

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.И. Верещагин, Т.С. Петровская, А.А. Дитц

Технология стекла

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство «Дельтаплан»
2010

УДК 666.041/.43
ББК 35.112.5-51

Петровская Т.С.

Технология стекла: учебное пособие / В.И. Верещагин, Т.С. Петровская, А.А. Дитц; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 131 с.

В пособии «Технология стекла» изложены основные способы получения стекла, рассмотрены технологические схемы, приведены диагностические материалы, полезные при оценке качества усвоенного материала.

Учебное пособие подготовлено на кафедре технологии силикатов и наноматериалов и рекомендовано для студентов направления 240304 «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов»

УДК 666.041/.43
ББК 35.112.5-51

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор ТГУ
В.В. Козик

Доктор технических наук, профессор ТГАСУ
Саркисов Ю.С.

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», 2010
© Верещагин В.И., Петровская Т.С., Дитц А.А.,
2010

Содержание

Содержание	3
Условные обозначения и сокращения	6
ВВЕДЕНИЕ	8
ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ	8
ГЛАВА 1. ПЕЧИ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	10
1.1. Стекловаренные печи	10
1.2. Классификация стекловаренных печей	13
Заключение	19
1.3. Вопросы для самоконтроля	20
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СТЕКЛОДЕЛИЙ	21
2.1. Формование стекла	21
2.1.1 Способы формования стеклоизделий	23
2.2. Термическая обработка стекла	25
2.2.1 Температурный режим отжига	27
2.2.2. Контроль качества отжига стекла	28
2.2.3 Температурный режим закалки изделий из стекла	29
Заключение	31
2.3. Вопросы для самоконтроля	32
ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА	33
3.1. Составы и свойства листового стекла	33
3.2 Особенности процесса варки листовых стекол	35
3.2.2. Особенности конструкций печей для варки листового стекла	37
3.2.3. Классификация листового стекла	Ошибка! Закладка не определена.
3.3 Способ лодочного вертикального вытягивания	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.1. Принцип формования ленты стекла способом ВВС	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.2. Факторы, определяющие результативность и эффективность	Ошибка! Закладка не определена.
процесса формования	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.3. Факторы, определяющие качество стекла	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.4. Конструкция выработочной камеры.	Ошибка! Закладка не определена.
3.3.5. Техничко-экономические показатели способа лодочного ВВС	Ошибка! Закладка не определена.
3.4. Вертикальное вытягивание стекла со свободной поверхности стекломассы (БВВС)	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.1. Принцип формования ленты стекла способом (БВВС)	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.2. Факторы, определяющие результативность и эффективность процесса формования.	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.3. Факторы, определяющие качество стекла	Ошибка! Закладка не определена.
3.4.4. Конструкция выработочной камеры.	Ошибка! Закладка не определена.

- 3.4.5. Техничко-экономические показатели способа **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.5. Способ вертикально-горизонтального вытягивания (ГВС) **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.5.1. Принцип формования ленты стекла способом (ГВС). **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.5.2. Конструкция выработочной камеры. **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.5.3. Техничко-экономические показатели способа ГВС **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.6. Выработка листового стекла способом горизонтального проката **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.6.1. Принцип формования ленты стекла способом горизонтального проката **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.6.3. Техничко-экономические показатели способа проката **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7. Производство листового стекла флоат - способом **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.1. Принцип формования ленты. **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.2. Возможность регулирования толщины ленты стекла. **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.3. Химические взаимодействия во флоат-процессе ... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.4. Формование полированного стекла. Устройство флоат-ванны... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.4.1. Формование полированного стекла толщиной менее 6,5 мм.... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.4.2. Формование полированного стекла толщиной более 6,5 мм.... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.5. Качество флоат-стекла и специфические виды брака.. **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.7.6. Техничко-экономические показатели способа **Ошибка! Закладка не определена.**
- Заклучение..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 3.9. Вопросы для самоконтроля **Ошибка! Закладка не определена.**
- ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА**
- **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1. Электровакуумное стекло **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.1. Составы и свойства электровакуумных стекол **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.2. Производство стеклянных оболочек кинескопов... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.3. Производство стеклянных элементов для ламп накаливания..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.4. Особенности процесса варки ЭВС.... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.1.5. Формование элементов для ламп накаливания **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.2. Производство стекловолокна **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.2.1. Классификация стекловолокна **Ошибка! Закладка не определена.**

- 4.2.2. Свойства стекловолокон и применяемые составы стёкл..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.2.3 Особенности организации процесса стекловарения и способы.... **Ошибка! Закладка не определена.**
выработки непрерывного волокна **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.2.4. Виды штапельных волокон. Сырьевые материалы для производства штапельного волокна **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.2.5.Способы выработки штапельных волокон из расплава..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.2.6. Технологическая схема производства штапельного волокна и теплоизоляционных изделий **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.3. Производство оптического волокна и волоконно-оптических элементов (ВОЭ) **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.3.1. Световод и волоконно-оптический элемент ВОЭ.. **Ошибка! Закладка не определена.**
Требования к волоконным световодам для оптических линий связи ... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.3.2. Способы выработки оптических стекловолокон.... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.3.4. Области применения оптического волокна **Ошибка! Закладка не определена.**
- Закключение..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 4.5. Вопросы для самоконтроля **Ошибка! Закладка не определена.**
- ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛОГО СТЕКЛА Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1. Тарное стекло..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.1. Классификация стеклянной тары..... **Ошибка! Закладка не определена.**
Применяемые составы, сырьевые материалы и требования предъявляемые к ним **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.2. Физико-химические свойства тарных стёкол **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.3. Варка стекла и особенности конструкции стекловаренных печей **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.4. Питание стеклоформирующих машин. Устройство и работа питателя **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.5. Формовочные машины..... **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.6. Пороки стеклянной тары **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.1.7. Способы повышения эксплуатационной надежности стеклянной тары **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.2. Сортовое стекло **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.2.1 Классификация сортовой посуды. **Ошибка! Закладка не определена.**
Применяемые составы, сырьевые материалы, требования к сырью **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.2.2. Приемы обесцвечивания стекломассы **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.2.3. Варка сортового стекла и особенности конструкции стекловаренных печей **Ошибка! Закладка не определена.**
- 5.2.4. Выработка сортового стекла **Ошибка! Закладка не определена.**

Заключение.....	Ошибка! Закладка не определена.
5.4. Вопросы для самоконтроля	Ошибка! Закладка не определена.
ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО СТЕКЛА	Ошибка! Закладка не определена.
6.1. Пеностекло	Ошибка! Закладка не определена.
6.1.1. Характеристики пеностекла.	Ошибка! Закладка не определена.
Физико-химические свойства, классификация.....	Ошибка! Закладка не определена.
6.1.2. Способы производства пеностекла...	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение.....	Ошибка! Закладка не определена.
6.2. Вопросы для самоконтроля	Ошибка! Закладка не определена.
Список используемой литературы.....	Ошибка! Закладка не определена.

Условные обозначения и сокращения

ДЭП – дополнительный электроподогрев
ВВС – лодочного и безлодочного вертикального вытягивания
БВВС – лодочного и безлодочного вертикального вытягивания
ГВС – способом вертикально – горизонтального вытягивания
КИС – коэффициент использования стекломассы
ЭВС – электровакуумным стеклам
ЭЛТ – электронно-лучевые трубки
НСВ – непрерывное стекловолокно
ШСВ – штапельное стекловолокно
СВ – стеклянным волокном
ТИМ – теплоизоляционных материалов
ВРП – вертикальный раздув паром
ВРВ – вертикальный раздув воздухом
ЦФД – центробежно-фильтрно-дутьевой способ
ТИИ – теплоизоляционные изделия
ПС-75 – плит строительного назначения плотностью 75 кг/м³
ПТ – плита технического назначения
ВОЭ – волоконно-оптический элемент
ОВ – оптические волокна
ПВО – явление полного внутреннего отражения
НА – численная апертура волокна
ПГФ – синтез в парогазовой фазе
ПЭТ – полиэтилентерефталат
ПС – пеностекло или ячеистое стекло
ИС – изоляционно-строительное
ИМ – изоляционно-монтажное
G – удельные съём стекломассы, кг/(м²·сут)
Q – удельный расход тепла, кДж/кг
КПД – коэффициент полезного действия, %
P – производительность, т/сутки
η – вязкость, Па·с
v₂ – скорость, град/мин
τ₂ – время, с
T_g – температура стеклования, °С
Δ – разность ход оптических лучей в стекле, ммк/см
φ – угол падения обыкновенного луча,
φ₀ – необыкновенного луча
α – коэффициентом расхода воздуха
F_{вароч} – площадь варочной части

ρ – плотность, кг/м³
 g – ускорение свободного падения, м/с²,
 σ – поверхностное натяжение, (Н/м),
 α – коэффициента линейного термического расширения, 10⁻⁷ град⁻¹
 $\sigma_{сж}$ – предела прочности стекла на сжатие, МПа
 $\sigma_{разр}$ – предела прочности стекла на разрыв кг/мм²
 $T_{к100}$ – характерная температура, при которой значение электросопротивления сохраняется, МОм
 $\epsilon_{пр}$ – электрическая прочность, кВ/мм
 M_k – модуль кислотности расплава
 M_v – модуль вязкости
 P_v – показатель водостойкости
 λ – теплопроводность, Вт/м·град
 ΔT – термостойкость, °С
об. % – объемные проценты
мас. % – массовые проценты
 v – скорость вытягивания стекла, м/час
 n_1 – показатель преломления

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие «Технология стекла» адресовано студентам очной и заочной форм обучения.

