

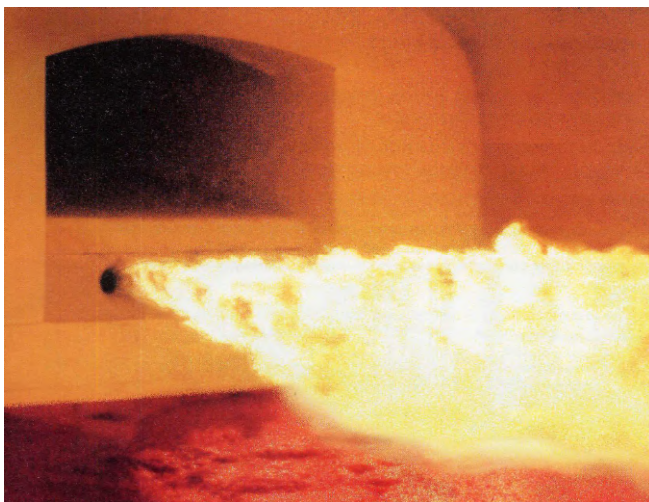
*Министерство образования и науки
Российской Федерации*

*Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова*

В. А. Кузнецов

СТЕКЛОВАРЕННАЯ ПЕЧЬ

Учебное пособие



**Белгород
2013**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова

В. А. Кузнецов

СТЕКЛОВАРЕННАЯ ПЕЧЬ

Утверждено ученым советом университета
в качестве учебного пособия
для студентов направления бакалавриата
140100 "Теплоэнергетика и теплотехника"
профиля "Энергетика теплотехнологии"

Белгород
2013

УДК 666.1.031(075)

ББК 35.41я73

К 89

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Ш.М. Рахимбаев
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

гл. инженер АО "Белпромпроект" П.Г. Михайлов

Кузнецов, В.А.

К 89 Стекловаренная печь: учеб. пособие / В.А. Кузнецов.

– Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. – 72 с.

В издании представлены тепловые и конструктивные схемы стекловаренной ванной печи и даны рекомендации по методике теплотехнических расчетов с позиций энергетики теплотехнологии.

Учебное пособие предназначено для выполнения курсового проектирования по дисциплине "Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки" для студентов направления бакалавриата 140100 "Теплоэнергетика и теплотехника" профиля "Энергетика теплотехнологии".

Данное издание публикуется в авторской редакции.

УДК 666.1.031(075)

ББК 35.41я73

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2013

Введение

Целью курсового проектирования является закрепление, углубление и конкретизация теоретических знаний, полученных студентами при изучении высокотемпературных процессов и установок. В качестве объекта проектирования выбрана стекловаренная печь, что в полной мере соответствует методическим требованиям подготовки энергетиков теплотехнологии.

Стекловаренные печи занимают особое место в производстве строительных материалов не только по широте их применения, разнообразию типов, конструктивных схем и режимов тепловой работы, но и по сложности протекающих в них теплотехнологических процессов, что в итоге приводит к их довольно низкой тепловой эффективности. Будущим специалистам в области промышленного энергосбережения предоставляются большие возможности разработки в курсовом проекте технических решений по совершенствованию высокотемпературной теплотехнологической установки, учитывая, что тепловой коэффициент полезного действия стекловаренных печей в настоящее время, как правило, не превышает 20...25 %.

Методические указания по проектированию ванн стекловаренных печей в основном соответствуют расчетным методам и проектным решениям [1 – 7], применяемым в инженерной практике стекольного производства. В отдельных случаях даются рекомендации по корректировке расчетных методов, если они не согласуются с принципиальными подходами энергетики теплотехнологии.

В задании на курсовой проект (см. прил. 1) указываются производительность стекловаренной печи по стекломассе, химический состав вырабатываемой стекломассы, основные сырьевые материалы, температура варки стекла и температура стекломассы, отводимой из варочной части печи, вид топлива, температура нагрева воздуха, коэффициент избытка воздуха, подаваемого на горение. Выбор других рабочих параметров теплотехнологической установки осуществляется и обосновывается студентом по рекомендациям учебного пособия или литературных источников. Индивидуальное задание предполагает углубленную разработку студентом отдельных вопросов повышения энергетической эффективности проектируемой установки.

Пояснительная записка к курсовому проекту должна содержать задание, тепловую схему высокотемпературной теплотехнологической установки, обоснование выбранного типа печи,

основных размеров бассейна и пламенного пространства, горелок и устройств для нагрева воздуха, описание конструктивного выполнения печи и ее тепловой работы и выводы по проекту в форме заключения. Особое внимание следует уделить анализу результатов выполнения индивидуального задания.

К пояснительной записке прилагаются расчеты состава и расхода сырьевой смеси, технологических и топливных газов, расчет теплового баланса печи и расхода топлива, тепловой расчет регенератора как воздухоподогревательного устройства. Все вычисления в курсовом проекте следует выполнять в международной системе единиц. В связи с этим уравнения в учебном пособии приведены к форме, рассчитанной на подстановку в них физических величин в целых единицах СИ, и не содержат переводных коэффициентов.

Графическая часть курсового проекта выполняется с помощью компьютерной техники и, как правило, содержит поперечный и продольный разрезы, а также отдельные конструктивные узлы ванной стекловаренной печи.

1. Теплотехнологические процессы в стекловаренной печи

В большинстве случаев источником тепловой энергии в ваннах стекловаренных печей является газообразное или жидкое топливо, сжигаемое в пламенном пространстве над бассейном (ванной) печи. Теплота передается шихте и стекломассе излучением и конвекцией.

Варка стекла является процессом многостадийного превращения твердых сырьевых материалов в жидкую стекломассу. Процесс варки стекла состоит из пяти стадий: плавления шихты, стеклообразования, осветления (дегазации), гомогенизации (выравнивания химического состава) и студки стекломассы. Каждая стадия имеет свои особенности, требует определенных условий и завершается при различных температурах.

Сразу же после загрузки в рабочее пространство печи поверхностный слой шихты в течение нескольких секунд нагревается до температуры 800...900 °С, и в нем начинают интенсивно протекать реакции силикатообразования: разложение солей, образование силикатов натрия и кальция, сернистого натрия, различных эвтектик, их частичное плавление. Образующийся расплав содержит растворяющиеся в нем зерна кремнезема и пронизан газовыми пузырьками. Расплав покрывает поверхность всего слоя шихты и, постепенно нагреваясь до 1100...1300 °С,

превращается в стекольную пену, которая стекает в бассейн и подвергается осветлению.

В стадии осветления (дегазации) видимые газообразные включения удаляются в газовую среду печи либо растворяются в стекломассе. Эта стадия наиболее продолжительна по времени, так как газы удаляются из стекломассы медленно. Обычно в стадии дегазации температуру повышают до максимума. В случае варки тарного, листового или сортового стекол в наиболее нагретой части ванны поддерживают температуру около 1500 °С, а для тугоплавких боросиликатных и других стекол ее повышают до 1600 °С.

В процессе гомогенизации стекломасса становится однородной по химическому составу, что требуется для выработки соответствующих изделий из данного стекла. Частично стадия гомогенизации протекает одновременно с дегазацией (осветлением) при тех же температурах. И, наконец, на стадии студки в результате постепенного снижения температуры на 150...300 °С стекломасса приобретает ту вязкость, которая необходима для выработки и формования изделий.

В процессе стекловарения наиболее ответственными и сложными являются стадии осветления и гомогенизации. От степени их завершенности зависят качество стекломассы и ее выработочные свойства. Одним из самых эффективных способов ускорения этих процессов является повышение температуры расплава. Вследствие значительного уменьшения вязкости стекломассы при повышении температуры варки массообменные процессы в ванне протекают более интенсивно, что, в свою очередь, ускоряет реакции дегазации и улучшает однородность расплава. Следовательно, повышение температурного уровня технологического процесса должно положительно влиять на скорость протекания основных физико-химических реакций варки стекла.

В ваннных печах непрерывного действия все стадии процесса стекловарения протекают в определенной последовательности непрерывно и одновременно в различных частях бассейна печи. Различают зоны варки, осветления, студки и выработки, которые располагаются одна за другой на различных участках по длине бассейна печи, как показано на рис. 1.

Технологический материал, загружаемый в виде шихты и стеклобоя в левом конце печи, постепенно проходит зоны бассейна с различными температурными условиями и превращается в однородную гомогенную стекломассу, которая выраба-

тывается в противоположном конце печи. В каждой зоне необходимо поддерживать неизменный во времени температурный режим.

Наиболее интенсивный подвод теплоты осуществляется в зоне варки 1 в области провара шихты, поскольку именно здесь сосредоточены затраты тепла на нагрев шихты и эндотермические реакции силикато- и стеклообразования. Увеличение температуры поверхности стекломассы в варочной зоне с 1300 до 1400 °С способствует более интенсивному протеканию реакций силикато- и стеклообразования и в результате в 3 раза сокращает время, необходимое для полного провара стекла. Для области, покрытой пеной, характерно резкое снижение усвоения ванной теплоты топлива из-за низкой теплопроводности слоя варочной пены.

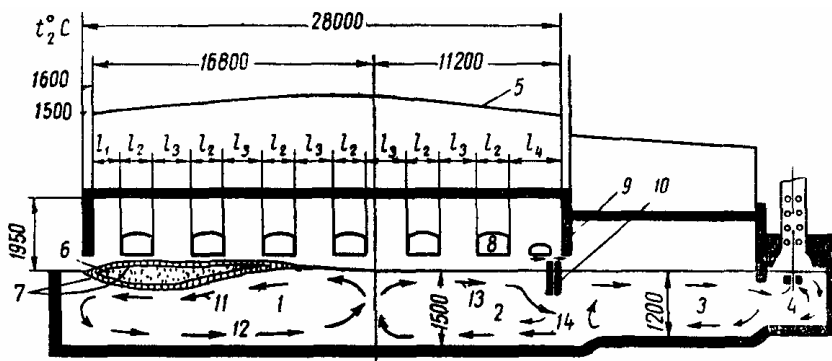


Рис. 1. Схема получения стекла в регенеративной ванной печи:

- 1 – зона варки; 2 – зона осветления (гомогенизации); 3 – зона студки; 4 – зона выработки листового стекла; 5 – температурная кривая; 6 – слой шихты;
- 7 – слой расплава; 8 – воздушные влеты горелок; 9 – разделительный экран;
- 10 – заградительный порог в стекломассе; 11 – ветвь потока стекломассы в варочной зоне, верхняя; 12 – то же, нижняя; 13 – ветвь потока стекломассы в зоне осветления, верхняя; 14 – то же, обратная

В зоне осветления и гомогенизации 2 пена на поверхности стекломассы отсутствует. Поэтому подвод теплоты к стекломассе вновь увеличивается. Повышение температуры расплава в зоне осветления с 1550 до 1600 °С уменьшает продолжительность провара стекла в 2,5 раза. Дальнейшее увеличение температуры ощутимого эффекта уже не дает.

Непрерывный характер работы ванн стекловаренных пе-

чей должен обеспечивать стабильность параметров теплового режима. Выполнению этого требования способствует естественная конвекция расплава в бассейне печи. В области максимума температуры на границе между зонами варки и осветления образуется восходящий поток стекломассы, разделяющий области пены и чистого зеркала на поверхности ванны. В результате в бассейне печи возникают противоположно направленные продольные конвекционные потоки стекломассы (см. рис. 1).

Поток стекломассы, направляющийся к загрузочному устройству из области максимальной температуры, способствует переходу в стекломассу химических компонентов на нижней поверхности слоя шихты и задерживает непроваренную шихту в зоне варки. Возможное изменение температурного поля в расплаве при нарушении теплового режима печи приведет к изменению направления движения потоков стекломассы, и в итоге расплав из непроваренных участков может попасть в проваренную стекломассу, что скажется на ее качестве. Таким образом, стабильность теплового режима является условием получения качественной стекломассы.

Движение расплава в бассейне оказывает значительное влияние на процессы теплообмена. И хотя из-за высокой вязкости расплавленной стекломассы скорость ее движения, как правило, невелика, тем не менее, движущиеся ламинарные потоки обуславливают более интенсивный перенос теплоты в глубину бассейна и способствуют усреднению химического состава расплава во всем его объеме.

Для интенсификации процессов стекловарения часто применяют дополнительный электрообогрев стекломассы в бассейне печи. Применение электрического тока в качестве источника теплоты для варки стекла основано на свойстве стекломассы становиться проводником при температуре выше 1000 °С. Дополнительный электрообогрев позволяет подводить теплоту непосредственно в глубинные слои ванны, что повышает скорость провара шихты, улучшает и ускоряет осветление стекломассы.

2. Выбор основных размеров и типа стекловаренной печи

Рабочая камера печи состоит из варочного бассейна (зоны варки и осветления), студочного или выработочного бассейна (зоны студки и выработки) и пламенного (газового) пространства, находящегося над бассейном.

В ваннных печах непрерывного действия для производства листового стекла зоны варки и осветления составляют варочную часть, а зона студки выделена в самостоятельную часть бассейна. К студочной части присоединены выработочные каналы или окна, по которым стекломасса подается на формование стеклоизделий. В печах с протоком для производства тарного стекла охлаждение стекломассы обычно осуществляется в выработочной части бассейна, конструктивно отделенной от варочной части.

Площадь варочной части бассейна $F_{\text{вар}}$ определяют по удельному съему стекломассы $g_{\text{вар}}$, величина которого оценивается по результатам эксплуатации стекловаренных печей:

$$F_{\text{вар}} = P_{\text{стк}} / g_{\text{вар}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{стк}}$ – производительность печи по стекломассе.

Величина удельного съема стекломассы $g_{\text{вар}}$ для обычных конструкций печей и температуры варочной части находится в пределах от 50 до 90 кг/(м²ч), но может превышать эти значения при увеличении количества загружаемого боя стекла (до 20...50 %), при дополнительном электрообогреве стекломассы в ванне печи (до 30...40 %) или при интенсификации теплообменных процессов в стекломассе специальными методами (например, бурлением при продувке ванны сжатым воздухом).

На рис. 2 представлены ориентировочные значения удельного съема стекломассы в зависимости от ее максимальной температуры в зоне варки, рекомендуемые для студенческих расчетов.

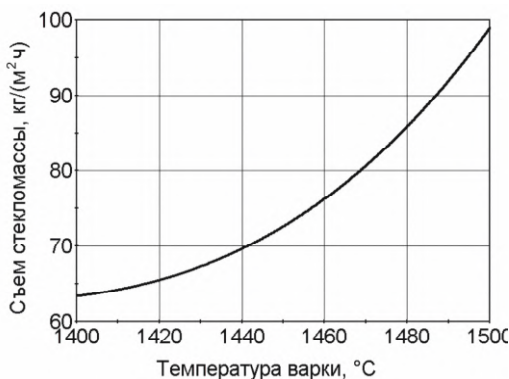


Рис. 2. Ориентировочные значения удельного съема стекломассы

После определения площади варочной части бассейна выбирают ее длину и ширину, причем отношение длины к ширине варочной части зависит от производительности и типа стекловаренной печи.

Выработка стеклянных изделий с заданными свойствами потребовала создания и применения различных типов печей для варки стекла. Наибольшее распространение в стекольном производстве получили ваннные стекловаренные печи непрерывного действия с регенеративным подогревом воздуха.

Для механизированной выработки листового стекла применяют мощные регенеративные печи производительностью 100...600 т стекломассы в сутки и более. Они имеют не только большую длину рабочего пространства варочной части (до 30 м), в пределах которой располагаются зоны варки и освещения, но и значительную ширину, достигающую 10 м. Естественно, что в таких условиях горение топлива осуществляют в поперечном факеле и с поперечным движением газов по отношению к направлению движения стекломассы.

Соотношение длины и ширины варочной части бассейна печей с поперечным направлением пламени находится в пределах от 1,5 до 3,5, чтобы обеспечить размещение на продольных стенах печи большого числа горелок (до 6...8 пар). При этом ширина варочной части бассейна и длина факела оказываются взаимосвязанными.

Иллюстрацией к сказанному являются представленные на рис. 3 продольный и поперечный разрезы крупной стекловаренной ванной печи для варки листового стекла.

Для сжигания природного газа печь снабжена шестью парами горелок шахтного типа, расположенных на боковых стенах. При перекидке (переводе) клапанов через каждые 30 мин воздушные влеты горелок на одной из боковых (продольных) стен печи переключаются на выполнение роли газоотводящих каналов. Воздух, поступающий на горение, нагревается в вертикальных секционных регенераторах до температуры 1000...1200 °С.

Шихту подают в печь через загрузочный карман, расположенный в торце варочной части бассейна. Под воздействием высоких температур она превращается в расплавленную стекломассу, которая непрерывно перемещается из варочной части бассейна в студочную, а затем распределяется по выработочным каналам.

В печи с поперечным направлением пламени перераспределение топлива по независимо работающим горелкам, располо-

женным на продольных сторонах печи, позволяет достаточно легко влиять на изменение температуры по длине бассейна стекломассы. Специфическое размещение зон по длине рабочего пространства стекловаренной печи обуславливает соответствующее распределение общей тепловой нагрузки по горелкам с поперечным направлением пламени. Наиболее высокий расход топлива обычно приходится на первую пару горелок в области провара шихты и на третью или четвертую пару горелок в области восходящего конвекционного потока стекломассы. Наименьшая тепловая нагрузка приходится на последнюю, шестую пару горелок, установленную в студочной части печи.

