.3), справедливы и для вертикальной камеры. Ниже приводятся статьи, которые должны быть учтены при составлении теплового баланса вертикальной камеры, и основные формулы для их определения.

Период (зона) нагрева

1. Статьи расхода теплоты

1.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

$$Q_1 = M_{б.с} \cdot c_{б.с} \cdot (t_{к} - t_{н}), \quad (250)$$

где $M_{б.с}$ — часовая производительность щелевой камеры по массе бетона, кг.

1.2. Нагрев металлических форм и вагонеток (Q_2)

$$Q_2 = M_{\text{ф}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{н}}), \quad (251)$$

где $M_{\text{ф}}$ — масса металла (форм и вагонеток), соответствующая часовой производительности камеры, кг.

1.3. Потери теплоты в окружающую среду (Q_3)

Методика определения теплотерь приведена в п. 1.4 теплового баланса ямной камеры в период нагрева (раздел 3.1).

1.3.1. Теплотери через стены камеры (Q'_3)

$$Q'_3 = q \cdot F_{\text{ст}} \cdot \tau, \quad (252)$$

где $F_{\text{ст}}$ — площадь стен зоны нагрева, м^2 ;

τ — продолжительность теплопередачи (в данном случае равна 1 ч).

1.3.2. Потери теплоты через пол в землю (Q''_3)

$$Q''_3 = F_n \cdot \frac{\lambda_n}{\delta_n} \cdot (t^{\text{вн}} - t_{\text{гр}}) \cdot \tau, \quad (253)$$

где F_n — площадь пола зоны нагрева, через которую происходят теплотери, м^2 ;

$t_{\text{гр}}$ — температура на границе пол — земля (методику расчета см. в п. 1.4.3 раздела 3.1);

$t^{\text{вн}}$ — температура внутренней поверхности пола, $^{\circ}\text{C}$, которая может быть принята равной $t_{\text{о.с}} + (5 \div 10)$;

τ — продолжительность теплопередачи (в данном случае равна 1 ч).

$$Q_3 = Q'_3 + Q''_3. \quad (254)$$

1.4. Аккумуляция теплоты ограждениями вертикальной камеры (Q_4)

Расчет подробно приведен в п. 1.4 теплового баланса напольной щелевой камеры (раздел 3.3).

1.5. Нагрев конструкций пакетировщика (Q_5)

Данная статья учитывается, если тепловой баланс составляют на момент пуска камеры.

1.6. Неучтенные потери теплоты (Q_6)

$$Q_6 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5), \quad (255)$$

где μ — коэффициент неучтенных потерь, может быть принят равным 0,05–0,1.

1.7. Общй расход теплоты в зоне нагрева ($Q_{\text{об}}^{\text{н}}$)

$$Q_{\text{об}}^{\text{н}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6. \quad (256)$$

2. Статьи прихода теплоты

2.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = V_6 \cdot \text{Ц} \cdot q_{\text{экз}}, \quad (257)$$

где V_6 — часовая производительность камеры по объему бетона, м^3 ;

$q_{\text{экз}}$ — тепловыделение 1 кг цемента в процессе ТВО, которое определяется по формулам, приведенным в тепловом балансе ямной пропарочной камеры, при этом $\tau = 1$ ч.

2.2. Теплота, подводимая в установку с теплоносителем (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_{\text{н}}^{\text{об}} - Q'_1. \quad (258)$$

3. Расход теплоносителя (влажного пара) в зоне нагрева

3.1 Часовой расход пара в зоне нагрева ($M_{\text{ч}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{ч}}^{\text{H}} = \frac{Q_2'}{(i'' - i')} \quad (259)$$

3.2. Удельный расход пара в зоне нагрева ($M_{\text{уд}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{уд}}^{\text{H}} = \frac{M_{\text{ч}}^{\text{H}}}{V_{\text{б.с}}}, \quad (260)$$

где $V_{\text{б.с}}$ — часовая производительность камеры по объему бетона.

3.3. Общий расход пара в зоне нагрева ($M_{\text{общ}}^{\text{H}}$)

$$M_{\text{общ}}^{\text{H}} = M_{\text{ч}}^{\text{H}} \cdot \tau_{\text{H}}, \quad (261)$$

где τ — продолжительность периода нагрева.

Период (зона) изотермической выдержки

4. Статьи расхода теплоты

4.1. Нагрев бетонной смеси (Q_1)

Данная статья в тепловом балансе периода изотермической выдержки может отсутствовать, так как уже на стадии нагрева изделия могут приобрести максимально возможную температуру.

4.2. Нагрев металлических форм-вагонеток (Q_2)

Данная статья также может отсутствовать.

4.3. Потери теплоты в окружающую среду (Q_3)

$$Q_3 = Q_3' + Q_3'' + Q_3''' \quad (262)$$

4.3.1. Потери теплоты через стены камеры (Q_3')

$$Q_3' = q \cdot F_{\text{ст}} \cdot \tau, \quad (263)$$

где $F_{\text{ст}}$ — площадь стен зоны изотермической выдержки.

4.3.2. Потери теплоты через перекрытие камеры (Q_3'')

$$Q_3'' = q \cdot F_{\text{пер}} \cdot \tau, \quad (264)$$

где $F_{\text{пер}}$ — площадь перекрытия камеры.

4.3.3. Потери теплоты через пол камеры в землю (Q_3''')

Данная статья входит в структуру теплового баланса зоны изотермической выдержки в том случае, если в камере располагается более двух пакетов форм, т. е. 4, 6 и т. д. Тогда

$$Q_3''' = F_n \cdot \frac{\lambda_n}{\delta_n} \cdot (t^{\text{вн}} - t_{\text{гр}}) \cdot \tau, \quad (265)$$

где F_n — площадь пола зоны изотермической выдержки, м^2 ;

$t^{\text{вн}}$ — температура внутренней поверхности пола, равная температуре в зоне изотермической выдержки.

4.4. Расход теплоты на нагрев ограждений камеры (Q_4)

Данная статья учитывается, если тепловой баланс составляют на момент пуска камеры.

4.5. Нагрев конструкций пакетировщика и передаточного устройства (Q_5)

Данная статья учитывается, если тепловой баланс составляют на момент пуска камеры.

4.6. Неучтенные потери теплоты (Q_6)

$$Q_6 = \mu \cdot (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5). \quad (266)$$

4.7. Общий расход теплоты в зоне изотермической выдержки ($Q_{06}^{из}$)

$$Q_{06}^{из} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6. \quad (267)$$

5. Статьи прихода теплоты

5.1. Теплота экзотермических реакций цемента (Q'_1)

$$Q'_1 = V_6 \cdot \Pi \cdot q_{экз}. \quad (268)$$

5.2. Теплота, подводимая с теплоносителем (Q'_2)

$$Q'_2 = Q_{06}^{из} - Q'_1. \quad (269)$$

6. Расход теплоносителя (влажного пара) в зоне изотермической выдержки

6.1. Часовой расход пара ($M_{ч}^{из}$)

$$M_{ч}^{из} = \frac{Q'_2}{(i'' - i')}. \quad (270)$$

6.2. Удельный расход пара ($M_{уд}^{из}$)

$$M_{уд}^{из} = \frac{M_{ч}^{из}}{V_{6,с}}. \quad (271)$$

6.3. Общий расход пара ($M_{06}^{из}$)

$$M_{06}^{из} = M_{ч}^{из} \cdot \tau_{изот}. \quad (272)$$

7. Расход теплоносителя за весь цикл ТВО

7.1. Общий расход пара (M_{06})

$$M_{06} = M_{06}^H + M_{06}^{из}. \quad (273)$$

7.2. Удельный расход пара ($M_{06}^{уд}$)

$$M_{06}^{уд} = M_{уд}^H + M_{уд}^{из}. \quad (274)$$

7.3. Среднечасовой расход пара ($M_{06}^ч$)

$$M_{06}^ч = \frac{M_{06}^{уд}}{\tau_{нагр} + \tau_{из}}. \quad (275)$$

8. Расход топлива (природного газа), необходимый для получения требуемого количества пара

8.1. Среднечасовой расход природного газа ($X_{ч}$)

$$X_{ч} = \frac{M_{06}^ч \cdot i^i}{\varepsilon \cdot q_{г}}. \quad (276)$$

8.2. Удельный расход природного газа ($X_{уд}$)

$$X_{уд} = \frac{M_{об}^{уд} \cdot i^i}{\varepsilon \cdot q_{г}}, \quad (277)$$

где i' — теплосодержание влажного пара;

ε — коэффициент использования теплоты топлива при производстве пара, доли ед., может быть принят равным 0,3;

$q_{г}$ — низшая теплотворная способность газа, может быть принята равной 35 600 кДж/м³ (8500 ккал/м³).

4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЛЯ ПРОПАРОЧНЫХ КАМЕР

4.1. Расчет и подбор диаметров паропроводов, отверстий дроссельных диафрагм

Диаметры пароподводящих трубопроводов рассчитываются по максимальной часовой потребности теплоносителя и скорости его движения. Прежде всего определяют площадь поперечного сечения трубопровода магистрали и ответвлений от него:

$$F = \frac{M_{\text{ч}}}{\rho'' \cdot W \cdot 3600}, \quad (278)$$

где $M_{\text{ч}}$ — максимальный часовой расход теплоносителя (пара), при расчете подвода к камере он принимается равным часовому расходу теплоносителя на стадии нагрева, при расчете магистрального трубопровода он принимается равным сумме часовых расходов пара во всех работающих тепловых установках, подключенных к данной магистрали (определяется на основе циклограммы работы установок);

ρ'' — плотность пара, кг/м³;

W — скорость пара, которая для насыщенного пара составляет 20–30 м/с и 30–40 м/с в магистральных паропроводах, для перегретого пара скорости принимают в 1,3–1,5 раза больше.

Отсюда диаметр трубопровода равен:

$$D = \sqrt{4F/\pi}. \quad (279)$$

Диаметр дроссельных диафрагм рассчитывают по формуле

$$d = \sqrt{M_{\text{ч}} / \left[1,252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot (\rho'' \cdot \Delta P)^{0,5} \right]}, \quad (280)$$

где α — коэффициент расхода пара (обычно колеблется в пределах 0,588–0,630);

ε — поправочный множитель на расширение пара (для расчетов может быть принят равным 0,79);

ΔP — перепад давления в дроссельной диафрагме.

Количество отверстий в перфорированной трубе может быть определено по формуле

$$n = M_{\text{ч}} / \left[0,67d^2 \cdot \sqrt{(0,02 + 0,048p) \cdot (p_1 - p_2) \cdot 100} \right], \quad (281)$$

где d — диаметр отверстий (обычно $d = 2$ –5 мм), мм;

p_1, p_2 — абсолютное давление пара в перфорированной трубе и камере ($p_2 = 0,1$ МПа).

4.2. Расчет вентиляторов для охлаждения изделий в камере

Сначала определяют удаляемое из камер количество теплоты:

- остывающих изделий до их средней конечной температуры;
- экзотермических реакций (если они еще имеют место);
- остывающих форм до $t_{\text{ср}}$ воздуха, т. е. до $(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})/2$;
- ограждений.

Удаляемое количество теплоты нужно уменьшить на величину потерь теплоты в окружающую среду через ограждения камеры (крышку — потолок, стены, пол) и на теплоту испарения влаги из камеры ($Q_{\text{исп}}$), кДж:

$$Q_{\text{исп}} = m \cdot (2500 + 1,97t_{\text{уход.возд}}), \quad (282)$$

где m — масса испаренной влаги, кг.

Исходя из количества теплоты, удаляемой в час ($Q_{уд}$), определяют расход воздуха (V_0), м³/ч, который в пособиях по вентиляционным установкам обозначают через Q_0 , м³/ч:

$$Q_0 = V = kQ_{уд}/[c_v \cdot (t_{кон} - t_{нач}) \cdot \tau], \quad (283)$$

где k — кратность циркуляции паровоздушной смеси, принимаемая равной 2;

c_v — теплоемкость воздуха, равная $0,31 \cdot 4,187$ кДж/(м³ · °С);

$t_{нач}$, $t_{кон}$ — соответственно начальная и конечная температуры воздуха, которые можно считать равными 20 и 60÷70 °С.

По расчетному часовому расходу воздуха (Q_p) определяют площадь сечения вентиляционного канала в камере (F), а затем его размеры:

$$F = \frac{Q_p}{3600W}, \quad (284)$$

где W — скорость воздуха в канале (обычно $W = 6\div 10$ м/с).

Высоту канала h принимают обычно больше его ширины b в 1,3÷1,5 раза.

Расчетную производительность вентилятора (Q_p), м³/ч, определяют по формуле

$$Q_p = \frac{1,1Q_0 \cdot (273 + t)}{273}, \quad (285)$$

где 1,1 — коэффициент запаса, учитывающий неточности расчетов, отступления от проекта при монтаже, несоответствие оборудования, негерметичность и т. п.

Полный (расчетный) напор вентилятора (H^p) равен сумме статического и динамического напоров, Па:

$$H^p = H_{ст} + H_{дин}. \quad (286)$$

Расчетный статический напор вентилятора ($H_{ст}$) расходуется на преодоление сопротивлений движению газов в линиях всасывания и нагнетания и определяется по формуле

$$H_{ст} = 1,2(h_{тр} + h_m \pm h_{геом}), \quad (287)$$

где 1,2 — коэффициент запаса, учитывающий те же факторы, что приведены выше при определении расчетной производительности вентилятора;

$(h_{тр} + h_m \pm h_{геом})$ — сумма сопротивлений движению газов от трения $h_{тр}$, местных сопротивлений h_m и на преодоление геометрического напора $h_{геом}$.

Динамический (скоростной) напор вентилятора $H_{дин}$ определяют по формуле

$$H_{дин} = \frac{W^2 \cdot \rho}{2}, \quad (288)$$

где W — скорость газов на выходе из сети, равная 10–20 м/с, может быть принята 15 м/с, но не должна быть меньше скорости в канале;

ρ — плотность газов у вентилятора.

Определив производительность и напор, можно перейти к подбору вентилятора по справочнику; следует выбирать тот вентилятор, у которого заданным значениям производительности и напора соответствует возможно бóльшая величина КПД.

Надо помнить, что в справочных таблицах и характеристиках для вентилятора приводят данные для перемещения воздуха при стандартных условиях (температура 20 °С, относительная влажность 50 %, барометрическое давление $760 \cdot 133,3$ Па и плотность 1,2 кг/м³). Поэтому при подборе по справочнику необходимо расчетный напор вентилятора привести к стандартным условиям $H^{пр}$ по формуле

$$H^{пр} = \frac{1,2H^p}{\rho} \quad (289)$$

или

$$H^{пр} = \frac{H^p(273+t)}{273+20}, \quad (290)$$

где H^p — расчетный напор, Па;

ρ — плотность воздуха при температуре t , кг/м³;

t — температура воздуха у вентилятора, °С.

По характеристике выбранного вентилятора находят частоту вращения на валу вентилятора (n), об/мин, и КПД вентилятора η_v .

Мощность N_3 (в кВт) на валу электродвигателя вентилятора определяют по формуле

$$N_3 = \frac{Q_p H^p}{(3600 \cdot 1000 \cdot 9,8 \cdot \eta_v \eta_{пр})}, \quad (291)$$

где η_v — КПД вентилятора;

$\eta_{пр}$ — КПД передачи мощности от электродвигателя к валу вентилятора, для непосредственной насадки колеса вентилятора на вал электродвигателя $\eta_{пр} = 1$, при соединении вала электродвигателя с валом вентилятора с помощью муфты $\eta_{пр} = 0,98$, при клиноременной передаче $\eta_{пр} = 0,95$, при плоскоременной передаче $\eta_{пр} = 0,90$.

Установочную мощность электродвигателя $N_{уст}$ (в кВт) определяют по формуле

$$N_{уст} = K \cdot N_3, \quad (292)$$

где K — коэффициент запаса мощности (табл. 5), принимаемый при мощности на валу вентилятора $N_{уст}$ (в кВт).

Таблица 5

Коэффициент запаса мощности

Установочная мощность на валу вентилятора, $N_{уст}$, кВт	K
До 0,5	1,5
0,5–1,0	1,3
1,01–2,0	1,2
2,01–5,0	1,15
Свыше 5	1,1

Примечание. При расчете воздушных завес целесообразно вводить воздух через узкую щель в боковой стенке камеры, а забор тем же вентилятором производить из расширенного устья щели в стенке камеры с противоположной стороны, создавая таким образом поперечную рециркуляционную завесу.

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ АВТОКЛАВА

5.1. Автоклавные установки

Автоклавы представляют собой герметически закрывающиеся цилиндрические сосуды, рассчитанные на тепловлажностную обработку изделий паром под давлением порядка 0,8–1,3 МПа. Внутренний диаметр автоклавов 2,0–3,6 м, длина корпуса 19–27 м. Они бывают проходного и тупикового типа. В проходной автоклав поезд из вагонеток заталкивается с одного конца, а через другой после работы выгружается готовая продукция. На рис. 8 показана схема проходного автоклава.

Автоклав состоит из корпуса 1 с теплоизоляцией 13 и оборудования. К оборудованию относятся две быстрозакрывающиеся крышки 2, механизм 3, закрывающий и открывающий крышки, два предохранительных клапана 4, патрубков ввода пара 12, патрубков для вывода конденсата 7, патрубков для включения в вакуум-систему 10 и патрубков для перепуска пара 5. Сам корпус устанавливается на опоры, одна из которых, 11, закреплена неподвижно, а остальные — подвижные, 8, что позволяет корпусу при тепловом расширении передвигаться по ним. В корпусе для загрузки вагонеток на специальных опорах смонтирован рельсовый путь 9 с колеей 1524 мм. Внизу между рельсами во всю длину корпуса вмонтирована перфорированная труба 6, соединенная с патрубком ввода пара и предназначенная для раздачи пара в автоклаве.