В пособии подробно рассматриваются составы промышленных стекол, используемые и нетрадиционные сырьевые материалы, устройство выработочных камер различных способов выработки стекла, а также технологические схемы производства. Изучив предложенный курс, вы углубите свои знания о стекольном производстве как современной отрасли промышленности, ассортимент продукции которой непрерывно расширяется и востребован как индивидуальным потребителем так и другими отраслями реальной экономики.

При изложении материалов большое внимание уделяется вопросам обеспечения качества стекольной продукции, безопасности труда и экологии. Совершенствования производства и повышение его эффективности.

Производства большинства видов стеклоизделий является крупнотоннажным и базируется на использовании главным образом природных сырьевых материалов. Однако в последние 20 – 30 лет ведутся активные изыскания возможности применения нетрадиционного сырья, в роли которого, как иллюстрируется примерами, могут быть использованы техногенные отходы или продукты их переработки.

Повышение ресурсоэффективности стекольного производства – одна из важных задач специалистов, работающих сегодня на производстве и в науке. Материалы пособия и рекомендованная литература помогут в курсовом и дипломном проектировании.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОГО ПОСОБИЯ

Успешное изучение учебного материала пособия позволит вам сформировать базу знаний и умений.

Вы будете знать:

- важнейшие технологические свойства стекл;
- особенности составов и варки стекол;
- способы выработки стекла;
- оборудование для выработки стеклоизделий;
- принципиальное устройство выработочных камер;
- технологические линии производства стекла;
- современное состояние сырьевой базы.

Вы будете уметь:

- производить расчет состава шихты по заданному составу стекла;
- производить расчет основных свойств стекла;
- сравнивать между собой способы производства листового стекла;
- прогнозировать влияние соответствующих оксидов на свойства стекла.

Вы будете владеть:

- терминологией предмета, достаточной для профессионального общения;
- методикой расчета составов шихт;
- методикой расчета основных свойств стекол.

ГЛАВА 1. ПЕЧИ СТЕКОЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В этой главе рассматриваются стекловаренные печи, применяемые в стекольном производстве. Приводятся основные показатели работы печей. Дается краткая классификация печей, и основные принципиальные конструкции, применяемы главным образом в отечественной промышленности.

1.1. Стекловаренные печи

Ванные печи непрерывного действия – наиболее распространенный и эффективный теплотехнический агрегат для варки стекла. Их применяют для варки и выработки листового, сортового, тарного, и других видов стекла. Конструкция и размеры печи зависят от вида вырабатываемых изделий, применяемого топлива и режима варки. Принципиальное устройство стекловаренной печи показано на рисунке 1.1.

Печь располагается в специальном здании – 1, рабочая камера имеет загрузочный карман – 2, варочную – 3 и студочную – 4 части, состоящие из бассейна и пламенного пространства; от студочной части отходят выработочные каналы – 5 с подмашинными камерами; варочная часть отапливается с помощью горелок – 6; воздух на горение предварительно подогревается в регенераторах – 7, канал – 8 служит для отвода дымовых газов через дымовую трубу – 9, переключение подачи воздуха идет через шиберы – 10, цифрой 11 показан котел утилизатор, а 12 – машины ВВС, 13 и 14 лента стекла.

Усовершенствование стекловаренных печей традиционных конструкций и печей нового типа ставит в первую очередь цели повышения производительности печи за счет увеличения удельного съема с одновременным снижением удельного расхода тепла, повышения химической однородности стекломассы и качества готовых изделий. Для крупных стекловаренных печей эти задачи решаются путем улучшения конструкции отдельных узлов или дальнейшего увеличения единичной мощности.

Такой подход позволяет кардинально улучшить целую группу технико-экономических показателей:

- *удельные капитальные затраты;*
- *удельный расход тепла и энергии;*
- *удельный расход огнеупоров.*

Особенностью печей высокой единичной мощности является то, что их габариты мало отличаются от размеров обычных стекловаренных печей. Высокий же суточный съем стекломассы на этих печах получают за счет повышения удельных съемов в 1,5–2 раза (от 2500 до 3500 кг/(м²·сут)). Лучшими достижениями для печей традиционной конструкции в настоящее время являются:

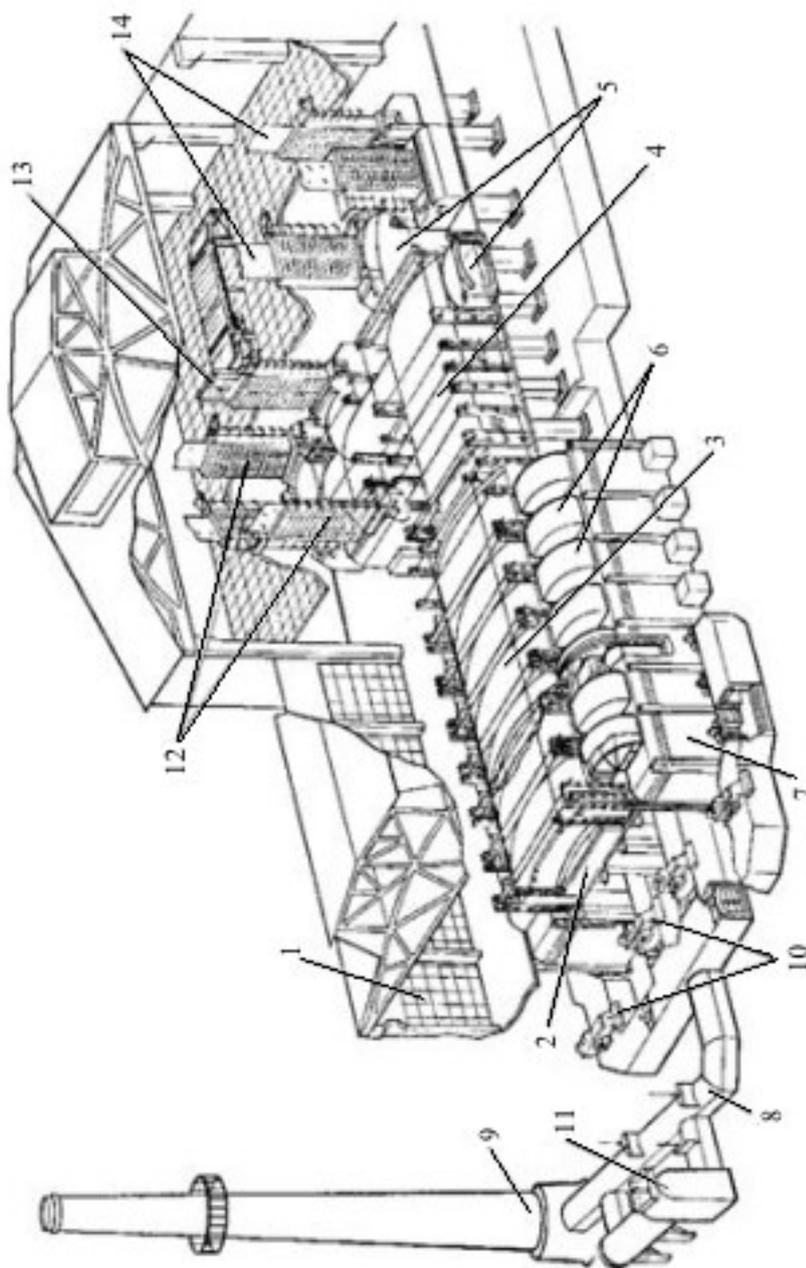


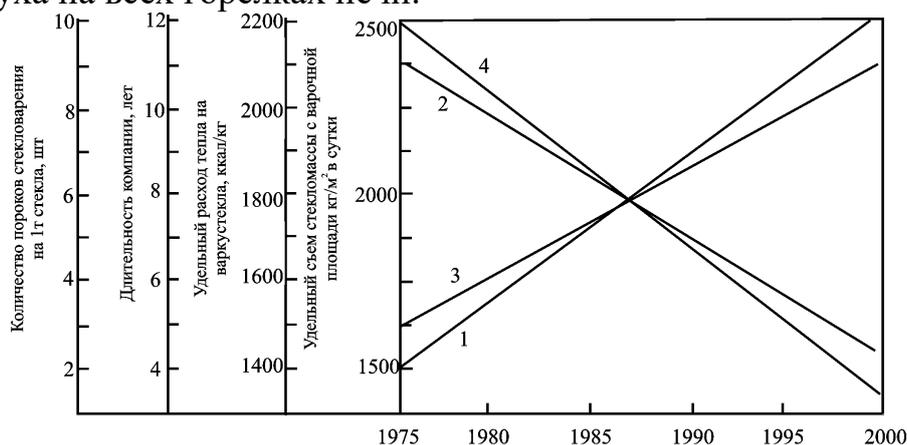
Рисунок 1.1. Принципиальное устройство стекловаренной печи

- удельный съём с отопляемой площади печи от 2500 до 2700 кг/(м²·сут);
- удельный съём с общей площади печи от 800 до 1200 кг/(м²·сут);
- удельный расход тепла от 4600 до 5076 кДж/кг лучше на 1 кг стекломассы;
- КПД от 50 до 70 %.

На рисунке 1.2 представлен график изменения основных технико-экономических показателей печей по производству листового флоат-стекла в период их активного освоения и распространения.