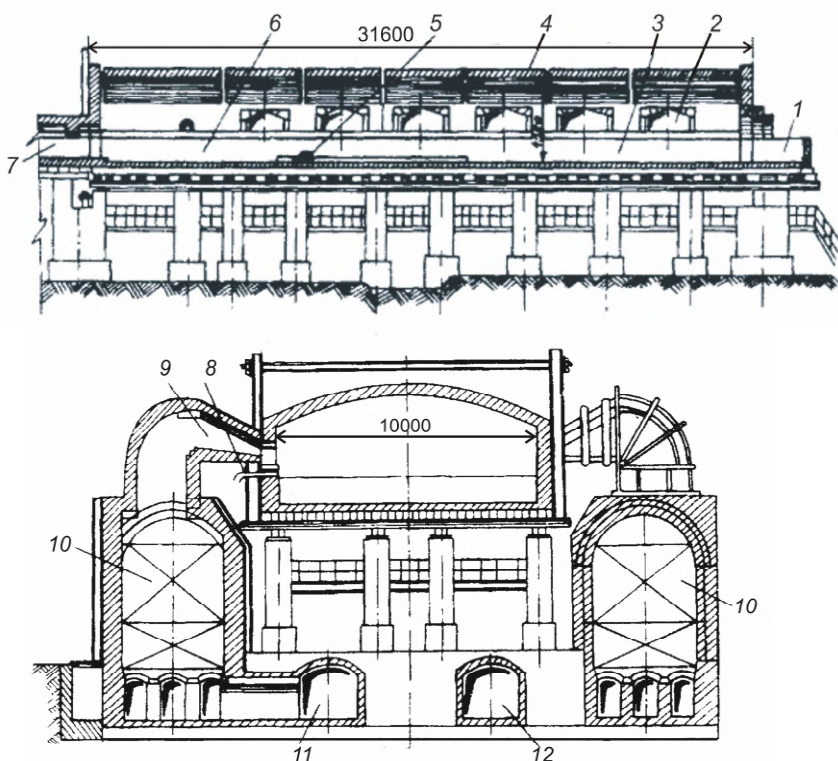


Рис. 3. Регенеративная печь с поперечным направлением пламени:
 1 – загрузочный карман; 2 – влеты горелок; 3 – варочная часть; 4 – свод;
 5 – порог; 6 – студочная часть; 7 – выработочный канал; 8 – подвод топлива;
 9 – подвод воздуха; 10 – регенераторы; 11 – дымовой боров;
 12 – канал для подачи воздуха

Студочная часть печи чаще всего конструктивно отделяется от варочной части как по стекломассе, так и по пламенному пространству. Но в крупных ваннных печах по условиям выработки листового стекла разделяющие устройства развиты слабо, в результате чего длина студочной части, необходимая для снижения температуры стекломассы, возрастает до 60...100 % длины варочной части.

В производстве тарного стекла применяют печи, в которых варочная и студочная части разделены в пламенном пространстве заградительным экраном, а их бассейны соединены друг с другом узким протоком. В печах с разделением газового пространства и бассейна уменьшается количество теплоты, передаваемой из варочной в студочную часть, и поэтому площадь зеркала студочной части может быть уменьшена до 20...30 % площади варочной части. Глубина бассейна в варочной части стекловаренной печи с поперечным пламенем обычно составляет 1,5 м, в студочной части 1,2 м.

В малых регенеративных ваннных печах, где горелки располагают с торца печи, используют подковообразную схему движения газов. При этом заметно удлиняется путь газов, что дает возможность более полно использовать их теплоту и исключить химический недожог топлива. Перед выходом из пламенного пространства печи дымовые газы проходят над шихтой, температура которой ниже температуры варки стекломассы примерно на 200 К, что приводит к их более глубокому охлаждению.

Устройство одной из ваннных стекловаренных печей с подковообразным направлением пламени представлено на рис. 4. Для сжигания природного газа здесь используются две шахтные горелки, установленные в торцевой стене пламенного пространства печи. Влеты горелок поочередно служат для подачи на горение воздуха, нагретого в регенераторе, и для отвода в регенератор продуктов сгорания топлива. Перекидка клапана происходит через каждые 30 мин.

Загрузку шихты осуществляют через два кармана, расположенных в боковых стенах рядом с горелками. Бассейн печи конструктивно разделен на две части – варочную и выработочную. Так как зона студки в варочной части печи слабо выражена, охлаждение стекломассы происходит преимущественно в выработочной части печи (на рис. 4 не показана). Площадь выработочной части бассейна составляет 15...25 % от площади варочной части печи.

В печах с подковообразным направлением пламени ширина варочного бассейна составляет от 3 до 8 м, длина – от 4 до 12 м. Отношение длины к ширине выбирается в пределах от 1,5 до 2. Глубина бассейна составляет 1000...1400 мм.

Необходимо отметить, что в печах с подковообразным пламенем трудно установить требуемое распределение температур по длине рабочего пространства. Слишком малые выходные скорости топлива или воздуха и большое разрежение могут привести к тому, что факел от одной горелки практически сразу же повернет в соседний отводящий газоход. А чрезмерно высокие скорости факела приведут к быстрому выходу из строя противоположной торцевой стенки печи.

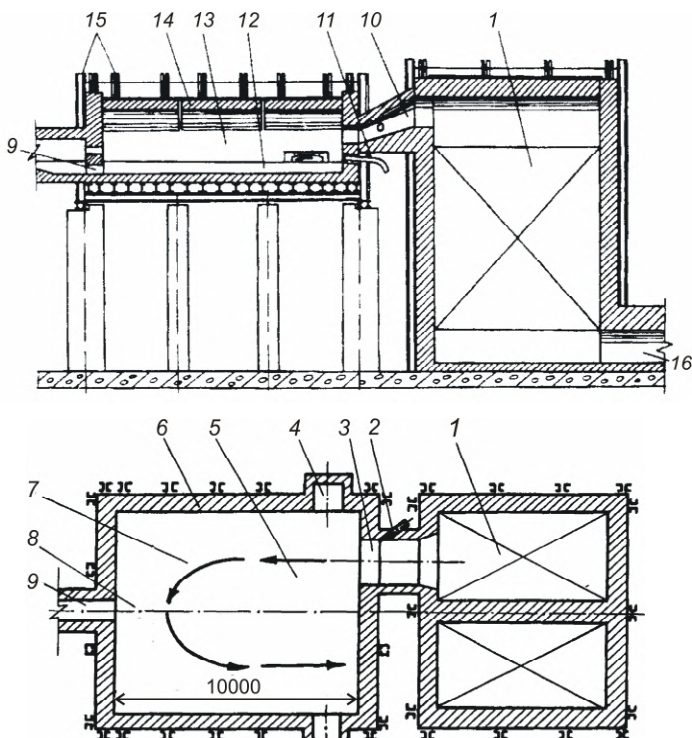


Рис. 4. Ванная регенеративная печь с подковообразным пламенем:

- 1 – насадка регенератора; 2 – боковая подача топлива; 3 – влет горелки;
- 4 – загрузочный карман; 5 – варочная зона; 6 – стены печи; 7 – зона освещения;
- 8 – зона стужки; 9 – проток; 10 – подвод воздуха; 11 – нижний подвод топлива;
- 12 – стекломасса в бассейне; 13 – пламенное пространство; 14 – свод печи;
- 15 – металлический каркас печи

Для выработки специальных и цветных стекол, хрусталя, стеклоблоков и других изделий в настоящее время достаточно широко используют рекуперативные печи прямого нагрева. Отсутствие регенераторов и перекидных клапанов делает печи прямого нагрева очень компактными, в результате чего резко сокращаются капитальные затраты на их сооружение. Стационарный нагрев воздуха в рекуператоре обеспечивает необходимую стабильность теплового режима печи и гарантирует очень высокое качество продукции. Сжигание в этих печах высококалорийного топлива при малых значениях коэффициента избытка воздуха ($\alpha_{\text{в}} \approx 1,05$) позволяет получать достаточно высокие температуры при минимальном подогреве воздуха.

Схема процесса стекловарения в рекуперативной печи прямого нагрева показана на рис. 5. Шихта поступает через загрузочное окно в фронтальной стене печи. Между варочной и осветлительной зонами бассейна выложен специальный заградительный порог, препятствующий проникновению непроваренной стекломассы в зону осветления. Перед зоной студки в ванне предусматривается проток, позволяющий отбирать более охлажденную и полностью проваренную стекломассу. В пламенном пространстве студочная часть печи отделена от варочной разделительным экраном. Дополнительный электроподогрев ускоряет процесс осветления стекломассы.

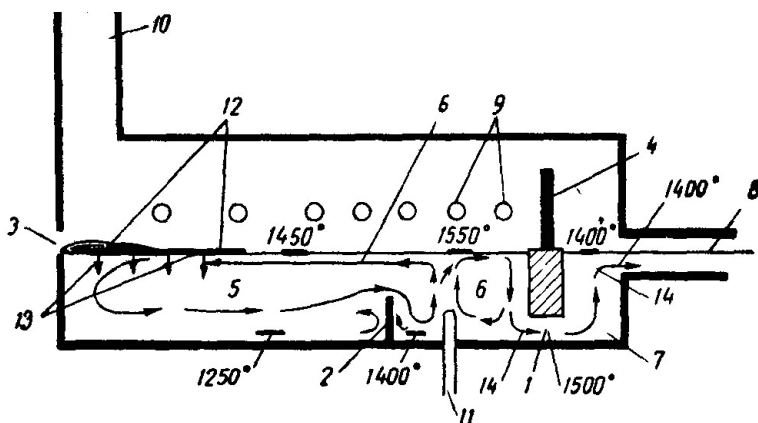


Рис. 5. Схема процесса стекловарения в печи прямого нагрева:
1 – проток; 2 – порог; 3 – загрузочное окно; 4 – разделительный экран; 5 – зона варки; 6 – зона осветления; 7 – зона студки; 8 – выработочный канал;
9 – горелки, 10 – газоотводящий канал; 11 – электрод; 12 – шихта и пена, 13 – свежепроваренная стекломасса; 14 – отбор стекломассы на выработку

Общий вид печи прямого нагрева представлен на рис. 6. Ее бассейн имеет форму вытянутого прямоугольника с отношением длины к ширине, равным 4,5. Горелки расположены вдоль боковых сторон в один ряд по длине печи. Газоотводящий канал расположен в своде печи над областью загрузки шихты. Продукты горения и стекломасса двигаются навстречу друг другу (противотоком), что позволяет полнее использовать теплоту отходящих газов.

В связи с тем, что для сжигания природного газа, который чаще всего используют для отопления печей прямого нагрева, применяют короткофакельные горелки, при значительной ширине печи не удается обеспечить качественный провар стекломассы на оси рабочего пространства. Поэтому печи этого типа имеют ширину до 2,6...3 м.

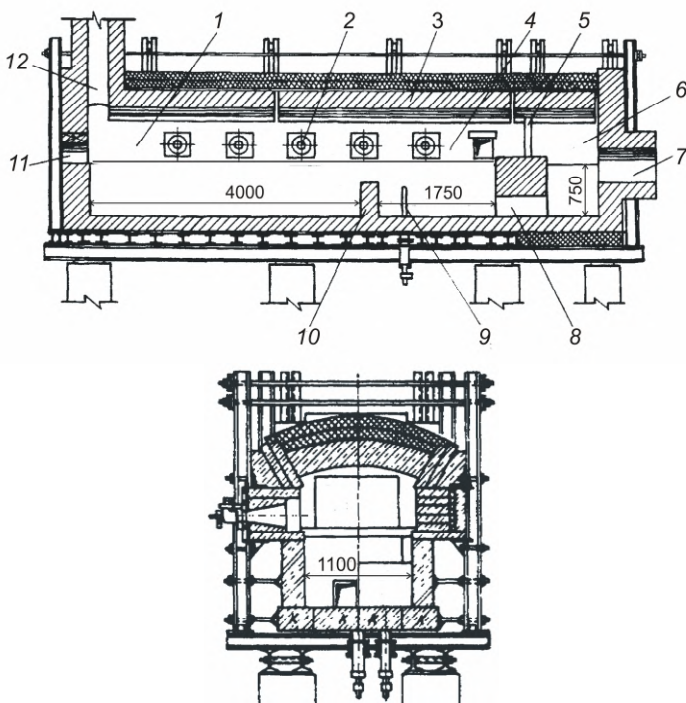


Рис. 6. Продольный и поперечный разрезы печи прямого нагрева:

- 1 – зона варки; 2 – горелки; 3 – свод печи; 4 – зона освещения; 5 – разделительный экран; 6 – студочная часть; 7 – выработочный канал;
- 8 – проток; 9 – электрод; 10 – порог; 11 – загрузочное отверстие;
- 12 – газоотводящий канал

3. Футеровка и тепловая изоляция стекловаренных печей

При сооружении стекловаренных печей применяются огнеупорные материалы, такие, как бакор, динас, шамот и кварцевый плавленный огнеупор, значительно различающиеся по своим физическим и химическим свойствам.

Бакорами называют высококачественные электроплавленные бадделеитокорундовые огнеупоры. Они содержат две главные кристаллические фазы – бадделеит (ZrO_2) и корунд ($Al_2O_3 + SiO_2$). Бакоры отличаются очень высокой огнеупорностью и стеклоустойчивостью. В нашей стране стекольная промышленность использует бакор трех типов (бакор-33, бакор-37 и бакор-41), различающийся содержанием ZrO_2 . Наиболее стеклоустойчив бакор-41. Температура применения бакоров 1550...1700 °С. Их используют для кладки бассейна, влетов горелок и других участков печи, включая и свод.

Динас – это огнеупорный материал, изготовленный из кварцевого порошка, содержащего не менее 95 % SiO_2 и 1,5...2,5 % CaO . Огнеупорность динаса достигает 1730 °С при высокой температуре начала деформации под нагрузкой (1620...1660 °С), что позволяет применять его в высокотемпературных стекловаренных печах при изготовлении нагруженных частей футеровки.

В то же время динас обладает низкой термостойкостью, выдерживая всего одну-две теплосмены. Поэтому части футеровки, выполненные из динаса, не должны подвергаться резкому охлаждению ниже температуры 700 °С. Динас используют для кладки сводов, стен пламенного пространства и горелок стекловаренных печей.

Шамотные огнеупоры, содержащие 30...45 % Al_2O_3 , а также SiO_2 и Fe_2O_3 обладают хорошей термостойкостью, но невысокой температурой начала деформации под нагрузкой (до 1400 °С). Применяются для кладки бассейна ванной печи, каналов и регенераторов.

Кварцевый плавленный огнеупор – брус из непрозрачного кварцевого стекла, содержащий 99 % SiO_2 и в качестве примеси 0,5 % Al_2O_3 . Температура применения 1650...1680 °С. В настоящее время кварцевый брус применяют для кладки бассейнов и протоков стекловаренных печей, в которых варят малощелочные тугоплавкие стекла.

Кладка стекловаренных печей выполняется из огнеупорных кирпичей, имеющих различные размеры и форму. Часто применяют шамотный стеновой брус размером 300 x 400 x 500 мм и

шамотный донный брус, имеющий размеры 300 x 400 x 1000 мм, динасовый сводовый брус, имеющий размеры 100 x 200 x 300 мм и др. Кварцевые брусья имеют постоянную толщину и ширину (100 и 250 мм соответственно), а вот их длина может быть различной: 600, 800 или 1000 мм. Бакоровые брусья чаще всего изготавливают размером 250 x 400 x 600 мм.

Футеровка является наиболее ответственной частью высокотемпературных печей. Поэтому огнеупорные материалы для сооружения стен, свода и пода печи подбирают с тщательным учетом условий их работы. От правильного выбора огнеупорных материалов в значительной степени зависят расход огнеупоров на единицу продукции, межремонтный срок службы печи, возможность точной выдержки технологического режима и, в конечном итоге, качество стеклоизделий, производительность печи, расход топлива.

Дно бассейна выкладывают из шамотных брусьев в один ряд, поэтому их толщина определяет толщину дна (до 300 мм). Внутреннюю поверхность дна бассейна дополнительно покрывают плоскими плитками толщиной 100 мм из высокостойкого огнеупорного материала (кварца или бакора). Бассейн располагается на самостоятельном фундаменте. Дно бассейна укладывают на стальные полосы, опирающиеся на поперечные металлические балки.

Стены бассейна выкладывают из бакоровых, а также каолиновых, высокоглиноземных или электроплавленных брусьев, причем ширина бруса (300 или 400 мм) определяет толщину стен.

В стекловаренных печах очень важным элементом является металлическая обвязка бассейна, обеспечивающая распорное крепление стен бассейна (рис. 7). Конструкция обвязки бассейна состоит из упорных болтов с развилкой, зажимающей уголок, которым обвязан бассейн. Она воспринимает давление стекломассы, передает усилие на каркас печи и в то же время может легко сниматься при горячем ремонте печи.

Стены пламенного пространства стекловаренных печей должны быть на 100...300 мм шире стен бассейна, причем выступающей над стеновыми брусьями бассейна стороной они опираются на металлические кронштейны, которые закреплены на колоннах металлического каркаса печи. Для предохранения от непосредственного воздействия выбивающихся из рабочего пространства газов металлические опоры перекрывают фасонными динасовыми брусьями с выступами-зубьями (см. рис. 7).

Благодаря наличию металлических опор стены пламенного пространства не связаны с кладкой стен ванны, поэтому их называют подвесными. Между ними и стенами бассейна остается щель шириной 80...120 мм. Для уменьшения тепловых потерь ее закладывают шамотным кирпичом – *заклинком*.

В малых печах стены могут быть и тоньше – 300...380 мм. Динасовые стены снабжают тепловой изоляцией из динасового или шамотного легковеса.

В печах с поперечным пламенем высота пламенного пространства конструктивно складывается из расстояния от уровня стекломассы до горелочного бруса (100 мм), высоты нижнего горелочного бруса (200 мм), высоты воздушного влета (до 600 мм), толщины арки влета (200 мм).

Для печей с подковообразным пламенем расстояние между верхним краем отверстия воздушного влета и главным сводом печи принимается не менее 300 мм.

Главный свод стекловаренных печей может быть арочным или подвесным. Наибольшее распространение получила арочная конструкция (см. рис. 7). Радиус кривизны арочных сводов обычно берут приблизительно равным ширине печи.

Арочные своды выкладывают из клинового кирпича. Чем больше ширина стекловаренной печи, тем большую толщину должен

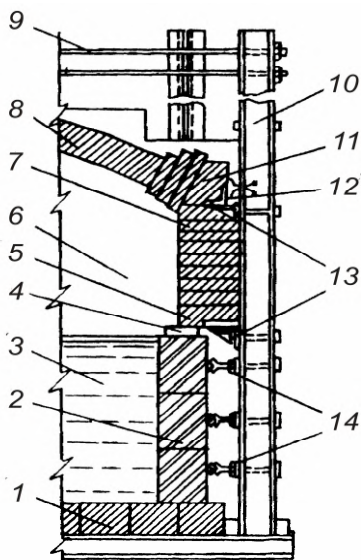


Рис. 7. Кладка рабочего пространства ванной стекловаренной печи:

- 1 – донные шамотные брусья; 2 – стеновые бакоровые брусья; 3 – стекломасса; 4 – заклинок; 5 – зуб; 6 – пламенное пространство; 7 – динасовая кладка подвесных стен; 8 – арочный свод; 9 – гибкая связь каркаса; 10 – стойка каркаса; 11 – пятовый кирпич; 12 – подпятовая балка; 13 – кронштейны для подвески стен; 14 – распорное крепление стен бассейна

иметь свод, чтобы обеспечить необходимую надежность и устойчивость. При ширине печи до 4 м можно использовать обычный кирпич длиной 230 мм. Если же пролет составляет 4...6 м, то необходимо использовать специальный сводовый кирпич размером 300 мм. При предельно допустимой для арочных сводов величине пролета (до 10 м) кирпич имеет размер 400 мм по толщине свода.

