

Посвящается светлой памяти
профессора Степаненко М.Г.

**К ИСТОРИИ ОЦЕНКИ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ
ПРОЦЕССОВ МАССОТЕПЛООБМЕНА И
ТЕХНОЛОГИИ СТЕКЛОВАРЕНИЯ
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО
ЛИСТОВОГО СТЕКЛА
В РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВАННЫХ ПЕЧАХ**

Автор: к.т.н., с.н.с. И.С.Ильяшенко

Москва, 2021 г.

АННОТАЦИЯ

В статье дана современная оценка отечественных специалистов по проблеме взаимного влияния процессов массотеплообмена и технологии стекловарения на производительность и качество листового стекла в регенеративных ваннных печах. Автор отмечает большой объем научно-исследовательских работ, выполненных по этой теме профессором Степаненко М.Г. с сотрудниками на действующих промышленных ваннных стекловаренных печах производства листового стекла. Степаненко М.Г. рассматривал указанные типы ваннных стекловаренных регенеративных печей как единый технологический и тепловой агрегат. Он впервые разработал методику расчета теплоотдачи на шихту, которая она получает и поглощает сверху из газового пространства варочной зоны печи и снизу (под шихтой) от «сыпчного» потока стекломассы.

Учитывая важность и актуальность выполненных в то время научно-исследовательских работ Степаненко М.Г. с сотрудниками ГИС (Государственного института стекла), г. Москва, автор статьи считает возможным воспроизвести основные разделы из его книги [7] «Пути совершенствования ваннных стекловаренных печей», Москва, 1960 г. В заключение автором статьи делается попытка на примере действующей современной ваннной печи регенеративного типа оценить количественное взаимное влияние процессов массотеплообмена и стекловарение на производительность и качество листового стекла.

К сожалению, автор в ранее (в 2016 г.) опубликованной им на сайте ОАО «Институт стекла» (г. Москва) статье «К истории печной теплотехники процесса стекловарения» указанную выше проблему не рассматривал. Учитывая это, данную статью нужно считать как необходимое ее дополнение.

Ильяшенко И.С. окончил в 1956 году Московский энергетический институт (МЭИ) по специальности «Промышленная теплотехника». С 1970 г. по 1996 г. работал заведующим теплотехнической лабораторией, заведующим сектором теплотехники и экологии, ведущим научным сотрудником в Государственном научно-исследовательском институте стекла (ГИС) г. Москва и ОАО «Институт стекла» (г.Москва).

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени нет количественной оценки взаимного влияния процессов массотеплообмена и технологии процесса стекловарения на производительность и качество листового стекла в регенеративных ваннных стекловаренных печах.

Ранее были только известны общие важнейшие направления совершенствования технологических процессов производства стеклоизделий, которые являются высокотемпературными и осуществляются по сложному механизму. Далее кратко цитирую по книге профессора Ю.А.Гулояна «Эффективность технологических процессов в производстве стеклянных изделий», Москва, 1982 [1] следующее: «Рассмотрим некоторые способы повышения движущей силы технологических процессов производства стеклоизделий:

1. Основным средством ускорения химического взаимодействия в технологических процессах производства стекла является повышение температуры. Благодаря этому достигается ускорение силикатообразования при варке стекла.

2. В производстве стекла диффузионные явления играют важную роль. Именно ими определяется скорость стеклообразования при варке (растворение зерен кварца в расплаве силикатов).

3. Если приходится иметь дело с теплопереносом, от которого зависит ход всего процесса, то движущей силой являются температурные градиенты. Так, при варке стекла в пламенных печах повышение температурных градиентов между пламенным пространством и шихтой приводит к ускорению процессов стеклообразования».

В Институте стекла (ГИС) г. Москва, например, были выполнены научно-исследовательские работы [2], [3] по высокотемпературной варке стекла и характеру массообмена в крупногабаритной стекловаренной печи и его влиянию на процесс выработки, но в этих работах не было количественной оценки влияния массообмена и теплообмена на качество листового стекла. Также доказательством того, что до настоящего времени нет количественной оценки влияния процессов массообмена и теплообмена (в т.ч. в зоне сыпчного конвекционного потока стекломассы под шихтой) на качество листового стекла является утверждение авторов книги [4] «Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей» профессора Дзюзера В.Я., Швыдкого В.С.,

опубликованной в 2009 г. Они отмечают в разделе «Интенсификация конвекционных потоков расплава в зоне бассейна», что «повышение кратности циркуляции стекломассы в сыпчонном контуре является, с одной стороны наиболее эффективным способом воздействия на температуру расплава под кучами шихты, с другой — наиболее трудным в реализации управления конвекционными потоками стекломассы и предполагает детальное исследование внутреннего теплообмена и гидродинамики расплава». С этим высказыванием авторов этой книги трудно не согласиться. Именно поэтому, по мнению автора статьи, до настоящего времени не существует лучшей конструкции агрегата для варки стекла, альтернативного ванной регенеративной стекловаренной печи, созданной 150 лет назад немецким инженером Фридрихом Сименсом!

В связи с этой нерешенной проблемой, автор статьи не может не воспроизвести высказывание инженера Кузьмича Б.Ф., автора перевода книги Ламорта Ю. «Стекловаренные печи» [5] - «Процесс варки стекла, состоящий из варки, дегазации, гомогенизации и студки, как всякий другой, протекает во времени и пространстве. Понять и овладеть этими процессами, найти для них числовые выражения — значит найти ключ к вопросу о производительности, самому важному, поскольку к. п. д. печи чрезвычайно низок и еще «стекловаренная печь не может сравниваться ни с мартеновской, ни с любой нагревательной печью, так как в этих печах узловые вопросы исчерпываются в основном достижением температуры. Стекловаренная печь, как сказано, есть не только прибор для достижения температуры, но и прибор для варки стекла».

Конечно, необходимо отметить, что упоминается период 30-40 гг. прошлого века в бывшем СССР и мире. Но эта проблема актуальна и в настоящее время! Тем не менее, существует количественная связь процессов стекловарения и массотеплообмена на качество листового стекла в стекловаренных печах, в т.ч. под шихтой и выработочном канале. По мнению профессора Панковой Н.А. [6] - «Известно несколько вариантов количественной оценки гомогенизирующей способности печи. Эффективность усреднения стекломассы можно характеризовать величиной отношения количества движения конвекционного и выработочного потоков к количеству движения выработочного потока:

$$K = (K_k + K_b)/K_b$$
$$K = (V_k/V_b)^2(h_b/h_k) + 1 \quad (1)$$

где K — коэффициент потока;

K_k, K_v — количество движения в конвекционном и выработочном потоке, кг м/ч;

V_k, V_v — скорость конвекционного и выработочного потока, м/час;

h — глубина потока, м.

Для сыпчного цикла $K = 518$, а для выработочного потока $K = 216$.

Это означает, что интенсивность гомогенизации в сыпчном цикле практически в 2 раза выше».

Таким образом, из всего упомянутого выше можно сделать вывод, что конвекция потоков стекломассы в регенеративных стекловаренных печах листового стекла и другой стеклопродукции определяется температурами этих конвекционных потоков, которые в конечном итоге являются результатом сложного процесса тепломассообмена между потоками расплава стекломассы сверху и снизу слоя шихты в варочной и выработочных зонах печи.

К истории исследований и расчетов процессов стекловарения и тепломассообмена в действующих регенеративных печах производства листового стекла

Одним из выдающихся (по мнению автора) пионеров по организации и проведению научно-исследовательских работ по изучению процессов тепломассообмена на действующих промышленных регенеративных стекловаренных печах является профессор Степаненко М.Г. Он руководил теплотехнической лабораторией ГНИИС (ГосНИИстекла) г. Москва с конца 30-х до середины 60-х гг. прошлого века. Результаты этих работ лаборатории содержатся в его книге [7] - «Пути совершенствования ваннных стекловаренных печей», г. Москва, 1960 г. В книге освещаются явления теплообмена в ваннных стекловаренных печах различных типов и способы отопления. Освещены эффективные способы питания печей, рациональное распределение технологических зон в крупных промышленных печах и влияние на их работу заградительных устройств и др. Однако основным достоинством работ, выполненных Степаненко М.Г., является разработанная им методика расчета теплоотдачи на шихту, которую она получает и поглощает сверху из газового пространства варочной зоны печи и снизу от сыпчного потока стекломассы под ней. Расчеты этих тепловых потоков (удельных) на шихту сверху и снизу основываются на

практических измерениях температур расплава в действующих промышленных печах. Эта методика позволяет определить основные размеры варочной зоны печи, а в дальнейшем основные размеры регенеративных ванн стекловаренных печей.