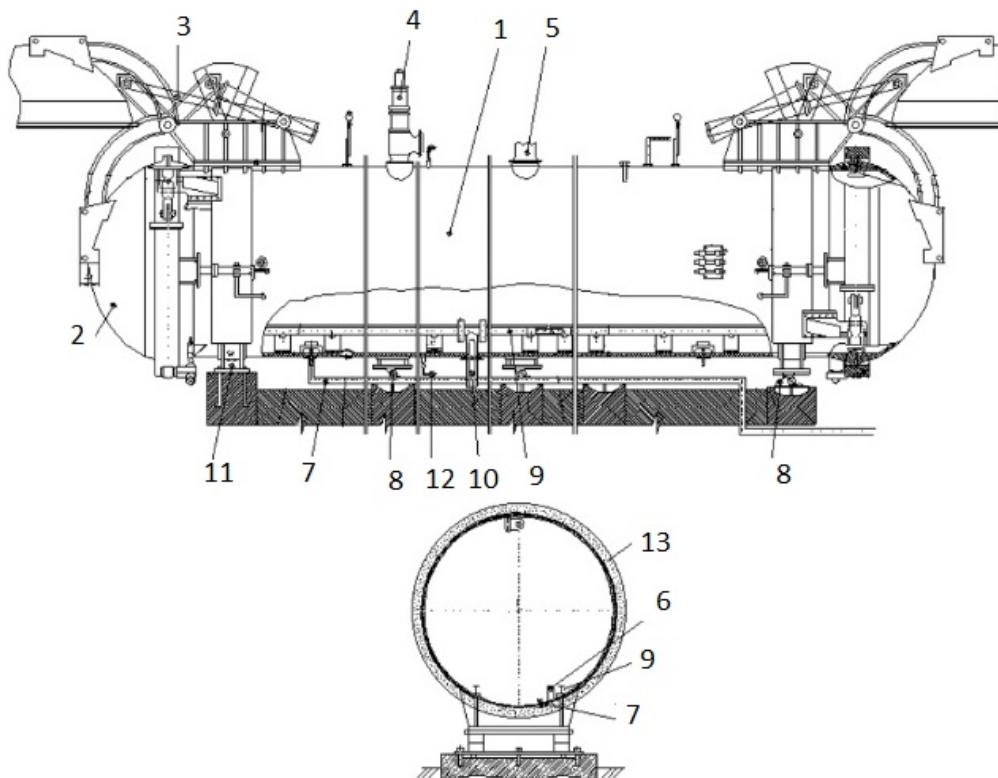


Рис. 8. Схема проходного автоклава:

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — механизм открывания и закрывания крышки; 4 — предохранительный клапан; 5 — патрубок для перепуска пара; 6 — перфорированная труба для раздачи пара; 7 — конденсатоотвод; 8 — подвижная опора; 9 — рельсовый путь; 10 — патрубок для вакуумирования; 11 — неподвижные опоры; 12 — патрубок ввода пара; 13 — теплоизоляция

Работа автоклава заключается в следующем. На путях колеи 1524 мм в цехе формируют состав загруженных изделиями вагонов и заталкивают его в подготовленный, с открытыми крышками, автоклав. После загрузки и герметизации крышек можно либо включить подачу пара и начать тепловлажностную обработку, либо включить вакуумирование и потом начать обработку, либо, не закрывая крышек, включить подачу пара и начать продувку. Далее путем подачи пара поднимают температуру до максимальной, затем осуществляется изотермическая выдержка, причем пар в это время подается только на компенсацию потерь теплоты. По окончании выдержки начинается охлаждение. Подача пара при этом отключается.

Расчеты автоклава осуществляются в следующей последовательности:

- 1) выбирается тип и количество автоклавов в зависимости от производственной программы предприятия, вида и габаритов изделия, размеров форм (поддонов) с изделиями, их числа в установке (п. 5.2);
- 2) выбираются материалы для теплоизоляции ограждающих конструкций и определяется их толщина, площадь и масса (п. 5.3);
- 3) рассчитывается расход тепловой энергии, удельный расход пара и коэффициент полезного использования теплоты (п. 5.5);

Для расчетов необходимы следующие данные:

- полная характеристика изделия: размеры, масса, расход сырьевых материалов и арматуры, температура перед автоклавной обработкой;
- производственная программа выпуска изделий по их количеству и объему бетона;
- способ формования изделий: в индивидуальных формах, по резательной технологии или прессованием;
- режим автоклавной обработки: длительность подъема давления и температуры, температура и продолжительность изотермической выдержки, длительность снижения давления и температуры, температура изделий после автоклавной обработки.

Эффективность работы автоклава оценивается по показателям коэффициента его загрузки и удельного расхода пара на тепловую обработку единицы продукции. Коэффициент загрузки автоклава не должен быть ниже следующих значений:

- при индивидуальных формах 0,2...0,3;
- при резательной технологии 0,35...0,45;
- при производстве кирпича 0,4...0,5.

Удельный расход пара не должен превышать значений, представленных в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Расход пара в кг/м³ готовой продукции на изготовление изделий из ячеистых и плотных автоклавных бетонов (при избыточном давлении 1,2 МПа)

Плотность изделий, кг/м ³	Производство в индивидуальных формах при коэффициенте загрузки автоклава			Производство по резательной технологии при коэффициенте загрузки автоклава		
	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
300	–	–	–	170	145	135
400	–	–	–	185	160	150
500	310	270	250	200	175	165
600	320	280	260	210	190	180
700	330	290	270	220	200	190
800	340	300	280	230	210	200
900	350	310	290	–	–	–
1900	390	370	340	–	–	–

Примечание. При избыточном давлении 1 и 0,8 МПа расход пара соответственно на 5 и 10 % меньше табличных значений.

Таблица 7

Расход пара на изготовление силикатного кирпича и камней

Вид изделий	Избыточное давление, МПа	Удельный расход пара на 1 тыс. шт. усл. кирпича, кг, при автоклавировании	
		Без перепуска пара	С перепуском пара
Полнотелый кирпич	0,8	425	335
	1,2	470	350
Утолщенный кирпич с 10 % пустот	0,8	400	320
	1,2	440	335
Камни с 24 % пустот	1,6	435	335
Камни с 30 % пустот	1,2	380	300

5.2. Выбор автоклава и автоклавных вагонеток. Определение размеров и массы форм

Технические характеристики наиболее распространенных в стройиндустрии автоклавов и автоклавных вагонеток представлены в табл. 8 и 9, а также в справочной литературе.

Таблица 8

Технические характеристики автоклавов

Показатели	Тип автоклава							
	Проходной			Тупиковый				
Внутренний диаметр, мм	2000		2600	3600		2000	2600	3600
Длина корпуса, мм	19 000	21 000	19 000	21 000	27 000	19 000	19 100	27 000
Рабочее давление, МПа	1,2	1,6	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2
Рабочая температура, °С	191	203	191	187	191	191	187	191
Ширина колеи вагонетки, мм	750	750	900	1524	1524	750	900	1524
Габаритные размеры, мм: длина, ширина, высота	20 200	23 200	20 915	23 240	29 980	20 225	20 720	29 420
	2 690	3 720	3 250	4 800	4 250	2 690	3 000	4 250
	3 830	32 150	3 963	5 000	5 900	3 830	4 790	5 900
Масса, т	25,7	32,15	36,2	118,5	133,5	30,1	40,1	113,5
Установленная мощность, кВт	5,5	5,5	5,5	10	10,5	5,5	10	10,5

Таблица 9

Технические характеристики автоклавных вагонеток

Показатели	Ширина колеи, мм			
	750		900	1524
Габаритные размеры, мм: длина ширина высота	6330		3690	6250
	1600		1600	2040
	—		—	250
Масса, т	1,26		0,75	1,647
Грузоподъемность, т	10		6	22
			80	

Предварительный выбор автоклавной вагонетки осуществляется по ширине колеи автоклава, габаритам и массе груза вагонеток. В случае если автоклавирование изделий происходит в формах или на поддонах, необходимо рассчитать их размеры и массу. Внешние и внутренние размеры форм определяются в зависимости от вида и размеров изделий (рис. 9). Допускается принимать ширину бортов форм 10...25 см, а толщину поддона — 10...30 см.

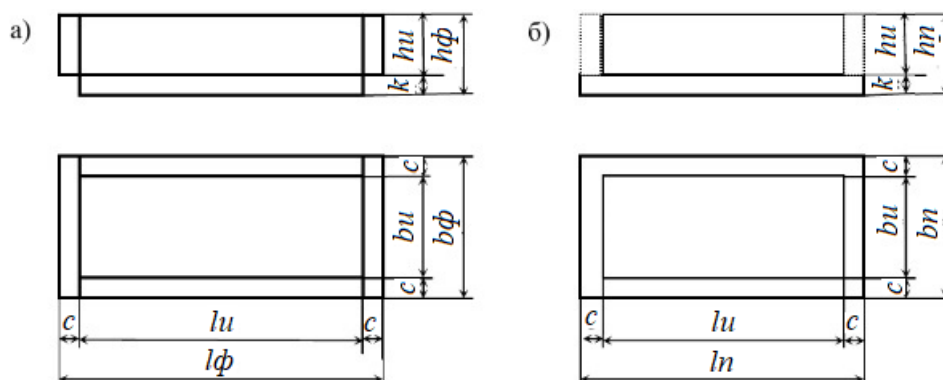


Рис. 9. Схема формы (а) и поддона (б), вид сбоку и сверху:
 l_u, b_u, h_u — длина, ширина и высота изделия; l_ϕ, b_ϕ, h_ϕ — длина, ширина и высота формы;
 l_n, b_n — длина и ширина поддона; k — толщина поддона; c — ширина бортов

Ориентировочную массу форм и поддонов можно определить по укрупненным показателям табл. 10 или расчетом.

Таблица 10

Удельная металлоемкость форм (поддонов) для изготовления изделий из различных видов бетона

Наименование изделий	Плотность бетона, кг/м ³	Масса металла на 1 м ³ изделий, т/м ³
Плиты покрытий и перекрытий	1800...2000	1,1...1,8
Панели внутренних стен	1800...2000	1,1...1,3
Ячеистобетонные изделия	500...900	0,6...0,9
	200...600	0,2...0,4

Предварительный выбор автоклава зависит от его требуемой производительности, определяемой производственной программой изготовления изделий, и габаритов изделия. Для окончательного выбора автоклава и автоклавной вагонетки желательно в масштабе начертить схему загрузки автоклава, пример которой приведен на рис. 10.

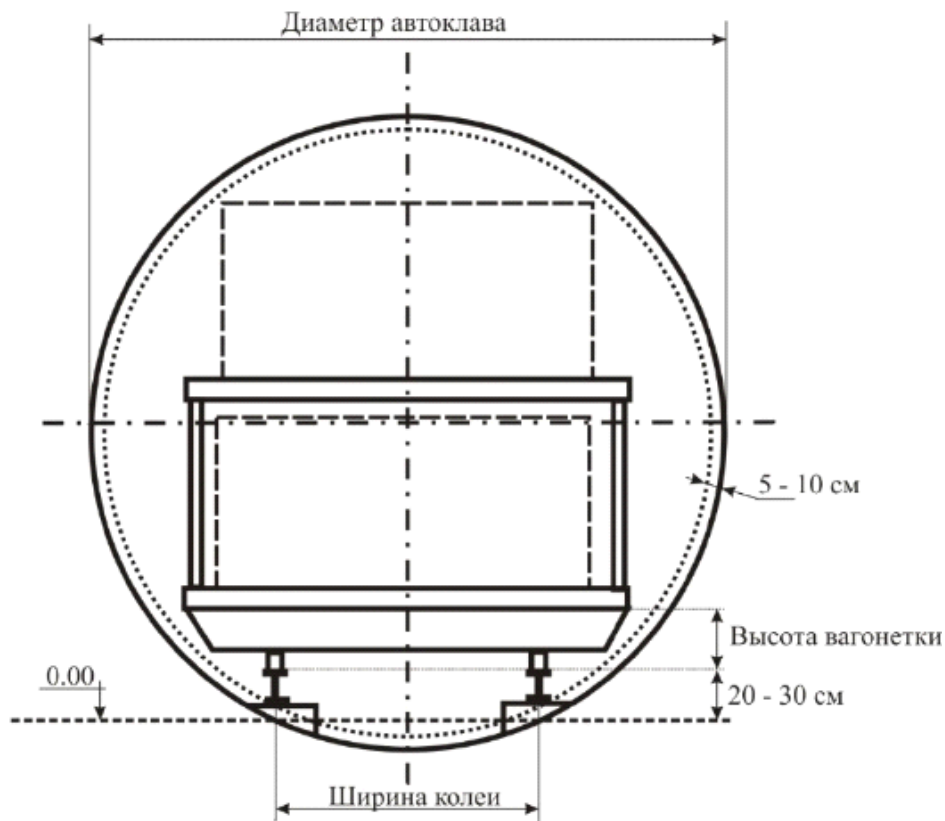


Рис. 10. Пример построения схемы загрузки автоклава

При сравнении нескольких вариантов предпочтение отдается тому, который характеризуется максимальным значением коэффициента загрузки автоклава $K_з$, определяемым по формуле

$$K_з = \frac{V_{и}}{V_{ав}}, \tag{293}$$

где $V_{и}$ — объем изделий, находящихся в автоклаве, м³;
 $V_{ав}$ — внутренний объем автоклава, м³:

$$x = \frac{\pi \cdot D_{ав}^2 \cdot L}{4}, \tag{294}$$

где $D_{ав}$ и L — внутренний диаметр и длина автоклава, м.

5.3. Определение толщины, площади и массы ограждающих конструкций автоклава

Ограждающие конструкции автоклава представляют собой многослойную конструкцию из металлического корпуса и теплоизоляционного слоя, защищенного с внешней стороны слоем оцинкованной стали (рис. 11). Для теплоизоляции автоклавов применяют, как правило, полужесткие минераловатные плиты. Допускается использовать и другие теплоизоляционные материалы с термостойкостью не ниже 200 °С. Характеристики слоев ограждающих конструкций автоклава приведены в табл. 11.

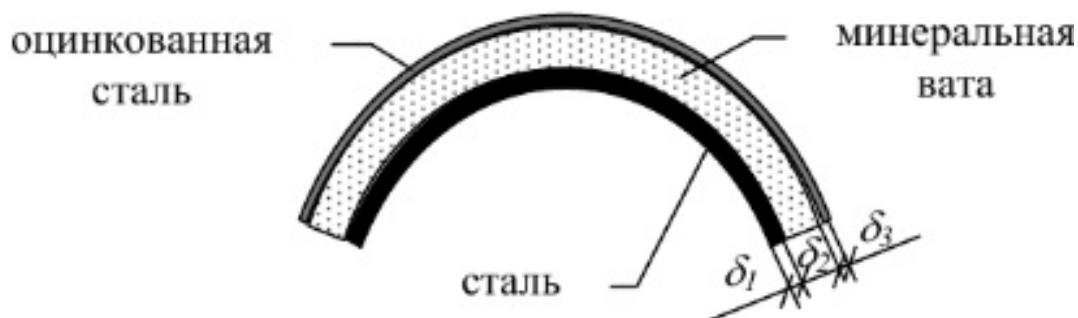


Рис. 11. Фрагмент ограждающих конструкций автоклава

Таблица 11

Характеристики слоев ограждающих конструкций автоклава

№ слоя	Материал	Средняя плотность ρ_m , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности l , Вт/(м ² ·°С)	Коэффициент теплоемкости c , кДж/(кг·°С)	Толщина слоя d_i , м
1	Сталь	7800	58	0,48	$2,5 \cdot 10^{-2}$
2	Полужесткая минераловатная плита	150	0,050	0,84	Определяется расчетом
		200	0,056		
		225	0,058		
		250	0,058		
3	Оцинкованная сталь	7800	58	0,48	$(1 \dots 2) \cdot 10^{-4}$

Толщина теплоизоляционного слоя рассчитывается для обеспечения необходимой теплосащиты конструкции. В основе расчета лежат следующие положения.

Если задается температура на наружной поверхности ограждающих конструкций, то плотность теплового потока через ограждения q , Вт/м², можно определить по формуле

$$q = \alpha_n \cdot (t_{нп} - t_c), \quad (295)$$

где $t_{нп}$ — температура на наружной поверхности конструкции в период изотермической выдержки, °С;

t_c — температура окружающей среды в цехе, °С;

α_n — коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду, Вт/(м²·°С).

Для плоских поверхностей с температурой на наружной стороне не более 100 °С и неподвижной средой он может быть определен по формуле

$$\alpha_n = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{нп} - t_c). \quad (296)$$

При известной величине термического сопротивления плотность теплового потока через ограждения можно рассчитать по формуле

$$q = k \cdot (t_b - t_c), \quad (297)$$

где t_b — температура внутри установки, °С (в автоклаве она принимается равной температуре изотермической выдержки);

k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С):

$$k = \frac{1}{R_0}, \quad (298)$$

где R_0 — термическое сопротивление ограждающей конструкции, (м²·°С)/Вт:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_b} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (299)$$

где α_b — коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°С);

$\delta_1 \dots \delta_n$ — толщина отдельных слоев ограждающих конструкций автоклава, м;

$\lambda_1 \dots \lambda_n$ — коэффициенты теплопроводности отдельных слоев ограждающих конструкций автоклава, Вт/(м²·°С), принимаемые по табл. 11.

Для автоклава, в котором в качестве теплоносителя используется пар с $\alpha_b = 1000 \dots 2000$ Вт/(м²·°С), а внутренний и наружный слои практически не участвуют в термическом сопротивлении конструкции из-за своей малой толщины и высокой теплопроводности, соотношение (299) упрощается:

$$R_0 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (300)$$

С учетом (300) уравнение (5) можно привести к виду

$$q = \frac{(t_d - t_c)}{\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_n}}. \quad (301)$$

Из (301) выводится соотношение для расчета толщины теплоизоляционного слоя δ_2 :

$$\delta_2 = \left(\frac{(t_b - t_c)}{q} - \frac{1}{\alpha_n} \right) \cdot \lambda_2. \quad (302)$$

Исходя из этих положений, расчет толщины теплоизоляционного слоя осуществляют в следующей последовательности.