Распор свода воспринимается связями каркаса печи. У арочных сводов площадки, на которые опираются крайние кирпичи, называют *пятами*, а среднюю, самую высокую часть свода – *замком*. Пятовые кирпичи сводов должны плотно прилегать к подпятовым балкам. В стекловаренных печах пята свода лежит во всю длину на уголке и швеллере, в свою очередь имеющем местные опоры на кронштейнах колонн (см. рис. 7).

В крупных стекловаренных печах для производства листового стекла часто используют подвесные своды. В отличие от арочного в подвесном своде кирпичи подвешиваются к поперечным балкам каркаса печи посредством стальных анкеров или специальных держателей. Сооружаются подвесные своды из специальных кирпичей с отверстиями или фасонных кирпичей (рис. 8), собираемых по нескольку штук в секции, которые и подвешиваются на балках, расположенных над печью.

Подвесные своды не лимитируют ширину печей. Хотя они более сложны по своей конструкции, зато значительно облегчают ремонты, которые могут проводиться без длительных остановок печей и даже во время их работы.

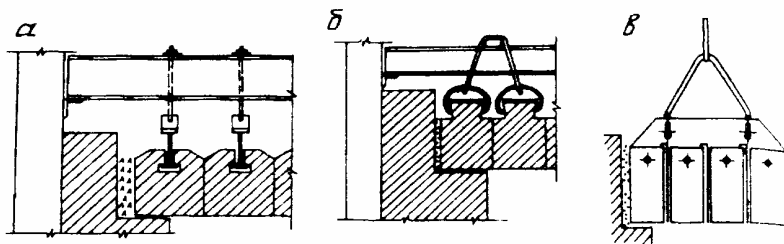


Рис. 8. Устройство подвесных сводов из фасонных кирпичей (а, б) и кирпичей с отверстиями (в)

С целью снижения удельного расхода топлива и повышения теплового КПД применяется тепловая изоляция высокотемпературных печей (рис. 9).

Диатомит и трепел относятся к теплоизоляционным материалам естественного происхождения. Их используют для засыпок в порошкообразном виде. Кроме того, из них изготавливают кирпич на глинистой связке. Диатомитовые кирпичи обладают очень малой прочностью, и их применяют для выполнения слоя наружной тепловой изоляции стен и сводов печей. Их пористость колеблется в пределах 55...75 %, а предельная температура применения достигает 1000 °С.

Особую группу составляют специально созданные высокопористые легковесные огнеупорные изделия, сочетающие в себе свойства огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Выпускают легковесные изделия на основе шамота, динаса, высокоглиноземистых материалов и карборунда. Максимальная температура применения легковесных изделий колеблется от 1300 °С (шамот-легковес) до 1600 °С (карборунд-легковес).

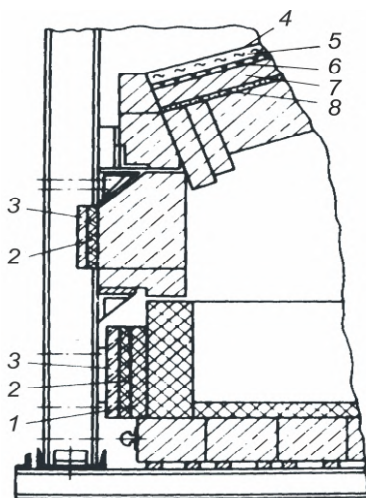


Рис. 9. Тепловая изоляция огнеупорной кладки стекловаренной печи:

1 – фосфатный ячеистый бетон (120 мм); 2 – фосфатный керамзитобетон (60 мм); 3 – фосфоперлит (60 мм); 4 – алюминиевый лист; 5 – каолиновое волокно (60 мм); 6 – уплотнительная огнеупорная обмазка; 7 – легковесный динасовый кирпич (114 мм); 8 – кварцевая мука с песком (20 мм)

Подвесные своды сложнее теплоизолировать, так как при перегреве металлических подвесок в месте их контакта с тепловой изоляцией происходит значительное удлинение подвесок, что может даже привести к некоторому провисанию свода.

В связи с тем, что подавляющее большинство огнеупорных материалов, используемых для футеровки рабочего пространства стекловаренных печей, при высокой температуре может очень сильно изнашиваться, тепловую изоляцию стен ванн стекловаренных печей применяют лишь на отдельных участках обмуровки (см. рис. 9). Обычно выполняют тепловую изоляцию свода, подвесных стен пламенного пространства и нижней части стен бассейна стекловаренных печей. Как правило, оставляют без тепловой изоляции дно (подину) и верхнюю часть стен бассейна печи на уровне поверхности стекломассы.

Больше всего огнеупоры изнашиваются в бассейне печи от воздействия стекломассы и особенно расплавленных компонентов стекольной шихты (сода, сульфат и др.) на уровне зеркала стекломассы. Износ футеровки в этих местах уменьшают, снижая температуру ее поверхности, соприкасающейся со стекломассой, путем дополнительного охлаждения огнеупора.

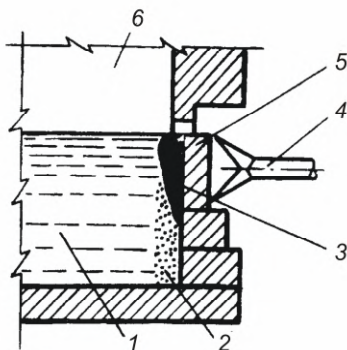


Рис. 10. Воздушное охлаждение стен бассейна стекловаренной печи: 1 – стекломасса; 2 – малоподвижная пленка стекломассы; 3 – гарнисажный слой стекла; 4 – воздушное сопло; 5 – верхний ряд охлаждаемых огнеупорных брусьев; 6 – пламенное пространство печи

Наибольшее распространение получило охлаждение наружных поверхностей верхнего ряда огнеупорных брусьев ванн печей струями холодного воздуха, подаваемого через сопла со щелевидными отверстиями (рис. 10). При понижении температуры кладки на ее внутренней поверхности образуется гарнисажный слой из застывшего стекла, а в нижней части появляется малоподвижная пленка стекломассы, которые и защищают огнеупор от интенсивного разъедания.

Очевидно, что интенсивное охлаждение кладки ваннных стекловаренных печей не только значительно увеличивает потери теплоты в окружающую среду, но и заметно снижает долю теплоты, идущей на стекловарение из общего ее количества, подведенного в печь, уменьшая, таким образом, коэффициент отъема теплоты топлива.

4. Конструктивное выполнение узлов стекловаренной печи

При нагреве футеровки стекловаренных печей до высоких температур, определяемых технологией варки стекла, она естественно расширяется. Чтобы компенсировать расширение кладки при ее нагревании в стенах газового пространства и в своде печи предусматриваются температурные швы.

В прямых стенах швы располагаются через 5...6 м и для каждого слоя кирпича слегка смещаются, чтобы избежать сквозной щели. В горизонтальной проекции температурный шов имеет вид ломаной линии (рис. 11).

Зазоры между кирпичами в температурных швах выбирают из расчета по 6 мм или 12 мм на каждый метр шамотной или dinasовой кладки соответственно. Кладку свода на крупных печах выполняют в виде отдельных секций длиной по 3...6 м, отделенных друг от друга температурными швами шириной 50...80 мм. Во избежание подсоса воздуха или потерь газа температурные швы заполняют слегка увлажненной огнеупорной массой, а при кладке насухо — огнеупорным порошком.

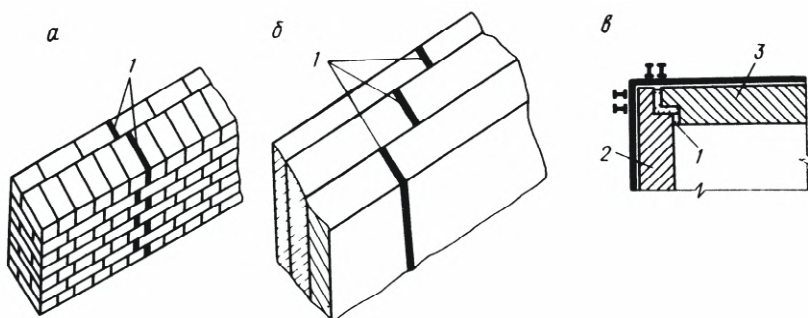


Рис. 11. Температурные швы в однослойных стенах (а), в многослойных стенах (б) и в углах стен (в): 1 — температурный шов; 2 — торцевая стена; 3 — боковая стена

Металлический каркас призван направлять расширение огнеупорной кладки стекловаренных печей в сторону температурных швов. В результате такого направленного расширения после вывода стекловаренной печи на рабочий режим не только полностью исчезают температурные швы, делая кладку сплошной, но и внутри футеровки снимаются все температурные напряжения.

Как уже отмечалось, наиболее интенсивно кладка стен бассейна разрушается на уровне зеркала стекломассы. Поэтому в стекловаренных печах непрерывного действия необходимо поддерживать постоянный уровень стекломассы. Его колебание не только вызывает преждевременное разрушение стеновых брусьев бассейна, но и ухудшает качество стекла и нарушает режим питания машин, вырабатывающих стеклоизделия. Для поддержания постоянного уровня стекломассы в бассейне печи необходимо непрерывно загружать шихту. От способа загрузки и толщины слоя шихты на поверхности стекломассы зависят скорость ее провара, а следовательно, и производительность печи.

В современных ваннных печах шихту подают в специальный загрузочный карман, представляющий собой широкий выступ бассейна без перекрытия (рис. 12). В нижней части кармана находится расплавленная стекломасса, на поверхность которой засыпают шихту и стеклянный бой из бункера. Затем плунжерный питатель проталкивает загружаемые материалы в печь. При тонкослойной загрузке на поверхности стекломассы создается сплошной слой шихты, толщина которого не должна превышать 30 мм.

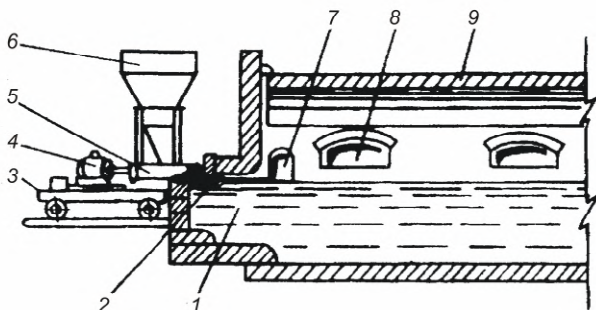


Рис. 12. Тонкослойная загрузка шихты плунжерными питателями:
1 – стекломасса; 2 – слой загруженной шихты; 3 – подвижная тележка; 4 – привод питателя; 5 – плунжерный питатель; 6 – бункер; 7 – окно для загрузки
стеклянного боя; 8 – влет шахтной горелки; 9 – свод печи

В ваннных печах непрерывного действия с поперечным направлением пламени загрузочный карман располагают в варочной части у фронтальной стены для того, чтобы путь движения шихты до зоны осветления был максимальным (см. рис. 12). При этом загрузочный карман должен иметь ширину не менее 80 % от ширины бассейна, длину 0,5...1 м.

В ваннных печах с подковообразным направлением пламени, в которых горелки располагают с торца, шихту загружают с продольных сторон печи через боковые загрузочные карманы, каждый из которых имеет длину и ширину от 0,7 до 1 м (см. рис. 4).

Для того чтобы гарантировать необходимое качество поступающей на выработку стекломассы, в бассейне стекловаренных печей предусматривают разделительные приспособления для более отчетливого выделения отдельных технологических зон. Действие разделительных устройств основано на торможении конвекционных потоков, движущихся в сторону выработочной части печи, путем установки заграждений в стекломассе.

В малых и средних ваннных печах для варки стекла и выработки стеклянной тары варочную и выработочную части бассейна соединяют по стекломассе протоками, а газовое пространство разделяют помощью сплошных или решетчатых огнеупорных перегородок. Выработочная часть печи обычно не имеет самостоятельного отопления, и теплота, необходимая для ее обогрева, передается из варочной части через решетчатый разделительный экран или узкий зазор. Это позволяет при достаточно высокой температуре в варочной части обеспечить необходимое для выработки стекла интенсивное охлаждение стекломассы в отделенной от нее экраном выработочной части.

Протоки располагают обычно вблизи дна варочной части печи (рис. 13). Для изготовления протоков используют электроплавленные огнеупоры (бакоры), а иногда кварцевый стеклостеклобрус.

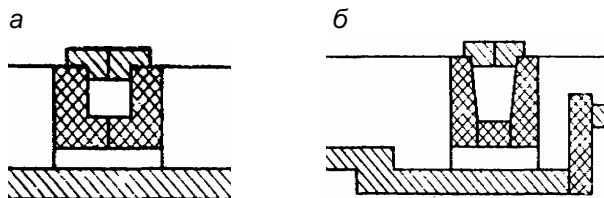


Рис. 13. Схема устройства протока в стекломассе:
а – незаглубленный; б – заглубленный проток

На некоторых крупных печах разделение по стекломассе обеспечивают с помощью заградительного устройства, выполненного в виде плоской бакоровой преграды, монтируемой поперек бассейна. Для перетока стекломассы в студочную часть в преграде у дна бассейна оставляют канал высотой 600...800 мм.

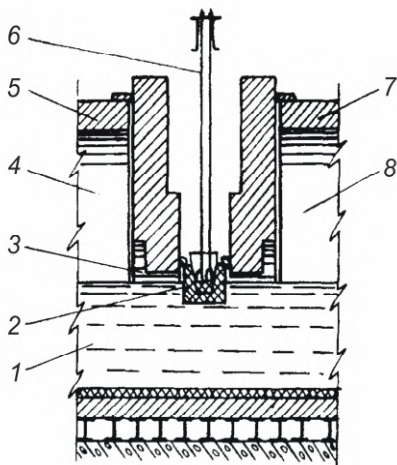


Рис. 14. Заградительный экран:
1 – стекломасса; 2 – фасонные бакоровые брусья; 3 – зазор между стекломассой и экраном; 4 – варочная часть; 5 – свод печи; 6 – стальные подвески; 7 – свод студочной части; 8 – студочная часть

Один из вариантов конструктивного решения разделительного устройства такого типа представлен на рис. 14. Оно выполнено из фасонных бакоровых брусьев в виде подвешенной на стальных подвесках преграды, что позволяет изменять ее заглубление в стекломассе.

В этой конструкции предусмотрено разделение варочной и студочной частей по газовой среде, ограничивающее сечение для прохода газов. Между нижним краем плоской арки заградительного экрана и поверхностью стекломассы составляют зазор по газовой среде высотой 200...250 мм, необходимый для регулирования давления в студочной (выработочной) части печи путем изменения тяги дымовой трубы.

5. Горелочные устройства стекловаренных печей

Горелки в стекловаренных печах являются одним из важнейших конструктивных элементов, от которого во многом зависят технологические и технико-экономические показатели работы печей. Правильная организация процесса сжигания топлива позволяет создать в рабочем пространстве температурный

и газовый режимы, предусмотренные технологией варки того или иного сорта стекла.

В ваннах регенеративных печах применяют так называемые шахтные горелки, конструктивную основу которых составляют воздушные каналы, соединяющие регенераторы с печью. Высококалорийное топливо (природный газ или мазут) подводят в печь с помощью газовых сопел или мазутных форсунок через воздушный влет или вблизи него, что позволяет создавать удлиненный высокотемпературный факел диффузионного типа, скорость сжигания топлива в котором зависит в основном от интенсивности диффузионных процессов смешения горючих компонентов с воздухом.

Для обеспечения максимальной теплоотдачи к поверхности ванны факел должен иметь определенную форму, длину, жесткость, настильность и степень черноты. Поэтому свод шахтной горелки выполняют с наклоном под углом $20...30^\circ$, направляющим воздушный поток и горящий факел к поверхности ванны.

Схемы подвода высококалорийного топлива к шахтным горелкам показаны на рис. 15. Подвод топлива снизу под воздушный влет горелки (рис. 15, а) используют достаточно широко, чтобы получить длинный факел, например в печах с подковообразным направлением пламени. В этом случае струю распыленного топлива рекомендуется направлять под небольшим углом вверх (до $5...10^\circ$ к горизонту), что способствует улучшению перемешивания природного газа с воздухом, а при сжигании мазута исключает попадание в ванну топливных частиц, приводящих к окрашиванию стекломассы и образованию в ней газовых пузырьков.

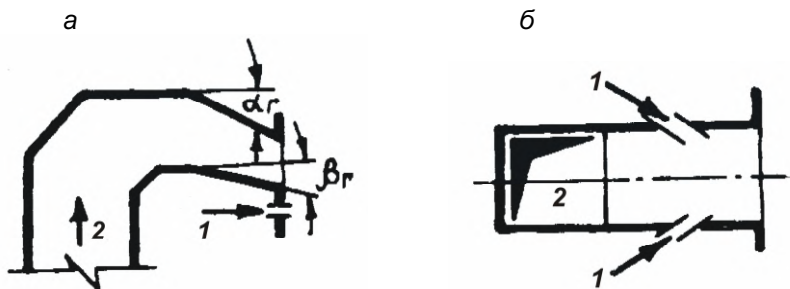


Рис. 15. Нижний (а) и боковой (б) подводы топлива в шахтных горелках:

1 – топливо; 2 – воздух

Боковой подвод топлива с подачей топлива в "щеки" горелки по схеме 15, б также получил широкое распространение, особенно в печах с поперечным направлением пламени, так как он обеспечивает более надежное и полное смешение топлива с воздухом.

В качестве примера на рис. 16 показана конструкция шахтной горелки с двусторонним боковым подводом топлива. Влет 4 горелки, примыкающий к боковой (продольной) стене пламенного пространства 3 печи, соединен воздушным каналом 8 с наднасадочным пространством 10 регенератора 9. Воздушный канал 8 горелки имеет наклонный свод 1 и выкладываемую горизонтально или под небольшим углом выстилку 5. При помощи подводов 7 топливо подают в воздушный канал 8 под углом 30...42° к его продольной оси через два отверстия 2 в боковых стенках, на расстоянии 600...800 мм от пламенного пространства 3 печи. Обе струи горящего топлива сталкиваются под углом одна к другой на выходе в пламенное пространство и затем сливаются в общую струю, образуя единый диффузионный факел.