Необходимо отметить, что эта методика применима и в настоящее время, о чем будет сказано ниже при оценке тепловой и технологической работы современных действующих стекловаренных печей для производства полированного листового стекла методом «флоат-процесса».

Ценность этой методики, разработанной профессором Степаненко М.Г., состоит в том, что при ее использовании можно определить расходы конвекционных потоков стекломассы под шихтой и скорость сыпчонного потока стекломассы и тем самым оценить качество стекломассы (ее гомогенизацию), по методике, как было показано выше, в работе профессора Панковой Н.А. [6]. Поэтому здесь целесообразно воспроизвести методику Степаненко М.Г. [7], стр. 59.

«Количество тепла, излучаемого пленкой расплава на лежащую под ней шихту, равно:

$$q = \Sigma C_q (T/100)^4, \text{ ккал/м}^2\text{час} \quad (2),$$

где: $C_q = 4,88 \text{ ккал/м}^2\text{час град. К}$

Σ — коэффициент излучения (степень черноты) расплава, определенный рядом измерений [13] и равный 0,87.

Температуру на нижней границе пленки расплава, как показано на рис. 3, можно принимать 1190°C , тогда $q = 200000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$.

С другой стороны, через пленку расплава передается тепло:

$$q^1 = \frac{\lambda_{\text{сум}}}{\delta} \Delta t \text{ ккал/м}^2\text{час} \quad (3),$$

где: $\lambda_{\text{сум}} = 23^* \text{ ккал/м}^2\text{час}$ (см. рис. 7)

* В указанное значение $\lambda_{\text{сум}}$, входит и теплопроводность, т.е. передача тепла излучением.

Где: $\delta = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$

по измерениям $\Delta t = 90^\circ\text{C}$ (в среднем), тогда:

$$q^1 = \frac{23,2}{0,01} \times 90 = 200000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$$

Так как процесс теплообмена через пленку расплава стационарен, $q = q^1$, что и подтверждается расчетом».

Эта методика, предложенная Степаненко М.Г., по мнению автора статьи, позволяет избавиться от сложного расчета теплообмена между газовым пространством печи и поверхностью шихты.

Можно также проверить полученный по методике Степаненко М.Г. тепловой поток, равный $q^1 = 200000$ ккал/м²час.

По методике профессора Конакова П.К. [8], [9], разработанной позже для сложного теплообмена в полупрозрачных тонких слоях при условии, когда $KS < 2$, где: K — коэффициент поглощения среды, см⁻¹, а S — толщина слоя среды, м.

В нашем случае, коэффициент поглощения стекломассы равен $K = 0,3$ см⁻¹, а толщина слоя, принятая Степаненко М.Г., равна $S = 0,01$ м. При этих условиях соотношение $0,3 \cdot 1 < 2$ выполнено и можно считать теплообмен в тонком слое стекломассы как сумму независимых друг от друга тепловых потоков теплопроводностью и излучением.

Тогда тепловой поток теплопроводностью будет равен:

$$q_{\lambda} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t = \frac{2}{0,01} \times 90 = 18000 \text{ ккал/м}^2\text{ч}$$

где: λ — теплопроводность стекломассы при $t_c \sim 1250^\circ\text{C}$ равна [10] $\lambda = 2$ ккал/м час^{°C};

δ — толщина слоя стекломассы (по Степаненко М.Г.) равна $\delta = 0,01$ м;

Δt — перепад температур в слое стекломассы равен $0,01$ м, $\Delta t = 90^\circ\text{C}$.

Тепловой поток излучения в тонком слое стекломассы:

$$q_{\text{изл}} = E_{\text{пр}} C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] =$$

$$= 0,9 \times 4,96 \{[(1255 + 273)/100]^4 - [(800 + 273)/100]^4\} = 186000 \text{ ккал/м}^2\text{час},$$

где: $E_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты слоя стекломассы и шихты;

C_0 — 4,96 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, ккал/м²час^{°K};

T_1 — средняя температура слоя стекломассы (по Степаненко М.Г.);

T_2 — средняя температура слоя шихты (по Степаненко М.Г.).

Таким образом, суммарный удельный тепловой поток через слой стекломассы:

$$q_{\text{сум.}} = q_{\lambda} + q_{\text{изл.}} = 18000 + 186000 = 204000 \text{ ккал/м}^2\text{час},$$

мало отличается от величины теплового потока, рассчитанного по методике Степаненко М.Г., и равный: $q = 200000$ ккал/м²час.

Продолжаем воспроизводить методику Степаненко М.Г., «чтобы обеспечить тепловой поток, направленный на шихту снизу на глубине 0,1-0,2 м под зеркалом, необходимо создать определенный температурный перепад между конвекционным потоком, имеющим стабильную температуру при стационарном процессе теплообмена, и относительно неподвижным «эндотермическим слоем» шихты.

Для расчета используем формулу потока тепла через теплопрозрачную среду:

$$q^{11} = 1,15 \frac{C_q [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]}{A \left(\frac{1}{2} + KS^1 h \right)} = 80000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$$

где: 1,15 — коэффициент, учитывающий конвекцию;

$C_q = 4,88 \text{ ккал/м}^2\text{час град.К}$;

T_1 — температура излучающего слоя стекломассы в град. К;

T_2 — температура пограничного слоя шихты, воспринимающей тепловой поток от «нижней» стекломассы, равная 800°C ;

A — коэффициент сопротивления при входе лучистой энергии в прогретую шихту, равный 0,5;

KS^1 — коэффициент поглощения стекломассы;

h — толщина слоя, отделяющая шихту от стекломассы, принимается равной 0,12 м.

Значение $q^{11} = 80000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$ составляет 40% от теплового потока «сверху», принимаемого равным $\sim 200000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$.

Подставляя значение параметров для шихты оконного стекла получаем, что температура теплоотдающего слоя стекломассы лежит в пределах $1250-1260^\circ$.

Эти значения совпадают с результатами непосредственного измерения [13]».

Нужно здесь отметить, что проверочный расчет q^{11} , выполненный автором статьи показал, что Степаненко М.Г., принимал коэффициент поглощения стекломассы равный $KS^1 = 10$ при ее толщине равной $h = 0,12 \text{ м}$, что не совсем совпадает с данным коэффициентом поглощения стекломассы оконного стекла с рис. 1¹ в его книге [7] стр. 62.

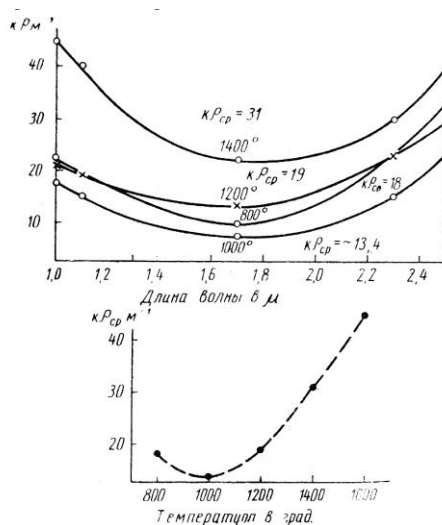


Рис. 1¹. Значение KS^1 для листового стекла

Но замечание Степаненко М.Г. о том, что температура слоя стекломассы подтверждается непосредственными измерениями [15], не вызывает никаких сомнений.

Важно отметить, что Степаненко М.Г. с сотрудниками теплотехнической лаборатории, прежде чем предложить методику расчетов для определения удельных тепловых потоков, воспринимаемых шихтой «сверху» (из газового пространства варочной зоны печи) и «снизу» (от конвекционного сыпчного потока расплава стекломассы), провели большой объем исследований и измерений на действующих регенеративных печах (с поперечным отоплением), а также изучили имеющиеся методики расчета сложного теплообмена между газовым пространством печи и шихтой. Также нужно отметить, что Степаненко М.Г. рассматривал стекловаренную печь как тепловой агрегат, который обеспечивает необходимый технологический процесс производства (в данном случае) листового стекла необходимого качества.

В связи с этим, автор данной статьи считает необходимым воспроизвести основные разделы книги Степаненко М.Г. «Пути совершенствования ваннных стекловаренных печей», которые позволили автору этой книги разработать указанную выше методику.

СТЕКЛОВАРЕННАЯ ПЕЧЬ КАК ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ

Как и всякая печь, в которой происходит термический процесс, стекловаренная печь представляет собой аппарат для теплообмена, где тепло печных (пламенных) газов

или электроэнергия, преобразованная в тепло, переходит на шихту и бой, загружаемые в печь, превращая их в однородный расплав — стекломассу.