1. Принимают температуру на наружной поверхности конструкции в период изотермической выдержки $t_{нп}$, °С, при условии, что она не превышает 40 °С. Наиболее эффективны ограждения, у которых температура на наружной поверхности в этот период выше температуры окружающей среды не более чем на 2...3 °С.
2. Принимают температуру окружающей среды в цехе t_c , °С. По нормативам для производства автоклавных материалов и изделий она должна составлять 16...18 °С.
3. По формуле (296) определяют величину коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности в окружающую среду α_n , Вт/(м²·°С).
4. По формуле (295) определяют плотность теплового потока через ограждения q , Вт/м².
5. По формуле (302) вычисляют расчетную толщину теплоизоляционного слоя.
6. Фактическую толщину теплоизоляционного слоя ограждающих конструкций автоклава δ_2 , м, принимают при условии, что она должна быть не ниже расчетной и кратной 5 см.

Площадь наружной поверхности автоклава $S_{ан}$, м², складывается из площади его цилиндрической $S_{ц}$ и торцевых S_m частей:

$$S_{ан} = S_{ц} + S_m = \pi \cdot D_{ан} \cdot L + 1,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot D_{ан}^2 / 4 = \pi \cdot D_{ан} \cdot (L + 0,6D_{ан}), \quad (303)$$

где $D_{ан}$ — наружный диаметр автоклава, м, определяемый по формуле

$$D_{ан} = D_{ан} + 2 \cdot (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3). \quad (304)$$

Масса первого слоя ограждающих конструкций m_1 (корпуса автоклава) принимается по его техническим характеристикам (табл. 8). Массу каждого следующего i -го слоя ограждающих конструкций m_i , кг, можно приближенно рассчитать по формуле

$$m_i = S_{ан} \cdot \delta_i \cdot \rho_{mi}, \quad (305)$$

где ρ_{mi} , — средняя плотность материала i -го слоя, кг/м³ (табл. 11).

Полученные данные можно занести в табл. 12.

Таблица 12

Массы ограждающих конструкций автоклава	
Обозначение масс	Масса, кг
Масса корпуса автоклава m_1	
Масса теплоизоляционного слоя m_2	
Масса защитного слоя m_3	

5.4. Определение температуры на границе слоев ограждающих конструкций автоклава и средней температуры в слоях

Для последующих расчетов необходимо знать температуры на границе слоев ограждающих конструкций автоклава и средние температуры в материалах слоев как до начала тепловой обработки, так и в период изотермической выдержки в процессе тепловой обработки. Схема распределения температур представлена на рис. 12.

Температуры на внутренней поверхности автоклава $t_{вп}$, средние температуры нижнего слоя t_{cp1} и температуры на границе нижнего и теплоизоляционного слоев t_{12} принимаются равными температуре внутренней среды в автоклаве $t_{в}$:

$$t_{вп} = t_{cp1} = t_{12} = t_{в}, \quad (306)$$

где $t_{в}$ в период охлаждения автоклава принимается равной 30...50 °С, а в период изотермической выдержки — равной температуре выдержки.

Средние температуры верхнего слоя t_{cp3} и температуры на его границе с теплоизоляционным слоем t_{23} принимаются равными температуре наружной поверхности автоклава:

$$t_{23} = t_{cp3} = t_{нп}. \quad (307)$$

При этом в период охлаждения $t_{нп}$ принимается равной температуре среды в цехе.

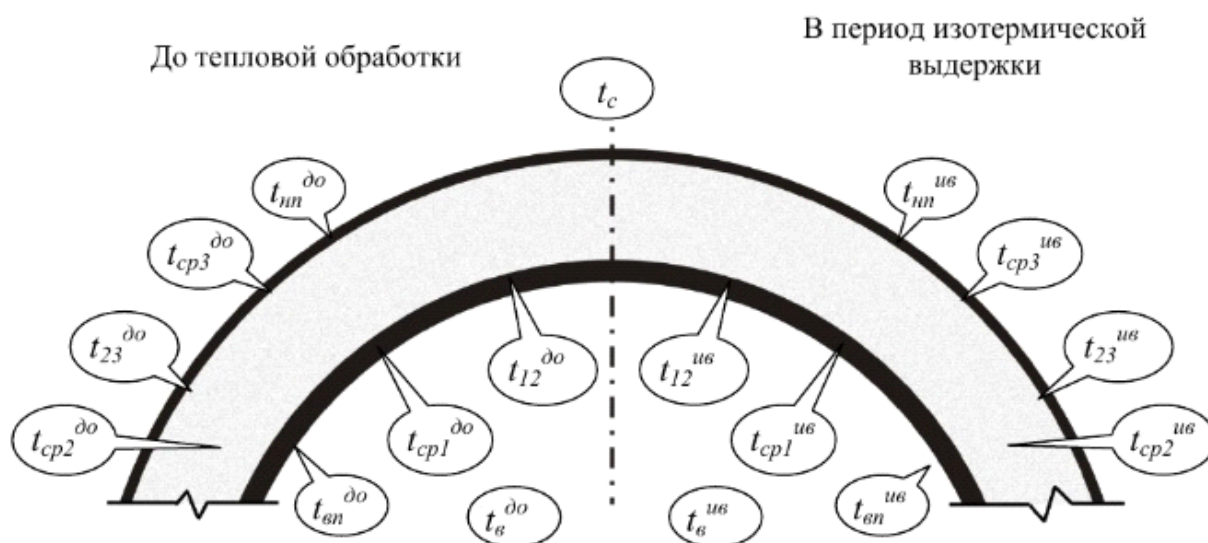


Рис. 12. Схема распределения температур в ограждающих конструкциях автоклава

Средние температуры теплоизоляционного слоя t_{cp2} рассчитываются как полусумма температур на его границах:

$$t_{cp2} = \frac{t_{12} + t_{23}}{2}. \quad (309)$$

Полученные значения температур можно представить в табличной форме (табл. 13).

Таблица 13

Значения температур в ограждающих конструкциях автоклава

Обозначение температур	Величина температур, °С	
	До ТО (индекс до)	При ТО (индекс ив)
Температура внутри автоклава t_b		
Температура на поверхности внутреннего слоя $t_{вп}$		
Средняя температура внутреннего слоя t_{cp1}		
Температура на границе внутреннего и теплоизоляционного слоев t_{12}		
Средняя температура теплоизоляционного слоя t_{cp2}		
Температура на границе теплоизоляционного и наружного слоев t_{23}		
Средняя температура наружного слоя t_{cp3}		
Температура на поверхности наружного слоя $t_{нп}$		
Температура среды t_c		

5.5. Тепловой баланс автоклава

Данный расчет позволяет определить расход теплоты, рассчитать расход теплоносителя и определить эффективность тепловой установки. Он заключается в составлении теплового баланса, включающего составляющие по расходу теплоты на нагрев (металла, форм, установки), потери теплоты (с поверхности ограждающих конструкций, через неплотности) и приход теплоты с теплоносителем, с формами, за счет химических реакций и т.д.

Определение расхода тепла на нагрев

Определение расхода тепла на нагрев изделий

Расход тепла на нагрев изделий $Q_{и}$, кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_{и} = m_{и} \cdot c_{и} \cdot (t_{к} - t_{н}), \quad (310)$$

где $m_{и}$ — масса изделий, находящихся в установке, кг;

$c_{и}$ — теплоемкость изделий, кДж/(кг·°С);

$t_{к}$ — конечная температура изделий, °С, $t_{к} = t_{в}^{и6}$ (табл. 13);

$t_{н}$ — начальная температура изделий, °С, в технологии силикатных бетонов принимается, как правило, равной 40 °С.

Поскольку сырец изделия, поступающего на тепловлажностную обработку, представляет собой разнородный материал, состоящий из компонентов с разной теплоемкостью, общий расход тепла на нагрев изделия складывается из расходов тепла на нагрев каждого компонента:

$$Q_{и} = Q_{с} + Q_{в} + Q_{а}, \quad (312)$$

где $Q_{с}$, $Q_{в}$, $Q_{а}$ — расходы теплоты на нагрев сухих составляющих, воды и арматуры всех изделий, находящихся в установке, кДж/период.

Из уравнений (310) и (312) следует, что

$$Q_{и} = (m_{с} \cdot c_{с} + m_{в} \cdot c_{в} + m_{а} \cdot c_{а}) \cdot (t_{в}^{и6} - t_{н}), \quad (313)$$

где $m_{с}$, $m_{в}$, $m_{а}$ — массы сухих составляющих (вяжущего, заполнителей, сухих добавок и т. д.), воды, арматуры соответственно, кг (расход составляющих на 1 м³ бетона принимается по нормативным документам);

$c_{с}$, $c_{в}$, $c_{а}$ — удельные теплоемкости сухих составляющих, воды и арматуры, кДж/(кг·°С).

Для сухих составляющих (силикатов) принимается $c_c = 0,84 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; для воды $c_b = 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, для стальной арматуры $c_a = 0,48 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, для органических материалов $c_{орг} = 1,68 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.

Определение расхода тепла на нагрев форм и автоклавных вагонеток

Расход тепла на нагрев форм и вагонеток Q_ϕ , кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_\phi = m_\phi \cdot c_\phi \cdot (t_\phi^K - t_\phi^H) + m_{\text{ваг}} \cdot c_{\text{ваг}} \cdot (t_{\text{ваг}}^K - t_{\text{ваг}}^H), \quad (314)$$

где m_ϕ — общая масса форм (поддонов), находящихся в автоклаве, кг;

$m_{\text{ваг}}$ — общая масса автоклавных вагонеток, кг;

c_ϕ и $c_{\text{ваг}}$ — удельная теплоемкость форм и вагонеток, кДж/(кг · °C), принимаемая для стали равной 0,48 кДж/(кг · °C);

t_ϕ^H — начальная температура форм, °C, принимаемая для силикатных бетонов равной 40 °C;

$t_{\text{ваг}}^H$ — начальная температура вагонеток, °C, принимаемая равной температуре среды в цехе t_c (табл. 13);

t_ϕ^K и $t_{\text{ваг}}^K$ — конечная температура форм и вагонеток, °C, принимаемая равной температуре внутри автоклава в период изотермической выдержки t_B^{ue} (табл. 13).

Определение расхода тепла на нагрев ограждающих конструкций автоклава

Расход тепла на нагрев ограждающих конструкций автоклава $Q_{ок}$, кДж/период, складывается из расходов тепла на нагрев каждого i -го слоя Q_i :

$$Q_{ок} = \Sigma Q_i = \Sigma [m_i \cdot c_i \cdot (t_i^K - t_i^H)], \quad (315)$$

где m_i и c_i — масса и теплоемкость материала i -го слоя (табл. 11 и 12);

t_i^K — конечная температура i -го слоя, °C; принимается равной средней температуре слоя в процессе изотермической выдержки t_{cpi} (табл. 13);

t_i^H — начальная температура i -го слоя, °C; принимается равной средней температуре слоя до начала тепловой обработки $t_{cpiдо}$ (табл. 13).

Определение расхода тепла на нагрев внутреннего пространства в автоклаве

Расход тепла на нагрев внутреннего пространства в автоклаве $Q_{вп}$, кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_{вп} = V_{ac} \cdot c_{вз} \cdot (t_B^{ue} - t_B^{до}), \quad (316)$$

где V_{ac} — свободный внутренний объем автоклава, м³:

$$V_{ac} = V_{ав} - V_\phi - V_{\text{ваг}}, \quad (317)$$

V_ϕ — объем всех форм (поддонов + изделий) в автоклаве, м³, определяемый расчетом (раздел 5.2);

$V_{\text{ваг}}$ — объем всех вагонеток в автоклаве, м³:

$$V_B = \frac{m_{\text{ваг}}}{\rho_{ст}}, \quad (318)$$

$\rho_{ст}$ — плотность стали, кг/м³, принимаем $\rho_{ст} = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3$;

$c_{вз}$ — объемная теплоемкость воздуха, кДж/(м³ · °C), принимаем $c_{вз} = 1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Определение потерь тепла

Потери тепла через ограждающие конструкции

Потери тепла через ограждающие конструкции Q_n , кДж/период, рассчитываются по формуле

$$Q_n = 3,6 \cdot S_{ан} \cdot \left[\alpha_n^n \cdot (t_{нп}^n - t_c) \cdot \tau_n + \alpha_n^b \cdot (t_{нп}^{ue} - t_c) \cdot \tau_b \right], \quad (319)$$

где α_n^n — коэффициент теплоотдачи с поверхности автоклава в период подъема температуры, Вт/(м² · °C):

$$\alpha_n^n = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{нп}^n - t_c); \quad (320)$$

$t_{\text{нп}}^{\text{п}}$ — средняя температура на поверхности автоклава в период подъема температуры:

$$t_{\text{нп}}^{\text{п}} = \frac{t_{\text{нп}}^{\text{до}} + t_{\text{нп}}^{\text{уб}}}{2}; \quad (321)$$

$t_{\text{нп}}^{\text{до}}$ и $t_{\text{нп}}^{\text{уб}}$ — температуры на наружной поверхности автоклава до тепловой обработки и в процессе изотермической выдержки (табл. 13);

$\alpha_{\text{н}}^{\text{п}}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности автоклава в период изотермической выдержки, Вт/(м²·°C):

$$\alpha_{\text{н}}^{\text{п}} = 9,8 + 0,07 \cdot (t_{\text{нп}}^{\text{уб}} - t_{\text{н}}), \quad (322)$$

$\tau_{\text{п}}$, $\tau_{\text{в}}$ — время подъема и выдержки температуры, ч.

Потери тепла с конденсатом пара

Потери пара с конденсатом $Q_{\text{к}}$, кДж/период, рассчитываются по формуле

$$Q_{\text{к}} = m_{\text{к}} \cdot c_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}} = [D - (k \cdot D + V_{\text{ас}} \cdot \rho_{\text{п}})] \cdot c_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}}, \quad (323)$$

где $m_{\text{к}}$ — масса конденсата, образующегося при тепловой обработке, кг;

$c_{\text{к}}$ — теплоемкость конденсата, принимаем $c_{\text{к}} = 4,18$ кДж/(кг·°C);

$t_{\text{к}}$ — температура конденсата, °C; для автоклавной обработки она составляет 80...90 °C;

D — масса пара, затраченного на тепловую обработку, кг/период; неизвестная величина, определяемая из уравнения теплового баланса;

$\rho_{\text{п}}$ — плотность пара, кг/м³, принимаемая по табл. 14 при давлении изотермической выдержки;

k — доля потери пара, для автоклава $k = 0,02...0,05$.

Таблица 14

Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления

Давление (абсолютное), МПа	Температура, °C	Плотность $\rho_{\text{п}}$, кг/м ³	Энтальпия пара i'' , кДж/кг	Теплота парообразования r , кДж/кг
0,1	99,1	0,579	2677	2264
0,8	169,6	4,075	2776	2057
0,9	174,5	4,536	2780	2040
1,0	179,0	5,037	2784	2024
1,1	183,2	5,516	2787	2009
1,2	187,1	5,996	2790	1995
1,3	190,7	6,474	2793	1984
1,4	194,1	6,952	2795	1968
1,5	197,4	7,431	2796	1956
1,6	200,4	7,909	2798	1943
1,7	203,4	8,389	2799	1931

Потери тепла с отходящим паром

По окончании изотермической выдержки давление и температуру в автоклаве снижают, отводя от него пар. Потери тепла с отходящим паром $Q_{\text{оп}}$, кДж/период, рассчитываются по формуле

$$Q_{\text{оп}} = k_{\text{у}} \cdot V_{\text{ас}} \cdot \rho_{\text{п}} \cdot i'', \quad (324)$$

где $k_{\text{у}}$ — коэффициент, учитывающий способы последующей утилизации отработанного пара; если в проекте предусмотрена система перепуска пара, принимается $k_{\text{у}} = 0,02...0,05$; при утилизации пара в парогенераторе $k_{\text{у}} = 0,1...0,2$; при сбросе пара в атмосферу $k_{\text{у}} = 1$;

i'' — удельная энтальпия пара при давлении изотермической выдержки (табл. 14), кДж/кг.

Неучтенные потери тепла

Неучтенные потери тепла складываются из потерь через неплотности установки и прочих потерь. Несмотря на то что автоклав является герметичной установкой, в промышленных условиях, как правило, наблюдается пропускание пара через байонетное кольцо в процессе тепловой обработки изделий. Потери тепла с паром через неплотности автоклава $Q_{\text{пп}}$, кДж/период, определяются по формуле

$$Q_{\text{пп}} = k \cdot D \cdot i'' , \quad (325)$$

где k — доля потери пара, $k = 0,1 \dots 0,2$;

D — масса пара, затраченного на тепловую обработку, кг/период.