Наиболее важными задачами совершенствования процесса стекловарения являются:

- оснащение печей современными широкопольными загрузчиками шихты и стеклобоя через фронтальные карманы, что обеспечивает интенсификацию процесса провара шихты и стеклобоя на более коротком участке печи и снижает пылеунос компонентов шихты в насадки регенераторов и окружающую среду;
- оснащение печей эффективными системами сжигания топлива, обеспечивающими требуемую степень смешивания топлива и воздуха, максимальное покрытие факелом зеркала стекломассы, возможность регулирования длины факела при любых тепловых нагрузках, исключая при этом их перелеты;
- оснащение печей высокоточными автоматизированными системами контроля и регулирования соотношения топливо/воздух при технологически обоснованных коэффициентах избытка воздуха на всех горелках печи.



Условное обозначение: 1 – удельный съём стекломассы с варочной площади; 2 – удельный расход теплоты на варку стекла; 3 – длительность кампании; 4 – количество пороков стекловарения на 1 тонну стекла.

Рисунок 1.2. Основные технико-экономические показатели ваннных стекловаренных печей производства листового флоат-стекла.

1.2. Классификация стекловаренных печей

Для классификации ваннных стекловаренных печей используют следующие характеристики:

- *производительность;*
- *направление пламени;*
- *конструкция бассейна;*
- *способ использования тепла отходящих газов.*

По производительности печи условно делят на крупногабаритные (от 50 т/сут и выше), среднегабаритные (от 10 до 50 т/сут) и малогабаритные (от 3 до 10 т/сут). При увеличении удельного съема стекломассы эти показатели в целом не характеризуют размеры ванной печи. В зависимости от типа вырабатываемого стекла и стеклоизделий печи подразделяются на ваннные печи листового, тарного стекла, сортовой посуды, технических и специальных стекол. Для производства листового стекла используют печи производительностью от 600 до 800 т/сут и более. Для производства тары применяют печи производительностью от 160 до 300 т/сут.

Техническая характеристика крупных и средних ваннных печей, по данным проф. М. Г. Степаненко, приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Техническая характеристика стекловаренных печей

Группа печей	Тип бассейна печи	Вид стекла	Площадь бассейна печи, м ²		Удельный съем стекломассы с отапливаемой площади, кг/(м ² ·сут)	Удельный расход тепла на 1 кг продукции, кДж/кг
			Отапливаемая часть	Выработочная часть		
Крупные ваннные печи (от 50 до 450 т/сут)	без преград	листовое	800–300	60–180	600–1500	15000–19000
	проточный	бутылочное (темно-зеленое)	60–85	15–20	900–1800	18000–20000
		сортовое (полубелое)	50–70	12–20	700–1500	12500–13500
		консервная тара (полубелая)	100–120	20–25	800–1500	12500–14000

Группа печей	Тип бассейна печи	Вид стекла	Площадь бассейна печи, м ²		Удельный расход стекломассы с отапливаемой площади, кг/(м ² ·сут)	Удельный расход тепла на 1 кг продукции, кДж/кг
			Отапливаемая часть	Вырабочая часть		
Средние ванны печи (от 15 до 60 т/сут)	проточный	бутылочное (полубелое и зеленое)	20–60	8–15	700–1500	12500–14000
		сортовое (полубелое)	20–60	8–15	700–1500	21000–25000
		консервная тара (полубелая и зеленая)	25–60	10–15	700–1500	16500–21000
		парфюмерное, аптечное, (полубелое)	15–45	8–15	600–1500	16500–25000
	общий	тарное (полубелое и зеленое)	15–30	–	400–800	16500–29000
		разное (полубелое и зеленое)	10–25	–	400–1000	55000–71000

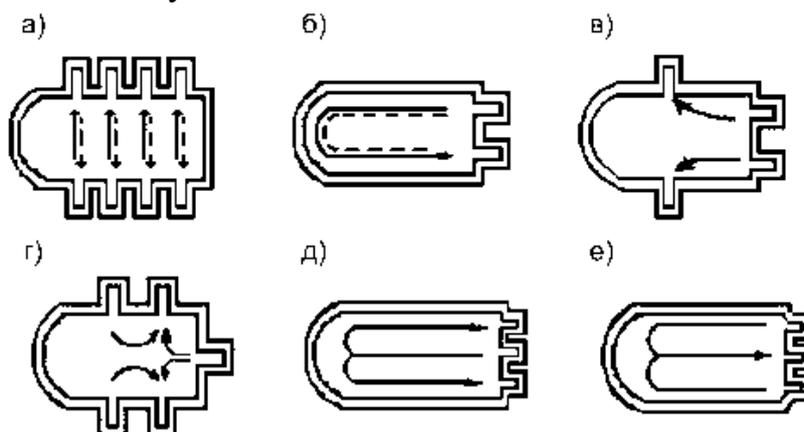
По направлению пламени стекловаренные печи разделяются на печи с поперечным, подковообразным и комбинированным направлением пламени по отношению к направлению движения стекломассы (рис. 1.3).

Поперечное направление газов понимается как перпендикулярное производственному потоку стекломассы, а продольное как параллельное или совпадающее с ним.

В регенеративных печах применяют поперечное и подковообразное направление факела и движение газов, а в рекуперативных, кроме того, продольное и комбинированное. В малых регенеративных или рекуперативных ваннах печах горелки чаще всего располагают с торца, а газы движутся подковообразно. При этом удлиняется путь газов, что дает возможность более полно завершить горение и использовать тепло отходящих газов. В средних и крупных ваннах печах обычно применяют поперечное направление газов и горелки располагают на продольных сторонах печи. Такое расположение горелок позволяет регулировать распределение температур, давлений и состава газовой среды по длине печи.

Варочный бассейн является существенной конструктивной частью печи, при этом его геометрические размеры как основная площадь, соотношение длины к ширине и глубина ванны должны соответствовать производственным требованиям.

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.



Условное обозначение: а) – регенеративная печь поперечным направлением пламени; б) – регенеративная печь с подковообразным направлением пламени; в) – рекуперативная печь с продольным направлением пламени; г) – рекуперативная печь с комбинированным направлением пламени; д) и е) – рекуперативная печь с подковообразным направлением пламени.

Рисунок 1.3. Типы ваннных печей в зависимости от направления топливного факела и движение газов

Смесь шихты и боя, непрерывно загружаемая в одном конце печи, постепенно проходит зоны бассейна с различными температурными условиями и превращается в однородную гомогенную стекломассу, которая вырабатывается в противоположном конце печи. В каждой зоне необходимо поддерживать неизменный во времени (стационарный) температурный режим. Возможность установления определенного температурного режима в ваннных печах непрерывного действия предусматривается конструкцией их рабочей камеры.

Для выделения отдельных зон с различными температурными режимами газовое пространство рабочей камеры разделяют приспособлениями из огнеупорных материалов различной конструкции. Регулирование режима варки улучшается при разделении газового простран-

ства рабочей камеры печи сплошными или решетчатыми перегородками (экранами), шиберами или сниженными арками.

Поддержанию необходимого температурного режима по длине бассейна печи способствуют и устанавливаемые в стекломассе огнеупорные разделительные приспособления - заградительные лодки, пороги, протоки. Устройство протоков и других разделительных приспособлений позволяет изменить характер движения потоков стекломассы и отбирать для выработки более охлажденную и проваренную стекломассу.

В зависимости от того, насколько сильно разграничены зона студки и зона осветления, настолько отличаются между собой ванны с протоком и «открытые» ванны. Ванная печь с протоком является типичной ванной для изготовления полого стекла, так называемые «открытые» печи применяют для изготовления листового стекла. На (рис. 1.4) представлены схемы бассейна ванный печей:

а – регенеративная печь с газовым пространством, разделенным сплошным экраном, и с поперечным направлением пламени; б – регенеративная печь с полностью разделенным газовым пространством и поперечным направлением пламени; в – регенеративная печь с газовым пространством, разделенным решетчатым экраном, и с поперечным направлением пламени; г – регенеративная печь с решетчатым экраном и подковообразным направлением пламени; д – рекуперативная печь с подковообразным направлением пламени; е – рекуперативная печь с продольным направлением пламени; ж – рекуперативная печь с продольным направлением пламени и двойным сводом; з – рекуперативная печь с противоточным движением газов и стекломассы и продольным направлением пламени; и – трехтонная печь с регулятором уровня отбора стекломассы и поперечным направлением пламени; к – печь с выделенной варочной зоной и поперечным направлением пламени.