В обычных ваннных печах пламенные газы образуются в верхнем строении, ограниченном сводом, стенами и стекломассой. Источником их является топливо (газообразное и жидкое), подаваемое горелками, непосредственно соединенными с рабочей камерой печи.

Тепло, выделяющееся пламенными газами, за вычетом потерянного через ограждения, в основном, передается вниз, на стекломассу (шихту, пену, открытое зеркало) для осуществления процесса стекловарения.

Таким образом, процесс теплообмена в печи определяется, с одной стороны, теплообменом в газовой сфере, а с другой — теплообменом в самой стекломассе и в пограничной зоне тепловосприятости стекломассой (ее поверхностью), на которой расположены в порядке следования технологического процесса: куча шихты, полурасплавленные остатки ее, варочная пена, рафинажная пена и, наконец, чистое зеркало. Каждый из этих промежуточных этапов обладает своими резко различными теплофизическими параметрами, обуславливающими интенсивность процесса теплообмена.

Таким образом, теплообменные процессы, проходящие в ваннных печах, представляют собой сложный взаимозависимый комплекс явлений, которые возникают в газовой сфере, затем протекают на границе между ней и стекломассой (или шихтой) и заканчиваются в самой стекломассе. Различие в свойствах этих сред, в которых протекают тепловые процессы и происходит организация соответствующих теплоносителей (топливо, электроэнергия), требуют внимательного и детального исследования локальных условий, определяющих благоприятное развитие теплообмена.

Поэтому в последующем изложении сначала рассматривается теплообмен в газовой среде (в печном пространстве), в которой в обычных случаях организуется первичный теплоноситель — пламенные газы, затем уже теплообмен в стекломассе; своеобразная, отличная от типовой, схема теплообмена при наличии электрообогрева рассматривается в специальной главе.

Изучение газовой среды — печного пространства — обязывает решить вопросы рационального питания печи топливом и организации соответствующего процесса горения, что обуславливает исследование работы и конструкции горелок для

газообразных и жидких топлив, а также теплообменников (генераторов и рекуператоров), от тепловой характеристики которых в значительной мере зависят свойства печных газов как теплоносителей.

Вместе с тем существенную роль в теплообмене в газовой среде и на границе газ-шихта, газ-стекломасса играют метод подачи шихты в печь и ее состояние, а также распределение ее по площади варочного бассейна, т.е. в сферу рассмотрения данной главы должна войти и организация зеркала, «картограмма зеркала стекломассы», определяющая характер и степень использования площади бассейна печи.

Теплообмен в стекломассе неизбежно предполагает связь тепловой характеристики с ее свойствами как жидкости; теплообмен стекломассы как горячего расплава через стенки и дно бассейна определяет явление конвекции, весьма существенно влияющее на необходимый процесс студки (и выработки), а также на величину теплового к.п.д. и частично на технологические параметры (качество вырабатываемой стекломассы).

Теплообмен в газовой среде

Предварительные сведения

В классических стекловаренных печах, имеющих газопламенное отопление, основное количество тепла, как известно, передается излучением пламенных (печных) газов и раскаленной кладки верхнего строения печи.

Излучение кладки печи играет весьма важную роль и тем большую, чем меньше излучательная способность печных газов, в которых двухатомные газы (CO_2 , H_2O , SO_3) обладают так называемым селективным излучением, а частью вообще прозрачны для тепловых лучей (O_2 , N_2).

Перемещаясь в печном пространстве, газы, естественно, передают тепло с помощью конвекции. Однако скорости их малы и не превышают в среднем 1-4 м/сек, так что конвективная слагаемая в процессе теплообмена играет скромную роль. Принято считать, что не менее 85-95% тепла в ваннных печах передается излучением, которое и составляет в необходимых случаях (проектирование, проверка работы печной установки, исследование теплообмена) объект теплового расчета.

При расчете теплообмена в печном пространстве, наполненном газами указанной характеристики, основной трудностью является определение эффективной

температуры факела (пламени); еще большие затруднения испытывают при расчете зонального теплообмена, который как раз и имеет место в стекловаренных ваннных печах. Имеется несколько формул для вычисления указанной температуры (Поллак, Тимофеев, Захариков), которые, однако, недостаточно точны, так как в них не учитывается неравномерность в распределении температуры по вертикали (в факеле) и наличие лучепоглощающих компонентов (сажа, CO_2 , H_2O , SO_3).

Так как эффект излучения пропорционален разности четвертых степеней температур, то очевидно, что основным фактором интенсификации теплообмена является температура излучателя (газов, поверхности кладки), которую и стремятся иметь наиболее высокой за счет повышения теплотворной способности топлива¹ Q^H_p , полноты его горения, подогрева воздуха и горючего (генераторные газы) с учетом устойчивости огнеупоров, составляющих кладку печного пространства.

На рис. 1 даны зависимости между величиной теплового потока, направленного из печного пространства на шихту и свободное зеркало стекломассы, и температурой шихты; принимается, что поверхность плавящейся шихты имеет постоянную температуру в интервале от 1180 до 1270° [12], зеркало — 1400 и 1350°. Кривые построены на основе расчета теплообмена, предложенного Захариковым [13, 14], причем приняты:

$$a_{\phi} = 0,3; T_{\phi}^4 = 0,54; T_y^2 T_{\phi}^2; a_{ст} = 0,94; a_{ш} = 0,9$$

$$\alpha_{\phi} = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ ккал/м}^2\text{час град К,}$$

где: T_{ϕ} — эффективная температура факела, град. К;

T_y — температура отходящих газов, град. К;

T_{ϕ} — теоретическая температура пламени, град. К;

a_{ϕ} , $a_{ст}$, $a_{ш}$ — коэффициенты излучения соответственно факела, стекломассы и шихты.

Анализ кривых обнаруживает простую зависимость между увеличением теплового потока и ростом температуры. Вместе с тем получается, что на каждые 10°С возрастания T_{ϕ} тепловой поток на свободное зеркало (с температурой 1400 или 1350°С) увеличивается на 4000 ккал/м²час, что составляет примерно 10%; кроме того, теплообмен с шихтой растет более форсировано — на 6000 ккал/м²час на каждые 10°С, что составляет ~ 6%. Так как основная тепловая работа происходит в зоне плавления

¹ До известного предела, после которого увеличение не изменяет температуру излучателя.

шихты, то, следовательно, целесообразно повышать температуру в печном пространстве именно на этом участке.

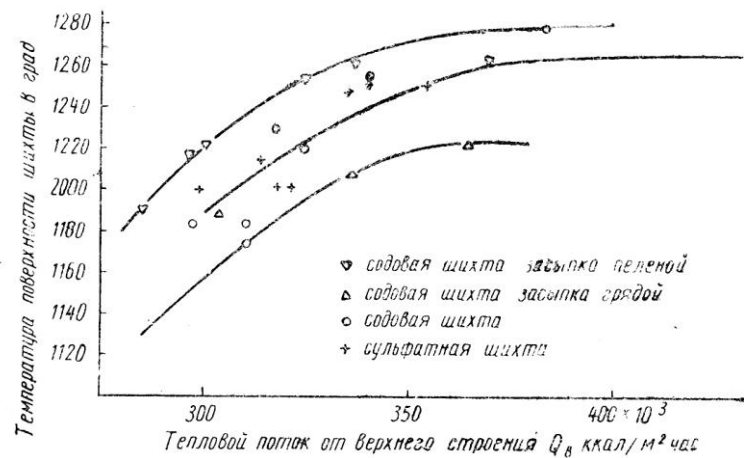


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности шихты от величины теплового потока

Если исходить из положения, что на варку стекла приходится 2/3 всей тепловой энергии, а на осветление 1/3 [15] и принять соотношение между площадями, занятыми плавящейся шихтой и пеной², и свободным зеркалом в размере 2:3, что наблюдается в интенсивно работающих печах, то указанное распределение температур (1200-1250°C на шихте и 1350-1400°C на поверхности пены и зеркала) примерно отвечает приросту тепловых потоков.

Вместе с тем рис. 1 показывает, что выгодно держать в зоне шихты температуру примерно такую же, как и в зоне осветления. Однако в ваннных печах с обычным методом отопления и загрузкой шихты температура стекломассы, отделенной от печного пространства слоем шихты или пены, неизбежно значительно ниже, что, в частности, является причиной возникновения весьма полезного конвекционного потока сыпчного цикла. В зоне куч шихты происходит максимальное тепловосприятие, вследствие которого возникает неизбежное снижение температуры печного пространства, значительно большее, нежели в последующих зонах варочного бассейна. Поэтому выравнивать температуру между зоной сыпки и началом зоны пены, где обычно расположен максимум температуры, практически очень трудно. Это может явиться фактором интенсификации работы ванной печи лишь в том случае, если будет

² Пенной считают сваренную стекломассу, содержащую лишь остатки зерен кремнезема и газовые пузырьки и подлежащую осветлению.