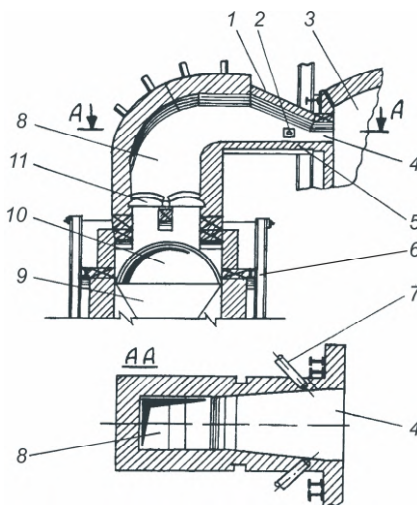


Рис. 16. Шахтная горелка с боковым подводом топлива:

1 – наклонный свод воздушного канала; 2 – отверстия для подачи топлива; 3 – пламенное пространство печи; 4 – влет горелки; 5 – выстилка; 6 – металлический каркас регенератора; 7 – топливные подводы; 8 – вертикальный канал; 9 – насадка регенератора; 10 – наднасадочное пространство; 11 – проемы для шибров

Как правило, топливное сопло устанавливают у внешней кромки отверстия в футеровке, оставляя открытым зазор до 5...10 мм. Подсос холодного воздуха через этот зазор охлаждает сопло топливного подвода в тот период, когда через него не подается природный газ. Истекающая струя топлива подсасывает в печь через щель между топливным соплом и футеровкой значительное количество холодного атмосферного воздуха, из-за чего избыток воздуха в печи возрастает на 10...15 %.

Практика стеклольного производства свидетельствует о том, что длина факела в значительной степени зависит от условий ввода топлива в воздушный поток. Длина факела играет важную роль в организации теплообмена в рабочем пространстве стекловаренных печей. Создавая в печи длинный настильный факел, обеспечивают направленный радиационный теплообмен, при котором результирующий поток излучения от факела к стекломассе больше, чем от факела к кладке. Исследования тепловой работы стекловаренных печей показывают, что оптимальная длина факела должна составлять 0,5...0,75 ширины печи с поперечным направлением пламени и 0,7...0,8 длины печи с подковообразным пламенем.

Оценка длины диффузионного факела l_{ϕ} при сжигании природного газа и при заданном диаметре выходного отверстия топливного сопла d_o может быть выполнена по формуле [9]:

$$\frac{l_{\phi}}{d_o} = 3,1 \left[\frac{(n_b + 1)(2Sc_{\tau} + 1)}{1,31} - 1 \right] \sqrt{\frac{\rho_{\tau}}{\rho_{\phi}}}, \quad (2)$$

где n_b – масса воздуха, теоретически необходимого для сгорания 1 кг топлива, Sc_{τ} – турбулентное число Шмидта ($Sc_{\tau} \approx 0,85$), ρ_{τ} – плотность топлива, ρ_{ϕ} – средняя плотность газообразной среды в факеле.

Из расчетной формулы (2) следует, что длина диффузионного факела возрастает при увеличении диаметра топливного сопла и уменьшении плотности газообразной среды в факеле. Скорость истечения топлива из горелки влияет на длину диффузионного факела косвенно. Увеличение скорости истечения топлива за счет уменьшения диаметра топливного сопла приводит к образованию более короткого факела. В других случаях факел может несколько удлиняться при увеличении скорости истечения топлива за счет повышения его расхода при неизменном выходном отверстии топливного сопла, так как при

этом повышается температура и снижается средняя плотность газообразной среды в факеле.

Для природного газа при $\rho_g \approx 16$ кг/кг и при средней температуре горения 1700...1750 °С расчетная длина факела составит около 210 диаметров топливного подвода d_0 . В условиях промышленных печей длина факела может быть несколько больше расчетной, если происходит ухудшение условий смешения топлива с воздухом. Наибольшее применение в стекловаренных печах находят топливные сопла диаметром 20...30 мм. Применение сопел большого диаметра 40...60 мм уменьшает жесткость факела и, как следствие, ухудшает его настильность.

Ширина воздушного влета выбирается в пределах 1,2...2 м, высота – 400...600 мм. Расстояние между осями горелок в печах с поперечным пламенем составляет 3,5...5 м. При этом общая ширина влетов горелок должна составлять 50...80 % длины отопляемой части бассейна ванной печи. В печах с подковообразным пламенем устанавливается одна пара шахтных горелок.

В печах прямого нагрева, отопляемых природным газом, применяют двухпроводные горелки полного или частичного смешения природного газа с воздухом (рис. 17). Горелки размещаются на боковых стенах печи прямого нагрева так, чтобы расстояние между осями горелок составляло 800...1000 мм.

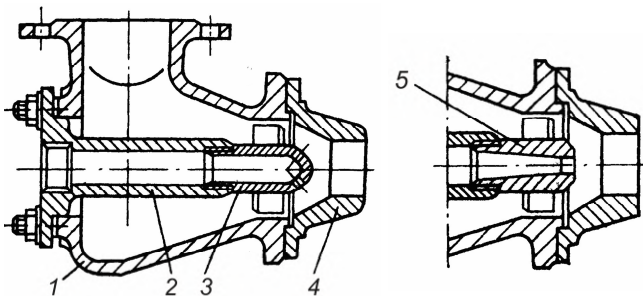


Рис. 17. Двухпроводная горелка:

- 1 – корпус; 2 – газовое сопло; 3 – наконечник сопла типа А;
4 – горелочная головка; 5 – наконечник сопла типа Б

В двухпроводной горелке с наконечником газового сопла типа А осуществляется многоструйное истечение топлива под углом к потоку воздуха, в результате чего образуется короткий пламя. За его пределами теплоотдача к поверхности ванны заметно снижается, что и приводит к ограничению ширины печи.

Горелка может быть модифицирована путем установки в ней газового сопла типа Б (см. рис. 17), который обеспечивает струйное истечение природного газа в направлении потока воздуха. Такая горелка способна создавать в пламенном пространстве печи достаточно длинный диффузионный факел, длина которого может быть приближенно определена по формуле (2).

6. Тепловые схемы стекловаренной печи

Тепловая схема представляет собой наглядную иллюстрацию состава и размещения источников энергии, горелочных и регенеративных устройств, последовательности перемещения продуктов горения, сырьевых и технологических материалов в высокотемпературной теплотехнологической установке. Она может послужить полезным инструментом, помогающим правильно учесть все материальные и тепловые потоки при составлении материальных и тепловых балансов стекловаренной печи.

Примеры построения тепловой схемы стекловаренных печей приведены на рис. 18. Тепловая схема предусматривает разбивку бассейна стекловаренной печи, по крайней мере, на две части – варочную часть 1, выполняющую роль зон основной технологической обработки (ОТО) и технологической дообработки (ТД), и студочную часть 2, выступающую в роли зоны технологически регламентированного охлаждения материалов (ТРО). Для нагрева воздуха, подаваемого на горение, предусмотрены регенераторы 3.

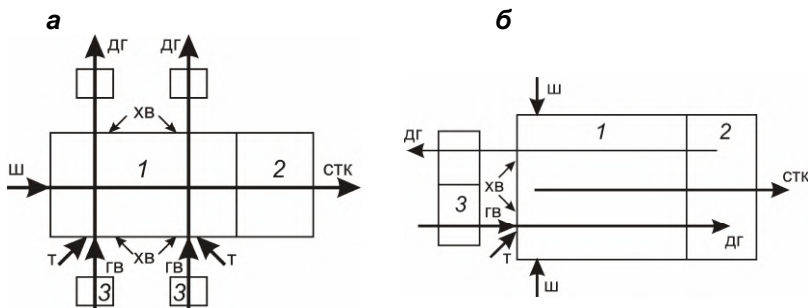


Рис. 18. Тепловые схемы стекловаренной печи с поперечным (а) и подковообразным (б) направлением пламени:

1 – варочная часть; 2 – студочная часть; 3 – регенератор;
ш – шихта; стк – стекломасса; т – топливо; гв – горячий
воздух; хв – холодный воздух; дг – дымовые газы

На схеме показаны направления движения технологического материала (шихты и стекломассы), топлива, горячего воздуха и дымовых газов. Обозначены присосы холодного воздуха.

На тепловой схеме печи с поперечным пламенем (см. рис. 18, а) видно, что теплоизлучающие газы проходят над участками стекломассы с разной температурой – над плавящейся шихтой и над зоной гомогенизации, и поэтому охлаждаются неодинаково. В этом случае при составлении теплового баланса температуру дымовых газов следует усреднять.

На тепловой схеме печи с подковообразным пламенем (см. рис. 18, б) дымовые газы выходят из пламенного пространства в том месте, где в бассейн подается холодная шихта, и, следовательно, они могут быть охлаждены до минимально возможной температуры.

7. Материальный баланс и объемы технологических газов

В силикатных стеклах, образующих большинство промышленных стеклоизделий, основными стеклообразующими окислами являются SiO_2 (62...75 %), CaO (6...14 %) и Na_2O (13...18 %). Обычно в состав стекла для модификации его свойств вводятся дополнительно окислы K_2O , MgO , Fe_2O_3 и др. Заданный химический состав стекла предопределяет набор сырьевых материалов, включаемых в состав шихты.

Основными исходными сырьевыми материалами стекольных шихт являются кварцевый песок, известняк, доломит, сода и сульфат натрия. Кроме того, в шихту вводят стекольный бой и некоторые другие химические вещества для окрашивания, обесцвечивания и осветления стекломассы. Стекольный бой ускоряет и облегчает варку, так как он плавится при более низкой температуре, чем шихта, и не требует тепла на реакции стеклообразования.

Диоксид кремния SiO_2 вводят в шихту обычно в виде кварцевого песка природных месторождений, причем для стекловарения применяют пески, содержащие не менее 95 % кремнезема и строго регламентируемое количество окрашивающих примесей. Оксид кальция CaO вводят посредством карбоната кальция CaCO_3 , содержащегося в горных породах типа известняков, мела и др. Оксид натрия Na_2O вводят в состав стекла через кальцинированную соду Na_2CO_3 или сульфат натрия Na_2SO_4 .

В настоящее время сульфат натрия Na_2SO_4 используется лишь в качестве добавки к содовой шихте (до 5 % от общего содержания щелочных компонентов). Он приводит к появлению легкоплавких эвтектик на стадии силикатообразования и является активным осветлителем стекломассы, так как при разложении выделяет крупные газовые пузыри, способствующие удалению из нее мелких пузырьков – "мошки". При содержании в шихте более 2 % сульфата натрия требуется добавлять в шихту каменный уголь в качестве восстановителя (до 10 % от содержания сульфата).

Оксид калия K_2O входит в шихту в виде поташа K_2CO_3 , оксид магния MgO - преимущественно в виде доломита $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$. Оксиды железа попадают в стекло в большинстве случаев как примесь, содержащаяся в природных сырьевых материалах.

Для расчета состава шихты следует сначала вычислить массовую долю стеклообразующих окислов в каждом компоненте шихты по его химическому составу (при условии отсутствия примесей), например, $x_{\text{SiO}_2}^{(\text{песок})}$, $x_{\text{CaO}}^{(\text{мел})}$, $x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сода})}$, $x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сульфат})}$, $x_{\text{K}_2\text{O}}^{(\text{поташ})}$ и др., написав соответствующие химические реакции разложения компонентов:



Для расчетов можно принять следующие значения атомной массы химических элементов: $\text{Ca}=40$; $\text{Na}=23$; $\text{K}=39$; $\text{C}=12$, $\text{S}=32$, $\text{O}=16$ а.е.м. (или кг/кмоль).

Затем по заданному содержанию окислов в стекле $x_{\text{SiO}_2}^{(\text{стекло})}$, $x_{\text{CaO}}^{(\text{стекло})}$, $x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{стекло})}$, $x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{стекло})}$, $x_{\text{K}_2\text{O}}^{(\text{стекло})}$ с помощью уравнений материального баланса определяются теоретические массовые расходы компонентов шихты, необходимые для получения из них 1 кг стекла (стк) в предположении, что все нелетучие окислы полностью переходят из шихты в стекло:

$$g_{\text{песок}}^{\text{теор}} = x_{\text{SiO}_2}^{(\text{стекло})} / x_{\text{SiO}_2}^{(\text{песок})},$$

$$g_{\text{мел}}^{\text{теор}} = x_{\text{CaO}}^{(\text{стекло})} / x_{\text{CaO}}^{(\text{мел})},$$

$$g_{\text{сода}}^{\text{теор}} = x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{стекло})} / x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сода})},$$

$$g_{\text{сульфат}}^{\text{теор}} = x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{стекло})} / x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сульфат})},$$

$$g_{\text{поташ}}^{\text{теор}} = x_{\text{K}_2\text{O}}^{(\text{стекло})} / x_{\text{K}_2\text{O}}^{(\text{поташ})}.$$

Действительный расход шихтовых материалов может быть несколько выше теоретического вследствие уноса части шихты дымовыми газами. Особенно велики потери щелочных компонентов шихты, частично возгоняющихся при высоких температурах. Обычно принимается, что потеря на улетучивание Na_2O и K_2O составляет 5 %. В то же время расход шихты может быть снижен за счет подачи в печь стеклобоя в количестве $g_{\text{бой}}$, кг на 1 кг стекла. Таким образом, действительные расходы компонентов шихты определяются по формулам, кг/кг стек:

$$g_{\text{песок}} = g_{\text{песок}}^{\text{теор}} (1 - g_{\text{бой}}),$$

$$g_{\text{мел}} = g_{\text{мел}}^{\text{теор}} (1 - g_{\text{бой}}),$$

$$g_{\text{сода}} = 1,05 g_{\text{сода}}^{\text{теор}} (1 - x_{\text{сульф}}) (1 - g_{\text{бой}}),$$

$$g_{\text{сульфат}} = 1,05 g_{\text{сульфат}}^{\text{теор}} x_{\text{сульф}} (1 - g_{\text{бой}}),$$

$$g_{\text{поташ}} = 1,05 g_{\text{поташ}}^{\text{теор}} (1 - g_{\text{бой}}),$$

где $x_{\text{сульф}}$ – массовое соотношение сульфата и соды в шихте.

Удельный расход сухой шихты в расчете на 1 кг стекла получают, суммируя действительные расходы всех ее компонентов:

$$g_{\text{ш}}^{\text{сух}} = g_{\text{песок}} + g_{\text{мел}} + g_{\text{сода}} + g_{\text{сульфат}} + g_{\text{поташ}} + \dots \quad (3)$$

Удельную массу технологических водяных паров, приходящуюся на 1 кг стекла, находят по количеству технологической влаги, испарившейся из шихты при заданной ее влажности $u_{\text{ш}}$, кг/кг стек:

$$g_{\text{вл}}^{\text{тех}} = u_{\text{ш}} / (1 - u_{\text{ш}}). \quad (4)$$

Отсюда определяется удельный расход влажной шихты, кг/кг стек:

$$g_{\text{ш}}^{\text{вл}} = g_{\text{ш}}^{\text{сух}} + g_{\text{вл}}^{\text{тех}}. \quad (5)$$

Далее следует определить массу веществ, переходящих в газообразную среду при разложении и возгонке компонентов шихты.

Масса технологического углекислого газа, выделяющегося из шихты, находится суммированием по соответствующим компонентам шихты. Следует иметь в виду, что, если при использовании сульфатной шихты в стекловаренную печь в качестве восстановителя подают уголь, то в расчете на каждый килограмм сульфата натрия образуется дополнительно 0,151 кг углекислого газа в соответствии с химической реакцией



В результате массовый расход технологического углекислого газа может быть вычислен по следующему уравнению, кг/кг стк:

$$g_{\text{CO}_2}^{\text{тех}} = g_{\text{мел}} x_{\text{CO}_2}^{(\text{мел})} + g_{\text{сода}} x_{\text{CO}_2}^{(\text{сода})} + g_{\text{поташ}} x_{\text{CO}_2}^{(\text{поташ})} + \dots \\ \dots + 0,151 g_{\text{сульфат}} , \quad (6)$$

где $x_{\text{CO}_2}^{(\text{мел})}$, $x_{\text{CO}_2}^{(\text{сода})}$, $x_{\text{CO}_2}^{(\text{поташ})}$ – массовые доли диоксида углерода в соответствующих компонентах шихты.

Массовый расход технологического газообразного диоксида серы определяется в соответствии с реакцией разложения сульфата натрия, кг/кг стк:

$$g_{\text{SO}_2}^{\text{тех}} = g_{\text{сульфат}} x_{\text{SO}_2}^{(\text{сульфат})} ,$$

где $x_{\text{SO}_2}^{(\text{сульфат})}$ – массовая доля диоксида серы в сульфате натрия, которая вычисляется по стехиометрическим соотношениям химической реакции.

Определяют массу уноса технологической пыли газами, кг/кг стк:

$$g_{\text{ун}} = 0,05 \left(g_{\text{сода}}^{\text{теор}} x_{\text{Na}_2\text{O}}^{\text{сода}} + g_{\text{поташ}}^{\text{теор}} x_{\text{K}_2\text{O}}^{\text{поташ}} \right) .$$

По результатам вычислений рекомендуется составить таблицу материального баланса по форме табл. 1. При правильном расчете материального баланса печи расхождение между приходом и расходом веществ в таблице не должно превышать 0,5 %.

Таблица 1

Сводная таблица материального баланса на 1 кг стекломассы

Приход веществ	кг/кг	Расход веществ	кг/кг
Влажная шихта $g_{\text{ш}}^{\text{вл}}$		Стекломасса	1
Стеклобой $g_{\text{бой}}$		Углекислый газ g_{CO_2}	
		Водяной пар $g_{\text{H}_2\text{O}}$	
		Диоксид серы g_{SO_2}	
		Технологический унос $g_{\text{ун}}$	
Всего:		Всего:	

Объемы технологических газов, м³/кг стк (при нормальных условиях), определяются, исходя из их массовых расходов:
 объемный расход технологического углекислого газа

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{tex}} = g_{\text{CO}_2}^{\text{tex}} / \rho_{\text{CO}_2}^0 ; \quad (7)$$

объемный расход технологического водяного пара

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{tex}} = g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{tex}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}}^0 ; \quad (8)$$

объемный расход технологического диоксида серы

$$V_{\text{SO}_2}^{\text{tex}} = g_{\text{SO}_2}^{\text{tex}} / \rho_{\text{SO}_2}^0 , \quad (9)$$

где $\rho_{\text{CO}_2}^0$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}^0$, $\rho_{\text{SO}_2}^0$ – плотность при нормальных условиях соответственно углекислого газа, водяного пара и диоксида серы.

8. Объемы и состав топливных газов

Объем воздуха $V_{\text{в}}^0$, необходимый для горения, и теоретические объемы продуктов горения $V_{\text{г}}^0$ соответствуют 1 м³ сгоревшего природного газа при коэффициенте избытка воздуха, равном единице. Все теоретические объемы приведены к нормальным условиям 0 °С, 760 мм рт. ст. (н.у.) и сведены в таблицы, которые рекомендуются для курсового проектирования (см. прил. 2).