Прочие неучтенные потери тепла $Q_{\text{пп}}$, кДж/период, рассчитываются по формуле

$$Q_{\text{пп}} = (0,05 \dots 0,15) \cdot (Q_{\text{и}} + Q_{\text{ф}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{вп}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{оп}}). \quad (326)$$

Приход тепла

Приход тепла с паром

Приход тепла с паром Q_m^n , кДж/период, рассчитывается по формуле

$$Q_m^n = D \cdot i'' . \quad (327)$$

Приход тепла от экзотермических реакций в изделиях

Если в состав сырьевой смеси для изготовления изделия входит цемент, его гидратация сопровождается выделением тепла, которое необходимо учитывать при составлении теплового баланса. Приход тепла от экзотермических реакций в изделиях $Q_{\text{эи}}$, кДж/период, определяется по формуле

$$Q_{\text{эи}} = V_{\text{б}} \cdot \text{Ц} \cdot Q_{\text{эц}} \cdot \rho , \quad (328)$$

где $V_{\text{б}}$ — объем бетона, находящегося в автоклаве, м^3 ;

Ц — расход цемента на 1 м^3 бетона, кг;

ρ — степень гидратации портландцемента, которая после ТВО обычно составляет $0,4 \dots 0,6$;

$Q_{\text{эц}}$ — тепло, выделяемая цементом в процессе ТВО, кДж/кг; для портландцемента эта величина определяется по формуле

$$Q_{\text{эц}} = 1,85 \cdot Q_{\text{ц28}} \cdot (В/В)^{0,44} \cdot (1 - \nu) , \quad (329)$$

$Q_{\text{ц28}}$ — тепловыделение цемента при 28-дневном твердении в нормальных условиях, кДж/кг (табл. 4);

$В/В$ — водовяжущее соотношение в силикатобетонной смеси, определяемое как отношение расхода воды затворения на 1 м^3 смеси к сумме расходов цемента, извести и молотого кварцевого песка, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ν — величина, зависящая от градусо-часов n твердения бетона:

$$n = t_n \cdot \tau_n + t_{\text{в}}^{16} \cdot \tau_{\text{в}} , \quad (330)$$

t_n — средняя температура бетона в период подъема температуры, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_n = \frac{t_{\text{н}} + t_{\text{к}}}{2} , \quad (331)$$

$t_{\text{н}}$ и $t_{\text{к}}$ — см. соотношение (310).

При $n \leq 375$ $\nu = e^{-0,0015n}$ и (329) принимает вид

$$Q_{\text{эц}} = 1,85 \cdot Q_{\text{ц28}} \cdot (В/\text{Ц})^{0,44} \cdot (1 - e^{-0,0015n}) , \quad (332)$$

при $375 < n < 2000$ $\nu = 0,666 \cdot e^{-0,0004n}$ и (332) принимает вид

$$Q_{\text{эц}} = 1,85 \cdot Q_{\text{ц28}} \cdot (В/\text{Ц})^{0,44} \cdot (1 - 0,666 \cdot e^{-0,0004n}) \quad (333)$$

Уравнение теплового баланса

$$Q_m^n + Q_{эи} = Q_{и} + Q_{ф} + Q_{ок} + Q_{вп} + Q_{п} + Q_{к} + Q_{оп} + Q_{пп} + Q_{нп}. \quad (334)$$

Решая уравнение теплового баланса, находят расход теплоты Q_m^n , кДж/период, расход пара — D , кг/период, удельный расход пара — d , кг/м³:

$$d = \frac{D}{V_u}. \quad (335)$$

Далее составляется сводная таблица теплового баланса и рассчитывается коэффициент полезного использования теплоты η , %:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_m^n} \cdot 100. \quad (336)$$

По окончании теплотехнических расчетов полученные результаты сводятся в табл. 15.

Таблица 15

Сводная таблица теплового баланса

Статьи баланса	Обозначения статей	Расход теплоты	
		кДж/период	%
Приход теплоты:			
с паром	Q_m^n		
от экзотермических реакций	$Q_{эи}$		
ВСЕГО			100
Расход и потери теплоты:			
на нагрев изделий	$Q_{и}$		
на нагрев форм	$Q_{ф}$		
на нагрев ограждающих конструкций	$Q_{ок}$		
на нагрев внутреннего пространства	$Q_{вп}$		
потери с поверхности	$Q_{п}$		
потери с конденсатом	$Q_{к}$		
потери с отходящим паром	$Q_{оп}$		
потери через неплотности	$Q_{пп}$		
прочие неучтенные потери	$Q_{нп}$		
ВСЕГО по расходным статьям			100

6. АГРЕГАТЫ ДЛЯ СУШКИ МАТЕРИАЛОВ

Для сушки материалов применяют различные сушильные агрегаты и установки. Для кусковых и сыпучих материалов обычно используют барабанные сушилки, а для штучных и листовых изделий — камерные и туннельные.

6.1. Барабанные сушилки

Эти сушилки (рис. 13) широко применяются для непрерывной сушки при атмосферном давлении кусковых, зернистых и сыпучих материалов (глина, песок, шлаки, минеральные добавки и др.).

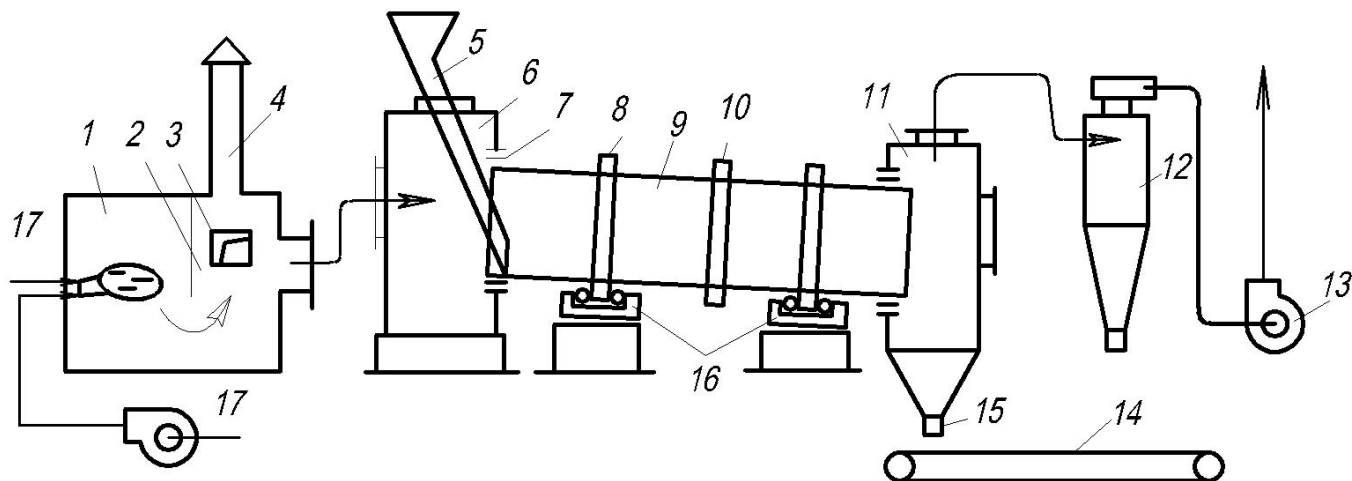


Рис. 13. Схема сушильного барабана:

1 — топка; 2 — смесительная камера; 3 — окно для подачи холодного воздуха; 4 — аварийная труба; 5 — подача материала; 6, 11 — концевые камеры сушилки; 7 — уплотнительные кольца; 8 — опорные бандажки; 9 — металлический барабан; 10 — венцовая шестерня; 12 — циклон; 13 — отсасывающий вентилятор; 14 — конвейер; 15 — челюстной затвор; 16 — роликовые подшипники; 17 — вентилятор подачи воздуха на горение; 18 — подача топлива

Барабанная сушильная установка состоит из вращающегося стального барабана 9, установленного под углом 4–6° к горизонту. Барабан снабжен венцовой шестерней 10, через которую осуществляется его вращение, и двумя опорными бандажками 8. Бандажки при вращении барабана катятся по неподвижным роликовым опорам 16 и исключают возможность передвижения барабана в продольном направлении. Торцы барабана с помощью уплотнительных колец 7 укреплены в камерах 6 и 11.

Камера 6 служит для подачи материала, которая осуществляется через течку 5 питателем. Через камеру 11 отбирается высушенный материал, который через затвор 15 попадает на конвейер готовой продукции 14.

Камеры 6 и 11 одновременно предназначены для подачи и отбора сушильного агента. При работе барабана методом прямотока сушильный агент и материал передвигаются в одном направлении, подача сушильного агента осуществляется в камеру 6, а отбор отработанного сушильного агента — через камеру 11. При работе барабана методом противотока сушильный агент подается в камеру 11, а отбирается через камеру 6, движение материала остается прежним. Сушильный агент — теплоноситель готовится в выносной топке 1 посредством сжигания топлива, подаваемого через горелку 18, воздух на горение подается вентилятором 17. Продукты горения топлива попадают в смесительную камеру 2, где через окно 3 разбавляются холодным воздухом. Топка 1 снабжена аварийной трубой 4. Подготовленные и разбавленные воздухом продукты горения топлива (сушильный агент) подаются в камеру 6 и поступают в сушильный барабан, где ассимилируют влагу материала. Отработанный сушильный агент отбирается из камеры 11 и поступает на очистку в батарейный циклон 12, после чего вентилятором 13 выбрасывается в атмосферу. Для более тщательной очистки отработанного сушильного агента во избежание загрязнения окружающей среды применяют двухстадийную очистку, для чего устанавливают последовательно электрофильтр либо рукавный фильтр.

Сушильные барабаны в нашей стране выпускают диаметром 1,0–3,5 м. Барабаны диаметром 1,0–2,8 м могут быть разной длины при ($L/D = 4-8$). Барабаны больших диаметров выпускают только стандартного размера $L \times D$: 2,8 × 14 м; 3,5 × 20 м; 3,5 × 27 м.

Металлический корпус барабана для повышения экономичности сушки снабжают внутренними насадками. На рис. 14 показаны типы применяемых насадок. Подъемно-лопастная насадка используется для сушки крупнокусковых и склонных к налипанию материалов, а секторная насадка — для малосыпучих и крупнокусковых материалов с большой плотностью.

Для мелкокусковых, сильно сыпучих материалов широко применяются распределительные насадки. Сушка тонкоизмельченных, пылящих материалов производится в барабанах, имеющих перевалочную насадку с закрытыми ячейками. Иногда используют комбинированные насадки, например подъемно-лопастную (в передней части аппарата) и распределительную.

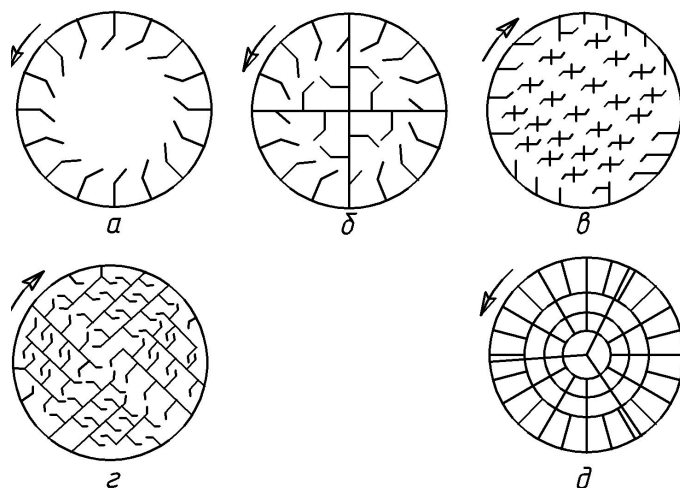


Рис. 14. Внутренние насадки барабана:
a — подъемно-лопастная; *б* — секторная; *в, г* — распределительная; *д* — перевалочная

При сушке материалов в барабане основное количество теплоты от сушильного агента материалу передается конвекцией во время пересыпания. При увеличении степени загрузки барабана материалом возможность его пересыпания сокращается. Вместе с этим уменьшается поверхность материала, омываемого сушильным агентом, и уменьшается интенсивность сушки. Поэтому оптимальным условием загрузки, по экспериментальным данным, считают заполнение объема барабана материалом не более чем на 15–20 %. Кроме того, материал получает теплоту от нагретых устройств барабана за счет теплопроводности. Конструкции барабана и поверхность материала получают теплоту за счет излучения.

Барабанные сушильные установки, как указывалось, могут работать по прямотоку и противотоку. Выбор того или иного принципа для сушки зависит от вида строительных материалов. Схема изменения температур материала и сушильного агента в барабанной сушильной установке показана на рис. 15.

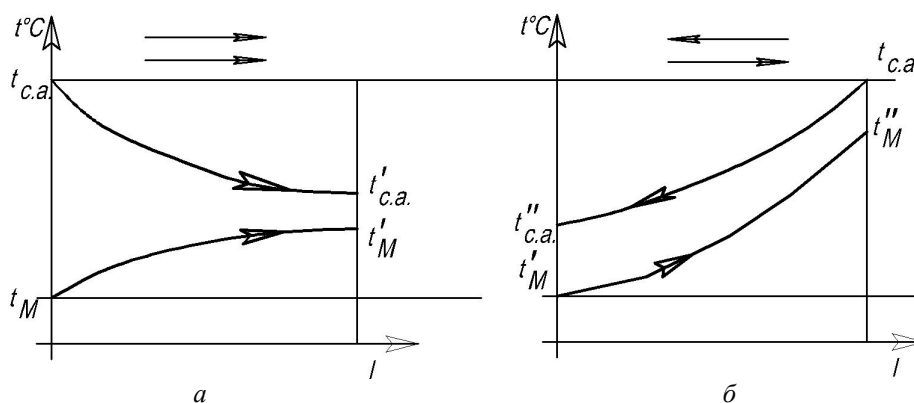


Рис. 15. Схема изменения температур материала и сушильного агента в барабанной сушильной установке:
a — при прямотоке; *б* — при противотоке

Сравнивая работу установок, отметим, что температура выходящего (отработанного) сушильного агента при противотоке ниже, чем температура отработанного сушильного агента при прямотоке. Следовательно, тепловая энергия при противотоке используется более полно. Однако материал при противотоке нагревается значительно сильнее, чем при прямотоке. Указанный принцип нагрева и служит основанием для выбора установок при различных технологических требованиях.

Теплотехнический расчет сушильного барабана и расчеты горения топлива приведены в учебнике Ю.А. Лоскутова

6.2. Камерные сушилки

Камерные сушилки используют для сушки глиняного кирпича, фарфоровых и фаянсовых изделий и др. Загрузка изделий в камеру может осуществляться на полках или вагонетках.

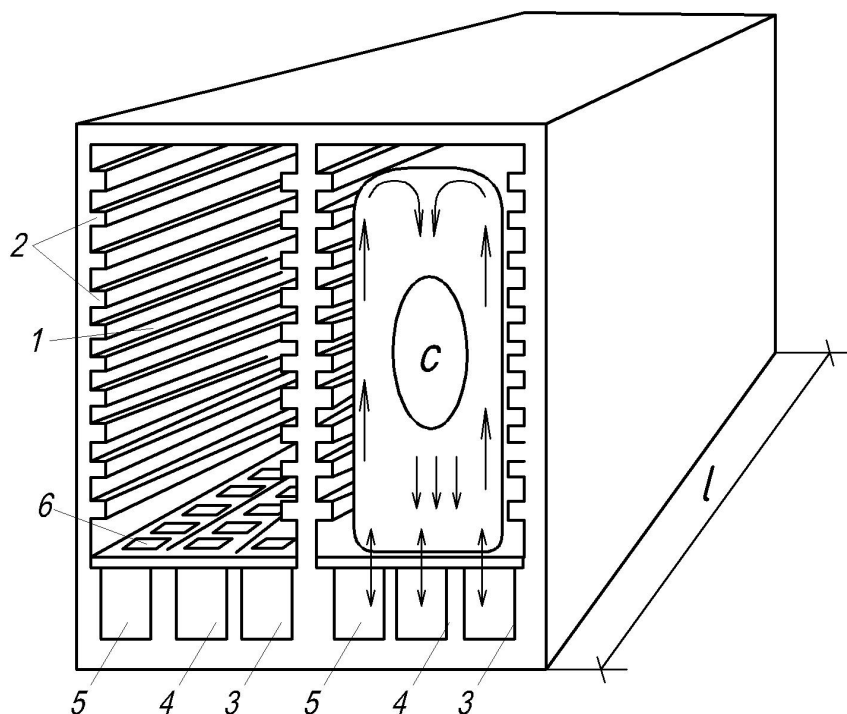


Рис. 16. Схема камерной сушилки:

1 — камера; 2 — выступы камеры для установки полок; 3, 5 — боковые каналы для подачи сушильного агента; 4 — центральный канал для отбора сушильного агента; 6 — настил с отверстиями

Схема простейшей камерной сушилки периодического действия для сушки кирпича показана на рис. 16. Камеры 1 высотой порядка 3,5 м рассчитаны на загрузку десяти полок с кирпичом. Эти полки загрузочной вагонеткой укладываются на выступы камеры 2. Длина камеры $L = 10-13$ м. Ниже уровня пола камера имеет три канала, два боковых, 3 и 5, для подачи сушильного агента, и средний, 4, для его отбора. Каналы перекрыты настилами с отверстиями 6. Камеры соединяются в блоки по 20–30 шт. и имеют общее снабжение сушильным агентом через подводящий канал и общий принудительный отбор сушильного агента. Сушильный агент через каналы 3 и 5 попадает в камеру и, так как он легче воздуха, занимающего рабочий объем камеры, поднимается вверх (показано стрелками) до тех пор, пока в процессе охлаждения не сравняется по массе с воздухом камеры.

По пути движения нагретый сушильный агент отдает теплоту более холодному материалу и начинает движение вниз. Постепенно снижаясь, он попадает в средний канал 4 и выбрасывается в атмосферу. Смешивание восходящих и нисходящих потоков сушильного агента вызывает многократную циркуляцию и достаточно равномерную сушку изделий. Однако в середине сушилки, где сушильный агент опускается вниз, имеется зона слабой сушки (она отмечена буквой С). В одной из камер в середине сделан вырыв, в этой части конструктивные устройства не показаны, а показан стрелками путь сушильного агента.

Зона С в камерах является наиболее уязвимым местом. К этой зоне сушильный агент подходит уже с низкой температурой и высокой относительной влажностью, и там сушка происходит медленнее по сравнению с другими частями садки изделий. Изделия, выгружаемые после сушки, имеют разную конечную влажность, и наиболее недосушенные из них те, что выходят из зоны С, хотя общий срок сушки довольно продолжительный.

Срок сушки кирпича в таких сушилках составляет 2–3 суток. Расход сушильного агента 4200–6300 кДж/кг испаренной влаги. Для улучшения циркуляции сушильного агента камеры дополнительно могут оснащаться вентиляторами.