достигнуто необходимое распределение температур по всей длине отапливаемого бассейна.

Следовательно, повышение температуры печного пространства (T_{ϕ}) на 10°C по обеим зонам увеличивает тепловой поток в среднем на 6-7%. Поскольку тепловой к.п.д. печи при этом возрастает, можно сделать вывод, что повышение температуры в печи на 1°C обуславливает увеличение полезной работы (съемы) на 0,7-0,8%. Такое соотношение было неоднократно отмечено в литературе [16,17].

Таким образом, теплообмен в отапливаемом печном пространстве при заданных технологических параметрах будет определяться температурой пламени (эффективной температурой факела), зависящей от его характеристики (степени излучения, степени заполнения ими печного пространства), а также от коэффициента излучения огнеупора и от распределения температуры по площади зеркала. Соблюдение всех этих условий, а также возможность интенсифицировать теплообмен будут зависеть от организации процесса горения и степени его завершения в печном пространстве.

Организация пламени³

При организации пламени, т.е. выделении максимально возможного количества тепла за счет горения вводимого топлива, должны быть соблюдены два основных условия.

Первое условие заключается в том, чтобы процесс горения был экономичным, т.е. до конца использовалось бы все потенциальное тепло, заключенное в топливе. Это требование предусматривает полное отсутствие горючих компонентов в отходящих газах, однако при этом резко снижается интенсивность излучения пламени (a_{ϕ}) на всей его длине, обусловленная присутствием в пламени частичек углерода. Однако можно так организовать процесс горения, что пламя, имея на всем своем пути в печном пространстве недогоревшие частицы углерода, будет обладать большей величиной a_{ϕ} и обусловит более интенсивный теплообмен между шихтой и стекломассой, оправдывая тем самым перерасход горючего. Попытки таким образом повысить производительность имели место в печах с диффузным пламенем Вильямса, однако

³ См. также статью Ильяшенко И.С. «Организация оптимального процесса сжигания топлива в ваннах стекловаренных печах регенеративного типа», журнал «Стекла Мира», № 2, 2008 г., с. 68-76, на сайте АО «Институт стекла» г. Москва

такие печи распространения не получили. Более выгодным оказалось использование температурного фактора (T_{ϕ}), возрастающего при полном горении.

Второе требование, отчасти связанное в процессе выполнения с первым, относится к распределению температуры по ходу (длине) факела.

Как известно, ваннные печи (исключая ванны малых размеров) обычно отапливаются при помощи системы отдельных факелов, которые пересекают печное пространство в горизонтальной плоскости в нескольких сечениях. При поперечном пламени каждый факел проходит над стекломассой в какой-либо одной зоне, поэтому требуется одинаковая температура образующихся при горении печных газов. При подковообразном пламени направление факела параллельно ходу технологического процесса и поэтому температура его должна соответственно меняться.

В идеальном случае все печное пространство над стекломассой может быть заполнено пламенем, в котором температура изменяется только в одном направлении — по ходу технологического процесса. Однако практически получается совсем другое: ряд параллельных факелов (печи средней и большой производительности), имеющих форму веретена с неравномерной температурой во всех трех измерениях, причем эти факелы разброшены продуктами горения.

Такая обстановка в сильнейшей мере затрудняет как расчет теплообмена, так и полное использование площади (и объема) отапливаемого бассейна, снижая его к.п.д.

Оптимальное использование площади можно наблюдать в рекуперативных печах с двойным сводом, а также в печах прямого нагрева, в которых благодаря своеобразной конфигурации бассейна (длинные узкие бассейны) и применению специальных горелок наилучшим образом используется площадь стекломассы при наиболее равномерном температурном распределении поперек бассейна.

Отсюда вытекает, что от конструкции и режима работы горелок зависит степень теплотехнического совершенства работы ванной стекловаренной печи.

В практике проектных организаций до сих пор существует критерий для расстановки горелок по длине бассейна, основанный на степени покрытия пламенем зеркала. Под этой степенью подразумевается отношение суммы площадей горизонтальных проекций факелов на зеркало, выраженное в процентах от общей площади.

Однако нетрудно заключить, что этим методом, в сущности говоря, не удастся достигнуть цели и им пользоваться нельзя; неправильность подобного критерия

хорошо иллюстрирована работой Захарикова [14]. При наличии нескольких горелок одна из них может не работать, и тем не менее на этой площади зеркала возможно получить необходимые тепловые напряжения.

Организация зеркала стекломассы

Теплообменом между печным пространством (газовой средой, сводом и стенами верхнего строения бассейна) начинается первый этап тепловой работы печи как технологического агрегата; шихта, поступающая в том или ином виде в бассейн, начинает превращаться в стекломассу, проходя через все фазы процесса, стекловарения, если она до этого не подвергалась термической обработке.

Рассматривая процесс теплообмена, остановимся сначала на типичном случае: в ванну загружается обычная холодная порошкообразная шихта и бой. Разделим условно превращение шихты в стекломассу на три стадии: куча шихты (вне зависимости от ее размеров и способа подачи в печь), варочная (шихтная) пена (расплав) и проваренная стекломасса (чистая поверхность, зеркало).

Следует указать, что вопрос теплообмена между печным пространством и шихтой и ее последующими модификациями (расплав, пронизанный пузырьками, дегазированная стекломасса) является, в сущности, весьма мало изученным. При изучении как стекловаренных печей, так и ваннных печей другого назначения (например, мартеновских, различных плавильных печей и т.п.) внимание исследователей привлекал процесс теплообмена между пламенем (или сводом печи) и поверхностью (зеркалом) расплава, причем рассматривалось отчасти и проникновение тепла в глубину.

При этом оценивались влияние свойств факела (светящегося и не светящегося), его «геометрия» и расположение в печном пространстве (у нас — Н.А.Захариков, Д.Б.Гинзбург, М.А.Глинков, за рубежом — В.Тринкс, Р.Шерман, А.Шакк, Г.Коста и др.). Однако в их работах не дифференцировано явление теплообмена по стадиям превращения тепловоспринимающего материала шихты, несмотря на то что его свойства сильно меняются в процессе стекловарения [26].

Визуальное наблюдение показывает, что зона бассейна, в которой происходит процесс варки, является гетерогенной по своей технологической характеристике. В начале ее, в области сыпчонного кармана плавают кучи или ряды свежезагруженной шихты, затем эти кучи покрываются жидкой пленкой расплава; по мере их

исчезновения среди густой шихтной пены остаются маленькие «огарки» шихты, далее получается уже шихтная (варочная) пена, оканчивающаяся в зоне чистого зеркала.

Шихтная пена (расплав, богатый пузырьками), распространяясь, занимает площадь между кучами (грядами) шихты. Таким образом, организуется своеобразная «картограмма» зеркала, отдельные части которой по разному воспринимают тепло. Естественно, что общий эффект теплообмена на всей площади отапливаемого бассейна будет зависеть от того, какая часть ее занята шихтой, пеной и чистой (проваренной) стекломассой [29].

Следовательно, здесь имеется сложный механизм передачи тепла, который еще не вскрыт с достаточной полнотой и точностью [14].

Уже через 1-2 мин. после загрузки в печь шихта покрывается сплошной пленкой жидкой фазы за счет слияния отдельных образующихся капелек расплава. Толщина этой пленки, пронизанной газовыми пузырьками, не превышает 10 мм; под ней находится сыпучая шихта, постепенно вовлекаемая в расплав, по мере стекания верхнего, наиболее подвижного, ранее образовавшегося слоя.

Через 15-30 мин.⁴ (при продольно-грядовой или «одеяльной» засыпке) гряды или сплошная пелена шихты разбиваются на отдельные кучки, чему очень способствует попеременная загрузка шихты и боя.

Еще через 15-30 мин. Кучи полностью расплавляются, оставляя пену. Пенистый расплав — шихтная пена, содержащая еще зерна нерастворенного песка, стекая с куч и гряд, занимает свободную площадь зеркала; распространяясь вперед и оконтуривая зону арки, пена имеет только лишь газовые пузырьки.

Глубинные пробы стекломассы, взятые под слоем шихты, даже в загрузочном кармане уже не содержат газовых включений и имеют высокую гомогенность [23]. Это свидетельствует о том, что все процессы варки стекла, вплоть до осветления и гомогенизации, заканчиваются в зоне варки [24]; при этом реакции силикатообразования протекают на поверхности куч шихты.