Действительные объемы и состав продуктов горения топлива рассчитывают с учетом коэффициента избытка воздуха α_B и присоса холодного воздуха $\Delta\alpha'_B$ при подаче топлива в печь. Присосы воздуха задают в долях от объема воздуха, теоретически необходимого для горения, так что объемный расход избыточного воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$ топлива (при н.у.), может быть найден по формуле

$$V_{\text{изб}} = 1,0161(\alpha_B + \Delta\alpha'_B - 1) V_B^0,$$

где численный множитель 0,0161, добавленный к единице, учитывает объем влаги, содержащейся в воздухе (10 г водяного пара на 1 кг сухого воздуха).

Как правило, действительные объемы углекислого газа и диоксида серы не отличаются от теоретических. Вследствие малого содержания диоксида серы в газах обычно отказываются от учета его индивидуальных отличий, добавляя его объем к объему углекислого газа:

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{SO}_2}^0. \quad (10)$$

Действительный объем водяных паров возрастает за счет влаги избыточного воздуха:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 (\alpha_B + \Delta\alpha'_B - 1) V_B^0. \quad (11)$$

Кроме того, следует учесть объемы азота и кислорода, вносимых избыточным воздухом:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{топ}} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79 (\alpha_B + \Delta\alpha'_B - 1) V_B^0, \quad (12)$$

$$V_{\text{O}_2}^{\text{топ}} = 0,21 (\alpha_B + \Delta\alpha'_B - 1) V_B^0. \quad (13)$$

Действительный объем продуктов горения топлива можно найти как сумму объемов всех газообразных компонентов, вычисленных по формулам (10) – (13).

$$V_r^{\text{топ}} = V_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} + V_{\text{N}_2}^{\text{топ}} + V_{\text{O}_2}^{\text{топ}},$$

или, добавляя к теоретическому объему газов объем избыточного влажного воздуха,

$$V_r^{\text{топ}} = V_r^0 + 1,0161(\alpha_B + \Delta\alpha'_B - 1) V_B^0. \quad (14)$$

По составу продуктов горения определяют объемные доли составляющих газообразных компонентов, которые в дальней-

шем могут быть использованы, например, для расчета средней теплоемкости газов:

объемная доля углекислого газа

$$\rho_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} = V_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} / V_{\text{r}}^{\text{топ}} ;$$

объемная доля водяных паров

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} / V_{\text{r}}^{\text{топ}} ;$$

объемная доля азота

$$\rho_{\text{N}_2}^{\text{топ}} = V_{\text{N}_2}^{\text{топ}} / V_{\text{r}}^{\text{топ}} ;$$

объемная доля кислорода

$$\rho_{\text{O}_2}^{\text{топ}} = V_{\text{O}_2}^{\text{топ}} / V_{\text{r}}^{\text{топ}} .$$

9. Тепловой баланс стекловаренной печи

Расход топлива определяют с помощью уравнений теплового баланса варочной части проектируемой стекловаренной печи.

В приходную часть теплового баланса включают теплоту $Q_{\text{топ}}$, выделяющуюся при сгорании топлива, теплоту горячего воздуха $Q_{\text{гв}}$ и холодного воздуха присосов $Q_{\text{хв}}$, теплоту $Q_{\text{ш}}$, поступающую с шихтой и стеклобоем.

В расходную часть теплового баланса стекловаренных печей обычно принято вводить теплоту стекловарения [2 – 5], включающую в себя не только теплоту химических реакций стеклообразования, но и теплоту нагрева стекломассы и технологических газов до температуры варки. Такой подход вносит определенную неточность в тепловой баланс, так как не учитывает, что температура стекломассы, отводимой из варочной части печи, ниже, чем температура варки, на 100...200 °С, в то время как температура отходящих технологических газов, наоборот, несколько выше.

С позиций энергетики теплотехнологии в расходную часть теплового баланса следует включать теплоту химических реакций стеклообразования $Q_{\text{хим}}$ и испарения влаги из шихты $Q_{\text{исп}}$, теплоту стекломассы $Q_{\text{стк}}$, отводимой из варочной части, теплоту отходящих топливных $Q_{\text{r}}^{\text{топ}}$ и технологических $Q_{\text{r}}^{\text{tex}}$ газов и потери теплоты $Q_{\text{п}}$ газами и стекломассой [8]. Предполагается, что потери теплоты с недожогом топлива отсутствуют.

В принятых здесь обозначениях уравнение теплового баланса варочной части печи имеет такой вид:

$$Q_T + Q_{ГВ} + Q_{ХВ} + Q_{Ш} = Q_{СТК} + Q_{ХИМ} + Q_{ИСП} + Q_{Г}^{ТОП} + Q_{Г}^{ТЕХ} + Q_{П} .$$

Для оценки степени энергетического совершенства (или несовершенства) проектируемой печи, целесообразно предварительно составить тепловой баланс термодинамически идеальной теплотехнологической установки, наделенной некоторыми предельными свойствами, теоретически обеспечивающими минимальный расход топлива на проведение теплотехнологического процесса. Так как в идеальной установке отсутствуют потери тепла, уравнение теплового баланса для нее примет следующий вид:

$$Q_T + Q_{ГВ} + Q_{Ш} = Q_{СТК} + Q_{ХИМ} + Q_{ИСП} + Q_{Г}^{ТОП} + Q_{Г}^{ТЕХ} .$$

Кроме того, предполагается, что в идеальной установке имеются неограниченные возможности интенсификации теплообмена при противоточной схеме движения газов и материала, вследствие чего температура отходящих газов принимается равной температуре плавления шихты (1200...1300 °С), а также осуществляется максимальная регенерация тепла в пределах выбранной тепловой схемы реальной теплотехнологической установки. В этой связи следует в идеальной установке принимать температуру горячего воздуха, равной температуре газов на выходе из варочной части печи, и предусмотреть предельно возможный подогрев шихты, поступающей в печь.

Ниже изложена методика расчета основных статей теплового баланса.

Приход тепла

1. Теплота $Q_{ТОП}$, выделяющаяся при сгорании топлива, кВт:

$$Q_{ТОП} = B_{ТОП} Q_H^P , \quad (15)$$

где $B_{ТОП}$ – неизвестный расход газообразного топлива; Q_H^P – теплота сгорания топлива низшая.

2. Теплота $Q_{ГВ}$, вносимая горячим воздухом, кВт:

$$Q_{ГВ} = B_{ТОП} \alpha_B V_B^0 c_{ГВ} t_{ГВ} , \quad (16)$$

где α_B – коэффициент избытка воздуха, подаваемого на горение;

V_B^0 – теоретически необходимый объем воздуха для сжигания 1 м³ природного газа; $c_{гв}$ – удельная объемная теплоемкость горячего влажного воздуха; $t_{гв}$ – температура горячего воздуха, подаваемого на горение.

3. Теплота $Q_{хв}$, вносимая холодным воздухом присосов, кВт:

$$Q_{хв} = B_{\text{топ}} \Delta \alpha'_{хв} V_B^0 c_{хв} t_{хв}, \quad (17)$$

где $\Delta \alpha'_{хв}$ – коэффициент присоса холодного воздуха; $c_{хв}$ – удельная объемная теплоемкость холодного влажного воздуха; $t_{хв}$ – температура холодного воздуха присосов.

4. Теплота $Q_{ш}$, поступающая с шихтой и стеклобоем, кВт:

$$Q_{ш} = P_{\text{стк}} (g_{ш}^{\text{сyx}} c_{ш} + g_{\text{бой}} c_{\text{бой}} + g_{\text{вл}}^{\text{tex}} c_{\text{вл}}) t_{ш}, \quad (18)$$

где $c_{ш}$, $c_{\text{бой}}$ и $c_{\text{вл}}$ – удельные массовые теплоемкости соответственно шихты, стеклобоя и воды при температуре $t_{ш}$ шихты, подаваемой в варочную часть печи ($c_{\text{вл}} \approx 4190$ Дж/(кг·К); теплоемкость $c_{\text{бой}}$ можно найти по формуле (20) при температуре шихты, теплоемкость $c_{ш}$ – по прил. 5).

Расход тепла

1. Теплота стекломассы $Q_{\text{стк}}$, отводимой из варочной части, кВт:

$$Q_{\text{стк}} = P_{\text{стк}} c_{\text{стк}} t_{\text{стк}}, \quad (19)$$

где $c_{\text{стк}}$ – удельная массовая теплоемкость стекломассы; $t_{\text{стк}}$ – температура стекломассы, отводимой из варочной части печи.

Теплоемкость стекломассы, Дж/(кг·К), рассчитывают по формуле

$$c_{\text{стк}} = \frac{\sum_i p_i (a_i t_{\text{стк}} + b_i)}{0,00146 t_{\text{стк}} + 1}. \quad (20)$$

Здесь Σ означает суммирование по всем окислам, входящим в состав стекломассы; индекс i – номер окисла, образующего стекло; p_i – массовая доля отдельных окислов в стекле; a_i и b_i – расчетные коэффициенты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты для расчета средней теплоемкости стекол

Оксид	SiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
a_i	1,960	1,717	2,152	3,471	1,863
b_i	693,8	715,6	896,8	933,3	735,2

2. Теплота $Q_{\text{хим}}$ химических реакций стеклообразования, кВт:

$$Q_{\text{хим}} = P_{\text{стк}} (q_{\text{CaCO}_3} g_{\text{мел}} x_{\text{CaO}}^{(\text{мел})} + q_{\text{Na}_2\text{CO}_3} g_{\text{сода}} x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сода})} + q_{\text{Na}_2\text{SO}_4} g_{\text{сульфат}} x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сульфат})} + q_{\text{K}_2\text{CO}_3} g_{\text{поташ}} x_{\text{K}_2\text{O}}^{(\text{поташ})} + \dots), \quad (21)$$

где q_{CaCO_3} , $q_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$, $q_{\text{Na}_2\text{SO}_4}$, $q_{\text{K}_2\text{CO}_3}$ – удельная теплота реакций стеклообразования, кДж/кг, отнесенная к массе соответствующего стеклообразующего окисла в составе исходного вещества; $x_{\text{CaO}}^{(\text{мел})}$, $x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сода})}$, $x_{\text{Na}_2\text{O}}^{(\text{сульфат})}$, $x_{\text{K}_2\text{O}}^{(\text{поташ})}$ – массовые доли стеклообразующих окислов в каждом компоненте шихты.

В табл. 3 приведены значения удельной теплоты реакций стеклообразования, в которых учтены как теплота реакций разложения исходных соединений, так и теплота реакций образования силикатов (CaSiO_3 , Na_2SiO_3 , K_2SiO_3 и др.).

Таблица 3

Удельная теплота химических реакций стеклообразования

Исходное вещество	Продукт разложения (окисел)	Продукт силикатообразования	Теплота химической реакции $q_{\text{ок}}$, кДж/кг окисла
CaCO ₃	CaO	CaSiO ₃	1537
MgCO ₃	MgO	CaSiO ₃	3467
Na ₂ CO ₃	Na ₂ O	Na ₂ SiO ₃	952
Na ₂ SO ₄	Na ₂ O	Na ₂ SiO ₃	3467
K ₂ CO ₃	K ₂ O	K ₂ SiO ₃	997

3. Теплота $Q_{\text{исп}}$ испарения влаги из шихты, кВт:

$$Q_{\text{исп}} = P_{\text{стк}} g_{\text{вл}}^{\text{тех}} r_{\text{исп}}, \quad (22)$$

где $g_{\text{вл}}$ – расход влаги, испаряющейся из шихты, кг/кг стк;
 $r_{\text{исп}}$ – удельная теплота парообразования ($r_{\text{исп}} \approx 2448$ кДж/кг для воды при 20 °С).

4. Теплота отходящих топливных $Q_{\text{г}}^{\text{топ}}$ и технологических $Q_{\text{г}}^{\text{тех}}$ газов, кВт:

$$Q_{\text{г}}^{\text{топ}} = B_{\text{топ}} V_{\text{г}}^{\text{топ}} c_{\text{г}}^{\text{топ}} t_{\text{г}}, \quad (23)$$

$$Q_{\text{г}}^{\text{тех}} = P_{\text{стк}} V_{\text{г}}^{\text{тех}} c_{\text{г}}^{\text{тех}} t_{\text{г}}, \quad (24)$$

где $c_{\text{г}}^{\text{топ}}$ и $c_{\text{г}}^{\text{тех}}$ – средние объемные теплоемкости соответственно топливных и технологических газов; $t_{\text{г}}$ – средняя температура газов на выходе из варочной части печи.

Рекомендуется принимать температуру отходящих газов примерно на 60...70 К выше температуры нагреваемого ими технологического материала. При этом для печей прямого нагрева и с подковообразным направлением пламени можно считать, что температура технологического материала равна температуре плавления шихты (1250 °С), а для других печей – средней величине между температурами плавления шихты и варки стекломассы.

Удельные теплоемкости газов определяют в зависимости от температуры и состава газов:

для топливных газов

$$c_{\text{г}}^{\text{топ}} = c_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} \rho_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} + c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} \rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} + c_{\text{N}_2}^{\text{топ}} \rho_{\text{N}_2}^{\text{топ}} + c_{\text{O}_2}^{\text{топ}} \rho_{\text{O}_2}^{\text{топ}};$$

для технологических газов

$$c_{\text{г}}^{\text{тех}} = \left(c_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2}^{\text{тех}} + c_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{тех}} + c_{\text{SO}_2} V_{\text{SO}_2}^{\text{тех}} \right) / V_{\text{г}}^{\text{тех}},$$

где c_{CO_2} , $c_{\text{H}_2\text{O}}$, c_{SO_2} , c_{N_2} , c_{O_2} – удельные объемные теплоемкости углекислого газа, водяных паров, диоксида серы, азота и кислорода, кДж/м³ (определяются в зависимости от температуры по прил. 4).

Теплоту технологического уноса в отходящих газах стекловаренных печей обычно не рассчитывают вследствие ее малости.

5. Рассчитываются потери теплоты Q_{Π} в стекловаренной печи (рекомендации по расчету см. в разделе 10).

После определения статей прихода и расхода тепла уравнение теплового баланса стекловаренной печи записывают в следующем виде:

$$B_{\text{топ}}(Q_{\text{н}}^{\text{р}} + \alpha_{\text{в}} V_{\text{в}}^{\text{о}} c_{\text{гв}} t_{\text{гв}} + \Delta \alpha'_{\text{хв}} V_{\text{в}}^{\text{о}} c_{\text{хв}} t_{\text{хв}} - V_{\text{г}}^{\text{топ}} c_{\text{г}}^{\text{топ}} t_{\text{г}}) = \\ = Q_{\text{стк}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{г}}^{\text{тех}} + Q_{\Pi} - Q_{\text{ш}}. \quad (25)$$

Из равенства (25) находят расход топлива $B_{\text{топ}}$, после чего заполняют сводную табл. 5 теплового баланса, представляя статьи расходной части в укрупненном виде:

расход тепла на технологические процессы стекловарения

$$Q_{\text{тех}} = Q_{\text{стк}} + Q_{\text{хим}} + Q_{\text{исп}};$$

расход тепла с отходящими дымовыми газами

$$Q_{\text{д.г}} = Q_{\text{г}}^{\text{топ}} + Q_{\text{г}}^{\text{тех}};$$

потери тепла в окружающую среду и студочную часть печи

$$Q_{\Pi} = Q_{\text{кл}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{кон}}.$$

В случае электрообогрева бассейна подведенную электроэнергию включают в приходную часть теплового баланса печи.

По данным табл. 4 находим тепловой КПД стекловаренной печи:

$$\eta_{\text{теп}} = (Q_{\text{тех}} - Q_{\text{ш}}) / Q_{\text{топ}}. \quad (26)$$

В отличие от методики, принятой в литературе [2 – 5], при определении КПД печи по формуле (26) теплота нагрева технологических газов не считается полезной для теплотехнологического процесса. В дальнейшем она частично используется для нагрева воздуха, поступающего в печь.

Таблица 4

Сводная таблица теплового баланса стекловаренной печи

Приход тепла	кВт	%	Расход тепла	кВт	%
С топливом $Q_{\text{топ}}$			На стекловарение $Q_{\text{тех}}$		
С воздухом $Q_{\text{в}}$			С дымовыми газами $Q_{\text{дг}}$		
С шихтой и боем $Q_{\text{ш}}$			Потери тепла Q_{Π}		
Всего:		100	Всего:		100

Рекомендуется оценить коэффициент отъема теплоты топлива в рабочем пространстве печи по формуле

$$\eta_o = (Q_{\text{тех}} + Q_{\text{ос}} - Q_{\text{ш}}) / (B_{\text{топ}} Q_{\text{н}}^p), \quad (27)$$

где $Q_{\text{ос}}$ – тепловые потери в окружающую среду, принимаемые здесь равными общим тепловым потерям $Q_{\text{п}}$ печи.

10. Расчет тепловых потерь в стекловаренных печах

Расчет тепловых потерь вынесен в самостоятельный раздел в связи с некоторой громоздкостью его изложения.

Необходимо рассчитать потери теплопроводностью через кладку печи $Q_{\text{кл}}$, излучением $Q_{\text{изл}}$ через отверстия (загрузочные карманы, влеты горелок и окна в студочную часть) и конвекционными потоками стекломассы в студочную (или выработочную) часть печи $Q_{\text{кон}}$.

Потери теплоты в окружающую среду теплопроводностью через кладку (футеровку) печи

$$Q_{\text{кл}} = k(t_{\text{кл}} - t_{\text{а}})F_{\text{кл}}, \quad (28)$$

где k – коэффициент теплопередачи через стенку; $t_{\text{кл}}$, $t_{\text{а}}$ – температура соответственно внутренней поверхности кладки и атмосферного воздуха; $F_{\text{кл}}$ – площадь поверхности стен, пода и свода печи.

Температура кладки в пламенном пространстве близка к температуре газов на выходе из варочной части печи, расчетная температура внутренней (горячей) поверхности стен в бассейне печи приблизительно равна температуре стекломассы, отводимой из варочной части, а температура пода на 100...200 К ниже (но не ниже 1100 °С).

Площадь поверхности арочного свода можно приближенно рассчитать, зная длину $a_{\text{св}}$ и ширину $b_{\text{св}}$ варочной части и приняв радиус свода равным ширине печи:

$$F_{\text{св}} = \pi a_{\text{св}} b_{\text{св}} / 3. \quad (29)$$

Коэффициент теплопередачи через плоскую стенку

$$k = 1 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right). \quad (30)$$

Здесь число n и толщина δ_i слоев кладки выбирается в соответствии с проектом; коэффициент теплопроводности λ_i находится при средней температуре слоев кладки (см. прил. 6).