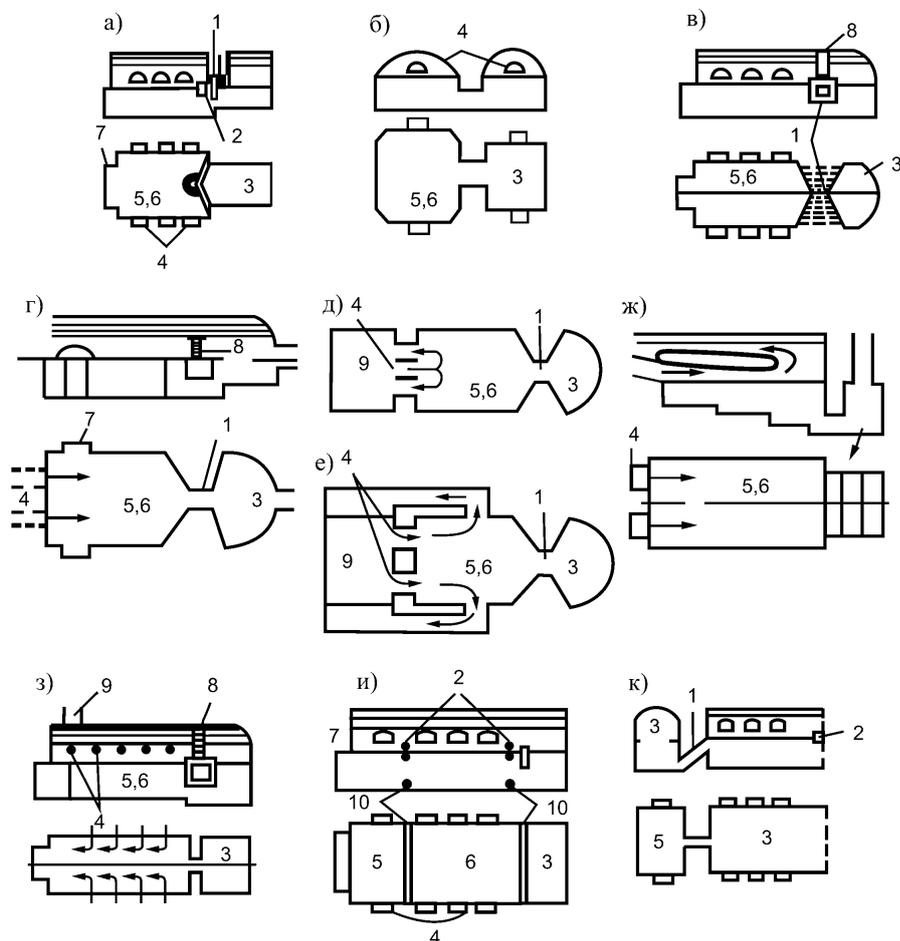
Применяются для этой цели керамические и стальные рекуператоры. На (рис. 1.5) показана принципиальная схема действия керамического рекуператора.

Принцип действия керамического рекуператора заключается в следующем - горячие дымовые газы входят в рекуператор через патрубок – 1, а выходят через патрубок – 2 теплообменник выполнен из материала с хорошей теплопроводностью.

Воздух, необходимый для горения, проходит по трубам 3 – 4 в перекрестном потоке и подогревается. При использовании керамических рекуператоров можно получить подогретый воздух до 1000 °С.

Основная проблема при применении керамических рекуператоров заключается в уплотнении путей для отработанных газов по отношению к воздуху.

При не герметичности труба вместе с отработанным газом отсасывает воздух, необходимый для горения, что мешает образованию пламени.



Условное обозначение: 1 – проток; 2 – лодка; 3 – решетчатый экран; 4 – горелки; 5 – загрузочный карман; 6 – рекуператор; 7 – варочная часть; 8 – зона освещения; 9 – зона стужки или выработки; 10 – пороги на дне бассейна.

Рисунок 1.4. Схемы бассейна ваннных печей.

На (рис. 1.6) представлено схематичное изображение металлического рекуператора радиационного типа с двойным кожухом.

Дымовые газы проходят с малой скоростью через внутренний цилиндр (1 – 2), в то время как нагреваемый воздух, необходимый для горения, с высокой скоростью устремляется через кольцевую щель между внутренними и внешними цилиндрами (3 – 4).

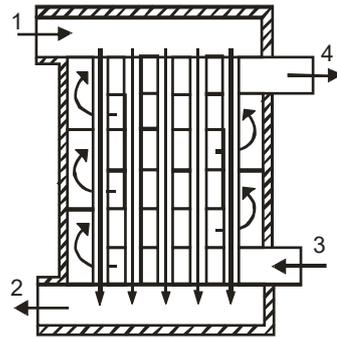


Рисунок 1.5. Схема керамического рекуператора

Максимальная температура для предварительного нагрева воздуха в металлических рекуператорах составляет от 600 до 700 °С.

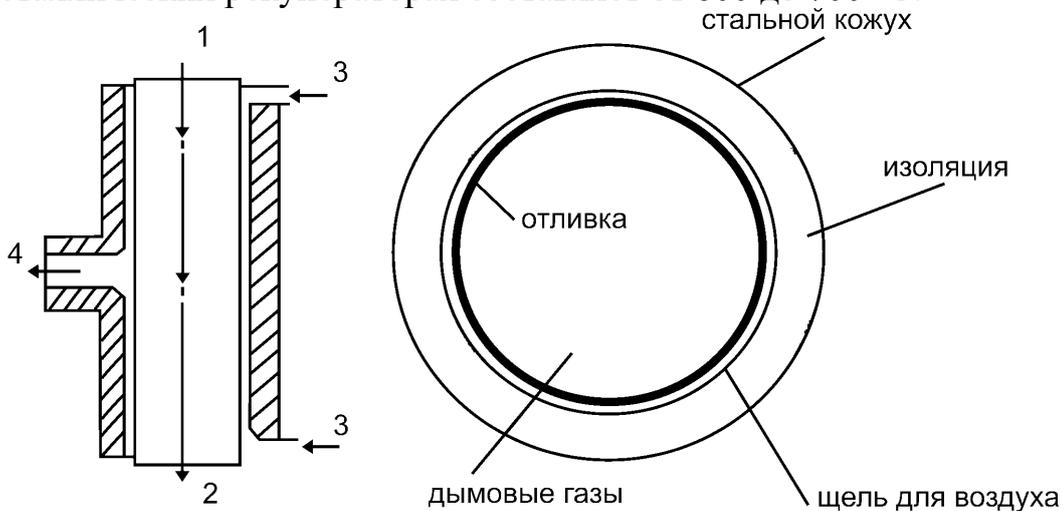


Рисунок 1.6. Схема металлического рекуператора

Преимущество рекуператоров перед регенераторами состоит в том, что они, имеют невысокую стоимость, и в них достигается постоянная температура подогрева воздуха для горения, благодаря чему поддерживаются стабильные условия горения. Недостатком является их невысокий КПД рекуперации тепла, особенно у стальных рекуператоров.

Регенеративная утилизация тепла происходит через вертикальные регенераторы дискретно из-за переменного нагрева, например в ванной печи с поперечными горелками. Обычно регенераторы состоят из вытянутых вверх камер, расположенных по обеим сторонам стекловаренной печи. Эти регенеративные камеры выполнены из огнеупорных кирпичей таким образом, чтобы обеспечить свободное прохождение через каналы горячих дымовых газов. При этом тепло дымовых газов передается огнеупорам. На (рис. 1.7) представлен поперечный разрез регенератора.

Эффективная работа регенератора определяется площадью поверхности теплообмена, которая обеспечивается тем или иным типом насадки.

Насадка конструируется с учетом ее сопротивления газовому потоку, которое не должно превышать определенных значений для конкретных печных комплексов. На сегодняшний день разработано много различных способов кладки насадок регенераторов.

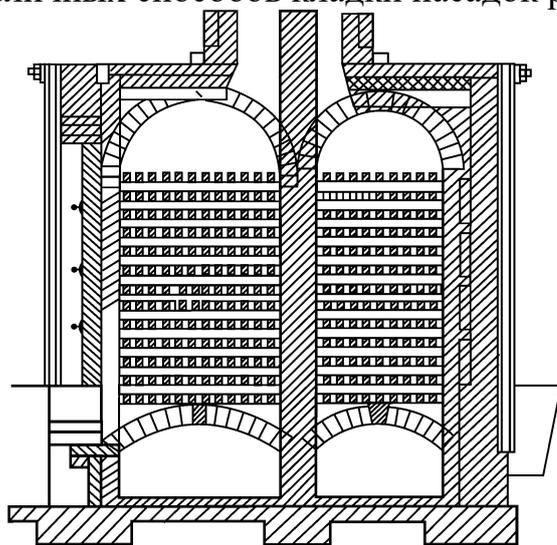


Рисунок 1.7. Схема вертикального регенератора

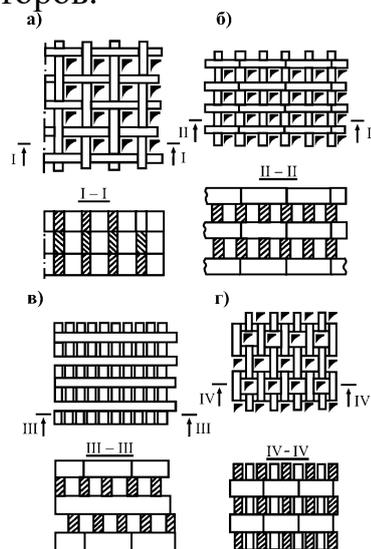


Рисунок 1.8. Примеры кладки насадок регенераторов

Вертикальная кладка насадки регенератора при использовании открытой корзиночной насадки является самым распространенным видом кладки огнеупорных кирпичей в регенеративных камерах.

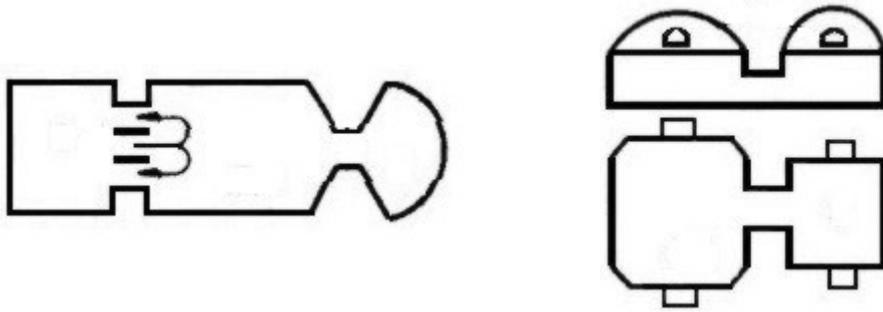
Когда огнеупоры нагреваются до определенной температуры (обычно свыше 1100 °С) направление движения дымовых газов и воздуха меняется. Воздух для горения проходит через нагретые камеры и там приобретает необходимую температуру. Переключение направления пламени происходит каждые 20 – 30 мин. Использование регенераторов дает возможность получать температуру предварительного нагрева на 400 – 500 °С выше, чем при применении рекуператоров. Более полное, чем в металлических рекуператорах использование тепла дымовых газов являются преимуществами регенераторов.