6.3. Туннельные сушильные камеры

Туннельные сушилки, в отличие от камерных, непрерывного действия. Основой такой сушилки является туннель, по которому организуется движение материала. Штучные изделия типа кирпича, керамических камней, блоков, различных гипсовых строительных деталей транспортируют по туннелю на вагонетках, роликовых или других конвейерах. Листовые изделия типа гипсовой штукатурки, теплоизоляционных и акустических плит транспортируют на многоярусных вагонетках, роликовых и других конвейерах. Минераловатные изделия — жесткие, полужесткие и гибкие плиты — транспортируют на роликовых конвейерах или конвейерах с подпрессовочным устройством.

В туннель, по которому непрерывно или с заданным интервалом движутся изделия, подается сушильный агент, который и ассимилирует влагу от материала. Отработанный сушильный агент выбрасывается из сушильной установки.

Схема прямоточной туннельной сушилки для глиняного кирпича показана на рис. 17.

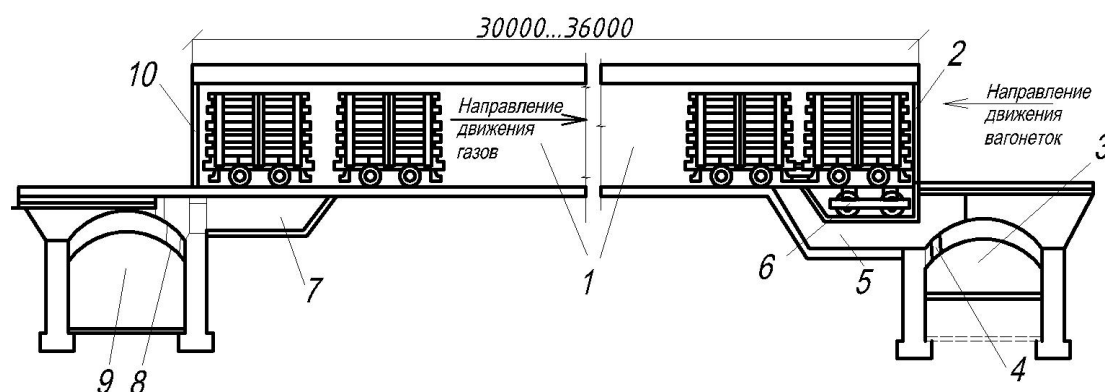


Рис. 17. Схема туннельной сушилки:

1 — туннель; 2, 10 — двери сушилки; 3 — канал для подвода сушильного агента; 4, 8 — подъемные заслонки для включения подачи и отвода сушильного агента; 5 — подводящий канал к туннелю; 6 — толкатель; 7 — отводящий канал; 9 — сборный канал отработанного сушильного агента

Кирпич-сырец, уложенный на полочных вагонетках, подается в туннель 1 длиной около 30 м. Направление загрузки вагонеток показано стрелкой. Толкатель 6 забирает вагонетку и ею проталкивает весь поезд на одну позицию, причем последняя вагонетка выходит из туннеля. Сушильный агент из общего для блока туннелей подводящего канала при открытой заслонке 4 поступает в туннель снизу прямотоком и ассимилирует влагу от материала. Отработанный теплоноситель через отводящий канал 7 поступает в общий сборный канал отработанного сушильного агента 9 и вентилятором выбрасывается в атмосферу. Расход теплоты в туннельных сушилках составляет 4200–5000 кДж/кг испаренной влаги.

В туннельных сушилках за счет увеличения скорости движения сушильного агента срок сушки был сокращен до 36–42 ч, однако качество материала несколько ухудшилось за счет появления трещин и других сушильных дефектов. Это происходит из-за неравномерной сушки по высоте туннеля. Но чем больше сила динамического давления на сушильный агент, создаваемая напором вентилятора, и чем меньше высота туннеля, тем меньше неравномерность сушки.

7. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

7.1. Сушильный барабан

Выбор параметров сушильных барабанов и режимов их работы зависит от физических свойств высушиваемого материала, главным образом от его начальной влажности и размеров кусков. Чем выше начальная влажность и мельче куски, тем интенсивнее идет испарение.

Производительность сушильного барабана оценивают по выходу высушенного материала (P_M) и по выходу влаги (P_w) в кг/с:

$$P_6 = 1000P_M/3600; \quad (337)$$

$$P_w = P_M \left(\frac{w_H - w_K}{100 - w_H} \right), \quad (338)$$

где P_M — количество материала, нуждающегося в сушке (по сухому веществу), т/ч;

w_H — начальная влажность материала, %;

w_K — конечная влажность материала, % (0,5–1,0 %).

Следующим этапом расчетов является определение рабочего объема сушильного барабана (в m^3) и выбор его по табл. 14 и 15:

$$V_6 = 3600P_w/m_0, \quad (339)$$

где m_0 — удельный паросъем, кг/(m^3 ч),

для глины $m_0 = 50–60$ кг/(m^3 ч), для известняка $m_0 = 45–65$ кг/(m^3 ч), для шлака $m_0 = 25–50$ кг/(m^3 ч),

для песка $m_0 = 80–100$ кг/(m^3 ч), для остальных материалов $m_0 = 45–55$ кг/(m^3 ч).

Время прохождения материала через сушильный барабан (τ , мин) и необходимую мощность привода для вращения барабана (N , кВт) определяют по формулам

$$\tau = \frac{120 \cdot \beta \cdot \rho_H \cdot (w_H - w_K)}{m_0 [200 - (w_H - w_K)]}, \quad (340)$$

$$N = 0,0013D_6^3 L_6 n \rho_H \delta, \quad (341)$$

где ρ_H — средняя насыпная масса материала, кг/ m^3 ;

β — коэффициент заполнения барабана в долях единицы, $\beta = 0,1–0,25$;

D_6 и L_6 — диаметр и длина барабана, м;

δ — коэффициент, учитывающий вид теплообменных устройств в барабане, $\delta = 0,04–0,07$ для лопастного теплообменника или при навеске цепей и $\delta = 0,01–0,02$ для ячееково-сепараторного теплообменника (прил. 9);

n — частота вращения выбранного барабана, $мин^{-1}$.

Таблица 14

Типоразмеры и частота вращения сушильных барабанов

Рабочий объем барабана, V_6	Размеры барабана, м		Частота вращения барабана, n , $мин^{-1}$	Толщина металлических стенок барабана, мм
	Диаметр	Длина		
20	1,6	10	3,2–6,4	11
38	2,0	12	3,2–6,4	12
45,5	2,2	12	3,2–6,4	14
53	2,2	14	3,3–6,4	14
88	2,5	18	3,2–6,4	16
74	2,8	12	3,2–6,4	14
86,2	2,8	14	3,2–6,4	14
123	2,8	20	2–6	18
141	3,0	20	2–6	18
177	3,2	22	2–6	18
259	3,5	27	2–6	–

Типоразмеры и частота вращения сушильных барабанов приведены в табл. 14, техническая характеристика некоторых типов сушильных барабанов — в табл. 15.

Количество сушильных барабанов определяют по формуле

$$n = \frac{P}{K_{и.м} \cdot P_{с.б}}, \quad (342)$$

где P — общее количество материала, нуждающегося в сушке (по сухому веществу), т/ч;

$P_{с.б}$ — производительность выбранного сушильного барабана, т/ч;

$K_{и.м}$ — коэффициент использования машинного времени, равный 0,8–0,85.

Тепловой расчет сушильного барабана и расчеты горения топлива приведены в учебнике П.Л. Левченко.

Таблица 15

Технические характеристики некоторых сушильных барабанов

Показатель	2,8 × 12	2,2 × 12	СМЦ-428	СМЦ-429	2,2 × 20	СМЦ-440
Размеры барабана, м:						
диаметр	2,8	2,2	2,8	2,8	2,2	2,2
длина	12	12	20	14	20	14
Наклон барабана, %	5	4	1–4	1–4	5	1–4
Производительность по сухому материалу, т/ч	18–23	8–10	25–30	20–25	22	14
Влажность материала, %:						
на входе	20–22	22	22	20–22	20	22
на выходе	2–3	2–4	3	1–8	2	3
Частота вращения барабана, мин ⁻¹	3,12; 3,6; 9	2, 4, 6	4,2	4,68	5	3,12; 3,6; 9
Мощность привода двигателя, кВт	630	66, 140, 200	75	55	36	36, 40, 50, 75
Масса, т	65	42	75	70	67	45,0

7.2. Камерная сушилка с полками

Для сушки штучных и листовых изделий используют сушильные камеры и туннельные сушилки. Температура, влажность теплоносителя и изделий показаны в табл. 16 и 17.

Таблица 16

Температуры и относительная влажность теплоносителя при сушке изделий

Наименование изделий	Температура, °С		Конечная относительная влажность, %
	Начальная	Конечная	
Шамотные изделия пластического формования:			
нормальные	110–140	35–40	75–90
фасонные	100–120	30–358	80–95
Шамотные изделия полусухого формования:			
нормальные	150–200	35–40	Не более 90
фасонные	120–150	35–40	Не более 90
Красный строительный кирпич нормальный	60–120	25–30	85–90
Плитки облицовочные для полов	100–120	40–50	60
Санитарно-строительный фаянс (досушка)	–	30–50	20–80
Канализационные трубы	110–120	35–55	40–75
Керамические блоки	70–120	21–32	88–95
Гипсовые блоки	120	40–50	85–90

Производительность сушил зависит от их конструкции, размеров, типа садки изделий на вагонетке и продолжительности сушки.

Производительность камерных сушил (P , шт/сут) зависит от емкости сушил и продолжительности сушки:

$$P = 24 \frac{N}{\tau}, \quad (343)$$

где N — емкость всех сушильных камер;

τ — продолжительность сушки, ч.

$$N = N_k n_p, \quad (344)$$

N_k — принятая емкость одной сушильной камеры, шт. изд.;

n_p — количество одновременно работающих камер.

Таблица 17

Начальная (w_n) и конечная (w_k) влажность изделий при сушке

Наименование изделий	w_n , %	w_k , %
Красный строительный кирпич	18–20	5–6
Канализационные трубы	15–17	1–3
Шамотные изделия пластического формования	17–18	5–6
Фарфоровые изделия	23–24	2–3
Электротехнический фарфор	17–18	1,0–1,5
Плитки облицовочные	8–9	0,5–0,9
Плитки для пола	10–11	1,5–2,0
Шамотные изделия полусухого формования	9–10	2–3
Санитарно-техническая керамика	16	1,0
Керамические блоки	18–19	5–6
Гипсовые блоки	35	6
Фаянсовые изделия (досушка)	7–12	0,8–1,0

Периодическая работа сушил требует дополнительного времени на загрузку, выгрузку изделий, на чистку камер и ремонт, поэтому на каждые 9–10 одновременно работающих камер устанавливают 2–3 камеры резервных. Для сушки кирпича сырца камеру делают обычно длиной 8–13 м, шириной 1,20–1,45 м и высотой 2,3 м (10 полок). На 1 м длины камеры укладывают по 300–360 шт. сырца.

Теплотехнические расчеты камеры проводят аналогично туннельному сушиллу.

7.3. Камерная сушилка с вагонетками

Производительность сушильной камеры, в которой используют вагонетки, рассчитывают исходя из заданного режима сушки материала, размеров и количества вагонеток и габаритов камеры.

Режим работы сушильной камеры по технологическим и экономическим соображениям принимают трехсменным.

Годовой фонд рабочего времени сушильной камеры T_ϕ (ч) зависит от режима работы предприятия (агрегатно-поточный или конвейерный способ производства) и режима работы печей. В некоторых случаях его принимают в количестве 350 сут.

Часовая производительность, кг/ч, всех сушильных камер:

$$P_\phi = P_r / (T_\phi K_n), \quad (345)$$

где P_r — производительность по высушенному материалу, т/год;

K_n — коэффициент использования эксплуатационного времени, равный 0,87–0,9.

Технические характеристики сушильных вагонеток

Наименование	Грузоподъемность		Количество полок	Шаг полок	Колея, мм	Диаметр колеса, мм	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
	шт. кирпичей	кг						
СМ-06.00	1680	9800	14	245	1 682	200	2350×2250×4240	1380
СМ-46А	252	1470	7	180	750	200	1300×1017×1380	240
ВСП-7	252	1470	7	180	750	200	1300×1017×1380	240
ВСП-6	216	1260	6	180	750	200	1300×1017×1200	216
ВС-1-6	240	1400	6	175	750	250	1291×1100×1228	290

Далее по табл. 18 или по справочникам выбирают типоразмер вагонетки и определяют их общее количество, а также их количество в камере, если ее длина составляет 8–13 м (см. раздел. 7.2).

Количество вагонеток, шт., находящихся одновременно в сушильных камерах:

$$n_{\text{общ}} = P_{\text{ч}}\tau / (G_{\text{в}}K_{\text{в}}), \quad (346)$$

где τ — время сушки, ч;

$G_{\text{в}}$ — грузоподъемность вагонетки, кг;

$K_{\text{в}}$ — коэффициент использования вагонетки, равный 0,92–0,95.

Габариты камеры определяют расчетным путем, исходя из размеров транспортных средств.

Внутренние размеры камеры, м, определяют по следующим формулам.

Длина камеры:

$$l_{\text{к}} = l_{\text{в}} \cdot n + (n + 1) \cdot a, \quad (347)$$

где $l_{\text{в}}$ — длина вагонетки, м;

n — количество вагонеток по длине камеры;

$a = 0,2–0,4$ — расстояние между вагонеткой и торцевой стенкой камеры, м (принимаем, что общая длина камеры не должна превышать 10–13 м).

Ширина камеры:

$$b_{\text{к}} = b_{\text{в}} + (n_1 + 1) \cdot a_1, \quad (348)$$

где $b_{\text{в}}$ — ширина вагонетки, м;

$a_1 = 0,15–0,3$ — расстояние между вагонеткой и боковой стенкой камеры, м.

Высота камеры:

$$h_{\text{к}} = h_{\text{в}} + (0,2 \div 0,3), \quad (349)$$

где $h_{\text{в}}$ — высота вагонетки, м;

$0,2 \div 0,3$ — расстояние от верха вагонетки до потолка камеры.

Наружные размеры, м, определяют с учетом полученных внутренних размеров камеры и толщин огражденных конструкций:

$$\text{— длина:} \quad L_{\text{к}} = l_{\text{к}} + 2\delta_{\text{ст}}, \quad (350)$$

$$\text{— ширина:} \quad B_{\text{к}} = b_{\text{к}} + 2\delta_{\text{ст}}, \quad (351)$$

$$\text{— высота:} \quad H_{\text{к}} = h_{\text{к}} + \delta_{\text{пот}}, \quad (352)$$

где $\delta_{\text{ст}}$, $\delta_{\text{пот}}$ — толщина стен и потолка соответственно, м.

Количество сушильных камер равно (шт.):

$$N_{\text{к}} = n_{\text{общ}} / n. \quad (353)$$

7.4. Туннельная сушильная камера

В действующих сушилах продолжительность сушки материалов и изделий определяется опытным путем и зависит от начальной и конечной влажности материала, температурного режима, влажности теплоносителя, плотности садки, а также от вида материала и изделий. Сушка сложных фасонных изделий требует большей продолжительности. Опыты, которые проводятся в НИИ, показывают, что срок сушки керамических изделий возможно сократить до 4–6 ч, а облицовочных плиток — до 15 мин.

Таблица 19

Продолжительность сушки изделий в туннельных сушилах

Наименование изделий	Начальная влажность, %	Время сушки, ч
Шамотные, пластического формования:		
нормальный кирпич	17–18	18–20
простой фаянс	18–19	24–36
сложный фаянс	18–19	42–110
Канализационные трубы	17	18–19
Керамические плитки для полов	8	12–14
Санитарно-техническая керамика:		
унитазы	16	36
умывальники	16	24
Керамические блоки:		
ускоренный режим	18–19	18
обычный режим	18–19	36

Тонкостенные, несложные по конфигурации изделия выдерживают очень высокую интенсивность сушки, особенно с применением инфракрасных лучей. Некоторые практические данные продолжительности сушки изделий в туннельных сушилах приведены в табл. 19.

Для определения размеров и количества туннелей по заданной производительности необходимо установить продолжительность сушки данного вида изделия, выбрать (принять) тип вагонетки (табл. 18) и способ садки изделий на вагонетку или емкость одной вагонетки. По размерам вагонетки и габаритам (по высоте) садки изделий определяют поперечное сечение туннеля. Если сушка предусматривается на печных вагонетках, то поперечные размеры туннеля сушил принимаются такими же, как для печи, и выбор их производится вместе с расчетом печи. При сушке изделий на полочных вагонетках ширина туннеля определяется по формуле (в мм)

$$B = b + 2(50 \div 100), \quad (354)$$

а высота туннеля от головки рельсов:

$$H = h + 100, \quad (355)$$

где b — ширина вагонетки, мм;

h — высота от головки рельсов до верха садки, мм.

При сушке изделий строительной керамики вагонетки часто имеют следующие размеры: ширина $b = 250$ мм, длина $l = 1500$ мм, высота $h' = 1550$ мм. Количество горизонтальных полок: 6 шт. при сушке кирпича и 11 шт. при сушке черепицы. Высота от головок рельсов до верха садки: для кирпича $h' = 1450$ мм, черепицы $h = 1560$ мм. На вагонетку вмещается 260–300 шт. сырца кирпича и 120–132 шт. черепицы. Ширина туннеля принимается 0,9–1,6 м, высота — 1,6–2,0 м.

При сушке огнеупорных изделий полочные вагонетки обычно имеют следующие размеры: $b = 850$ мм, $l = 1200$ мм, $h' = 1550$ мм. Количество полок — 6 шт., высота от головки рельса до верха садки $h = 1565$ мм. На вагонетку вмещается 192–198 шт. сырца нормальных кирпичей.

При сушке сантехнических изделий применительно к монорельсовому транспорту вагонетки имеют следующие размеры: $b = 800$ мм, $l = 1700$ мм. Масса металлической части вагонетки 202,4 кг.