Коэффициент теплоотдачи α_2 от наружной поверхности обмуровки к атмосферному воздуху представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией α_k и излучением α_l . Первый из них вычисляется по приближенной формуле в зависимости от разности температур наружной поверхности стенки и атмосферного воздуха:

$$\alpha_k = C(t_n - t_a)^{0,25}, \quad (31)$$

причем множитель C принимает значения 2,6 для вертикальных стен, 1,6 – для пода и 3,3 – для свода печи.

Коэффициент теплоотдачи излучением равен

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_n \sigma (T_n^4 - T_a^4)}{t_n - t_a} = \varepsilon_n \sigma (T_n + T_a) (T_n^2 + T_a^2), \quad (32)$$

где ε_n – степень черноты наружной поверхности кладки ($\varepsilon_n \approx 0,9$); σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴); T_n , T_a – температура соответственно наружной поверхности кладки и атмосферного воздуха, К.

Значения температуры слоев и наружной поверхности кладки определяют методом последовательного приближения. Сначала предварительно принимаются ориентировочные значения температуры на поверхности слоев кладки и вычисляется в первом приближении плотность теплового потока через кладку:

$$q_{кл} = k(t_{кл} - t_a). \quad (33)$$

Затем определяются значения температуры на границе слоев, начиная с внутренней поверхности футеровки:

$$t_i = t_{i-1} - q_{кл} \delta_i / \lambda_i.$$

Находят среднюю температуру в каждом слое, вычисляют тепловой поток через кладку. Расчет повторяют до его сходимости.

Тепловые потери можно вычислить с помощью компьютерной программы – через под и стены бассейна по прил. 7, а через свод и стены пламенного пространства печи, воспользовавшись программой лабораторной работы № 11 [9].

Потери теплоты излучением через отверстия (загрузочные карманы, воздушные влеты горелок и окна в студочную часть) определяются следующим образом:

$$Q_{изл} = \varphi_{отв} \sigma (T_{\Gamma}^4 - T_{отв}^4) F_{отв}, \quad (34)$$

где $\varphi_{отв}$ – коэффициент диафрагмирования, учитывающий сни-

жение потерь тепла по мере увеличения отношения толщины стенки l к размеру отверстия a или d (определяется по графикам рис. 19); $T_{\text{отв}}$ – температура газов или воздуха в пространстве за отверстием; $F_{\text{отв}}$ – площадь отверстия.

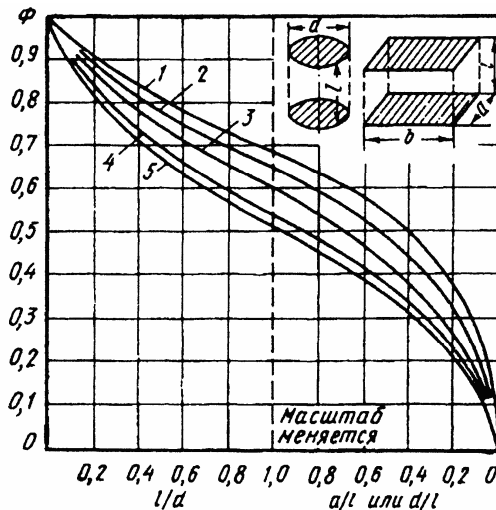


Рис 19. График, определяющий коэффициент диафрагмирования:
1 – узкая длинная полоса; 2 – прямоугольник ($a : b = 0,2$);
3 – прямоугольник ($a : b = 0,5$); 4 – квадрат; 5 – круг

Рекомендуется расчетную температуру $T_{\text{отв}}$ в воздушных влетах горелок определять как среднюю по значениям температуры нагретого воздуха и отходящих дымовых газов. При вычислении площади отверстия $F_{\text{отв}}$ следует принимать в качестве расчетной площадь только тех влетов, через которые в печь подается воздух (отверстия для отвода газов не учитываются), а в загрузочных карманах щель высотой 300...400 мм считать наполовину перекрытой шихтой.

Теплота, теряемая в студочную (или варочную) часть печи с конвекционными потоками стекломассы, равна

$$Q_{\text{кон}} = P_{\text{стк}} c_{\text{стк}} (t_{\text{стк}} - t_{\text{студ}}) (n_{\text{стк}} - 1), \quad (35)$$

где $n_{\text{стк}}$ – коэффициент потока; $t_{\text{стк}}$ – температура стекломассы, отводимой из варочной части печи; $t_{\text{студ}}$ – температура конвекционного потока стекломассы из студочной части в варочную часть печи (принимается на 100...200 К ниже температуры стекломассы, отводимой из варочной части печи).

Коэффициент потока $n_{\text{стк}}$ представляет собой отношение всего количества стекломассы, переносимой конвекционными потоками в студочную (или выработочную) часть печи, к количеству вырабатываемой стекломассы (к производительности печи по стекломассе). Для крупных ванн печей в производстве листового стекла $n_{\text{стк}} \approx 4...6$, а для ванн печей с протоком в производстве тарного стекла коэффициент потока приближается к единице ($n_{\text{стк}} \approx 1...1,2$).

11. Состав и температура дымовых газов

В воздухонагревателях стекловаренных печей также имеются присосы холодного воздуха. Чтобы упростить расчет, условно примем, что весь расчетный присос воздуха сосредоточен на участке между печью и воздухонагревателем. В этом случае объемный расход газов в самом воздухонагревателе останется постоянным. Учитывая присосы, следует уточнить состав и температуру дымовых газов перед воздухонагревателем.

Для стекловаренных печей прямого нагрева с рекуператорами можно принять $\Delta\alpha'' = 0,05$. В печах с регенераторами происходит дополнительный присос атмосферного воздуха в газоходы печи через открытые отверстия топливных амбразур в те периоды, когда топливо через них не подается, и доля присосов воздуха возрастает до $\Delta\alpha'' = 0,1...0,12$.

Дополнительный присос холодного воздуха не влияет на объем углекислого газа, определенный ранее по формуле (10). Объемы водяных паров, азота и кислорода, образовавшиеся при сгорании 1 м^3 топлива, несколько возрастают за счет присосов воздуха:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161 (\alpha_{\text{в}} + \Delta\alpha'_{\text{в}} + \Delta\alpha''_{\text{в}} - 1) V_{\text{в}}^0. \quad (36)$$

$$V_{\text{N}_2}^{\text{топ}} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79 (\alpha_{\text{в}} + \Delta\alpha'_{\text{в}} + \Delta\alpha''_{\text{в}} - 1) V_{\text{в}}^0, \quad (37)$$

$$V_{\text{O}_2}^{\text{топ}} = 0,21 (\alpha_{\text{в}} + \Delta\alpha'_{\text{в}} + \Delta\alpha''_{\text{в}} - 1) V_{\text{в}}^0. \quad (38)$$

Объемный расход дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$ (н.у.), входящих в воздухонагреватель определяется как суммарный объем топливных и технологических газов печи следующим образом:

объемный расход углекислого газа:

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{дг}} = B_{\text{топ}} V_{\text{CO}_2}^{\text{топ}} + P_{\text{стк}} V_{\text{CO}_2}^{\text{tex}}, \quad (39)$$

объемный расход водяного пара:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}} = B_{\text{топ}} V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{топ}} + P_{\text{стк}} V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{тех}}, \quad (40)$$

объемный расход азота:

$$V_{\text{N}_2}^{\text{дг}} = B_{\text{топ}} V_{\text{N}_2}^{\text{топ}}, \quad (41)$$

объемный расход кислорода:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{дг}} = B_{\text{топ}} V_{\text{O}_2}^{\text{топ}}. \quad (42)$$

Объемный расход дымовых газов в целом находят как сумму объемных расходов всех газообразных компонентов, вычисленных по формулам (39) – (42).

$$V_{\text{дг}} = V_{\text{CO}_2}^{\text{дг}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}} + V_{\text{N}_2}^{\text{дг}} + V_{\text{O}_2}^{\text{дг}}, \quad (43)$$

Далее определяются объемные доли отдельных компонентов в дымовых газах печи:

углекислого газа

$$p_{\text{CO}_2}^{\text{дг}} = V_{\text{CO}_2}^{\text{дг}} / V_{\text{дг}},$$

водяных паров

$$p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}} / V_{\text{дг}};$$

азота

$$p_{\text{N}_2}^{\text{дг}} = V_{\text{N}_2}^{\text{дг}} / V_{\text{дг}};$$

кислорода

$$p_{\text{O}_2}^{\text{дг}} = V_{\text{O}_2}^{\text{дг}} / V_{\text{дг}}.$$

Чтобы найти температуру дымовых газов за печью с учетом присосов холодного воздуха, теплоту, уходящую с дымовыми газами из стекловаренной печи $Q_{\text{дг}}$, кВт, (см. табл. 4), приравняем к теплоте дымовых газов, разбавленных присосами холодного воздуха,

$$Q_{\text{дг}} = V_{\text{дг}} c_{\text{дг}} t_{\text{дг}}.$$

Затем вычисляют температуру дымовых газов, выходящих из пламенного пространства стекловаренной печи:

$$t_{\text{дг}} = Q_{\text{дг}} / (V_{\text{дг}} c_{\text{дг}}). \quad (44)$$

Здесь $c_{\text{дг}}$ – средняя удельная теплоемкость газов на входе в воздухонагреватель, кДж/(м³К):

$$c_{\text{дг}} = c_{\text{CO}_2}^{\text{дг}} p_{\text{CO}_2}^{\text{дг}} + c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}} p_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}} + c_{\text{N}_2}^{\text{дг}} p_{\text{N}_2}^{\text{дг}} + c_{\text{O}_2}^{\text{дг}} p_{\text{O}_2}^{\text{дг}}, \quad (45)$$

$c_{\text{CO}_2}^{\text{дг}}$, $c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{дг}}$, $c_{\text{N}_2}^{\text{дг}}$, $c_{\text{O}_2}^{\text{дг}}$ – средние удельные объемные теплоемкости углекислого газа, водяных паров, азота и кислорода (определяются по прил. 4 при температуре дымовых газов $t_{\text{дг}}$).

Учитывая потери тепла в окружающую среду в соединительном газоходе, рекомендуется температуру газов на входе в воздухонагреватель принимать на 50...70 К ниже, чем вычисленную температуру $t_{\text{дг}}$ дымовых газов.

12. Рекуператоры стекловаренных печей

Рекуператор представляет собой теплообменное устройство для нагрева воздуха отходящими газами печей, в котором теплота передается от газов к воздуху через разделяющую их стенку. Рекуператоры хорошо поддерживают стационарный тепловой режим печи, так как для их нормальной работы не требуется периодически изменять направление движения газов. Поэтому рекуператоры устанавливают за стекловаренными печами прямого нагрева.

Очень удобным материалом для изготовления рекуператоров являются различные стали, имеющие высокую теплопроводность 20...45 Вт/(м·К) и позволяющие использовать сварку, чтобы обеспечивать герметичность конструкции.

Недостатком металлических рекуператоров является сравнительно низкая жаропрочность стали, что ограничивает температуру нагрева воздуха. Так, в случае использования углеродистых сталей температура воздуха не превышает 300...350 °С. При использовании легированных марок стали возможно увеличение температуры подогрева воздуха до 500...600 °С. При этом исходят из того, что допустимая температура стенки трубы из хромистых и хромоникелевых сталей составляет 600...650 °С.

В промышленности используют различные конструкции металлических рекуператоров. Для стекловаренных печей наиболее приемлемы конвективные рекуператоры из гладких стальных труб и радиационные рекуператоры.

Конвективные рекуператоры по конструкции весьма разнообразны. В них воздух может идти внутри трубы, а дымовые газы снаружи, и наоборот. Для изготовления рекуператора применяют электросварные или цельнотянутые трубы с внутренним диаметром от 20 до 50 мм и толщиной стенки 1,5...3 мм. Трубы крепят к трубным доскам при помощи сварки.

Одна из конструкций двухходового рекуператора из гладких прямых труб показана на рис. 20. В них воздух движется внутри стальных труб, обтекаемых снаружи дымовыми газами. Данный рекуператор обеспечивает подогрев воздуха до 300...400 °С при температуре дымовых газов 800...1000 °С.

Чтобы снизить аэродинамическое сопротивление по газам и облегчить очистку труб в тех случаях, когда в дымовых газах содержится технологический унос в виде мелкодисперсной пыли, применяют конструкцию рекуператора, в котором дымовые газы проходят внутри прямых труб, а поток нагревающегося воздуха обтекает эти трубы снаружи.

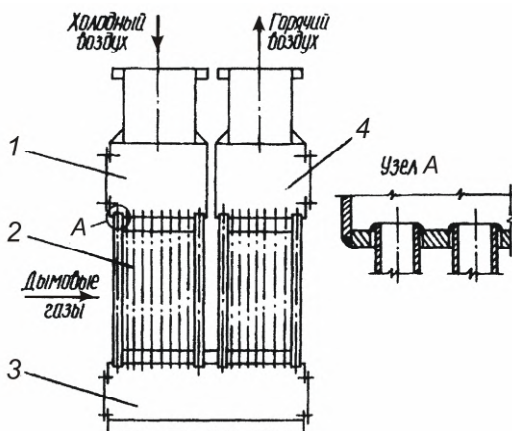


Рис. 20. Конвективный рекуператор:

1 – распределительный короб холодного воздуха; 2 – трубы для прохода воздуха; 3 – поворотный воздушный короб; 4 – сборный короб горячего воздуха

За стекловаренными печами прямого нагрева весьма эффективно применяются радиационные рекуператоры, в которых основное количество теплоты со стороны газов передается излучением. В радиационных рекуператорах каналы для прохода дымовых газов имеют большой диаметр (0,5...3 м), вследствие чего существенно увеличивается лучистая составляющая теплоотдачи от газов к стенке. Коэффициент теплопередачи для радиационных рекуператоров может составлять 100...120 Вт/(м²К), что приводит к заметному уменьшению поверхности теплообмена, выполняемой в этом случае из дорогостоящих легированных сталей.

Использование жаропрочных марок стали позволяет устанавливать радиационные рекуператоры за печами с температурой отходящих дымовых газов 1300...1600 °С. При этом температура подогрева воздуха может достигать 700 °С. Несомненным достоинством радиационных рекуператоров является свойственное им уменьшенное загрязнение поверхности нагрева технологическим уносом.

Наиболее распространены радиационные рекуператоры двух конструкций – щелевые и трубчатые. Щелевые рекуператоры (рис. 21) состоят из двух concentрических цилиндров 4 и 5, сваренных из листов жаропрочной стали толщиной 6...10 мм. По внутреннему цилиндру проходят дымовые газы, а в кольцевой щели между внутренним и наружным цилиндрами – нагреваемый воздух. Ширина щели для прохода воздуха принимается равной 8...60 мм. Для повышения скорости воздуха и обеспечения большей равномерности его распределения в кольцевой щели устанавливают направляющие спиралеобразные перегородки 6, которые одновременно служат прокладками, фиксирующими ширину щели между цилиндрами.

На обоих концах рекуператора расположены кольцевые коробки 2 и 7 (см. рис. 21), служащие для подвода и отвода нагреваемого воздуха.

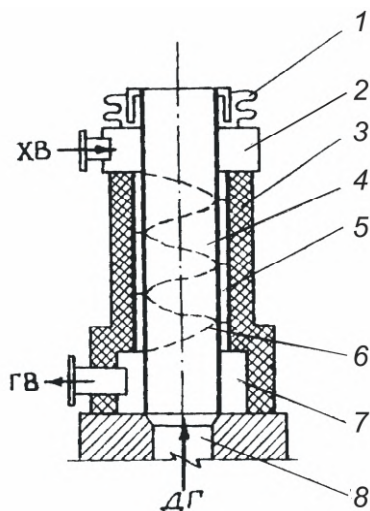


Рис. 21. Щелевой радиационный рекуператор:

1 – компенсатор; 2 – распределительный короб холодного воздуха; 3 – тепловая изоляция; 4 – внутренний цилиндр; 5 – наружный корпус; 6 – направляющие перегородки; 7 – распределительный короб горячего воздуха; 8 – дымовой канал; ХВ – холодный воздух; ГВ – горячий воздух; ДГ – дымовые газы

Воздух требуется подводить максимально равномерно, так как для нормальной эксплуатации щелевого радиационного рекуператора необходимо равномерное охлаждение воздухом всей поверхности нагрева внутреннего цилиндра 4. В противном случае рекуператор будет коробиться и выходить из строя.

Тепловое расширение цилиндров радиационного рекуператора компенсируют с помощью специального линзового компенсатора 1. Снижение тепловых потерь обеспечивает тепловая изоляция наружного цилиндра 3.

В трубчатых радиационных рекуператорах кольцевая щель отсутствует, а роль каналов для движения воздуха выполняют вертикальные трубы, концы которых приварены к распределительным кольцевым коробам. Такие рекуператоры дороже вследствие большей стоимости труб из жаропрочной стали, но более надежны в работе.

13. Регенераторы стекловаренных печей

Регенераторы выполняются в виде вертикальных или горизонтальных газоходов, заполненных многорядной решеткой (насадкой) из огнеупорных кирпичей или специальных блоков (рис. 22). Насадка в регенераторе служит аккумулятором тепла. Для нормальной работы стекловаренных печей необходимо, чтобы в их рабочее пространство постоянно поступал подогретый воздух. Поэтому регенераторы на печи устанавливают попарно, так чтобы в каждой паре одна из насадок нагревалась отходящими газами, а другая в это же время охлаждалась воздухом.

Продолжительность подачи воздуха или дымовых газов через каждую насадку для регенераторов ваннных печей составляет 30 мин. В конце этого периода производится перекидка клапана, расположенного в общем канале под насадками, что приводит к изменению направления движения газов в печи на противоположное и к перемене рабочей функции насадки в каждой регенераторной паре: нагретая газами насадка отдает аккумулированное ею тепло воздуху, в то время как охлажденная воздухом насадка нагревается отходящими газами печи. В итоге работа регенераторов характеризуется нестационарным тепловым режимом и колебаниями во времени температуры подогрева воздуха.

Греющие газы поступают в регенераторы с температурой 1350...1500 °С и покидают их с температурой 400...500 °С. Температура воздуха, поступающего в насадку регенератора, составляет 40...60 °С, поскольку как он несколько подогревается горячими стенами подводящих газоходов. В регенераторах воздух нагревается до 900...1250 °С.

В ваннных печах с поперечным направлением пламени регенераторы располагают вдоль продольных стен, а в печах с подковообразным пламенем – с торца печи. Тепловая работа регенераторов в крупных ваннных печах улучшается при разделении их на отдельные секции соответственно числу горелок. Секционирование регенератора позволяет регулировать количество воздуха, подаваемого на каждую горелку.