Температуры поверхности куч шихты определяются главным образом интенсивностью теплового потока из печного пространства [14]. Угол наклона поверхностей куч (гряд) также оказывает влияние, а абсолютные размеры и время

⁴ Эти промежутки времени характерны для температур в области загрузочного кармана в пределах 1380-1400°С.

пребывания их в печи не играют роли: на поверхности больших куч и исчезающих «огарков» шихты средняя температура одинакова.

Такая стабильность легко объясняется динамическим равновесием между скоростью стекания жидкой пленки (расплава) и образованием новой за счет поглощенного тепла. При стабильном тепловом потоке от печного пространства средняя температура стекающего расплава практически постоянна, что свидетельствует о стационарном режиме теплопередачи.

Зависимость количества поглощаемого шихтой тепла от величины падающего на нее теплового потока приведена на рис. 2. В этой зависимости учтены как способ загрузки шихты (грядой и пеленой), так и ее состав (содовый и сульфатный).

В приводимой зависимости величина теплового потока, падающего из печного пространства (от пламени, свода, стен), заменяется его эффективной температурой: в этом случае исключается такой неопределенный фактор, мешающий сопоставлению, как светимость факела и его конфигурация.

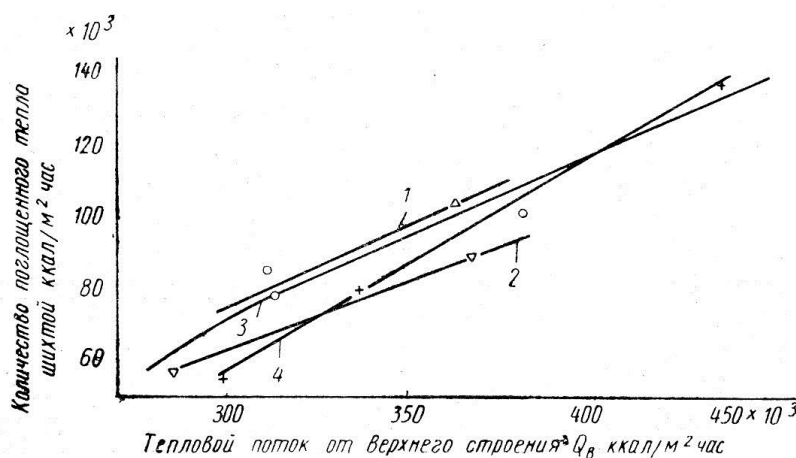


Рис. 2. Количество поглощенного шихтой тепла в зависимости от теплового потока из печного пространства
 1 — содовая шихта, засыпка грядой; 2 — содовая шихта, засыпка пеленой; 3 — содовая шихта; 4 — сульфатная шихта

Из сопоставления рис. 1 и 2 видно преимущество грядовой загрузки перед сплошной (пеленой), в последнем случае температура поверхности шихты на 30° выше, а количество поглощенного тепла на $15000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$ (или на 15%) меньше.

Кроме того, важно отметить, что увеличение теплового потока сверх $350000 \text{ ккал/м}^2\text{час}$ незначительно отражается на температуре поверхности шихты, достигающей при содовой составе 5-компонентной шихты $1240\text{-}1280^\circ$.

В этих условиях тепловой поток, не встречая значительного термического сопротивления, повышает нагрев (температуру) нижележащих слоев. Доказательством тому служит (см. рис. 2) увеличение количества тепла, поглощенного шихтой (сульфатный состав) на 30% при увеличении интенсивности теплового потока всего на $\sim 13\%$: с $400 \cdot 10^3$ ккал/м²час.

Шихта является хорошим отражателем; однако малая ее теплопроводность (см. далее рис. 7) приводит к быстрому нагреву поверхностного слоя. При появлении жидкой фазы скорость передачи тепла резко увеличивается.

Если толщина пленки расплава на куче равна примерно 10 мм, перепад температур между верхней и нижней ее поверхностями составляет $85-120^\circ$ [13]; сыпучая часть шихты, находящаяся еще ниже, имеет предельную температуру $600-700^\circ$.

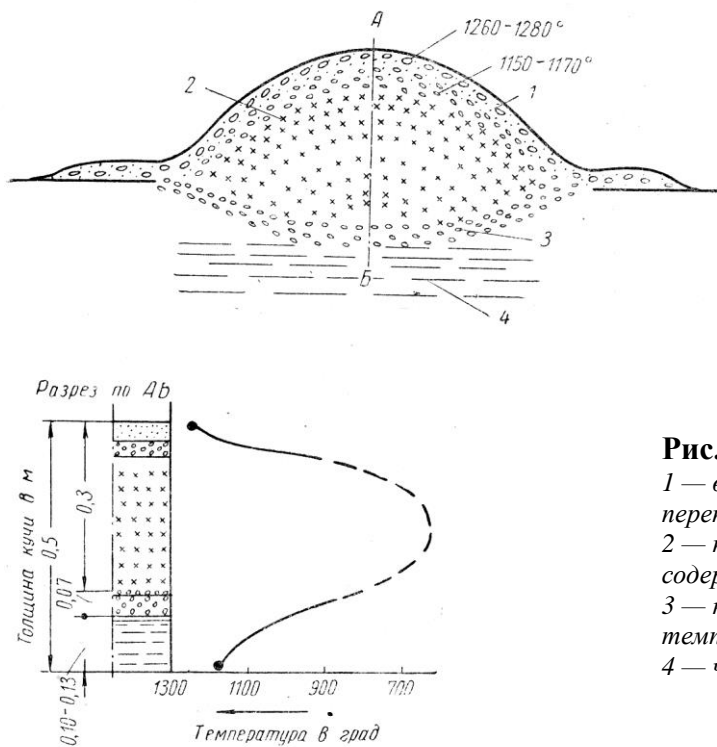


Рис. 3 Схема нагрева кучи шихты

- 1 — верхний эндотермический слой с перепадом температур $150-200^\circ$;
- 2 — порошкообразная шихта с минимальным содержанием жидкой фазы;
- 3 — нижний эндотермический слой с перепадом температур $100-150^\circ$;
- 4 — чистая стекломасса ($t=1150-1250^\circ$)

Схема распределения температуры в вертикальном разрезе загруженной кучи шихты после образования расплава и эндотермического слоя приведена на рис. 3.

Таким образом, процессы силикатообразования (за исключением полного растворения зерен кремнезема) протекают в расплаве в интервале температур $800-1280^\circ$ и практически сравнительно мало зависят от температуры печного пространства, а скорость процесса варки (производительность зоны варки), в основном, определяется

и лимитируется процессами теплопередачи, воздействующими на расплав-кучу сыпучей шихты со стороны печного пространства и стекломассы, находящейся под кучей⁵.

Отсюда вытекает влияние масштабного фактора, не позволяющего прямо переносить результаты наблюдения за процессом варки небольших количеств шихты (в лабораторных тиглях, горшках и т.п.) на процесс стекловарения в ваннных печах, где объемы стекломассы и поверхность зеркала замеряются десятками квадратных и кубических метров. Этим объясняется значительное расхождение в результатах определения зависимости между, например, скоростью варки и температурой, полученной различными экспериментаторами [13].

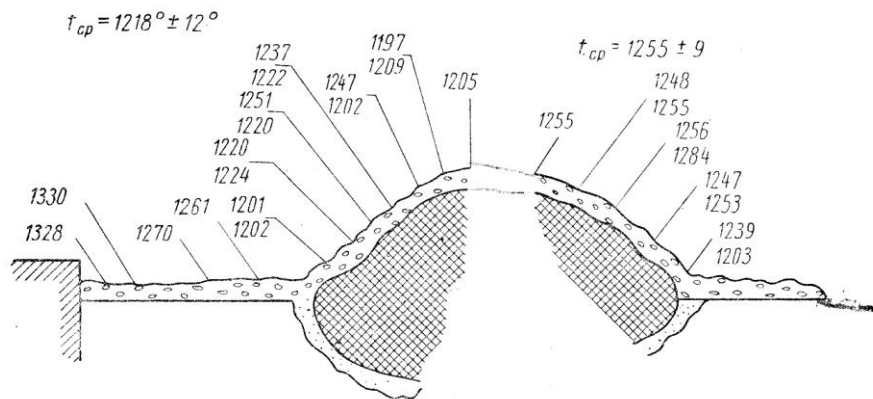


Рис. 4. Схема пульсирующего теплообмена при образовании расплава из шихты

Изучая механизм образования жидкой фазы, следует отметить, что при постоянной, в среднем, по всей поверхности кучи температуре, последняя непрерывно меняется в каждой данной точке со средне-вероятным отклонением $\pm 10-15^\circ\text{C}$ и максимальным $\pm 25^\circ\text{C}$.