Масса деревянной части вагонетки 24,6 кг (эти данные берутся по чертежу вагонетки). По данным из практики, на каждую вагонетку вмещается в среднем 248 кг, считая по обожженным изделиям. Высоту туннеля при монорельсовом транспорте вагонеток принимаем $H = 2400$ мм.

Производительность сушил определяется по формулам

$$P = \frac{N_{\text{в}}n}{\tau}, \text{ шт/ч,} \quad \text{или} \quad P = \frac{G_{\text{в}}n}{\tau}, \text{ т/ч,} \quad (356)$$

где $N_{\text{в}}$ — емкость одной вагонетки, шт. изделий;

$G_{\text{в}}$ — емкость одной вагонетки, т;

n — количество вагонеток, находящихся в сушиле, шт.;

τ — продолжительность сушки, ч.

Производительность сушил по годным изделиям (шт/сут или т/сут) определяется по формуле

$$P' = 24P\eta_{\text{с}}, \quad (357)$$

где $\eta_{\text{с}}$ — коэффициент, учитывающий брак изделий при сушке:

$$\eta_{\text{с}} = \frac{100}{100 - z_{\text{с}}}, \quad (358)$$

где $z_{\text{с}}$ — среднегодовой брак при сушке, %.

Так как после сушки изделия обжигаются в печи, то производительность ее по годным изделиям будет равна

$$P_{\text{п}} = P'\eta_{\text{обж}}, \quad (359)$$

где $\eta_{\text{обж}}$ — коэффициент, учитывающий брак изделий при обжиге,

$z_{\text{обж}}$ — среднегодовой брак при обжиге, %.

Емкость сушила определяется количеством изделий, одновременно находящихся во всех туннелях:

$$N = N_{\text{в}}n = P\tau, \text{ шт.,} \quad \text{или} \quad N = G_{\text{в}}n, \text{ т.} \quad (360)$$

Принимая длину каждого туннеля от 20 до 36 м (в отдельных случаях до 50 м) и зная длину одной вагонетки, можно найти количество вагонеток, вмещающихся в одном туннеле:

$$m = \frac{20}{l} \div \frac{36}{l}. \quad (361)$$

Тогда количество туннелей в сушиле равно

$$T = \frac{n}{m} = \frac{P\tau}{G_{\text{в}}m}. \quad (362)$$

Количество туннелей обычно берут с запасом на случай ремонта и чистки; на каждые 8–10 туннелей один туннель запасной. После этого расчета устанавливают количество туннелей в блоке сушил и принимают количество блоков. В одном блоке может быть до 30 туннелей с общим распределительным бором для подачи и отбора теплоносителя.

Длина сушила, установленного на печных вагонетках в одну линию с печью, определяется по количеству вагонеток. Зная длину l одной вагонетки, емкость $G_{\text{в}}$ вагонетки, продолжительность τ сушки, можно определить длину сушила:

$$L = nl = \frac{P\tau l}{G_{\text{в}}}. \quad (363)$$

Общая длина туннеля обычно принимается больше расчетной на 0,5–0,6 м, чтобы компенсировать длину разбега вагонеток.

8. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Обычно при расчете процесса сушки находят необходимое для подачи в сушило количество сушильного агента и требуемый часовой расход тепла, а также удельный расход тепла на сушку, отнесенный к 1 кг испаренной в сушиле влаги, характеризующей экономичность процесса сушки.

При расчете процесса сушки учитывают изменения основных параметров сушимого материала и теплоносителя, проходящих через сушильную установку.

В пособии приведены теплотехнические расчеты камерной сушилки с однократным использованием сушильного агента (воздуха) и туннельной сушильной камеры, в которой в качестве сушильного агента также используется воздух. Теплотехнический расчет обычной камерной сушилки подобен расчету туннельной сушильной камеры.

8.1. Теплотехнический расчет камерной сушилки с однократным использованием сушильного агента

Загрузка изделий в камеру происходит на вагонетках. В качестве сушильного агента используется воздух с предварительным подогревом в паровых калориферах.

Целью расчета является определение количества воздуха и теплоты, необходимых для испарения 1 кг влаги из высушиваемого материала.

В расчетах используется графоаналитический метод с применением паровых таблиц, $I-S$ и $I-d$ диаграмм.

Для расчета сушильной камеры нужны следующие исходные данные:

- производительность по высушенному материалу, Q , т/год;
- начальная и конечная влажность материала W_n и W_k , %;
- начальная и конечная температура материала (табл. 17), t_m' и t_m'' , °C;
- вид сушильного агента (воздух);
- температура воздуха, °C: перед калорифером t_0 , на выходе из сушильной камеры t_1 , на входе в камеру t_2 (табл. 16);
- относительная влажность ϕ , %, и температура t_0 наружного воздуха;
- продолжительность сушки τ , ч;
- давление пара в калорифере P , МПа;
- масса вагонетки $G_{тр}$ и грузоподъемность вагонетки G_b , кг;
- теплоемкость материала C_m , кДж/кг·град;
- теплоемкость транспортных средств (металла) $C_{тр}$ принимается равной 0,47 кДж/кг·град.

Вид некоторых ограждающих конструкций сушильной камеры (стена и потолок) приведен в табл. 20 и 21.

Тепловой расчет

1. Количество испаренной влаги.

Количество испаренной влаги, кг/ч, определяют по формуле:

$$W = G_{вл} - G_{сух}, \quad (364)$$

где $G_{вл}$ — количество влажного материала, поступающего в сушилку,

$$G_{вл} = Q_{ч} / (100 - W_n) \cdot 100, \quad (365)$$

$G_{сух}$ — количество высушенного материала, выходящего из сушилки,

$$G_{сух} = Q_{ч} / (100 - W_k) \cdot 100. \quad (366)$$

2. Удельный расход теплоты в камере q , кДж/кг; определяют из расхода теплоты Q , кДж/ч, на нагрев материала и транспортных средств.

На нагрев материала в камере:

$$Q_m = G_{сух} \cdot C_m \cdot (t_m'' - t_m'), \quad \text{кДж/ч} \quad (367)$$

$$q_m = Q_m / W, \quad \text{кДж/кг.} \quad (368)$$

На нагрев транспортных средств:

$$Q_{\text{тр}} = \frac{n \cdot G_{\text{тр}}}{\tau} \cdot C_{\text{тр}} \cdot (t''_{\text{тр}} - t'_{\text{тр}}), \text{ кДж/ч}, \quad (369)$$

$$q_{\text{тр}} = Q_{\text{тр}}/W, \text{ кДж/кг}, \quad (370)$$

где $t'_{\text{тр}} = t'_M - (5 \div 10)$ — температура вагонеток на входе в камеру, °С;
 $t''_{\text{тр}} = t_{\text{с.а}} - (5 \div 10)$ — температура вагонеток на выходе из камеры, °С;
 $\bar{t}_{\text{с.а}} = (t_1 + t_2)/2$ — средняя температура сушильного агента, °С.

3. Для определения потери теплоты в окружающую среду через ограждающие конструкции камеры необходимо вычислить:

3.1. Коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности стенки окружающему воздуху.

Принимаем температуру наружной поверхности стенки камеры

$$t'_{\text{ст}} = t_0 + (5 \div 10), \text{ °С}. \quad (371)$$

Для средней температуры наружного воздуха $\frac{t_0 + t'_{\text{ст}}}{2}$ из прил. 5 находим λ , ν , P_r , а по принятой $t'_{\text{ст}}$ определяем $P_{r \text{ ст}}$.

За определяющий размер принимаем наружную высоту камеры

$$\ell = H_k, \text{ тогда } G_r = \frac{g \ell^3 \Delta t}{\nu^2 T}, \quad (372)$$

где $\Delta t = t'_{\text{ст}} - t_0$;

$$T = t_0 + 273.$$

Для вертикальных поверхностей критерии теплоотдачи:

– при ламинарном режиме ($10^3 < G_r \cdot P_r < 10^9$)

$$Nu = 0,76 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0,25} \left(\frac{P_r}{P_{r \text{ ст}}} \right)^{0,25}; \quad (373)$$

– при турбулентном режиме ($G_r \cdot P_r > 10^9$)

$$Nu = 0,15 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0,33} \left(\frac{P_r}{P_{r \text{ ст}}} \right)^{0,25}. \quad (374)$$

Используя данные выражения, определяем коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·град):

$$\alpha_2^k = \frac{Nu \lambda}{\ell}. \quad (375)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м² · град), определяем из выражения

$$\hat{\alpha}_2 = \varepsilon_{1-2} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] / (t'_{\text{ст}} - t_0), \quad (376)$$

где ε_{1-2} — приведенный коэффициент излучения, принимаемый для строительных материалов равным 0,82–0,92;

C_0 — степень черноты абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²град⁴).

Эффективный коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки к окружающему воздуху, Вт/(м² · град), определяют из выражения

$$\alpha_2 = \alpha_2^k + \hat{\alpha}_2. \quad (377)$$

3.2. Коэффициент теплоотдачи α_1 от сушильного агента к внутренней поверхности стенки камеры.

Принимаем скорость воздуха в камере у стенки $w = 2,2\text{--}3,2$ м/с, а температуру внутренней поверхности стенки камеры $t''_{\text{ст}} = t_1 - (8 \div 16)$, °С.

Определяющей температурой, °С, является средняя температура сушильного агента $\bar{t}_{\text{с.а}} = (t_1 + t_2)/2$.

Для определяющих температур $\bar{t}_{c.a}$ и $t''_{ст}$ из прил. 5 находим λ , ν , P_r и $P_{r ст}$.

За определяющий размер принимаем внутреннюю высоту камеры $\ell = h_k$.

По критерию Рейнольдса устанавливаем режим движения сушильного агента:

$$Re = \frac{w \cdot \ell}{\nu}. \quad (378)$$

Если $Re < 10^4$, то коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении (α'_1) определяется из уравнения

$$Nu = 0,57 \cdot Re^{0,5}. \quad (379)$$

Если $Re > 10^4$, то данный коэффициент определяют из уравнения

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8}, \quad (380)$$

откуда $\alpha'_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell}$, Вт/(м²град).

Наличие естественной конвекции турбулизует поток и усиливает перенос теплоты. Учитывая это, определяем коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции из выражения

$$Nu = 0,15 \cdot (G_r \cdot P_r)^{0,33}, \quad (381)$$

где $G_r = \frac{g \ell \Delta t}{\nu^2 T}$;

$$P_r \text{ принят при } \bar{t}_{c.a} = (t_1 + t_2)/2; \quad (382)$$

$$\Delta t = \bar{t}_{c.a}, \text{ а } T = t_0 + 273, \quad (383)$$

откуда $\alpha''_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell}$, Вт/(м²град). (384)

С учетом турбулизации $\alpha_1 = 1,2 \cdot (\alpha'_1 + \alpha''_1)$, Вт/(м²град). (385)

3.3. Коэффициент теплопередачи для стен сушильной камеры, Вт/(м²град),

$$K_{ст} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (386)$$

Проверяем температуру наружной поверхности стенки, °С, при полученном коэффициенте теплопередачи:

$$t'_{ст} = t_0 + \frac{K_{ст}}{\alpha_2} (\bar{t}_{c.a} - t_0). \quad (387)$$

Подсчет коэффициентов теплоотдачи (α_1 и α_2) и коэффициента теплопередачи ($K_{пт}$) для потолка ведется в той же последовательности и по тем же расчетным формулам, что для стен камеры.

При определении α_1 определяющей температурой является средняя температура теплоносителя $\bar{t}_{c.a}$. Температура внутренней поверхности потолка $t''_{пт} = \bar{t}_{c.a} - (6 \div 10)$, °С, а за определяющий размер принимается половина наименьшей стороны $\ell = b_k/2$.

Скорость сушильного агента у потолка камеры принимается 3–3,5 м/с.

Учитывая, что тепловоспринимающая поверхность потолка обращена вниз, величина α_1 , Вт/(м²град) должна быть уменьшена на 30%:

$$\alpha_1 = 0,7(\alpha'_1 + \alpha''_1). \quad (388)$$

При определении α_2 определяющей температурой является средняя температура наружного воздуха $(t_0 + t'_{пт})/2$, где температура наружной поверхности потолка $t'_{пт} = t_0 + (4 \div 6)$ °С. Определяющий размер — $\ell = B_k/2$, м.

Величина определенного коэффициента теплоотдачи конвекцией α_2^k должна быть увеличена на 30%, так как теплоотдающая поверхность потолка обращена вверх. Величину коэффициента теплоотдачи излучением $\hat{\alpha}_2$ можно принять равной рассчитанному ранее, так как физические константы остаются практически теми же, что и в предыдущем случае.

$$\alpha_2 = 1,3 \cdot (\alpha_2^k + \hat{\alpha}_2), \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ град}). \quad (389)$$

Определяем коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ град})$, для потолка сушильной камеры:

$$K_{\text{пт}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (390)$$

Проверяем температуру наружной поверхности потолка, °С, при полученном коэффициенте теплоотдачи:

$$t'_{\text{пт}} = t_0 + \frac{K_{\text{пт}}}{\alpha_2} \cdot (\bar{t}_{\text{с.а}} - t_0). \quad (391)$$

4. Поверхности ограждающих конструкций сушильной камеры по наружным размерам, м^2 :

$$F = (F_{\text{ст}}^{\text{бок}} + F_{\text{ст}}^{\text{торп}}) \cdot 2 + F_{\text{пт}}, \quad (392)$$

где $F_{\text{ст}}^{\text{бок}}$ — боковые стены,
 $F_{\text{ст}}^{\text{торп}}$ — торцевые стены,
 $F_{\text{пт}}$ — потолок.

Общие потери теплоты, Вт, в окружающую среду:

$$q_5 = (F_{\text{ст}} \cdot K_{\text{ст}} + F_{\text{пт}} \cdot K_{\text{пт}}) \cdot (\bar{t}_{\text{с.а}} - t_0), \quad (393)$$

или $Q_5 \cdot 3,6$ кДж/ч.

Удельная потеря теплоты через ограждающие конструкции камеры, кДж/кг:

$$q_5 = \frac{Q_5 \cdot 3,6}{W}. \quad (394)$$

Потерей теплоты через пол пренебрегаем, так как это имеет место в период разогрева сушильной камеры. Потери теплоты через двери камеры не учитываем, поскольку они учтены во время подсчета потерь через торцевые стены камеры.

Удельная величина тепловых потерь, приходящихся на 1 кг испаренной влаги:

$$\Delta = 4,19t'_m - (q_m + q_{\text{тр}} + q_5), \text{ кДж}/\text{кг}. \quad (395)$$

5. Построение действительного процесса сушки на $I-d$ диаграмме (прил. 10) начинаем с теоретического процесса сушки (рис. 18).

Наносим точку A для параметров воздуха t_0 и φ_0 , для данной точки находим на диаграмме I_0 , кДж/кг, и d_0 , г/кг. Проводим линию $d_0 = \text{const}$ до пересечения с изотермой t_0 и находим точку B . Для данной точки определяем параметры воздуха на входе в сушилку I_1 , кДж/кг. Из полученной точки B проводим изоэнтальпию $I = \text{const}$ до пересечения с температурой сушильного воздуха на выходе из сушилки t_2 , получим точку C_0 и определяем по диаграмме d_2 , г/кг.

Для построения политропы действительного процесса сушки необходимо знать величину удельных тепловых потерь Δ , приходящихся на 1 кг испаренной влаги, чтобы определить величину отрезка C_0E_0 и отложить его вверх, если $\Delta > 0$, или вниз, если $\Delta < 0$.

$$C_0E_0 = \Delta \cdot (d_2 - d_1) \cdot 10^{-3}, \text{ кДж}/\text{кг}. \quad (396)$$

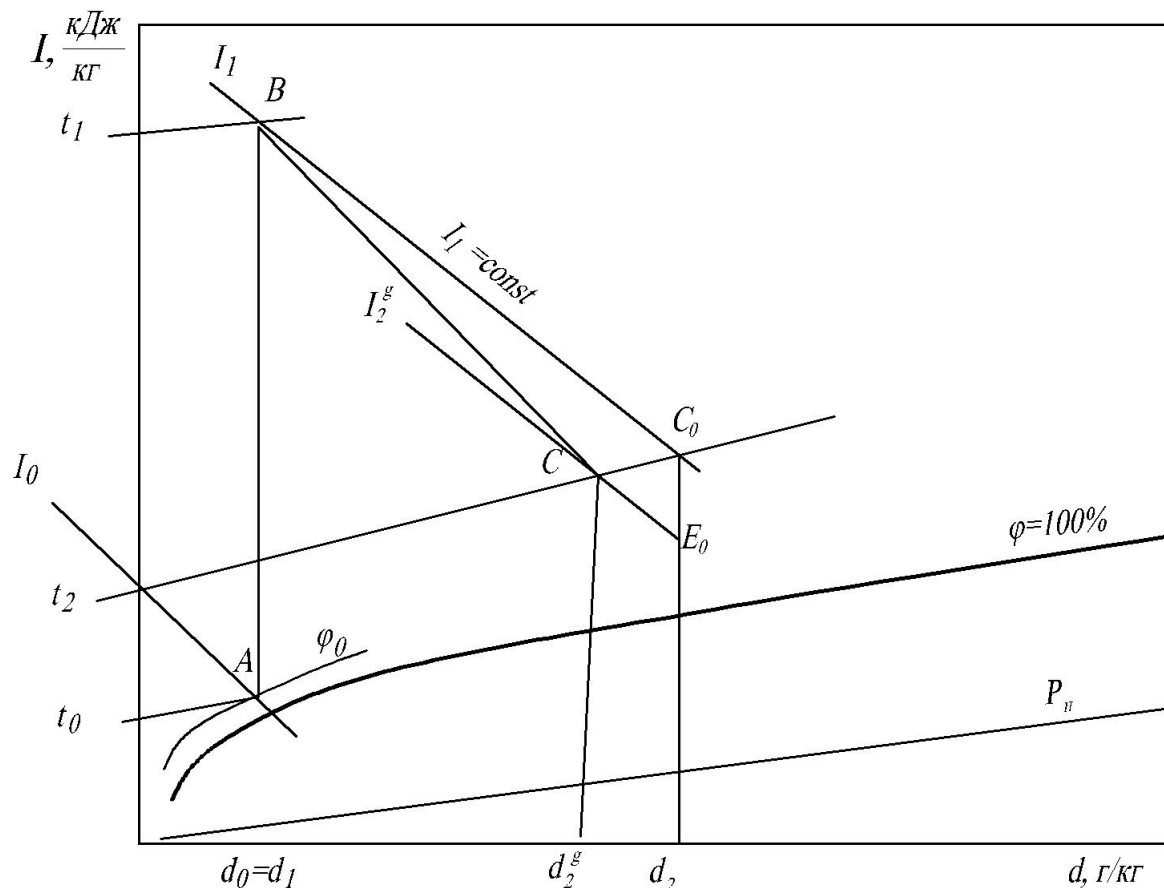


Рис. 18. Построение процесса сушки в $I-d$ диаграмме

Из точки B проводим политропу через точку E_0 . Пересечение политропы с линией (изотермой) t_2 дает конечную точку C действительного процесса BC , которой соответствует d_2^g , г/кг, и I_2^g , кДж/кг.