Заключение

В этой главе мы кратко рассмотрели принципиальные конструкции стекловаренных печей, применяемых в стекольном производстве и основные показатели работы печей. Классификацию печей и основные особенности. Рассмотрели конструкции печей.

1.3. Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите, пожалуйста, основные направления совершенствования процесса стекловарения.
2. Перечислите, пожалуйста, основные характеристики, используемые для классификации стекловаренных печей.
3. Дайте классификацию печам, представленным на рисунке ниже. Назовите тип печей.



4. Перечислите, пожалуйста, основные достоинства использования регенератора, рекуператора.
5. Перечислите, пожалуйста, основные недостатки использования регенератора, рекуператора.

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СТЕКЛОДЕЛИЙ

Вторая глава посвящена вопросам формования стеклоизделий. Представлена краткая классификация способов формования стеклоизделий и области их применения. Рассмотрены режимы отжига и закалки стеклоизделий, контроль качества отжига.

2.1. Формование стекла

Формование – вторая важнейшая технологическая стадия, которая состоит в придании стекломассе заданной формы и закреплении путем охлаждения.

Возможность формования стекломассы в пластичном состоянии связана, прежде всего, с особенностями изменения ее вязкости в зависимости от температуры. Пластичность позволяет расплаву принять заданную форму, после чего изделие охлаждается и затвердевает, сохраняя приданную ему форму.

Интервал температур, при которых стекло может быть отформовано, называется **интервалом формования** или выработки. В этом интервале вязкость стекла изменяется от 10^2 до 10^8 Па·с, а при полном отвердевании вязкость становится равной 10^{12} Па·с.

Значения температур и вязкости, соответствующие выработке, зависят от состава стекла и способа формования. Скорость изменения вязкости стекла во времени (скорость затвердевания), зависящая от состава и цвета стекла, определяет необходимое время формования и производительность выработки изделий.

Формование протекает в две стадии:

- **формообразование** – придание пластичной стекломассе конфигурации формуемого изделия в результате приложения внешних сил, характер действия которых обусловлен видом изделия и способом формования. Определяющие факторы стадии формообразования: вязкость, поверхностное натяжение, пластичность, упругость и характер температурного изменения этих свойств стекломассы;
- **фиксация формы** – закрепление конфигурации отформованного изделия в результате твердения стекломассы, характер которого обусловлен составом стекла, видом изделия и способом охлаждения. Определяющие факторы: скорость твердения стекла, изменение вязкости стекломассы при изменении температуры (за-

висит от состава стекла) и температуры во времени (условия охлаждения).

В общем виде процесс формования характеризуется следующими условиями:

$$v_1 \geq v_2 \text{ и } \tau_1 \leq \tau_2 \quad (2.1)$$

где

v_1, τ_1 – скорость и время формообразования;

v_2, τ_2 – скорость и время фиксации формы.

Практически формообразование изделия осуществляется значительно быстрее, чем фиксация его формы, поэтому в ходе процесса формования обычно часть времени затрачивается непосредственно на охлаждение и твердение изделий и соответственно в общем цикле формования.

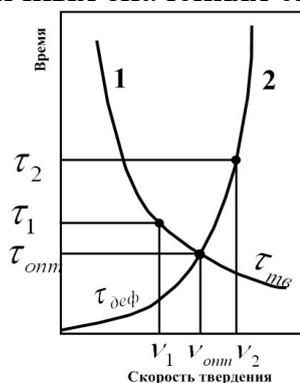
$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 \quad (2.2)$$

Помимо указанных стадий выделяется, как правило, особый технологический этап – охлаждение изделия. Затраты времени на этот этап в общем ходе процесса непроизводительны, поэтому на практике стремятся к максимально возможному увеличению v_2 , а следовательно, скорости охлаждения и твердения стекломассы при формовании и сокращению за счет этого величины τ_2 , которая определяет, по существу, общую продолжительность процесса формования.

В практических условиях для регулирования в нужном направлении продолжительности всего процесса формования и отдельных его стадий необходимо знать скорость твердения стекломассы и возможные технологические способы его уменьшения.

С увеличением скорости твердения время твердения уменьшается, а время деформирования увеличивается.

На (рис 2.1) приведены два возможных характерных режима при различных значениях скоростей твердения (v_1 , и v_2).



Условное обозначение:

1 – зависимость времени твердения $\tau_{тв}$;

2 – зависимость времени деформирования $\tau_{деф}$;

$\tau_{опт}$ – оптимальное время формования;

$v_{опт}$ – оптимальная скорость твердения.

Рисунок 2.1. Возможные режимы формования при различных скоростях твердения

В первом случае (v_1 и τ_1) время деформации меньше времени твердения, и общее время формования равно времени твердения. Это наиболее типичный для практики случай, когда отформованное изделие требует еще некоторого времени для отвердевания.

Для ускорения производственного процесса целесообразно уменьшать время формования, например, увеличивая скорость твердения. Во втором случае при скорости v_2 время деформации больше времени твердения, и время формования равно времени деформации. Рассматриваемый режим означает, что стекло, достаточно охладившись, еще не приобрело необходимой конфигурации. Учитывая крутой подъем правой ветви кривой на рис. 2.1, следует считать такой режим формования нецелесообразным. Уменьшением скорости твердения можно в этом случае добиться резкого сокращения времени формования.

Оптимальным является режим, при котором время формования оказывается минимальным (рис. 2.1), – соответствует точке пересечения кривых зависимости времени твердения и времени деформации от скорости твердения ($v_{\text{опт}}$, $\tau_{\text{опт}}$).

При формования стеклоизделий решающее значение имеют химический состав стекла, вид формирующих устройств и характер их контакта со стекломассой при формовании, температурный режим формируемого изделия и формы, условия охлаждения. Каждый из этих факторов оказывает влияние на скорость твердения стекломассы, что, определяет качество изделия и производительность стеклоформирующих машин.

2.1.1 Способы формования стеклоизделий

Способы формования можно разделить на *свободные* и *контактные*.

Свободные способы – способы формования, при которых стекломасса вплоть до затвердевания не контактирует с какими-либо твердыми поверхностями;

Контактные способы – способы формования, при которых, изделия выработывают в контакте с формирующими поверхностями.

Способы свободного формования применяют при производстве изделий, которые должны иметь чистую гладкую поверхность, которую трудно получить путем механической или химической обработки из-за больших размеров или малой толщины стекла. Способы контактного формования применяют при выработке изделий, требующих дополнительной обработки поверхности, либо таких изделий, к качеству поверхности которых не предъявляют особых требований.

При выработке изделий без контакта с формующими поверхностями главное значение имеет тепловой режим в процессе формования. Он должен быть таким, чтобы изделие до момента затвердевания успело приобрести окончательные форму и размеры.

При выработке изделий с использованием формующих поверхностей необходимо, чтобы они оставляли как можно меньше отпечатков и следов на поверхности изделий. Кроме того, стекло при выработке не должно прилипать к формующей поверхности или переохлаждаться ею, так как это вызывает кованость и посечки.

Процессы формования стекла так же можно разделить на **непрерывные** и **циклические**.

Непрерывные процессы формования – наиболее производительные способы формования, осуществляются путем непрерывного вытягивания, прокатки или направленного течения стекломассы с целью получения плоских или цилиндрических изделий с бесконечно простирающейся сплошностью и линейной размерностью в направлении формования (лента стекла, труба, волокно).

Циклические процессы формования, обычно менее производительные, сводятся к последовательному чередованию операций (циклов) отдельного изготовления штучных изделий путем прессования, выдувания или прессовывдувания из обособленных порций стекломассы каждого изделия в отдельности (в индивидуальных формах).

Таблица 2.1

Классификация способов формования стеклоизделий

Способ формования	Вид изделий	Разновидности способа формования
вытягивание	листовое стекло	вертикальное вытягивание лодочное и безлодочное, горизонтальное вытягивание
	стеклянные трубы	горизонтальное оттягивание (для тонких трубок), вертикальное безлодочное вытягивание
	стекловолокно	непрерывное вытягивание, растягивание путем раздува
прокат	листовое стекло	прокат гладкого и узорчатого стекла, прокат с армированием стекла металлической сеткой
	волнистое стекло	прокат с последующим гофрированием стекла
	профильное стекло	прокат с загибанием краев ленты в форме швеллера или коробки

Способ формования	Вид изделий	Разновидности способа формования
прокат	ковровая стекломозаика	прокат с нарезанием ленты на элементы малых размеров
	вальцованные трубы	горизонтальное вытягивание с разглаживанием стекла на сердечнике
отливка	листовое стекло с огненно-полированной поверхностью («плавающая лента»)	непрерывное регулируемое растекание плоской струи по поверхности расплавленного металла
	оптическое стекло	отливка стекломассы в разборную форму
выдувание	штучные изделия	выработка узкогорлых тарных изделий
прессование	штучные изделия	выработка стаканов
прессовыдувание	штучные изделия	выработка широкогорлых тарных изделий

2.2. Термическая обработка стекла

В технологии стекла применяется два вида термической обработки стеклоизделий, следующих за формованием: *отжиг* и *закалка*.