В крупных ваннных печах регенераторы делают с насадками высотой до 6,8 м. Вертикальные шахты горелок в этом случае отсутствуют, и нагретый воздух поступает к влетам горелок по горизонтальным каналам, сообщаясь непосредственно с наднасадочным пространством регенеративных камер. Такая конструкция регенераторов дает возможность нагревать воздух до более высокой температуры и снижать аэродинамические сопротивления между верхней частью регенераторов и влетами горелок.

Насадки регенераторов, работающих при температурах ниже 1300 °С, выкладывают преимущественно из шамота. При более высоких температурах применяют материалы, имеющие большую огнеупорность (магнезит, дианас, форстерит).

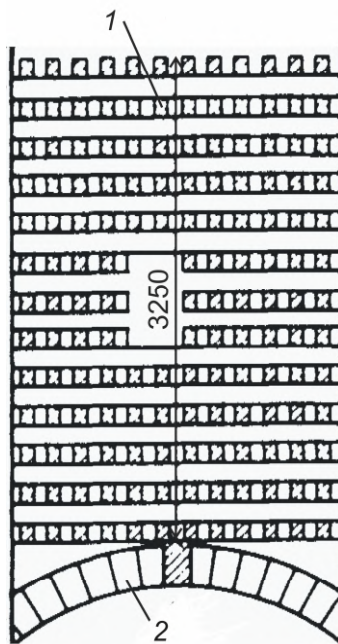


Рис. 22. Расположение насадки регенератора в газоходе:

1 – кирпичная насадка;

2 – несущие арки

Чаще всего для кладки насадки регенераторов используют огнеупорные кирпичи прямоугольной формы, выкладываемые на ребро. Кирпичи, как правило, имеют нормальные размеры (длина $l = 230$ мм, высота $h = 113$ мм, толщина $\delta = 65$ мм). При такой толщине кирпичи могут выдерживать большую нагрузку в нижней части насадки и максимально участвовать в теплообмене.

Кирпичи в насадке располагают таким образом, чтобы между ними остались проходы для газов. Свободный участок поперечного сечения между кирпичами насадки называют ячейкой регенератора. Ячейка имеет форму прямоугольника длиной a и шириной b , но чаще форму квадрата размером 120×120 мм.

Каналы под насадками регенераторов перекрывают отдельными несущими арками толщиной $230 \dots 300$ мм и шириной 115 или 230 мм, которые и воспринимают вес кирпичей насадки (см. рис. 22). Промежутки между арками шириной 115 мм обеспечивают проходы для газовых и воздушных потоков. При ширине более 2 м поднасадочный канал делится стенкой на два параллельных канала, перекрываемых отдельными арками.

Существует несколько типов кладки насадки регенераторов. Насадку можно выкладывать так, чтобы кирпичи образовывали сплошные каналы с продольным обтеканием их газами и воздухом (насадка Каупера). С точки зрения теплообмена более эффективной является насадка Сименса с чередующимися рядами (см. рис 22), в которой достигается близкое к поперечному обтеканию кирпичей газами или воздухом.

В регенераторах стекловаренных печей получила распространение насадка Лихте (рис. 23) с чередующимися и смещенными в шахматном порядке рядами. Кирпичи в каждом продольном ряду расположены вразбежку, так что в теплообмене участвуют торцевые поверхности примерно половины кирпичей насадки.

Насадка типа Лихте характеризуется следующими расчетными параметрами:

удельной поверхностью нагрева, приходящейся на единицу объема насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$,

$$F_{\text{уд}} = \frac{\delta}{h} \cdot \frac{a + 2b + \delta - \ell}{(a + \delta)(b + \delta)} + \frac{a + 2\delta + \ell}{(a + \delta)(b + \delta)}, \quad (46)$$

степенью заполнения объема кирпичом, $\text{м}^3/\text{м}^3$,

$$V_{\text{уд}} = \frac{\delta}{2} \cdot \frac{a + \delta + \ell}{(a + \delta)(b + \delta)}, \quad (47)$$

удельной площадью свободного сечения, приходящейся на единицу площади поперечного сечения газохода, $\text{м}^2/\text{м}^2$,

$$S_{\text{уд}} = \frac{ab}{(a + \delta)(b + \delta)}, \quad (48)$$

эквивалентной толщиной кирпича, м,

$$\delta_{\text{э}} = 2V_{\text{уд}} / F_{\text{уд}}. \quad (49)$$

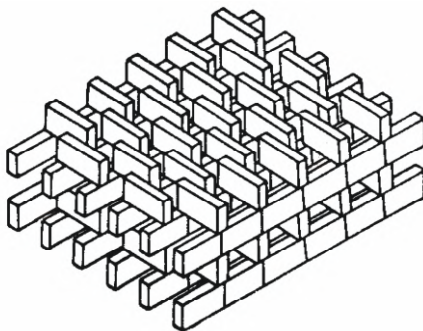


Рис. 23. Конструкция насадки вертикального регенератора типа Лихте с чередующимися смещенными рядами и расположением кирпичей вразбежку

Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду обмуровку регенераторов выполняют трехслойной: внутренний слой - из огнеупорного (обычно шамотного) кирпича, средний - из легковесного шамотного или диатомового кирпича и наружный - из красного кирпича. Для повышения газоплотности стены регенераторов снаружи покрывают специальными обмазками.

14. Тепловой расчет рекуператоров и регенераторов

Несмотря на различие в конструкции и особенностях теплообмена рекуператоров и регенераторов, существует определенная аналогия в их тепловой работе. Основной целью расчета, как рекуператоров, так и регенераторов является определение поверхности нагрева или объема, занимаемого теплообменным устройством.

По заданному коэффициенту избытка воздуха при горении α_B и рассчитанному ранее теоретически необходимому для горения объему воздуха V_B^o определяют объемный расход воздуха в воздухонагревателе, $\text{м}^3/\text{с}$ (при нормальных условиях):

$$V_B = B_T \alpha_B V_B^o, \quad (50)$$

и количество теплоты ΔQ_B , воспринятое нагреваемым воздухом, кВт:

$$\Delta Q_B = V_B (c_B'' t_B'' - c_B' t_B'), \quad (51)$$

где t_B' и t_B'' – температуры воздуха на входе и на выходе из воздухонагревателя, °С; c_B' и c_B'' – соответствующие им средние удельные теплоемкости влажного воздуха, $\text{кДж}/(\text{м}^3\text{К})$.

Уравнение теплового баланса воздухонагревателя можно записать в обобщенной форме следующим образом:

$$\Delta Q_r = \Delta Q_B + Q_n^{\text{BH}},$$

где ΔQ_r – теплота, отданная охлаждаемыми газами, кВт; Q_n^{BH} – потери теплоты воздухонагревателем в окружающую среду, величина которых составляет 5...15 % от теплоты ΔQ_r , отданной газами (меньшее значение – для рекуператоров). Обычно для учета потери теплоты в тепловом балансе воздухонагревателя используют понятие коэффициента сохранения тепла:

$$\phi = 1 - Q_n^{\text{BH}} / \Delta Q_r = 0,85 \dots 0,95,$$

так что количество теплоты, отданное охлаждаемыми газами, определится из равенства

$$\Delta Q_r = \Delta Q_B / \phi.$$

С помощью уравнения теплового баланса воздухонагревателя находят температуру газов на выходе из рекуператора или регенератора:

$$t''_r = (V_{дг} c'_{дг} t'_r - \Delta Q_r) / (V_{дг} c''_{дг}), \quad (52)$$

где t'_r и t''_r – температуры газов на входе и на выходе из воздухонагревателя, °С; $c'_{дг}$ и $c''_{дг}$ – соответствующие им средние удельные теплоемкости дымовых газов, кДж/(м³К), рассчитываются по формуле усреднения (45) и прил. 4 при соответствующей температуре газов t'_r или t''_r .

Так как температура газов на выходе из воздухоподогревателя заранее неизвестна, то при расчете теплоемкости принимается ее ориентировочное значение, которое затем уточняется. Если новое значение температуры, рассчитанное по уравнению (52), отличается от ранее принятого более, чем на 50 К, то расчет теплоемкости следует повторить при новой температуре.

При известных значениях температуры воздуха и дымовых газов рассчитывают средний температурный напор в воздухонагревателе при противотоке или прямотоке по формуле логарифмического усреднения:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln(\Delta t_6 / \Delta t_m)}, \quad (53)$$

где Δt_6 и Δt_m – наибольшее и наименьшее значения разности температур газов и воздуха во входных и выходных сечениях воздухонагревателя, К. При противоточной схеме движения газов и воздуха

$$\Delta t_6 = t''_r - t'_в, \quad \Delta t_m = t'_r - t''_в.$$

Для расчета поверхности теплообмена воздухонагревательных устройств F используется уравнение теплопередачи:

$$Q_r = k \Delta t_{cp} F, \quad (54)$$

где Q_r – тепловой поток теплопередачи через поверхность теплообмена, Вт; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К); Δt_{cp} – средний температурный напор, К. Тепловой поток через поверхность теплообмена Q_r может быть приближенно найден путем усреднения потоков теплоты, отданной газами ΔQ_r и полученной воздухом $\Delta Q_в$ за единицу времени:

$$Q_r = (\Delta Q_r + \Delta Q_в) / 2.$$

15. Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи

Средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К), от охлаждаемых газов к нагреваемому воздуху рассчитывается в зависимости от типа воздухонагревательного устройства:

для металлических рекуператоров

$$k_{\text{ср}} = \xi \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (55)$$

для регенераторов

$$k_{\text{ср}} = \xi \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_3}{3\lambda_n} \left(1 - \frac{\delta_3^2 \rho_n c_n}{30\lambda_n \tau} \right)}, \quad (56)$$

где ξ – коэффициент использования воздухонагревателя, учитывающий загрязнение поверхности нагрева технологическим и золовым уносом, неполноту обтекания ее воздухом и газами и некоторые другие факторы, снижающие эффективность теплообмена (рекомендуется принимать $\xi = 0,7 \dots 0,8$); α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно от газов к поверхности нагрева и от поверхности нагрева к воздуху, Вт/(м²К); δ_3 – эквивалентная толщина кирпича насадки регенератора, м; λ_n – коэффициент теплопроводности регенеративной насадки, Вт/(м·К); c_n – удельная теплоемкость насадки, Дж/(кг·К), ρ_n – плотность материала насадки, кг/м³; τ – продолжительность периода нагрева или охлаждения насадки регенератора (следует принять $\tau = 1800$ с).

Коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности нагрева α_1 равен сумме коэффициентов теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к1}$ и излучением $\alpha_{л}$, в то время как коэффициент теплоотдачи α_2 к воздуху, не содержащему излучающих компонентов, равен только коэффициенту теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к2}$:

$$\alpha_1 = \alpha_{к1} + \alpha_{л};$$

$$\alpha_2 = \alpha_{к2}.$$

Для расчета коэффициентов теплоотдачи конвекцией используются эмпирические зависимости числа Нуссельта Nu от чисел Рейнольдса Re и Прандтля Pr следующего вида:

внутри труб (продольное обтекание)

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}; \quad (57)$$

в межтрубном пространстве (поперечное обтекание шахматных пучков труб)

$$Nu = 0,35 Re^{0,6} Pr^{0,33}; \quad (58)$$

в насадке типа Лихте

$$Nu = 0,149 Re^{0,68}. \quad (59)$$

Числа подобия Nu и Re представляют собой безразмерные комплексы физических величин:

$$Nu \equiv \frac{\alpha d_g}{\lambda}; \quad Re \equiv \frac{u d_g}{\nu},$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²К); λ – коэффициент теплопроводности воздуха или газов, Вт/(м·К); ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха или газов, м²/с; u – скорость воздуха или газов, м/с; d_g – определяющий линейный размер (эквивалентный диаметр), м, в качестве которого выбирается при продольном обтекании труб внутренний диаметр трубы, а при поперечном обтекании – наружный.

В насадке регенератора типа Лихте определяющий линейный размер равен так называемому "гидравлическому диаметру" поперечного сечения кирпича:

$$d_g = 2h\delta/(h + \delta).$$

Для нормального кирпича при его высоте $h = 113$ мм и толщине $\delta = 65$ мм «гидравлический диаметр» поперечного сечения кирпича $d_g = 82,4$ мм.

Коэффициенты λ , ν и число Pr , характеризующие физические свойства воздуха и газов, определяются при соответствующей расчетной температуре по таблицам прил. 3, где приведены данные для среднего состава газов. Так как продукты сгорания природного газа имеют повышенное содержание водяных паров, то в этом случае при нахождении величин λ , ν и Pr следует их табличные значения увеличивать на 5 %.

Скорости воздуха и газов выбирают, исходя из рекомендуемых их значений u_b^o и u_r^o , приведенных к нормальным условиям:

при продольном обтекании труб рекуператора $u_o \approx 3...4$ м/с;

при поперечном обтекании труб рекуператора $u_o \approx 1,5...2$ м/с;

в насадке регенератора $u_o \approx 0,3...0,6$ м/с, причем меньшие значения относятся здесь к воздуху..

Действительные скорости воздуха и газов при расчетной температуре t_b или t_r будут равны

$$u_b = u_b^o \frac{t_b + 273}{273}, \quad u_r = u_r^o \frac{t_r + 273}{273}.$$

Следует учитывать, что в насадке регенераторов площадь свободного сечения для прохода воздуха и газов одна и та же. Поэтому скорости воздуха и газов в регенераторах взаимосвязаны. Так, если выбрана скорость воздуха u_b^o , то приведенная скорость газов в насадке определяется с учетом соотношения объемных расходов газов и воздуха при нормальных условиях:

$$u_r^o = u_b^o \frac{V_r}{V_b}.$$

Коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{л}}$ находят, рассчитывая предварительно величину плотности потока результирующего излучения $q_{\text{л}}$:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л}}}{t_r - t_{\text{ст}}} = \frac{\varepsilon'_{\text{ст}} \sigma (\varepsilon_r T_r^4 - A_r T_{\text{ст}}^4)}{t_r - t_{\text{ст}}}, \quad (60)$$

где t_r и $t_{\text{ст}}$ – соответственно расчетные температуры газов и поверхности стенки труб рекуператора или насадки регенератора, °С; T_r и $T_{\text{ст}}$ – те же температуры газов и стенки, К; $\varepsilon'_{\text{ст}}$ – условная степень черноты поверхности стенки; σ – постоянная Стефана–Больцмана; ε_r и A_r – соответственно степень черноты и поглощательная способность газов.

Температура стенки обычно принимается средней между значениями температуры воздуха и газов в расчетном сечении воздухонагревателя:

$$t_{\text{ст}} = (t_b + t_r)/2.$$

Условная степень черноты поверхности стенки также находится по формуле арифметического усреднения:

$$\varepsilon'_{\text{ст}} = (\varepsilon_{\text{ст}} + 1)/2 ,$$

где степень черноты стенки $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,75 \dots 0,85$, причем меньшее ее значение соответствует более горячей части воздухонагревателя.

Степень черноты ε_r и поглощательная способность A_r газов находят по однотипным формулам, полученным на основе закона Бугера:

$$\varepsilon_r = 1 - e^{-k_r l_{\text{эф}}} , \quad (61)$$

$$A_r = 1 - e^{-k'_r l_{\text{эф}}} , \quad (62)$$

где $l_{\text{эф}}$ – эффективная толщина излучающего слоя газов, м; k_r и k'_r – коэффициенты поглощения лучей трехатомными газами, 1/м, рассчитанные соответственно при средней температуре газов и при температуре стенки:

$$k_r = p_{\Sigma} \left(\frac{0,78 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_{\Sigma} l_{\text{эф}}}} - 0,1 \right) \left(1 - \frac{0,37 T_r}{1000} \right) , \quad (63)$$

$$k'_r = k_r \frac{1000 - 0,37 T_{\text{ст}}}{1000 - 0,37 T_r} .$$

Здесь p_{Σ} – суммарная объемная доля трехатомных газов в излучающей среде:

$$p_{\Sigma} = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} .$$

Эффективная толщина излучающего слоя в общем случае определяется формулой

$$l_{\text{эф}} = 3,6 V/F , \quad (64)$$

где V – объем излучающих газов; F – поверхность стен, ограничивающих излучающий объем.

В конкретных случаях общая формула (64) приводится к следующим выражениям:

при движении газов внутри труб

$$l_{\text{эф}} = 0,9 d_{\text{в}} ,$$

в межтрубном пространстве

$$l_{\text{эф}} = 0,9 d_{\text{н}} \left(\frac{4s_1 s_2}{\pi d_{\text{н}}^2} - 1 \right),$$

где $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{н}}$ – соответственно внутренний и наружный диаметр труб; s_1 и s_2 – продольный и поперечный шаг труб.

Применительно к насадке регенератора формула (64) преобразуется к виду

$$l_{\text{эф}} = 3,6 (1 - V_{\text{уд}}) / F_{\text{уд}}. \quad (65)$$

Обычно, проектируя регенераторы, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи вычисляют отдельно для верха и низа насадки, после чего полученные значения коэффициентов усредняют. В курсовом проекте допустим более простой подход, когда эти коэффициенты вычисляются один раз при средней температуре газов или воздуха.

16. Итоги теплового расчета рекуператоров и регенераторов

Расчетную поверхность нагрева определяют по уравнению:

$$F = \frac{Q_{\text{т}}}{k_{\text{ср}} \Delta t_{\text{ср}}}. \quad (66)$$

Отсюда непосредственно может быть найден расчетный объем насадки регенератора:

$$V_{\text{нас}} = F / F_{\text{уд}}. \quad (67)$$

Рассчитывают основные размеры регенератора:
площадь свободного поперечного сечения насадки

$$S_{\text{нас}} = V_{\text{в}} / u_{\text{в}}^0, \quad (68)$$

площадь полного поперечного сечения газотока регенератора

$$S_{\text{рег}} = S_{\text{нас}} / S_{\text{уд}}, \quad (69)$$

высота насадки регенератора

$$H_{\text{рег}} = V_{\text{нас}} / S_{\text{рег}}. \quad (70)$$

Здесь $u_{\text{в}}^0$ – скорость воздуха в насадке регенератора, приведенная к нормальным условиям; удельные величины $F_{\text{уд}}$ и $S_{\text{уд}}$ рассчитаны по формулам (46) и (48).

Для рекуператоров вычисляют площади свободного сечения для прохода воздуха и газов:

$$S_B = V_B / u_B^o, \quad (71)$$

$$S_r = V_r / u_r^o, \quad (72)$$

а затем по известным геометрическим соотношениям находят число труб в рекуператоре $n_{тр}$ и их максимальную длину $l_{тр}$:

$$n_{тр} = \frac{4S_{тр}}{\pi d_B^2}, \quad (73)$$

$$l_{тр} = \frac{F}{\pi d_{ср} n_{тр}}, \quad (74)$$

где $S_{тр}$ – площадь поперечного сечения параллельно включенных труб; d_B и $d_{ср}$ – соответственно внутренний и средний диаметры труб.