Расход воздуха, необходимый для испарения влаги

Удельный расход воздуха, приходящийся для испарения 1 кг влаги:

$$\ell = \frac{1000}{(d_2^g - d_1)} \quad (397)$$

Общий массовый расход воздуха, кг/ч:

$$L = \ell \cdot W \quad (398)$$

Общий объемный расход воздуха, м³/ч:

$$V = L / \rho_t \quad (399)$$

где $\rho_t = \rho_0^H \cdot \frac{273}{t_0 + 273}$ — плотность воздуха при заданной температуре t_0 ;
 $\rho_0^H = 1,293$ — плотность воздуха при температуре 0 °С, кг/м³.

Расход теплоты на испарение влаги

Удельный расход теплоты на испарение 1 кг влаги:

$$q = \ell \cdot (I_1 - I_0), \text{ кДж/кг.} \quad (400)$$

Общий расход теплоты на испарение влаги в сушильной камере:

$$Q = q \cdot W, \text{ кДж/ч.} \quad (401)$$

Расчет поверхности нагрева паровых калориферов

К установке принимаем стальные пластинчатые калориферы.

Определяем расход пара на подогрев воздуха в калориферах:

$$D = \frac{Q}{(i'' - i') \cdot \eta_k}, \text{ кг/ч}, \quad (402)$$

где i'' и i' — энтальпии сухого насыщенного пара и конденсата при соответствующем давлении пара, кДж/кг;

η_k — к.п.д. калорифера, принимаем равным $0,94 \div 0,96$.

Значения энтальпии находим из прил. 6.

6. Определяем диаметр паропровода, m (мм):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot D}{3600 \pi \cdot \rho'' \cdot v}}, \quad (403)$$

где ρ'' — плотность сухого насыщенного пара при соответствующем давлении, кг/м³;

$v = 15 \div 20$ — скорость пара в паропроводе, м/с.

7. Определяем поверхность нагрева калорифера, м²,

$$F_k = \frac{Q}{K \cdot \left(t_n - \frac{t_n + t_0}{2} \right)}, \quad (404)$$

где t_n — температура сухого насыщенного пара при соответствующем давлении, °С;

K — коэффициент теплопередачи калорифера при обогреве паром, Вт/(м²град),

$$K = 14,1 \cdot (v \cdot \rho)^{0,366}, \quad (405)$$

где $v \cdot \rho$ — весовая скорость воздуха в калорифере, принимается в пределах 5–9 кг/м²с.

Таблица 20

Схема некоторых ограждающих конструкций сушильной камеры (потолок)

Номер слоя	Толщина слоя δ , мм	λ , Вт/м · град	ρ , кг/м ³	c , кДж/кг · град	Вид слоя
1	15, 20, 25	1,2	1800	0,84	Цементно-песчаная стяжка
2	100, 120, 150	0,12	400	0,8	Тепловая изоляция
3	70, 100, 120	1,55	2200	0,84	Железобетонная плита

Таблица 21

Некоторые виды ограждающих конструкций сушильной камеры (стенка камеры)

Материал ограждения	Толщина δ , мм	λ , Вт/мК	ρ , кг/м ³	c , кДж/кг · град
Керамический кирпич	380	0,58	1800	0,8
Известково-песчаная штукатурка	20	0,7	1600	0,84
Красный кирпич	380	0,74	1650	0,86
Керамзитобетон	250	0,6	1200	0,84
Керамзитобетон	340	0,65	1400	0,92
Известково-песчаная штукатурка	20	0,71	1620	0,84
Минераловатные плиты	80	0,75	150	0,81
Железобетонная панель	200	1,55	2200	0,84
Панель из ячеистого бетона	200	0,52	800	0,81
Цементно-песчаный раствор	15	1,2	1800	0,84
Шлакобетон	250	0,7	1500	0,7
Цементно-песчаный раствор	20	1,2	1800	0,84

8.2. Теплотехнический расчет туннельного сушила

Для расчета туннельного сушила необходимо знать производительность сушила в соответствии с заданной производительностью печи Π (т/год) годных изделий, обжигаемых в туннельных печах; количество рабочих дней в году; количество брака при сушке и обжиге (около 5 %); количество рабочих дней в году, Φ_r ; начальную w_n и конечную после сушки w_k относительную влажность изделий (%); время сушки, τ (ч).

Сушка производится горячим воздухом, отбираемым из зоны охлаждения туннельных печей. Начальную температуру воздуха при входе в сушило t_n и конечную на выходе из сушила t_k ($^{\circ}\text{C}$) принимаем в соответствии с видом изделий.

1. Определяем часовую производительность сушила (кг/ч) P_{Π} (раздел 7.4), при этом учитываем не только количество брака, но и фонд рабочего времени (сут.).

$$P_{\Pi} = \frac{100\Pi}{24\Phi_r(100-\eta_{\text{обж}})}, \quad (406)$$

где $\eta_{\text{обж}}$ — количество брака, %.

Так как в процессе обжига существуют потери при прокаливании, то в этом случае производительность сушила по сухой массе равна

$$P_c = K P_{\Pi},$$

где K — коэффициент, учитывающий потери при прокаливании (например, при 10 % потерь $K = 1,1$).

Поступает в сушило влажных изделий:

$$P_{\text{вл}} = P_c \frac{100}{100-w_n}. \quad (407)$$

Выходит из сушила высушенных изделий:

$$P_m = P_c \frac{100}{100-w_k}. \quad (408)$$

2. Часовое количество испаряемой влаги (кг/ч) находим по формуле

$$n^1 = P_{\text{вл}} \frac{w_n - w_k}{100 - w_k}. \quad (409)$$

3. Определяем расход сухого воздуха для теоретического процесса сушки. Начальная температура воздуха, поступающего в сушило, t_n ($^{\circ}\text{C}$), параметры воздуха окружающей среды зависят от местности (прил. 10). Влагосодержание и теплосодержание воздуха находятся по $I-d$ диаграмме (прил. 11 и 12) аналогично разделу 8.1. Расход сухого воздуха (кг/ч) при теоретическом процессе сушки находим по формуле

$$G_c^T = \frac{1000n^1}{d_2 - d_n}, \quad (410)$$

где d_2 — влагосодержание воздуха при окончании сушки, г/кг сух. возд.;

d_n — влагосодержание воздуха в начале сушки, г/кг сух. возд.

4. Находим потери теплосодержания воздуха в процессе сушки. Для расчета действительного процесса сушки определяем расход тепла в сушиле на нагрев материала, транспортирующих устройств и потери тепла в окружающую среду, но предварительно определяем размеры сушила.

Количество вагонеток, находящихся в сушиле:

$$n = \frac{P_{\Pi}\tau}{G_B}, \quad (411)$$

где G_B — емкость одной вагонетки, кг.

Количество туннелей будет равно

$$T = n/m, \quad (412)$$

где m — количество вагонеток в туннеле (принимается при расчете).

Вычисляем длину туннеля (мм):

$$L = nl + 0,6, \quad (413)$$

где l — длина вагонетки, мм.

Определяем ширину туннеля по формуле

$$B = b + 2(50 \div 100), \quad (414)$$

а высота туннеля от головки рельсов равна

$$H = h + 100, \quad (415)$$

где b — ширина вагонетки, мм;

h — высота от головки рельсов до верха садки, мм.

Стены сушила могут быть выполнены из разных материалов, например из красного строительного кирпича толщиной 360–380 мм (табл. 21). Сверху сушило покрыто железобетонными плитами и теплоизоляцией (табл. 20). В качестве теплоизоляции можно использовать шлаковую засыпку.

Общая ширина сушила, состоящего из n туннелей, равна

$$B_c = nB + (n + 1)S_1, \quad (416)$$

где S_1 — толщина одной стены сушила, мм.

Расход тепла на нагрев изделий в сушиле (кДж/ч) определяем по формуле

$$q_M = P_M c_M (t_k - t_n), \quad (417)$$

где c_M — теплоемкость высушенного материала при его конечной влажности w_k , кДж/кг·град:

$$c_M = c_c \frac{100 - w_k}{100} + \frac{4,2w_k}{100}, \quad (418)$$

где c_c — теплоемкость абсолютно сухого материала (прил. 7), кДж/кг·град;

t_k — конечная температура материала после сушки (можно принять на 150 градусов ниже начальной температуры сушильного агента при противоточном движении воздуха и вагонеток с изделиями), °С;

t_n — начальная температура материала до сушки, °С.

В час поступает вагонеток в сушило

$$n' = n/\tau. \quad (419)$$

Расход тепла на нагрев транспортирующих устройств (кДж/ч):

$$q_{тр} = G_{тр} c_{тр} (t_k - t_n), \quad (420)$$

где $G_{тр}$ — вес транспортирующего устройства, выходящего из сушила в час, кг/ч;

$c_{тр}$ — теплоемкость транспортирующих устройств, кДж/кг·град, теплоемкость стали

$c_{мет} = 0,47$ кДж/кг·град (если вагонетка содержит деревянные части, считать отдельно, затем сложить, теплоемкость дерева $c_{дер} = 1,13$ кДж/кг·град);

t_k — конечная температура вагонетки (равна начальной температуре сушильного агента, для деревянной части на 20 градусов меньше), °С;

t_n — начальная температура вагонетки, °С (равна начальной температуре материала).

Потери тепла в окружающую среду через стены, потолок, пол и двери (кДж/ч) определяем по формуле

$$q_{\text{окр}} = 3,6K(t_{\text{ср}} - t_{\text{окр}})F, \quad (421)$$

где K — коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$), который равен для стен

$$K_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (422)$$

$t_{\text{ср}}, t_{\text{окр}}$ — средние температуры внутренней поверхности сушила (температуры сушильного агента) и окружающей среды;

α_1 — коэффициент теплоотдачи внутри сушила от движущегося сушильного агента к стенкам камеры, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$, при скорости $v = 2$ м/сек он будет равен $\alpha_1 = 5,6 + 4v$;

λ_1 — коэффициент теплопроводности кирпичной стенки, равный $0,48$ $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки в окружающую среду, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ (определяем по номограмме — для $\Delta t = 15^\circ$ $\alpha_2 = 10,2$);

F — теплоотдающая поверхность стенок, м^2 , $F_c = 2LH$, потолка и пола — $F_{\text{п}} = LB_c$, м.

Коэффициент теплопроводности железобетона $\lambda_2 = 1,55$ $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ для теплоизоляционной засыпки $\lambda_3 = 0,12$ $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ (табл. 20).

По номограмме находим $\alpha_3 = 11,3$ $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$.

Коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$) для потолка равен

$$K_{\text{п}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_3}}, \quad (423)$$

где S_2 и S_3 — толщина бетонной плиты и теплоизоляционной засыпки, м.

Рассчитываем потери тепла через потолок по формуле (421).

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

$$q_{\text{пол}} = 3,6 \cdot 10 \cdot F, \text{ кДж/ч.} \quad (424)$$

Определяем потери тепла через дверки со стороны подачи теплоносителя: поверхность n дверей выполнена из дерева толщиной $S_4 = 50$ мм ($\lambda_4 = 0,16$ $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$).

Площадь дверей в м^2 равна

$$F_{\text{дв}} = HBn. \quad (425)$$

Коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$) будет

$$K_{\text{дв}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (426)$$

тогда

$$q_{\text{дв1}} = 3,6K(t_{\text{н}} - t_{\text{окр}})F_{\text{дв}}, \text{ кДж/ч.} \quad (427)$$

Потери тепла через дверки со стороны выдачи вагонеток равны

$$q_{\text{дв2}} = 3,6K_{\text{дв}}(t_{\text{к}} - t_{\text{окр}})F_{\text{дв}}, \text{ кДж/ч.} \quad (428)$$

Суммарные потери тепла в окружающую среду (кДж/ч) составят

$$q_{\text{окр}} = q_c + q_{\text{п}} + q_{\text{пол}} + q_{\text{дв1}} + q_{\text{дв2}}. \quad (429)$$

Общие потери тепла в сушиле будут

$$q_{\text{пот}} = q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{окр}}, \text{ кДж/ч.} \quad (429)$$

Потери теплосодержания воздуха в сушиле находим по уравнению

$$I_{\text{пот}} = q_{\text{пот}} / G_{\text{с.т}}, \text{ кДж/кг сухого воздуха.} \quad (430)$$

5. Действительный расход воздуха на сушку определяем с помощью $I-d$ диаграммы по $I_{\text{пот}}$. Конечные параметры сушильного агента $t_{\text{к}}$; влажность воздуха $\phi_{\text{к}}$, %. Действительный расход воздуха будет

$$G_{\text{с.воз}} = \frac{1000n^1}{d_{\text{к}} - d_{\text{н}}}, \quad (431)$$

где $d_{\text{к}}$ — влагосодержание воздуха после окончания сушки, г/кг сух. возд.;

$d_{\text{н}}$ — влагосодержание воздуха в начале сушки, г/кг сух. возд.

Количество воздуха в $\text{м}^3/\text{ч}$, подаваемого в сушило при $t_{\text{окр}}$ и V $\text{м}^3/\text{кг}$ сух. воз. (прил. 8), составит

$$V'_{\text{воз}} = V G_{\text{с.воз}}. \quad (432)$$

При начальной температуре воздуха его действительный расход составит ($\text{м}^3/\text{ч}$)

$$V_{\text{воз}} = V'_{\text{воз}} \left(1 - \frac{t_{\text{н}} - t_{\text{окр}}}{273} \right). \quad (433)$$

Количество отработанного воздуха, удаляемого из сушила при $t_{\text{к}}$, определяем из уравнения

$$V_{\text{ух}} = \left(\frac{G_{\text{с.м}}}{\rho_0} - \frac{n^1}{0,8} \right) \left(1 + \frac{t_{\text{к}}}{273} \right), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (434)$$

где $G_{\text{с.м}} = K \cdot G_{\text{с.воз}}$, $K = 1,009$;

ρ_0 — плотность отработанного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$\rho_0 = \frac{353 - 0,0013p_{\text{вл}}}{273}, \quad (435)$$

где $p_{\text{вл}}$ — парциальное давление водяного пара во влажном воздухе, $\text{Н}/\text{м}^2$.

6. Определяем расход тепла на испарение и нагрев влаги материала (кДж/ч):

$$q_{\text{исп}} = (2493 + 1,97t_{\text{к}} - 4,2t_{\text{м}})n'. \quad (436)$$

7. Рассчитываем тепло, уходящее с отработанным воздухом (кДж/ч):

$$q_{\text{ух}} = G_{\text{с.воз}} [1(t_{\text{к}} - t_{\text{окр}}) + 0,009 + 1,97(t_{\text{к}} - t_{\text{окр}})]. \quad (437)$$

8. Расход тепла на сушку (кДж/ч) равен

$$Q = G_{\text{с.воз}}(I_{\text{н}} - I_{\text{воз}}) - 4,2n^1t_{\text{м}}, \quad (438)$$

где $I_{\text{н}}$ — теплосодержание воздуха, подаваемое на сушку (начальное), кДж/кг сух. возд. (см. п. 3);

$I_{\text{воз}}$ — теплосодержание неподогретого атмосферного воздуха, кДж/кг сух. возд. (см. п. 3).

Удельный расход тепла на сушку (для летних условий) равен

$$g_w = \frac{Q}{n^1}, \text{ кДж/кг вл.} \quad (439)$$

9. Рассчитываем приход тепла. Потребное количество тепла, которое необходимо внести с воздухом, отбираемым из зоны охлаждения печи, учитывая нагрев его от $t_{\text{окр}}$ до $t_{\text{н}}$, равно Q кДж/ч, удельный расход равен g_w кДж/кг вл.

Составляем тепловой баланс сушила.