Термин *отжиг* характеризует процесс удаления или уменьшения внутренних остаточных напряжений в стеклоизделиях.

В процессе формования изделий из стекла и их охлаждения между поверхностными и внутренними слоями возникает разность температур, обусловленная низкой теплопроводностью стекла (так $\lambda_{\text{стекла}}=1,15$ Вт/м²·град, $\lambda_{\text{стали}}=47$ Вт/м²·град). В результате неравномерного остывания поверхностных и внутренних слоев в стекле возникают напряжения сжатия и растяжения. Скорость исчезновения напряжений обратно пропорциональна вязкости среды.

Когда стекло после быстрого охлаждения полностью остывает, т.е. принимает одинаковую температуру по всему объему, напряжения, возникшие в момент охлаждения, либо исчезают, тогда они называются временными, либо остаются, тогда они называются остаточными. Первый случай имеет место, когда процесс быстрого охлаждения протекает в интервале температур, при которых вязкие (неупругие) деформации в стекле практически не имеют места. Второй случай возникновения остаточных напряжений связан с вязкими (неупругими) изменениями формы стекла и имеет решающее значение для получения закаленного или отожженного стекла.

Для установления режима отжига того или иного стеклянного изделия определяют, прежде всего, температурный интервал, в котором могут возникнуть или исчезнуть остаточные напряжения. Этот интер-

вал, называемый зоной отжига, зависит от химического состава стекла. Он ограничивается высшей и низшей температурой отжига.

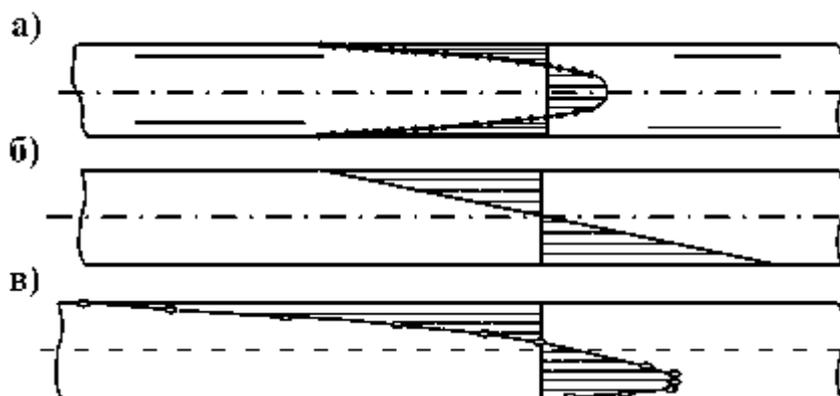


Рисунок 2.2. Эпюры возникающих напряжений в стекле

Под высшей температурой отжига ($T_{в.о.}$) подразумевают температуру, отвечающую, вязкости стекла 10^{12} Па·с. При этой температуре напряжения в стекле уменьшаются в 10 раз за время, равное 5 минутам.

Под низшей температурой отжига ($T_{н.о.}$) понимают температуру, отвечающую вязкости стекла 10^{14} Па·с. При ней напряжения уменьшаются в 10 раз за время, в 100 раз больше, чем при верхней температуре отжига, т.е. за 500 мин.

Отжиг может идти и ниже температуры ($T_{н.о.}$), до так называемой предельной температуры отжига, отвечающей вязкости 10^{15} Па·с, однако крайне медленно. При ней напряжения уменьшаются в 10 раз за время, в 1000 раз большее, чем при высшей температуре.

Высшая температура отжига теоретически соответствует границе хрупкого состояния стекла T_g и, следовательно, ее можно определить по кривой теплового расширения, по которой находят T_g для стекла конкретного химического состава. Практически из-за возможной деформации изделия температуру отжига в печах устанавливают на 20–30 °С ниже T_g .

Зная химический состав стекла и температуру отжига стекла близкого состава, можно определить приближенно высшую температуру отжига расчетным путем.

Низшая температура отжига обычных стекол по теоретическим данным на 48 – 58 °С ниже высшей температуры отжига. Практически эту разницу для обычных стекол принимают равной 100 °С, а для оптического стекла 150 °С.

Высшую и низшую температуру отжига наиболее точно определяют экспериментальным путем. Для этого в поляриметре-полярископе вместо предметного столика устанавливают электрическую трубчатую

печь, в которую помещают образец стекла и, постепенно его нагревая, определяют начало исчезновения, а затем момент быстрого исчезновения напряжений.

2.2.1 Температурный режим отжига

Процесс отжига большинства стеклоизделий проводят в четыре стадии (рис.2.3 – 2.4).

На стадии предварительного нагрева или охлаждения (отрезок I) изделия должны быть доведены до заданной высшей температуры отжига со скоростью, не вызывающей их разрушения.

На стадии постоянной температуры (отрезок II) изделия выдерживаются при высшей температуре отжига в течение времени, достаточного для заданного уменьшения напряжений.

На стадии медленного охлаждения (отрезок III) изделия охлаждаются с достаточно малой скоростью, не допускающей возникновения новых остаточных напряжений, превышающих заданные для этой стадии.

На стадии быстрого охлаждения (отрезок IV) изделия охлаждаются со скоростью, обеспечивающей допустимые временные напряжения.

В некоторых случаях, когда по условиям формования изделие равномерно прогрето (например, лента листового стекла), режим отжига осуществляется в три стадии: охлаждение до температуры отжига, медленное охлаждение и ускоренное охлаждение (рис. 2.4).



Рисунок 2.3. Кривая отжига штучных изделия из стекла

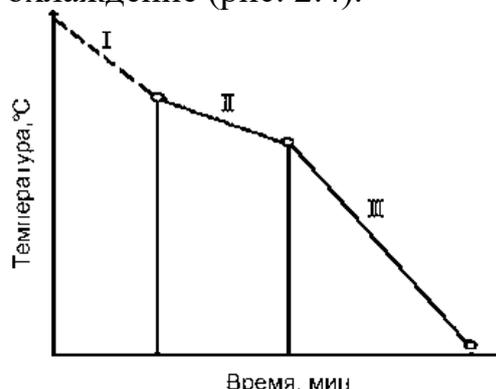


Рисунок 2.4. Кривая отжига листового стекла

Отдельные стадии процесса охлаждения показаны на кривых прямыми отрезками, длина которых зависит от продолжительности той или иной стадии. На практике подобные кривые режима отжига строят для каждого вида изделия, и ими пользуются при установлении температурного режима в отжигательных печах.

Для построения кривой необходимо для каждого вида изделия рассчитать продолжительность всех стадий отжига. Для расчета отжига предложен ряд методов. Достаточно точен метод Даувальтера, основанный на измерении характеристик соответствующих свойств стекла (плотности, теплопроводности, вязкости) и на вычислении по ним всех параметров отжига. На практике для быстрого расчета режима отжига чаще пользуются упрощенными формулами.

2.2.2. Контроль качества отжига стекла

Контроль качества отжига стекла основан на его оптических свойствах. Известно, что стекло в отношении его оптических свойств является веществом вполне однородным (изотропным). Однако это относится только к стеклам, свободным от механических напряжений. При наличии в стекле механических напряжений оно становится анизотропным, т.е. в нем возникают явления двойного лучепреломления, присущие кристаллическим телам. Степень дупреломления определяется величиной разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей. Чем больше в стекле напряжений, тем больше степень дупреломления и тем, следовательно, больше разность хода лучей. Поэтому, измерив, разность хода лучей, можно определить количество напряжений в стекле.

Разность хода лучей обозначается буквой Δ и измеряется в миллимикронах на 1 см дупреломляющей среды *ммк/см*.

Величину разности хода измеряют прибором, называемым поляриметром. Другим прибором – полярископом – можно качественно характеризовать напряжения в стекле по цветной картинке в поле зрения полярискоба, вызываемой эффектом двойного лучепреломления. Распространенные в настоящее время комбинированные приборы – поляриметры – полярискобы (рис.2.5) – позволяют количественно измерить напряжения в стекле и дать качественную их оценку.

Разность хода лучей определяют по формуле (2.3)

$$\Delta = \frac{3 \cdot (\varphi - \varphi_0)}{a}, \quad (2.3)$$

где

Δ – разность хода лучей, *ммк/см*;

a – ширина полоски, *см*;

φ – угол падения обыкновенного луча;

φ_0 – угол падения необыкновенного луча;

Зная разность хода, можно вычислить величину максимальных остаточных напряжений растяжения в центре образца по формуле:

$$P = \frac{\Delta}{K}, \quad (2.4)$$

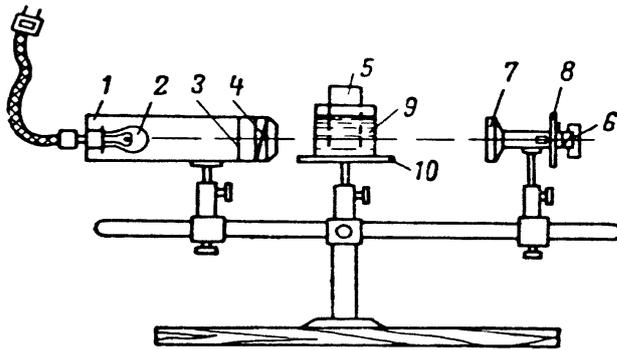
где:

P – величина остаточных напряжений;

Δ – разность хода лучей в мм/см;

K – оптическая постоянная упругости стекла, равная в зависимости от состава стекла 2,4 – 2,8 см²/кг

Условное обозначение:



1 – труба;

2 – источник света;

3 – светофильтр;

4 – поляризатор;

5 – образец;

6 – анализатор;

7 – лупа;

8 – движок;

9 – держатель образца;

10 – столик для образца.