Эти колебания представлены на рис. 4, где показаны результаты измерения температур на поверхности двух куч, проведенные с интервалом в 2-5 мин. Отсюда можно установить известное постоянство температур поверхности, что существенно при анализе явления теплообмена.

Газы, образующиеся в процессе разложения компонентов шихты, барботируют через жидкую пленку толщиной ~ 10 мм, систематически смещая, раздвигая и меняя толщину ее, что вызывает непрерывную пульсацию температур поверхности

⁵ Следует заметить, что значительное повышение температуры печного пространства влечет за собой заметное снижение вязкости расплава. В результате этого расплав становится более подвижным и быстрее обнажает нижележащий слой сыпучей шихты.

(пульсирующий локальный теплообмен). Отсюда напрашивается дополнительный вывод, что количество газов, образующихся в процессе варки, будет оказывать некоторое влияние на температуру поверхности куч шихты и теплообмен.

Так, ускоряющий эффект сульфата аммония, вводимого в состав шихты и целиком испаряющегося при 1000°C , можно объяснить указанным механизмом.

Из рис. 3 и 4 следует также, что слой эндотермических реакций, названный «эндотермическим полурасплавом», образуется с обеих сторон шихтной кучи (сверху и снизу). Температурная характеристика этих слоев еще недостаточно изучена; можно лишь сказать, что определение (измерение) перепада температур в ней является технически трудной задачей. Но определения температуры лежащей между ними сыпучей шихты неоднократно проводились [18] и дали максимальное значение $700-800^{\circ}$.

Температура в середине кучи шихты, равная $700-600^{\circ}\text{C}$ (см. рис 3), является условной и, естественно, в противовес постоянной температуре наружного слоя (стекающего расплава и нижнего «эндотермического слоя»), - изменяющейся по времени: по мере «таяния» кучи эта температура повышается, и в стадии «огарка» кучи она приближается к температуре находящейся под ней стекломассы ($1300-1350^{\circ}\text{C}$).

Вторым выводом по данной схеме является большая скорость «таяния» кучи сверху, нежели снизу. Легкоподвижный расплав — шихтная пена либо сливается по наклону, либо, будучи тяжелее (плотнее) эндотермического слоя и сыпучей шихты, прорывается вниз (вертикально), увеличивая площадь теплообмена и интенсивно прогревая излучением и конвекцией сыпучую часть шихты.

Снизу же куча шихты находится как бы в статическом состоянии с минимальной площадью теплообмена, обусловленного излучением теплопрозрачного и жесткого эндотермического слоя. Отсюда ясно, что количество воспринятого (поглощенного) тепла «сверху» будет гораздо больше, чем снизу, что и подтверждается расчетом [19] и экспериментом [20]. Действительно, соотношение количеств воспринимаемого загруженной шихтой тепла колеблется в пределах 2:1 и 1,5:1.

При принятии данного отношения, величина которого подтверждена экспериментальным путем [20], необходимо учесть роль конвекции (конвективного теплообмена), которая в зоне нахождения шихты может быть столь интенсивна, что температура стекломассы достигает на глубине $\sim 0,3$ м максимума $1300-1330^{\circ}\text{C}$, т.е. охлаждающее влияние шихты распространялось лишь на глубину до $0,2-0,25$ м [21].

Наличие этого конвекционного потока объясняет разницу в результатах подсчетов теплообмена, проведенных с учетом теплообмена в стекломассе только излучением, коэффициента поглощения K [22], и экспериментальных данных глубинного пирометража [21].

Расплав в виде шихтной пены, покидая кучи шихты и растекаясь по зеркалу стекломассы, постепенно нагревается до температуры 1400-1450°, так что процессы полного растворения зерен песка, дегазация и превращение шихтной пены в стекломассу протекают при переменном температурном режиме.

Период существования расплава в стадии шихтной пены определяется скоростью его осветления; последним обуславливается и максимальная температура прогрева расплава.

При низкой температуре печного пространства (1350-1370°) шихтная пена, нагреваясь приблизительно до этих температур, перестает воспринимать тепло, в то время как процесс осветления еще не закончен.

При температурах 1420-1450° и выше, как показали изменения, прекращение теплообмена не наблюдалось, так как находящаяся под пеной стекломасса имела более низкую температуру.

В целом между шихтной пеной и верхним строением устанавливается стационарный режим теплообмена, обусловленный разностью эффективных температур (между верхним строением и факелом и расплавом).

Непосредственные измерения тепловых потоков с помощью специального термозонда показали, что в среднем шихтная пена, стекающая с куч и заполняющая площадь зеркала между ними, поглощает в 2 раза меньше тепла, нежели шихта (при равных тепловых потоках от верхнего строения). Вместе с тем по мере продвижения к границе варочной зоны пена нагревается, так что интенсивность сальдо-потока уменьшается. Как показали измерения [12, 13, 23], относительная величина теплового потока на пену может быть охарактеризована коэффициентом 0,3-0,4, т.е. она равна $\sim 1/3$ теплового потока, падающего на кучу шихты.

Высокая температура стекломассы под пеной подтверждает значительное снижение теплообмена между пеной и печным пространством, на что указывает и ряд исследователей [25]. Относительная величина, полученная экспериментально, и схема распределения тепловых потоков (сальдо-потоков), воспринимаемых в варочной зоне, приведена на рис. 5 [20, 13]. Чистое зеркало воспринимает от 30 до 40% тепла, т.е.

значительно меньше, нежели шихта. Площадь «термического коридора» (до границы максимума температуры стекломассы) составляет в открытых печах не менее 25-28% от всей поверхности варочной зоны; только при этом условии можно обеспечить соответствующий подогрев шихты снизу и компенсировать наружные потери через стенки и дно бассейна. На этот прогрев затрачивается 15-20% тепла от «верхнего».

По данным В.Трира [25] свободное зеркало в проточных печах для полубелых стекол достигает $\sim 1/3$ всей площади бассейна (до протока), что позволяет обеспечить и необходимую температуру стекломассы у протока.

Таким образом, можно заключить, что количество тепла, поглощаемого зоной собственно варки, зависит от соотношения площадей, занятых кучами шихты и пеной, свободного (чистого) зеркала, а также от абсолютной (T°) температуры верхнего строения.

Вместе с тем ни в одной части зоны варки ванной печи при существующих составах шихты нельзя иметь температуру ниже 1350° , так как при этом теплообмен между пламенным пространством и участками зеркала, занятыми шихтной пеной, прекратится, т.е. площадь зоны варки не будет использована в максимальной мере.

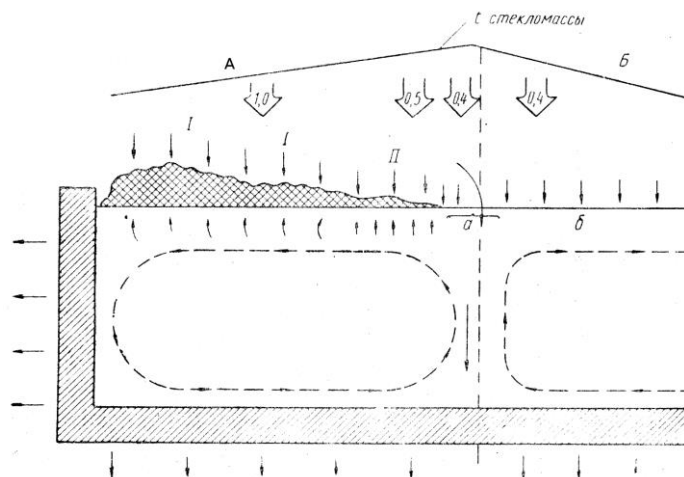


Рис. 5. Схема распределения относительной величины тепловых потоков по длине варочного бассейна.

А — область сыпного цикла; Б — область выработочного цикла;

а — термический коридор; б — зона чистого зеркала; I — зона шихты;

II — зона пены.

На рис. 6 дана зависимость между производительностью зоны варки, напряжением теплового потока от верхнего строения ($\text{ккал/м}^2\text{час}$) и отношением площадей, занятых кучами и шихтной пеной; при этом учтено количество тепла,

получаемого кучами шихты и пеной от стекломассы за счет конвекции (в размере 12-15% от всего получаемого шихтой тепла).

На этом же рисунке дана кривая (пунктирная), построенная по результатам исследования двух ванн печей (Б и Г). По этой кривой видно, как изменяется производительность печи при различном тепловом напряжении и какие при этом необходимы соотношения площадей.