Далее уточняют число ходов при поперечном обтекании труб и, если требуется, корректируют тепловой расчет рекуператора.

На основе результатов теплотехнических расчетов стекловаренной печи, рекуператоров или регенераторов и других элементов студенты разрабатывают чертежи общих видов и отдельных узлов теплотехнологической установки. В разделе "Заключение" пояснительной записки обобщают результаты расчетов, дают оценки тепловой эффективности теплотехнологической установки и подводят итоги выполнения индивидуального задания.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение 1

Группа ЭТ-

Студент (фамилия,
имя)

З А Д А Н И Е **на курсовой проект** "Ванная стекловаренная печь"

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Производительность печи | $P_{\text{СТК}}$, т/ч |
| 2. Химический состав стекла: | |
| 3. Сырьевые материалы: | |
| 4. Температура варки стекла | $t_{\text{вар}}$, °C |
| 5. Температура отводимой стекломассы | $t_{\text{СТК}}$, °C |
| 6. Температура горячего воздуха | $t_{\text{в}}$, °C |
| 7. Коэффициент избытка воздуха | $\alpha_{\text{в}}$ |
| 8. Коэффициенты присоса холодного воздуха:
на входе в печь | $\Delta\alpha'_{\text{хв}}$ |
| на выходе из печи и за печью | $\Delta\alpha''_{\text{хв}}$ |
| 9. Топливо – природный газ из трубопровода | № |

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ (Ф. И. О.)
Подпись преподавателя

Расчетные характеристики природного газа различных месторождений

№ п/п	Плотность ρ_T , кг/м ³	Теплота сгорания Q_H^p , кДж/м ³	Стехиометрические объемы воздуха и продуктов горения, м ³ /м ³				
			V_B^o	$V_{CO_2}^o$	$V_{H_2O}^o$	$V_{N_2}^o$	V_r^o
1	0,837	35800	9,52	1,04	2,10	7,60	10,74
2	0,858	36810	9,74	1,06	2,13	7,79	10,98
3	0,786	36130	9,57	1,03	2,13	7,59	10,75
4	0,764	36090	9,58	1,02	2,14	7,60	10,76
5	0,772	36550	9,68	1,04	2,16	7,67	10,87
6	0,786	37020	9,81	1,06	2,18	7,78	11,02
7	0,799	37430	10,00	1,08	2,21	7,93	11,22
8	0,776	37310	9,91	1,06	2,20	7,84	11,10
9	0,733	35040	9,32	0,98	2,11	7,38	10,47
10	0,728	35630	9,47	1,00	2,14	7,49	10,63
11	0,751	36260	9,64	1,03	2,16	7,64	10,83
12	0,741	35130	9,32	0,98	2,10	7,39	10,47
13	0,766	35840	9,51	1,02	2,13	7,54	10,69
14	0,901	41450	10,95	1,22	2,35	8,68	12,25
15	0,766	37100	9,85	1,05	2,19	7,79	11,03
16	0,758	36720	9,73	1,04	2,18	7,70	10,92
17	0,789	36470	9,70	1,04	2,16	7,70	10,90
18	0,782	36890	9,81	1,05	2,18	7,77	11,00
19	0,776	37560	9,91	1,07	2,21	7,84	11,12
20	0,741	36470	9,68	1,03	2,17	7,66	10,86
21	0,883	38020	10,05	1,08	2,23	7,94	11,25
22	0,789	30980	8,26	0,87	1,86	6,66	9,39
23	0,712	35890	9,52	1,00	2,15	7,52	10,67
24	0,740	35510	9,45	1,00	2,12	7,49	10,61
25	0,722	35510	9,43	0,99	2,13	7,46	10,59
26	0,781	37310	9,96	1,07	2,21	7,88	11,16
27	0,776	37870	9,98	1,07	2,22	7,90	11,19
28	0,750	36590	9,72	1,04	2,18	7,69	10,91
29	0,832	38350	10,03	1,09	2,20	7,97	11,26
30	0,748	36680	9,74	1,04	2,18	7,70	10,92

**Физические свойства воздуха и дымовых газов
среднего состава ($\rho_{\text{CO}_2} = 0,13$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11$)**

Темпе- ратура, °C	Воздух			Дымовые газы		
	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·K)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·K)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	2,45	13,2	0,70	2,28	11,9	0,74
100	3,20	23,2	0,69	3,13	20,8	0,70
200	3,90	34,8	0,69	4,01	31,6	0,67
300	4,50	48,2	0,69	4,84	43,9	0,65
400	5,05	62,9	0,70	5,70	57,8	0,64
500	5,60	79,3	0,70	6,56	73,0	0,62
600	6,15	96,7	0,71	7,42	89,4	0,61
700	6,68	115	0,71	8,27	107	0,60
800	7,15	135	0,72	9,15	126	0,59
900	7,60	155	0,72	10,0	146	0,58
1000	8,05	177	0,72	10,9	167	0,58
1100	8,47	200	0,72	11,8	188	0,57
1200	8,87	223	0,73	12,6	211	0,56
1300	9,27	247	0,73	13,5	234	0,55
1400	9,64	273	0,73	14,4	258	0,54
1500	10,0	300	0,73	15,3	282	0,53
1600	10,4	327	0,74	16,3	307	0,52
1700	10,8	355	0,74	17,3	333	0,51
1800	11,2	384	0,74	18,2	361	0,50
1900	11,6	415	0,74	19,0	389	0,49
2000	11,9	448	0,74	19,9	419	0,49

Объемная теплоемкость газов и воздуха, Дж/(м³К)

(средняя в интервале температур 0...t)

Температура $t, ^\circ\text{C}$	C_{CO_2}	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	C_{N_2}	C_{O_2}	$C_{\text{в}}^{\text{сух}}$ (сухой воздух)	$C_{\text{в}}^{\text{вл}}$ (влажный воздух)
0	1600	1494	1295	1306	1297	1319
100	1700	1505	1296	1318	1301	1325
200	1787	1522	1300	1335	1308	1332
300	1863	1542	1307	1356	1318	1342
400	1930	1566	1316	1378	1330	1355
500	1989	1590	1328	1398	1343	1369
600	2042	1615	1340	1417	1357	1383
700	2089	1641	1354	1435	1371	1398
800	2131	1668	1367	1450	1385	1412
900	2169	1696	1380	1465	1398	1425
1000	2204	1723	1392	1478	1410	1438
1100	2235	1750	1404	1490	1422	1450
1200	2264	1777	1414	1501	1433	1462
1300	2290	1803	1425	1511	1444	1473
1400	2314	1828	1435	1521	1454	1483
1500	2336	1853	1444	1530	1463	1493
1600	2356	1876	1453	1538	1472	1502
1700	2374	1899	1461	1546	1480	1510
1800	2392	1921	1469	1554	1488	1518
1900	2408	1942	1476	1562	1495	1526
2000	2422	1963	1483	1569	1502	1533

Удельная теплоемкость шихтовых материалов, Дж/(кг·К)

(средняя в интервале температур 0...t)

Темпе- ратура t, °C	C_{SiO_2}	C_{CaCO_3}	C_{MgCO_3}	$C_{Na_2CO_3}$	$C_{Na_2SO_4}$
20	743	835	902	1060	901
100	800	875	925	1140	1015
200	867	980	955	1230	1140
300	921	1020	985	1310	1240
400	971	1037	1005	1370	1320
500	1030	1050	1063	1410	1380
600	1070	1080	1110	1440	1425
700	1083	1096	1167	1460	1460
800	1090	1105	1223	-	-
900	1100	1112	1278	-	-
1000	1110	-	-	-	-
1100	1112	-	-	-	-
1200	1117	-	-	-	-
1300	1130	-	-	-	-
1400	1133	-	-	-	-
1500	1138	-	-	-	-

Теплофизические свойства огнеупорных и теплоизоляционных материалов

Материал	Теплопроводность λ , Вт/(м · К)	Теплоемкость C_p , Дж/(кг · К)	Плотность ρ , кг/м ³	Предельная рабочая температура, °С
Динас	1,07+0,00093 <i>t</i>	795+0,335 <i>t</i>	>1900	1750
	0,81+0,00076 <i>t</i>		<1900	1700
	0,58+0,00043 <i>t</i>		1100	1500
Шамот	1,04+0,00015 <i>t</i>	837+0,264 <i>t</i>	>1900	1500
	0,70+0,00064 <i>t</i>		1900	1400
	0,61+0,00018 <i>t</i>		1300	1300
	0,35+0,00035 <i>t</i>		1200	1300
	0,28+0,00023 <i>t</i>		1000	1250
	0,21+0,00043 <i>t</i>		800	1200
Высокоглиноземистый	2,1 - 0,00062 <i>t</i>	835+0,250 <i>t</i>	2500	1900
	1,52-0,00018 <i>t</i>		2200	1600
Магнезитовый	6,2 - 0,0027 <i>t</i>	1050+0,145 <i>t</i>	2700	1700
	4,6 - 0,0012 <i>t</i>		2600	1650
Хромомagneзит	2,8 - 0,00087 <i>t</i>	754+0,15 <i>t</i>	3000	1750
Форстеритовый	3,3 - 0,0011 <i>t</i>	890+0,419 <i>t</i>	3000	1800
	1,63-0,00040 <i>t</i>		2500	1600
Циркониевый	1,3 + 0,00064 <i>t</i>	540+0,12 <i>t</i>	3300	2000
Цирконовый	2,1 - 0,00093 <i>t</i>	530+0,125 <i>t</i>	3200	1900
Кварцевый	6,8 + 0,0015 <i>t</i>	900+0,618 <i>t</i>	2200	1700
Карборундовый	5,2 - 0,0013 <i>t</i>	960+0,146 <i>t</i>	2000-2500	1500
Диатомитовый	0,27+0,00023 <i>t</i>	920	1100	900
	0,17+0,00035 <i>t</i>	850	750	900
Диатомовая засыпка	0,10+0,00028 <i>t</i>	—	500	700
Пеношамот	0,47+0,00051 <i>t</i>	837+0,264 <i>t</i>	800	700
Пенобетон	0,095	800	360	500
Шлаковая вата	0,065+0,00035 <i>t</i>	880	300	700

Пример компьютерной программы

(потери тепла варочной частью бассейна)

```

Program HeatLoss;
{$APPTYPE CONSOLE}
uses SysUtils, Walls in 'Walls.pas';
Begin
    Wall:=tWall.Create; //создается объект Wall
    Wall.InitialData; //задаются начальные параметры
    Wall.Results; //получены результаты вычислений
End.

UNIT Walls;
INTERFACE
const Si = 5.67e-8; //постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м2К4)
        Ewl = 0.9; //степень черноты стен печи
        Ton= 273.15; //температура, К, соответствующая 0°С
        Ta = 30; //температура атмосферного воздуха, °С
        Tak = Ta+Ton; //температура атмосферного воздуха, К
        Ta2 = Tak*Tak; //квадрат температуры атмосферного воздуха
type tTwal = array[0..5]of real; //температура на границе слоев
type tWall = class
    nwal: byte; //число слоев по толщине пода печи
    alw,kwal: real; //коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи
    fwal,qwal: real; //поверхность теплообмена и тепловой поток
    name: array[1..5] of string; //наименование выбранного огнеупора
    yw,law: array[1..5] of real; //толщина слоя, коэффициент теплопроводности
    tw: tTwal; //температура на границах слоев стенки
    Procedure InitialData;
    Procedure HotWall(var Qwal:real;var Tw:tTwal);
    Function fLa(Name:string;T:real):real;
    Procedure Results;
end;
var Wall: tWall; //объект типа tWall
    ff: text; //текстовый файл

IMPLEMENTATION
Procedure tWall.InitialData; //Исходные данные
var j: byte;
Begin
    nwal:=4; //число слоев по толщине пода печи
    Fwal:=40; //площадь пода и прилегающих стен варочного бассейна, м2
    Yw[1]:=0.02; Yw[2]:=0.4; Yw[3]:=0.12; Yw[4]:=0.06; Yw[5]:=0; //толщина пода, м
    Name[1]:= 'бакор'; //название материала первого слоя
    Name[2]:= 'шамот плотный'; //название материала второго слоя
    Name[3]:= 'пеношамот'; //название материала третьего слоя
    Name[4]:= 'фосфатоперлит'; //название материала четвертого слоя
    Tw[0]:=1200; //температура поверхности кладки в бассейне, °С
    for j:=1 to Nwal do Tw[j]:=Ta+(Tw[0] -Ta)/(Nwal+1); //...на границах слоев, °С
End;

```

```

Procedure tWall.HotWall(var Qwal:real;var Tw:tTwal); //Тепловой поток
var z,tkw,tw2,rwal: real;
    rw: array[1..5] of real;
    j: byte;
Begin
    if Kwal=0 then Kwal:=1; //коэффициент передачи, Вт/(м2К)
    repeat
        z:=Kwal;
        Rwal:=0;
        for j:=1 to Nwal do begin
            Law[j]:=fLa(Name[j],(Tw[j-1]+Tw[j])/2); //теплопроводность j-го слоя, Вт/(м.К)
            Rw[j]:=Yw[j]/Law[j]; //термическое сопротивление j-го слоя
            Rwal:=Rwal+Rw[j]; //суммарное термическое сопротивление стенки пода
        end;
        Twk:=Tw[nwal]+Ton; Tw2:=Sqr(Twk); //температура наружной поверхности, К
        //Коэффициент теплоотдачи к атмосферному воздуху, Вт/м2К
        Alw:=1.6*Sqr(Sqr(Tw[nwal]-Ta))+Ewl*Si*(Tw2+Ta2)*(Twk+Tak);
        Rwal:=Rwal+1/Alw; //суммарное термическое сопротивление теплопередачи
        //Температура на поверхности слоев обмуровки пода, °C
        for j:=1 to Nwal do Tw[j]:=(Tw[j-1]+(Ta-Tw[0])*Rw[j]/Rwal);
        Kwal:=1/Rwal; //коэффициент теплопередачи, Вт/(м2К)
        until Abs(1-z/Kwal)<0.0001;
        Qwal:=Kwal*(Tw[0]-Ta)*Fwal/1000; //Тепловой поток через под и стены бассейна
End;

Function tWall.fLa(Name:string;T:real):real; //Коэффициент теплопроводности,
// Вт/(м.К)
Begin
    if Name = 'бакор' then Result:=1.7+0.00257*T else
    if Name = 'шамот плотный' then Result:=1.04+0.00015*T else
    if Name = 'динасовый легковес' then Result:=0.56+0.00043*T else
    if Name = 'пеношамот' then Result:=0.418+0.00024*T else
    if Name = 'фосфатоперлит' then Result:=0.067+0.00012*T
    else Result:=0.065+0.00035*T //...шлаковата
End;

Procedure tWall.Results; //Результат вычислений
var j: byte;
Begin
    Assign(ff,'HeatLoss.txt'); Rewrite(ff); //имя файла для записи результатов
    HotWall(Qwal,Tw); //расчет тепловых потерь
    //Вывод результатов в файл
    Writeln(ff,' Температура внутренней поверхности пода Tglas =',Tw[0]:7:1,' °C');
    Writeln(ff,' Потери тепла стекломассой в бассейне Qwal =',Qwal:6:1,' кВт');
    Writeln(ff,' j Y, мм T, °C Материал слоев');
    for j:=1 to Nwal do Writeln(ff,j:3,Yw[j]*1000:9:0,Tw[j]:15:1,' ',name[j]);
    Close(ff);
End;
END.

```

Библиографический список

1. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: Учеб. для вузов / И. И. Перелетов, Л. А. Бровкин, Ю. И. Розенгарт и др.; Под ред. А. Д. Ключникова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.
2. Б а р е н б о й м А. М. и др. Тепловые расчеты печей и сушилок силикатной промышленности: Учеб. пособие / Под ред. Д. Б. Гинзбурга и В. Н. Зимина. – М.: Стройиздат, 1964. – 496 с.
3. Л е в ч е н к о П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1968. – 368 с.
4. М а т в е е в М. А. и др. Расчеты по химии и технологии стекла / М. А. Матвеев, Г. М. Матвеев, Б. Н. Френкель. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.
5. В о л г и н а Ю. М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов: Учеб. для техникумов. – М.: Стройиздат, 1982. – 276 с.
6. Б у л а в и н И. А. и др. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов: Учеб. для вузов / И. А. Булавин, И. А. Макаров, А. Я. Рапопорт, В. К. Хохлов. – М.: Стройиздат, 1982. – 248 с.
7. Г у щ и н С. Н. Теплотехника стекловаренных печей: Учеб. для вузов. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 1998. – 444 с.
8. К у з н е ц о в В. А. Высокотемпературные теплотехнологические установки: Учеб. пособие. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2001. – 76 с.
9. Высокотемпературные процессы в теплотехнологических установках: Метод. указания / В.А. Кузнецов, П.А. Трубаев, А.В. Трулев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 68 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Теплотехнологические процессы в стекловаренной печи	4
2. Выбор основных размеров и типа стекловаренной печи	7
3. Футеровка и тепловая изоляция стекловаренных печей	15
4. Конструктивное выполнение узлов стекловаренной печи	21
5. Горелочные устройства стекловаренных печей	24
6. Тепловые схемы стекловаренной печи	29
7. Материальный баланс и объемы технологических газов	30
8. Объемы и состав топливных газов	34
9. Тепловой баланс стекловаренной печи	36
10. Расчет тепловых потерь в стекловаренных печах	42
11. Состав и температура дымовых газов	45
12. Рекуператоры стекловаренных печей	47
13. Регенераторы стекловаренных печей	50
14. Тепловой расчет рекуператоров и регенераторов	54
15. Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи	56
16. Итоги теплового расчета рекуператоров и регенераторов...	60
Приложения	62
Приложение 1. Задание на курсовой проект	62
Приложение 2. Расчетные характеристики природного газа различных месторождений	63
Приложение 3. Физические свойства воздуха и дымовых газов среднего состава	64
Приложение 4. Объемная теплоемкость газов и воздуха.....	65
Приложение 5. Удельная теплоемкость шихтовых материалов	66
Приложение 6. Теплофизические свойства огнеупорных и теплоизоляционных материалов	67
Приложение 7. Пример компьютерной программы	68
Библиографический список	70

Учебное издание

Кузнецов Валерий Алексеевич

СТЕКЛОВАРЕННАЯ ПЕЧЬ

Учебное пособие

Подписано в печать	Формат 60х84/16.	Усл. печ. л. 4,2.	Уч.-изд. л. 4,5.
Тираж 80 экз.	Заказ	Цена	
Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46			