Рисунок 2.5. Схема устройства поляриметра-полярископа

Для получения качественной характеристики напряжений движок переводят в правое положение. Если напряжения в стекле отсутствуют, поле зрения полярископа остается пурпуровым. При наличии в стекле напряжений наблюдаются различные цвета, по которым можно судить о качестве отжига. Равномерное фиолетовое поле зрения свидетельствует о хорошем отжиге, а красновато-оранжевые и синие цвета об удовлетворительном отжиге, белые, зеленые и желтые цвета – признак неудовлетворительного отжига.

2.2.3 Температурный режим закалки изделий из стекла

При естественном остывании отформованного изделия в нем возникают неравномерно распределенные остаточные напряжения, вызывающие разрушение изделия. Если нагреть стекло до пластичного состояния, а потом резко охладить его поверхности, то можно вызвать появление равномерно распределенных остаточных напряжений, которые придают стеклу повышенную механическую прочность и термостойкость.

Процесс тепловой обработки стекла (нагрев и быстрое охлаждение), приводящий к образованию равномерно распределенных оста-

точных напряжений сжатия во внешних слоях и растяжения во внутренних, называют закалкой.

Повышенную прочность закаленной стеклянной пластины можно объяснить следующим. Как видно из эпюры напряжений в закаленном стекле, не испытывающем внешней изгибающей нагрузки (рис. 2.6. а), поверхностный слой стекла оказывается сильно сжатым, причем по мере удаления от поверхности напряжения сжатия уменьшаются и на некотором расстоянии от нее, в так называемом нейтральном слое, они исчезают совсем. Далее расположены слои стекла, испытывающие растяжение, постепенно возрастающее по мере приближения к середине стеклянной пластины, где оно достигает максимума. Напряжения во второй половине пластин расположены симметрично по отношению к первой.

Если по направлению вертикальной оси стеклянной пластины, в которой путем идеально проведенного отжига удалены все напряжения, приложить изгибающую силу, то в ней возникнут временные напряжения (рис. 2.6. б). В верхнем слое появятся максимальные усилия сжатия, постепенно уменьшающиеся по направлению к центру пластины, где они совершенно исчезают. Во второй половине пластины возникнут уже временные растягивающие напряжения, постепенно возрастающие по мере удаления от оси и приобретающие максимальную величину в нижнем слое пластины. На (рис. 2.6. в) приведена схема действия той же изгибающей силы на закаленную пластину, в которой существуют равномерно распределенные внутренние напряжения. В такой пластине напряжения, возникающие под влиянием изгибающей силы, складываются с уже существующими напряжениями и распределяются.

При сравнении напряжений, возникших под одной и той же нагрузкой в отожженной и закаленной пластинах, можно сделать следующие выводы:

- верхний слой закаленной пластины сжат суммарным усилием, вследствие чего напряжения сжатия в нем значительно выше, чем в отожженной;
- максимальные напряжения растяжения в отожженной пластине находятся на самой нижней поверхности, в то время как у закаленной пластины они смещены внутрь и имеют значительно меньшую величину.

Следовательно, под влиянием приложенного изгибающего усилия закаленное стекло испытывает большее сжатие в верхнем слое и меньшее растяжение в нижнем слое, чем отожженное. Поскольку предел прочности стекла при сжатии, как известно, в 10 раз больше, чем при

растяжении, то понятно, почему закаленное стекло обладает повышенной прочностью.

Механическая прочность и термостойкость закаленного стекла зависят от степени закалки, которая определяется величиной напряжений в стекле. Как и при контроле отжига, напряжения измеряют оптическим методом в поляриметре при просвечивании торца пластины стекла в средней плоскости. Для удобства количество напряжений в закаленных стеклах выражают не в *ммк/см*, а в порядках на 1 см *N/см*.

В зависимости от степени закалки и характера разрушения различают три основные группы закаленных стекол: сильно закаленное – сверхпрочное (более 4 *N/см*), закаленное (2 – 4 *N/см*) и полужакаленное (до 2 *N/см*). Первое при разрушении дает мельчайшие осколки чешуйчатой формы, вплоть до порошкообразных частиц, второе – мелкие осколки округленной формы с не режущими гранями, а третье – остроугольные осколки удлиненной формы.

Заключение

Во второй главе были рассмотрены вопросы, посвященные процессу формования стеклоизделий. Представлена краткая классификация способов формования стеклоизделий и области их применения. Освещены режимы термической обработки стекла: отжиг и закалка стеклоизделий. Рассмотрена методика проведения стадии контроля качества отжига, и используемая аппаратура.

2.3. Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятию формование стекла.
2. В каком температурном интервале возможно формование стеклоизделий.
3. Перечислите, пожалуйста, стадии формования, и поясните, какие факторы влияют на вторую стадию.
4. Перечислите, пожалуйста, известные вам способы формования стеклоизделий.
5. Дайте определение термину – отжиг.
6. Какие напряжения являются остаточными.
7. Перечислите, пожалуйста, стадии отжига.
8. Охарактеризуйте стадию медленного охлаждения.
9. На каких явлениях построен контроль качества отжига.
10. Какие устройства (прибор) применяют для контроля качества отжига? Опишите принцип работы прибора.
11. Поясните, пожалуйста, принципиальное различие между отжигом и закалкой.

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

В этой главе рассматриваются современные способы производства листового стекла. Приводятся основные составы стекол. Приведена классификация и составы промышленных стекол, ключевые вопросы технологического процесса варки и выработки стекломассы.

Даются технико-экономические характеристики различных способов производства.

3.1. Составы и свойства листового стекла

Листовое стекло (ЛС) составляет более 50 % от всего выпуска стекла в Российской Федерации. Наибольшую часть листового стекла, около 80%, используют в промышленном, гражданском и сельскохозяйственном строительстве. Остальные почти 20 % потребляют другие отрасли промышленности: автомобилестроение, самолётостроение, железнодорожный транспорт, морской и речной транспорт, производство мебели и др.

Основой составов для большинства промышленных стекол является система $\text{SiO}_2\text{--CaO--Na}_2\text{O}$, которая модифицируется и другими оксидами Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O . В таблице 3.1 представлены составы выпускаемых листовых стёкол.

Таблица 3.1

Составы промышленных листовых стёкол

Стекло	Оксиды								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	B_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
Листовое	71,20	1,34	0,12	–	7,76	3,5	15,14	–	0,38
Кварцевое	99,91	0,01	–	–	0,03	0,01	0,04	–	–
Химико-лабораторное	68,60	3,80	–	2,50	8,40	0,80	9,70	6,10	–
Тарное	72,00	3,50		–	10,00	–	14,50	–	–
Прокат	72,00	1,10	–	–	9,10	3,00	13,80	–	–

Из таблицы 3.1 видно, что составы разных промышленных стекол очень отличаются друг от друга. Современные составы промышленных стекол содержат, как правило, от 5 до 7 компонентов, а специальные технические и оптические стекла и более.

Каждый вносимый оксид добавляет стеклу те или иные свойств. В таблице 3.2 показано влияние оксидов на свойства получаемых стекол.

К составам стёкол предъявляют 2 группы требований.

Первая касается физико-химических свойств стекла или стеклоизделий и соответствует функциональному назначению и условий эксплуатации готовой продукции.

Вторая группа требований относиться к технологическим и по сути определяет свойства стекломассы с учетом типа стекловаренной печи и способа выработки стекломассы. Наиболее общие требования второй группы следующие:

- обеспечение заданных свойств изделиям в зависимости от их назначения и условий эксплуатации;
- достаточно высокая скорость варки при температурах, установленных производственной практикой (с учётом качества топлива и применяемых для кладки стекловаренной печи огнеупоров);
- минимальное агрессивное воздействие в процессе варки на огнеупоры стекловаренной печи;
- более низкая температура кристаллизации в расплавленном состоянии по сравнению с температурой формования стекла, что является гарантией отсутствия кристаллизации при студке и выработке;
- достаточная скорость твердения стекломассы для обеспечения высокой скорости выработки;
- по возможности состав стекла, а значит и шихта не должны содержать дефицитных и дорогостоящих сырьевых материалов, а также токсичных материалов, вредно влияющих на окружающую среду.

Таблица 3.2

Сводная таблица влияние оксидов на свойства стекла

Свойство стекла	Оксиды					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Температура плавления	+	+	-	±	-	-
Вязкость	+	+	-	±	-	-
Склонность к кристаллизации	+	-	+	±	-	-
Поверхностное натяжение	+	+	+	+	-	-
Плотность	-	+	+	+	+	+

Свойство стекла	Оксиды					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Механические свойства	+	+	+	–	–	–
Химическая стойкость	+	+	+	–	–	–
Термическое расширение	–	–	+	+	+	+
Термостойкость	+	+	–	–	–	–
Показатель преломления	–	Н	+	Н	–	–

Условное обозначение:

«+» – значение свойства увеличивается при введении этого оксида,

«–» – значение свойства уменьшается при введении этого оксида,

«±» – оказываемое влияние зависит от концентрации,

«Н» – нет сведений.