Поскольку пунктирная кривая построена на основе измерения типовой ванны, можно считать ее известным ориентиром при предварительном расчете использования площади зеркала и определении метода загрузки шихты. По мере накопления опытных данных указанные количественные зависимости получают и более достоверное и универсальное обоснование к рациональному теплотехническому расчету типовой конструкции ванн печей. Чтобы поставить процесс теплообмена, имеющего целью расплавить шихту и подогреть расплав до необходимой температуры, в наиболее благоприятные условия, т.е. обеспечить максимальный эффект, целесообразно рассчитать количество тепла на нагрев шихты с учетом всех протекающих в ней изменений теплофизических свойств.

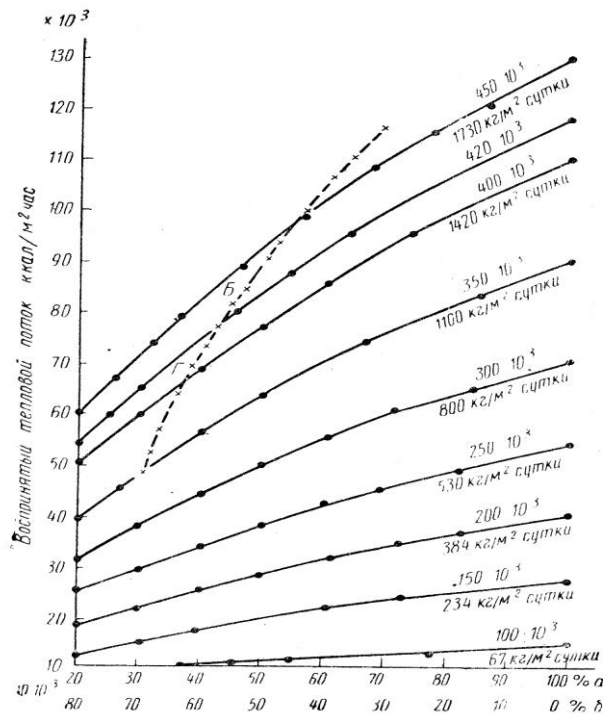


Рис. 6. Производительность зоны варки в зависимости от отношения площади, занятой шихтой и пеной (а) и свободным зеркалом (б), а также от величины теплового потока, воспринятого от верхнего строения. (Цифры над кривыми показывают величину теплового потока, падающего на зеркало)

Схема нагрева шихты при ее установившемся тепловом состоянии приведена на рис. 3.

Как уже было сказано, свежезагруженная куча шихты быстро сплавляется; если расплав не стекает с кучи, то он превращается в корочку [27], ниже которой сохраняется сыпучая шихта. При стекании расплава с кучи процесс приобретает стационарный характер.

Чтобы рассчитать распределение температуры в толще кучи, необходимо определить значение $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$. Как показал ряд исследований [26], значение a по шихте с γ меняется в широких пределах в зависимости от температуры. Шихта как сыпучее тело перестает существовать с момента образования силикатных спеков; можно принять, что это состояние обусловлено нагревом в среднем до 700° (600-800°).

Такой переход влечет за собой «скачок» в значениях теплофизических констант, что изображено на рис. 7. При 100-200° [26] λ шихты равно примерно 0,22-0,23 ккал/м час град. В стадии силикатного спека (700-800°) в зависимости от значения объемного веса $\gamma = 1400-1500 \text{ кг/м}^3$ λ возрастает в 23 раза за счет уплотнения частиц (реакции в твердом состоянии). При более высокой температуре уже нельзя говорить о λ как об атомарной теплопроводности. При образовании жидкой фазы в связи с процессом разложения и выделением готовой фазы (барботажа через жидкие пленки), а также значительным усилением радиации значение λ как суммарного коэффициента теплопередачи ($\lambda_{\text{сумм}}$) резко возрастает, достигая 20-25 ккал/м час град (согласно результатам измерений и расчетов по исследованию шлаков [28]).

В ряде работ по изучению и измерению избирательного поглощения стекломассы (М.Черни, Л.Генцель, Н.Нейрот, Э.Миррен, Ф.Гэффкен) предложен термин «эффективный коэффициент теплопроводности», который, однако, не учитывает явления конвекции, меняющего фактическое значение коэффициента теплообмена в стекломассе. Следовательно, без поправки на конвекцию этим коэффициентом нельзя пользоваться для расчета теплообмена в ваннах печах, где конвективный перенос тепла достаточно заметен и влияет на общий суммарный эффект теплообмена.

Значительно меняется также и величина теплоемкости, под которой, учитывая гетерогенное состояние шихты, необходимо подразумевать не только собственно нагрев шихты и расплава, но и совокупность эндотермических и экзотермических эффектов, возникающих при варке стекла.

При расчете величины Сэкв. принято, что основные эндотермические реакции в шихте проходят в интервале температур 800-1150°, максимум поглощения тепла при этих реакциях приходится на 900-1050°, а полностью они заканчиваются при 1250-1300°.

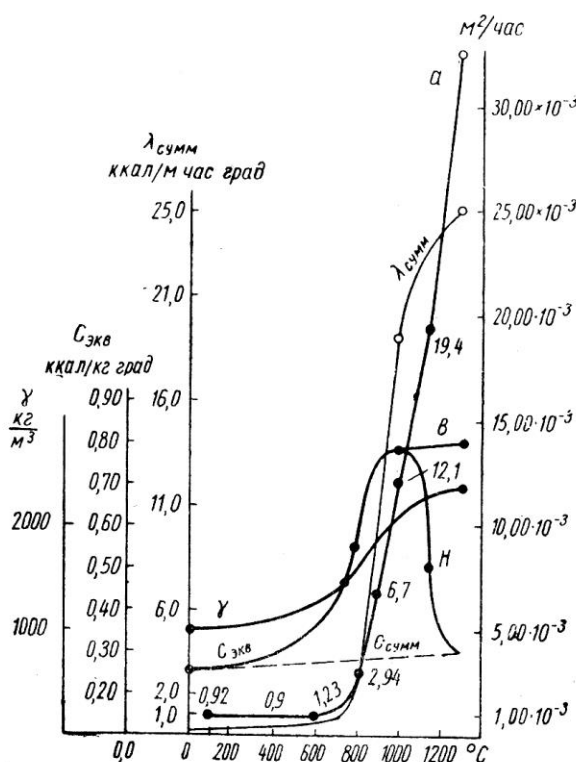


Рис. 7. Изменение теплофизических констант шихты при ее нагреве

Поэтому при исчислении удельного расхода тепла на нагрев от холодного состояния шихты (сыпучей) значение Сэкв. после 1000° будет возрастать (верхняя ветвь кривой — в); если же определяется Сэкв. для расчета расхода тепла в интервале температур только от 1000 до 1300°, то его значение берется по нижней ветви кривой (н).

Значения теплофизических параметров λ , C и γ шихты, превращающейся в процессе варки в стекломассу, а также вычисленные значения температуропроводности α — в интервале температур 100-1300° даны на рис. 7, изменение этих характеристик в зависимости от температуры построены на основе вышеизложенных соображений.

Имея значения λ , C и γ , можно проверить производительность варочной зоны при разных режимах».

Важно еще раз отметить, что такого совместного анализа технологического режима и массотеплообмена процесса стекловарения в регенеративных ваннах стекловаренных печей с поперечными факелами горелок производства листового стекла никто не выполнял до Степаненко М.Г. и после него, в таком объеме исследований на действующих промышленных печах вот уже почти 60 лет!

Поэтому автор этой статьи решил воспроизвести для специалистов этого профиля этот уникальный анализ, в котором органически соединены технологический режим работы печи и процесс массотеплообмена в ней.

Примером использования методики, разработанной Степаненко М.Г., отмеченной выше, может служить анализ процесса стекловарения на современной высокопроизводительной стекловаренной печи производства полированного листового стекла производительностью 430 т/с [11]. На этой печи были измерены глубинные температуры сыпчонного потока стекломассы, что особенно важно при дальнейшем анализе процессов массообмена и теплообмена, который будет приведен ниже.

Итак, производительность печи 430 т/с = 17,91 т/час = 17910 кг/час при принятой, в данном анализе, теоретической удельной теплоте на стекловарение равна 800 ккал/кг (на 1 кг стекломассы).

Общая теплота на стекловарение равна $17910 \cdot 800 = 14,32 \cdot 10^6$ ккал/час, это суммарная теплота, которую должна получить стекольная шихта сверху (из газового пространства) и снизу (от сыпчонного потока стекломассы под шихтой).

Принимаем, по методике Степаненко М.Г., что удельный тепловой поток сверху на шихту (из газового пространства) равен 200000 ккал/м²час и снизу (от сыпчонного потока стекломассы) равен 80000 ккал/м²час.