Таблица 22

Тепловой баланс туннельного сушила

Наименование статьи	Количество тепла		
	кДж/ч	кДж/кг вл.	%
Расход тепла			
1. Нагрев материала, q_m			
2. Нагрев транспортирующих устройств, $q_{тр}$			
3. Потери в окружающую среду, $q_{окр}$			
4. Испарение и нагрев влаги материала, $q_{исп}$			
5. Тепло, уходящее с отработанным воздухом, $q_{ух}$			
6. Невязка баланса			
Приход тепла			

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алимов Л.А. Технология строительных изделий и конструкций : Бетонovedение : учебник для вузов / Л.А. Алимов, В.В. Воронин. — М. : Академия, 2010. — 425 с.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. — М. : АСВ, 2011. — 528 с.
3. Баженов Ю.М. Проектирование предприятий по производству строительных материалов и изделий / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин, Н.В. Трескова. — М. : АСВ, 2005. — 472 с.
4. Вознесенский А.А. Тепловые установки в производстве строительных материалов и изделий. — М. : Госстройиздат, 1964. — 371 с.
5. Воробьев Х.С. Теплотехнологические процессы и аппараты силикатных производств / Х.С. Воробьев, Д.Я. Мазуров, А.А. Соколов. — М. : Высшая школа, 1965. — 773 с.
6. Кузнецов Г.Ф. Тепловая изоляция : Учебное пособие / Г.Ф. Кузнецов, В.И. Бельский, В.П. Горбачев и др. ; под ред. Г.Ф. Кузнецова. — М. : Стройиздат, 1985. — 421 с.
7. Кронгауз С.Д. Тепловая обработка и теплоснабжение на заводах сборного железобетона. — М. : Стройиздат, 1961. — 470 с.
8. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. — М. ; Л. : Гос. энергетическ. изд-во, 1963. — 320 с.
9. Левченко П.Л. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности. — М. : Альянс, 2007. — 366 с.
10. Лоскутов Ю.А. Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов / Ю.А. Лоскутов, В.М. Максимов, В.М. Веселовский. — М. : Машиностроение, 1986. — 376 с.
11. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. — М. : Стройиздат, 1977. — 159 с.
12. Михеев М.А. Основы теплопередачи : Учебник / М.А. Михеев, И.М. Михеева. — М. : Энергия, 1977. — 344 с.
13. Никифорова Н.М. Основы проектирования тепловых установок при производстве строительных материалов : учеб. пособие для техникумов. — М. : Высшая школа, 1974. — 144 с.
14. Оборудование для производства строительных материалов и работ : справочник / гл. ред. А.Д. Жуков. — М. : Стройинформ, 2006. — 440 с.
15. ОНТП 07-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования предприятий сборного железобетона. — М. : Минстройматериалов СССР, 1986. — 51 с.
16. ОНТП 09-85. Предприятия по производству изделий из ячеистого и плотного бетона автоклавного твердения : Нормы технологического проектирования. — М. : Минстройматериалов СССР, 1986. — 116 с.
17. Павлов В.Ф. Основы проектирования тепловых установок : учеб. пособие / В.Ф. Павлов, С.В. Павлов. — М. : Высшая школа, 1987. — 143 с.
18. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов технологии : Учеб. пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН России П.Г. Романкова. — М. : Альянс, 2007. — 576 с.
19. Перегудов В.В. Теплотехника и теплотехническое оборудование. — М. : Стройиздат, 1990. — 336 с.
20. Рекомендации по тепловой обработке тяжелого бетона с учетом активности цемента при пропаривании. — М. : Госстрой СССР, 1984. — 20 с.
21. Рекомендации по снижению расхода тепловой энергии в камерах для тепловлажностной обработки железобетонных изделий. — М. : Стройиздат, 1984. — 56 с.
22. СН 513-79. Временные нормы для расчета расхода тепловой энергии при тепловлажностной обработке сборных бетонных и железобетонных изделий в заводских условиях. — М. : Стройиздат, 1980. — 48 с.
23. СНиП 3.09.01-85. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий / Госстрой России. — М. : ФГУП ЦПП, 2005. — 44 с.
24. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. — М., 2005. — 140 с.
25. Строительные материалы : справочник / А.С. Болдырев [и др.] ; под ред. А.С. Болдырева, П.П. Золотова. — М. : Стройиздат, 1989. — 567 с.
26. Строительные машины : справочник : в 2 т. Т. 2 : Оборудование для производства строительных материалов и изделий / В.Н. Лямин [и др.] ; под общ. ред. М.Н. Горбовца. — М. : Машиностроение, 1991. — 496 с.
27. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности / А.М. Баренбойм, Т.М. Галиева, Д.Б. Гинзбург и др. ; под ред. Д.Б. Гинзбурга и В.Н. Зимины. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1964. — 496 с.

28. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. — Т. 1. — М. : Энергия, 1975. — 744 с.
29. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. — Т. 2. — М. : Энергия, 1976. — 896 с.
30. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. — М. : Стройиздат, 1982. — 384 с.

Приложения

Приложение 1

Единицы измерения (справочные данные)

Физическая величина	Обозначение	Название, соотношения между единицами измерения
Количество теплоты, энергия	Q	Джоуль, Дж = Н·м = Вт·с 1 кДж = 0,239 ккал = $2,778 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч Калория, 1 кал (ккал) = 4,1868 Дж (кДж) 1 кВт·ч = 860 ккал. 1 кВт·ч = 3600 кДж
Мощность	P	Ватт, Вт = Дж/с 1 кал/с = 4,1868 Вт; 1 ккал/ч = 1,163 Вт
Температура	T t	Градус Кельвина, К Градус Цельсия, °С, $t = T - T_0$. $T_0 = 273,15$ К
Разность температур	Δt	$\Delta t \cdot ^\circ\text{C} = \Delta t \cdot \text{K}$
Удельная теплоемкость	C	Дж/(кг·°С) 1 кал/(кг·°С) = 4,1868 Дж/(кг·°С)
Теплопроводность	λ	Вт/(м·°С) 1 ккал/(м·ч·°С) = 1,163 Вт/(м·°С)
Коэффициент теплоотдачи, тепловосприятости	α	Вт/(м ² ·°С) 1 ккал/(м ² ·ч·°С) = 1,163 Вт/(м ² ·°С) 1 Вт/(м ² ·°С) = 0,86 ккал/(м ² ·ч·°С)
Удельная теплота сгорания	Q^H	Нижшая теплота сгорания Дж/кг, Дж/м ³ 1 ккал/кг (м ³) — 4,1868 кДж/кг (м ³)
Энтальпия	i	1 ккал/кг = 4,1868 кДж/кг

Приложение 2

Значения функции Фурье $f(F_0)$ при $Bi = \infty$

Форма тела	Значения F_0												
	0,03	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4
Плита	1,0	0,95	0,78	0,61	0,49	0,40	0,31	0,24	0,18	0,14	0,11	0,06	0,03
Балка $L = \infty$	1,0	0,90	0,60	0,35	0,24	0,15	0,10	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0
Куб	1,0	0,86	0,48	0,22	0,16	0,09	0,05	0,03	0,01	0,01	0	0	0

Приложение 3

Режим тепловой обработки изделий из тяжелых бетонов в кассетах (паровые отсеки располагаются через два рабочих отсека), в пакетах

Толщина бетона в изделиях, мм	Класс (марка) бетона	Режим тепловой обработки при 80–90 °С
До 100	B12,5 (M150)	1 + 4 + 4 = 9
101–200	B12,5 (M150)	1 + 5 + 5 = 11
До 100	B15 (M200)	1 + 3,5 + 3,5 = 8
101–200	B15 (M200)	1 + 4 + 4,5 = 9,5
До 100	B25 (M350)	1 + 3 + 3 = 7
101–200	B25 (M350)	1 + 3,5 + 4,5 = 9

Среднее значение коэффициента загрузки камер (K0) по видам изделий

Изделия	Значения K0 для камер:	
	специализированных	универсальных
Плиты перекрытий сплошные, многопустотные, ребристые	0,15	0,24
Ригели	0,27	0,05
Марши	0,25	0,06
Колонны	0,34	0,12
Панели перекрытий	0,35	0,22
Фундаментные блоки и панели	0,5	0,32

Физические параметры сухого воздуха при давлении 0,1 МПа

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{град)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{град)}$	$\nu \cdot 10^8, \text{м}^2/\text{с}$	$P_{\text{ч}}$
0	1,293	1,005	2,442	13,28	0,707
20	1,205	1,005	2,593	15,06	0,703
40	1,128	1,005	2,756	16,96	0,699
60	1,060	1,005	2,896	18,97	0,696
80	1,000	1,009	2,047	21,09	0,692
100	0,946	1,009	3,210	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,338	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,489	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,640	30,09	0,682
180	0,779	1,021	3,780	32,49	0,681

Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (по давлению)

$P, \text{МПа}$	$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$\nu'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$\tau, \text{кДж/кг}$
0,16	133,31	0,9200	475,41	2696,3	2220,8
0,20	120,23	0,8860	504,74	2706,8	2202,0
0,26	128,73	0,6929	541,2	2718,9	2177,7
0,30	133,54	0,6055	561,7	2725,5	2163,8
0,40	143,62	0,4623	604,3	2738,7	2134,1
0,50	151,84	0,3749	640,1	2748,9	2108,7
0,60	158,84	0,3156	670,6	2756,9	2086,3
0,80	170,41	0,2403	720,9	2769,0	2048,1

Средняя теплоемкость материалов (интервал температур 0–100°)

Материал	c , кДж/кг·град	Материал	c , кДж/кг·град
Антрацит	0,908	Мел	0,879
Асбест	0,816	Мрамор	0,900
Базальт	0,837	Песок кварцевый	0,796
Бетон	1,130	Полевой шпат	0,800
Гипс безводный	0,837	Силиманит	0,837
Глина сухая	0,921	Стальные балки	0,481
Глинозем	0,766	Стекло	0,837
Гранит	0,837	Тальк	0,875
Дерево	2,722	Торф сухой	1,373
Динас	0,796	Уголь бурый	1,424
Диатомит	0,837	Уголь жирный	1,214
Доломит	0,930	Уголь тощий	1,118
Зола	0,837	Фарфор	1,089
Известняк	0,921	Форстерит	0,888
Карборунд	0,963	Хромомагнетит	0,754
Керамика	0,837	Цемент	1,130
Кокс кусковой	0,850	Шамот	0,837
Кирпич строительный	0,921	Шлак котельный	0,791
Корунд	0,796	Шлак доменный	0,754
Лед	2,114	Шлакобетон	0,879
Магнетит	0,963		

Удельный объем влажного воздуха на 1 кг сух. воздуха (v м³/кг при $B = 99,4$ кН/м²)

t , град.	φ , %							
	100	90	80	70	60	50	40	30
–15	0,747	0,747	0,747	0,747	0,747	0,746	0,746	0,746
–10	0,762	0,762	0,762	0,762	0,762	0,761	0,761	0,761
–5	0,778	0,778	0,777	0,777	0,777	0,776	0,776	0,776
0	0,794	0,794	0,793	0,793	0,792	0,792	0,791	0,791
5	0,811	0,810	0,809	0,809	0,808	0,807	0,806	0,806
10	0,828	0,827	0,826	0,825	0,824	0,823	0,822	0,821
15	0,847	0,846	0,844	0,843	0,841	0,840	0,838	0,837
20	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853
30	0,915	0,911	0,907	0,903	0,899	0,895	0,891	0,887
40	0,977	0,970	0,962	0,954	0,947	0,940	0,933	0,925
50	1,07	1,05	1,04	1,02	1,01	0,996	0,983	0,970
60	1,20	1,17	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,02
70	1,44	1,38	1,32	1,27	1,22	1,17	1,13	1,09
80	1,95	1,79	1,65	1,53	1,43	1,34	1,26	1,19
90	3,57	2,88	2,42	2,08	1,83	1,63	1,47	1,33
100	–	10,9	5,45	3,63	2,72	2,17	1,81	1,55
120	–	11,5	5,73	3,82	2,86	2,28	1,90	1,63
140	–	12,0	6,01	4,01	3,00	2,40	2,00	1,71
160	–	12,6	6,30	4,19	3,14	2,51	2,09	1,79
180	–	13,2	6,58	4,38	3,29	2,63	2,19	1,87
200	–	13,7	6,86	4,57	3,43	2,74	2,28	1,96

Основные параметры сушки материалов в сушильных барабанах

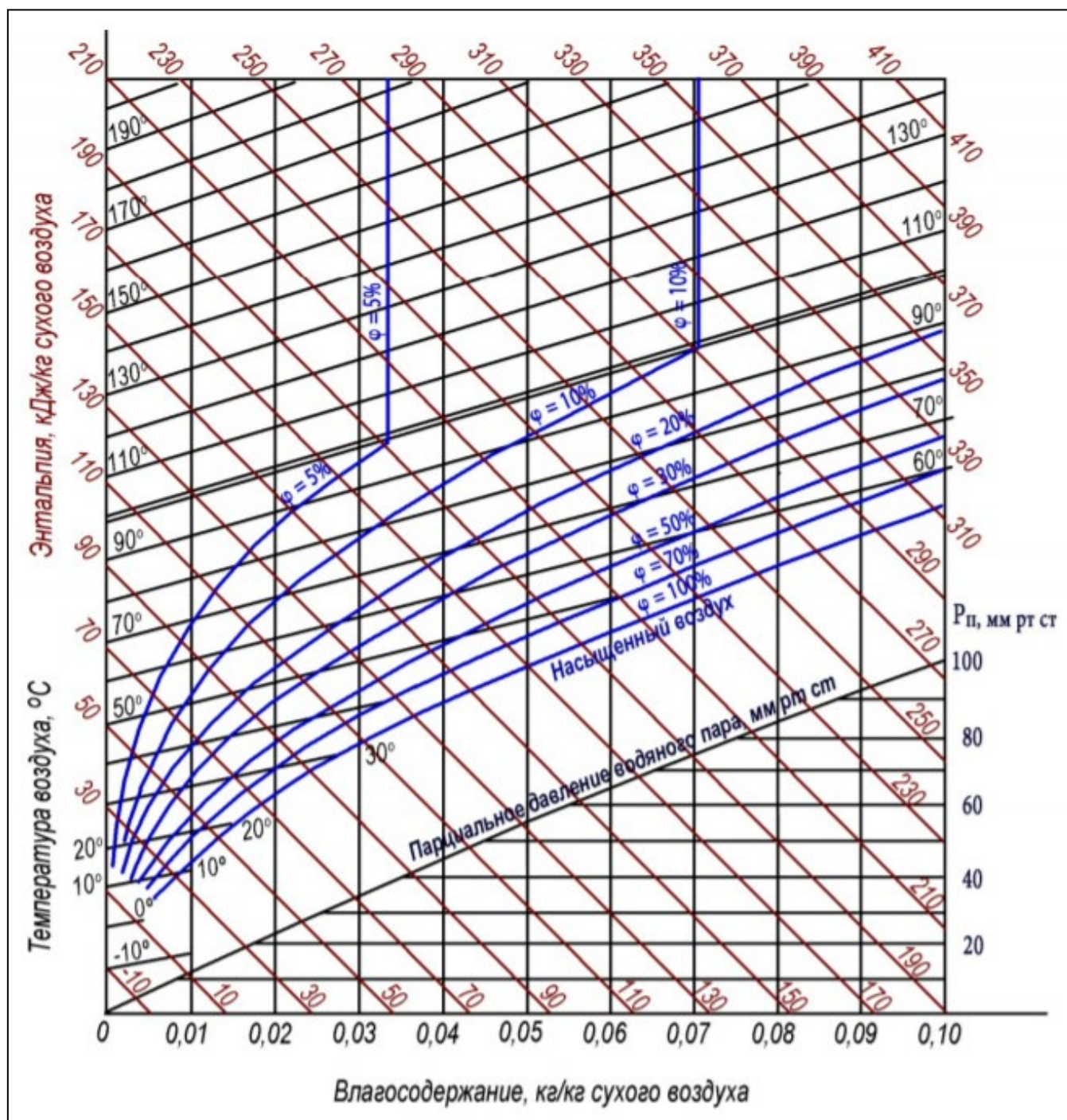
Материал	Насыпная плотность, кг/м ³	Влажность, %		Температура газов, °С		Напряжение, m_o , кг/м ³ ч	Тип теплообменных устройств в барабане
		w_H	w_K	t_H	t_K		
Глина	1800	20–25	4–6	600–800	80–100	50–60	Лопастные
Глина	1800	20–25	0,5–1	750–850	100–110	40	Ячейковые
Опилки	250	30–40	10–15	300–400	80–100	20–30	Лопастные
Известняк	1800	10–12	0,5–1	800–1000	100–120	40–65	Лопастные или ячейковые
Мел	1400	20–25	3–5	800–900	100–120	50–60	Ячейковые
Каолин	1600	20–30	0,5–2,0	800–1000	60–100	30–35	Лопастные
Песок	1700	5–10	0,1–0,3	800–1000	80–100	80–100	Ячейковые
Сланец	1500	25–30	5–10	500–600	80–100	40–65	Лопастные
Бурый уголь	900	30	10–15	400–500	60–150	60–100	Лопастные
Шлак гранулированный	1100	20	0,3	500–600	80–100	23–50	Ячейковые

Приложение 10

Среднемесячные значения $t_{воз}$ и ϕ для некоторых городов РФ

Город	Январь		Июль	
	$t_{воз}$	ϕ	$t_{воз}$	ϕ
Архангельск	-13,3	88	15,3	79
Астрахань	-7,1	91	25,2	58
Благовещенск	24,2	78	21,2	72
Брянск	-8,8	88	18,2	74
Владивосток	-13,7	74	20,6	77
Волгоград	-9,9	85	24,7	50
Вологда	-12,0	85	17,5	70
Воронеж	-9,8	90	20,6	62
Нижний Новгород	-12,2	89	19,4	68
Иркутск	-20,9	85	17,2	72
Казань	-13,6	86	19,9	63
Керчь	-1,3	88	23,4	68
Краснодар	-2,1	90	23,7	67
Красноярск	-19,2	81	19,3	72
Курск	-9,3	88	19,4	67
Санкт-Петербург	-7,7	87	17,5	69
Москва	-10,8	88	18,0	70
Новгород	-8,4	88	17,6	78
Новосибирск	-19,3	83	18,7	59
Новороссийск	-2,0	75	23,6	68
Омск	-19,6	85	19,1	70
Орел	-9,5	92	19,6	77
Пермь	-16,0	84	18,0	72
Ростов-на-Дону	-6,1	89	23,7	59
Саратов	-11,3	84	23,1	53
Свердловск	-16,2	84	17,2	70
Смоленск	-8,4	88	17,6	78
Томск	-19,4	82	17,8	76
Челябинск	-16,2	84	18,6	72
Чита	-27,4	82	18,7	65

I-D диаграмма влажного воздуха (до 200°)



I-D диаграмма влажного воздуха (до 800°)