Принимаем поверхность шихты сверху и снизу одинаковой.

Вот почему в дальнейших анализах теплообменного процесса принималось, что шихта сверху на стекловарение получает ~60%, а снизу ~40%. Вот это соотношение впервые установил Степаненко М.Г.(см. выше).

Таким образом, необходимая поверхность шихты должна равняться:

$$\frac{14,32 \times 10^6 \times 0,6}{200000} = 43 \text{ м}^2,$$

а фактическая средняя поверхность этой стекловаренной печи в периоде ее кампании была равна ~45 м² при ширине 10 м, длине 4,5 м при границе шихты в середине между 1-й и 2-й парами горелок.

Снизу⁶ от сыпчного конвективного потока стекломассы, шихта должна получить количество теплоты:

$$14,32 \cdot 10^6 \cdot 0,4 \sim 5,7 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$$

и она должна получить по методике Степаненко М.Г.:

$$43 \times 80000 = 3,44 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$$

Таким образом, зная среднюю разность температур сыпчного потока (при его принятой высоте равной 0,2 м) между 1-й и 2-й парами горелок и до 1-й пары горелок печи и равную на основании [11]: $1340-1270=70^\circ\text{C}$, можно определить необходимый расход сыпчного потока стекломассы:

$$\frac{3,44 \cdot 10^6}{0,25 \cdot 70} \approx 195000 \text{ кг/час} = 195 \text{ т/час}$$

где: 0,25 — удельная теплоемкость стекломассы, ккал/кг^oC по рис. 7, а коэффициент вращения сыпчного цикла стекломассы под шихтой в час будет равен:

$$\frac{195000}{17910} = 11!$$

Объемный расход сыпчного потока стекломассы:

$$\frac{195000}{2500} = 78,0 \text{ м}^3/\text{час},$$

а при ширине сыпчного потока стекломассы 10 м и высоте 0,2 м, на которой были определены фактические его средние температуры и его площадь сечения равной $10 \cdot 0,2 = 2 \text{ м}^2$.

Скорость сыпчного потока равна:

$$\frac{78}{2} \approx 39 \text{ м/час или } 0,65 \text{ м/мин.}$$

Расход выработочного потока стекломассы равен:

$$\frac{17910}{2500} \approx 7,16 \text{ м}^3/\text{час}$$

где: 17910 кг/час — расход выработочного потока стекломассы;

2500 кг/м³ — удельный вес стекломассы.

При ширине выработочного потока (на принятой для анализа стекловаренной печи равной 10 м), и глубине потока $\sim 0,3 \text{ м}$ (принятой 0,3 от глубины выработочного канала равным 1,0 м), сечение выработочного потока равно:

$$0,3 \cdot 10 = 3 \text{ м}^2$$

⁶ Тепловыми потерями через боковые стены и дно зоны варки данной печи не учитываем, т.к. они составляют около 5% от $5,7 \cdot 10^6$ ккал/ч.

Таким образом, скорость выработочного потока стекломассы равна:

$$\frac{7,16}{3} = 2,38 \text{ м/час}$$

Коэффициент сыпчного потока по методике Панковой Н.А. для количественной оценки гомогенизирующей способности печи по формуле (1) равен:

$$K = \left(\frac{39}{2,38} \right)^{\frac{2 \times 0,3}{0,2}} + 1 = 404$$

Коэффициент выработочного потока стекломассы для количественной оценки гомогенизирующей способности стекловаренной печи по расчетам Панковой Н.А. [6] равен 216, а автор статьи оценивает этот коэффициент для принятой для анализа действующей стекловаренной печи в пределах 250. Это означает, что интенсивность гомогенизации в сыпчном цикле практически в 1,6 раза выше, чем в выработочном потоке стекломассы. Этим, видимо, и объясняется, в том числе, высокий коэффициент использования стекломассы (КИС) на принятой для этого анализа действующей промышленной стекловаренной печи! Этим же, видимо также, и объясняется, что до сих пор (почти 150 лет!) нет альтернативы конструкции ванной регенеративной стекловаренной печи листового стекла, которая широко применяется в настоящее время в РФ, СНГ и во всем мире!

Впервые на это обстоятельство обратила внимание профессор Панкова Н.А. в одной из последних своих работ [6]. Работая долгие годы в Государственном научно-исследовательском институте стекла (ГИС) и на стеклозаводах бывшего СССР она часто говорила: «Стекло не любит суеты!»

Литература

1. Гулоян Ю.А. Эффективность технологических процессов в производстве стеклянных изделий. Москва, Легкая пищевая промышленность, 1982, с. 168
2. Бондарев К.Т., Поллак В.В. Высокотемпературная варка стекла. «Стекло и керамика», 1971, № 1.
3. Будов В.М., Жузе Т.Б., Михайлова-Богдановская З.А. О характере массообмена в крупногабаритной стекловаренной печи и его влияние на процесс выработки. «Стекло и керамика», 1976, № 2, с. 8-11.
4. Дзюзер В.Я., Швыдкой В.С. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей (под редакцией Дзюзера В.А.). Теплотехник, Москва, 2009, с. 340.
5. Ламорт Ю.С. Стекловаренные печи (1932). Издание в СССР и перевод с немецкого инж. Кузьмича Б.Ф. под редакцией проф. Шведова Б.С. с дополнением инж. Кузьмича Б.Ф., Москва, 1937.
6. Панкова Н.А., Михайленко Н.Ю. Теория и практика промышленного стекловарения. Москва, 2003, М.О. РФ РХТУ им. Д.И.Менделеева, Издательский центр, Учебное пособие, Москва, 2003, с. 37-40, 1.4. Гомогенизация стекломассы.
7. Степаненко М.Г. Пути совершенствования стекловаренных печей. Гос. Издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, Москва, 1960, с. 156.
8. Конаков П.К. Теоретические основы теплотехники. ГЭИ, 1957.
9. Konaков P.K., International Journal of Heat and Mass Transfer, 2 March, 136, 1961.
10. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи. Издательство литературы по строительству, Москва, 1967, с. 63.
11. Игнатов С.В. Кандидатская диссертация. ГИС, Москва, 1984, с. 135.
12. Захариков Н.К. Вопросы производства стекла. Сб. Вып. 4, Изд. АН УССР, 1956.
13. Вилнис К.К., Степаненко М.Г. Теплообмен между шихтой и пламенным пространством стекловаренных печей. «Стекло и Керамика», № 3, 1959.
14. Теплотехника производства стекла, Труды Института использования газа, № 5, АН УССР, 1958.
15. Степаненко М.Г. Коэффициент полезного действия ваннных стекловаренных печей. «Стекло и Керамика», № 1, 1958.
16. Вилнис К.К., Полак В.В., Степаненко М.Г. Об оптимальном температурном режиме зоны варки стекловаренных ваннных печей. «Стекло и Керамика», № 4, 1958.

17. Шарп Д. Величина конструкции печи и способа варки стекла на производительность. *Ceramic Ind.* V, 1955.
18. Обследование работ действующих стекловаренных печей с установлением оптимального режима и максимальной производительности. Технический отчет Теплотехнической лаборатории ГИС, 1954.
19. Коллектив авторов. Теплотехнические расчеты силикатной промышленности (под ред. Гинзбурга Д.Б. и Зимина В.Н.). Промстройиздат, 1951.
20. Иванцов Г.П. Вопросы движения газов в печах. Сборник статей, 1936.
21. Трир В. Измерение температур в стекломассе ваннных печей, *Glast. Ver.*, 1951, с. 55-63.
22. Генцель Л. Измерение поглощения в инфракрасной области стеклом в интервале от 20° до 1360°. *Glast Ver.*, 1951, с. 55-63.
23. Разработка и испытание новых конструкций стекловаренных ваннных печей. - Технический отчет Теплотехнической лаборатории ГИС по теме 36-1, 1956.
24. Вилнис К.К. Влияние конструктивных и теплотехнических параметров на конвекцию стекломассы. *Стекло, Информбюллетень, ГИС, № 2, 1958.*
25. Трир В. Измерение температур в стекломассе ваннных печей. *Glast. Ver.*, № 1, 1953.
26. Гинзбург Д.Б. Стекловаренные печи. Гизлегпром, 1948.
27. Степаненко М.Г., Томашевич И.О. Коэффициент полезного действия стекловаренных печей СКП. «Стекло и Керамика», № 1, 1948.
28. Глинков М.А. Мартеновская печь, как теплотехнический агрегат. *Металлургиздат, 1949.*
29. Пейшес И. Борьба с потерями тепла в стекловаренных печах. *Glass Ind.*, № 5, 1947.