Из таблицы видно, что оксиды оказывают разное влияние на разные свойства стекол. Оказываемое влияние зависит не только от природы оксида, но и от его содержания в составе стекла.

3.2 Особенности процесса варки листовых стекол

Термический процесс, в результате которого смесь разнородных компонентов образует однородный расплав называется *стекловарением*. Качество стекломассы определяет качество стекла и готового изделия, поэтому при варки листовых стекол большое внимание уделяется качеству стекломассы. К стекломассе, поступающей на выработку, предъявляют ряд требований:

- полное отсутствие непроварившихся зёрен шихты;
- отсутствие видимых газовых и твёрдых включений;
- химическая однородность стекломассы;
- термическая однородность стекломассы.

Выполнение требований обеспечивается рациональной организацией всего комплекса технологических операций и процессов от подготовки и загрузки шихты в стекловаренную печь до подачи подготовленной стекломассы к стеклоформирующим машинам.

Основные параметры стекловарения, влияющие на качество стекломассы:

- температурный режим варки;
- состав и давление газовой среды;
- постоянство уровня стекломассы.

Температурный график варки вдоль продольной оси печи (по обе стороны от *квельпункта*) имеет решающее значение для протекания основных стадий стекловарения. Поэтому применительно к печам листового стекла необходимо установить оптимальную границу шихты и варочной пены, площадь которой, как правило, занимает от 45 до 50 % отапливаемой части печи. Важно не допускать ее изменения, что обеспечивает устойчивое протекание реакций силикато- и стеклообразования. Температурный режим второй части варочной зоны строится таким образом, чтобы максимально способствовать протеканию процессов гомогенизации и осветления стекломассы. Колебание температуры в варочной части печи допускается в пределах ± 5 °С. Регулируют температурный режим отапливаемой части печи, изменяя тепловую нагрузку отдельных горелок. Максимальную температуру варки поддерживают с точностью ± 10 °С. Большое значение также имеет стабильность температурного режима в студочной части печи, т.к. здесь формируются потоки стекломассы, поступающие на формование. Поэтому уровень температур в студочной части поддерживают с точностью ± 1 °С.

Химический состав газов атмосферы печи. Зависит от рода сжигаемого топлива, соотношения топлива и воздуха в различные периоды варки или в отдельных зонах печи, а также от состава шихты. Так как достигнуть идеального смешения топлива и воздуха не удается, то полного сгорания обычно не наблюдается, в продуктах горения можно одновременно обнаружить CO_2 , CO и свободный кислород. В зависимости от количества CO и O_2 атмосфера печи может быть восстановительной (содержание CO в пределах от 0,3 до 0,4 об. %), нейтральной или окислительной (содержание CO – 0 об. %, O_2 более 2 об. %). Так как шихта увлажняется, а при сгорании углеводородов топлива образуется вода, то в атмосфере печи содержится много водяного пара. В зоне провариваемой шихты газовая среда обогащается углекислотой, сернистым газом и кислородом. Сернистый газ в атмосфере печи может образоваться и из серы, если последняя присутствует в топливе.

Химический состав газовой среды – важный параметр режима печей; газы из атмосферы печи участвуют в реакциях, протекающих в шихте, и взаимодействуют со сваренной стекломассой. Поэтому над шихтой и стекломассой необходимо создавать тот состав газовой среды, который обеспечивает наилучшие условия варки и осветления.

Химический состав газовой среды в стекловаренных печах в большой степени определяется коэффициентом избытка воздуха, подаваемо-

го для горения, α . В зоне варки $\alpha = 1,0 - 1,2$ восстановительная среда); в зоне чистого зеркала $\alpha = 1,2 - 1,3$ (окислительная среда).

Для поддержания постоянства газовой атмосферы не допускается утечка и подсосы воздуха через неплотности в воздухопроводах и их соединениях, шибах, в дымовоздушных каналах, через кладку регенераторов, горелок, равно как и задувание воздуха в печь из системы охлаждения брусьев бассейна.

Пламя при сгорании газа в печи должно быть светящимся, настильным и хорошо покрывать поверхность шихты и стекломассы в зоне варки. Факел должен быть направлен в зону интенсивного освещения. Категорически запрещается направлять факел на стены и свод, а также допускать перелет пламени в противоположные горелки.

Колебания уровня стекломассы. Допускают в пределах $\pm 0,1$ мм для обеспечения устойчивой работы выработочных машин и предотвращения разъедания огнеупоров.

3.2.2. Особенности конструкций печей для варки листового стекла

Варка листового стекла производится в регенеративных ваннных печах непрерывного действия с поперечным направлением пламени. Используются газопламенные печи, (часто с использованием дополнительного электрообогрева), непрерывного действия с поперечным направлением пламени, имеющие от 5 до 8 пар горелок. Большое число горелок обеспечивает возможность устанавливать и поддерживать необходимый температурный и газовый режим по длине печи.

В производстве листового стекла применяют самые мощные и наиболее автоматизированные газопламенные стекловаренные печи производительностью до 700 т/сут, и удельным съемом от 2000 кг/м² в сутки.

Конструкция варочной части всех крупных печей листового стекла независимо от способа выработки и режима варки принципиальных различий не имеет, на рис. 1.4. (Глава 1) представлены разные типы используемых печей.

Во всех типах печей можно выделить следующие основные части:

- варочный бассейн;
- сужение между варочной и студочной частью, так называемый «пережим»
- часто кроме сужения применяют пороги и преграды.

Конструкция выработочной (студочной) части печей имеет специфические особенности в зависимости от способа формования.

Часто в конце варочной или в студочной части печей устраивают так называемые «хальмовочные» карманы (карманы Питтсбурга) для усиления поперечных конвекционных потоков с целью улавливания возможных загрязнений, «например» плавающей на поверхности стекломассы пены, а также для интенсификации охлаждения стекломассы. Суммарная площадь таких карманов не превышает 6 м².

В современных стекловаренных печах предусмотрено разделение газового пространства специальными экранами, для создания в разных частях печи различные условия варки. Разделение варочной и студочной частей печи может быть как по газовой среде, так и по стекломассе. Необходимость устройства разделительных приспособлений еще более возрастает с повышением температур варки (до 1580 – 1600 °С).

Цель разделительных приспособлений:

- снизить коэффициент потока (число *Новаки*);
- преградить путь загрязнениям;
- усилить гомогенизацию стекломассы в результате принудительного заглубления ее поверхностных потоков (частично возвращающихся в виде обратного нижнего потока) ;
- стабилизировать работу формовочных машин – за счёт создания устойчивого теплового режима в студочной части и выработочном канале;
- стабилизировать режим давлений в варочной части и тем самым снизить износ печи.

Коэффициент потока или (число *Новаки*) n , – показывает отношение всего количества стекломассы, движущейся в выработочную часть, к вырабатываемому количеству стекломассы.

Снижение коэффициента потока способствует:

- лучшему охлаждению стекломассы;
- уменьшение теплового излучения из варочной части в студочную часть печи по пламенному пространству;
- уменьшение переноса тепла из варочной в студочную часть конвекционными потокам стекломассы за счёт уменьшения ширины их сечения;

т.о. снижается приток тепла в студочную часть, что способствует интенсификации процесса студки. Кроме того, чем меньше коэффициент потока, тем более качественная стекломасса поступит на выработку.

Для достижения выше поставленных целей применяют ряд специальных конструкций к которым относятся экраны и мосты.

Экран Германова (рис. 3.1) радикально отделяет выработочную часть печи от варочной по газовой среде и имеет охлаждаемую воздухом преграду по стекломассе, выполненную из бакоровых брусьев, подвешенных на стальных подвесках. Состоит из 1 – фасонные камни из бакора-41; 2 – канал воздушного охлаждения; 3 – плоская арка; 4 – подвесы. Экран заглублен в стекломассу на глубину от 200 до 300 мм и обеспечивает перепад температур стекломассы от 70 до 100 °С, снижает коэффициент потока n до 1,1–1,4, вместо 5–6 без экрана.

Бакоровый мост конструкции ГИС (рис. 3.2) включает перешеек со сниженным сводом и плоской аркой. Состоит из 1 – промежуточная опора; 2 – плоская арка из бакора-41; 3 – плоская динасовая арка;

Разделение по стекломассе осуществляется при помощи горизонтального моста из бакоровых огнеупоров, прочно зажатых с обеих сторон распорными болтами, и обеспечивает снижение температуры на 40 – 50 °С, а также снижает n до 1,1 – 1,6.

Трубчатый холодильник заглубляется в стекломассу, обеспечивает перепад температур на 100 – 120 °С, снижает n до 1,1 – 1,6.

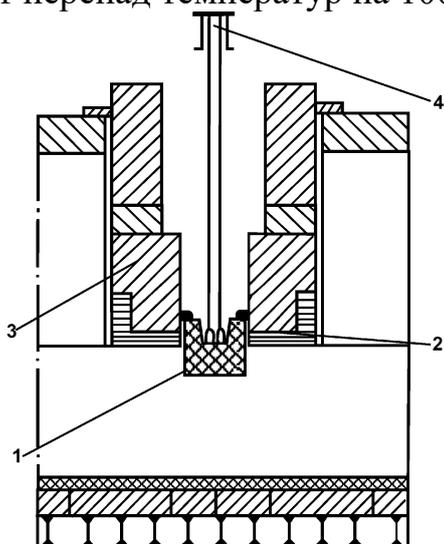


Рисунок 3.1. Схема заградительного экрана конструкции А.Н. Германова

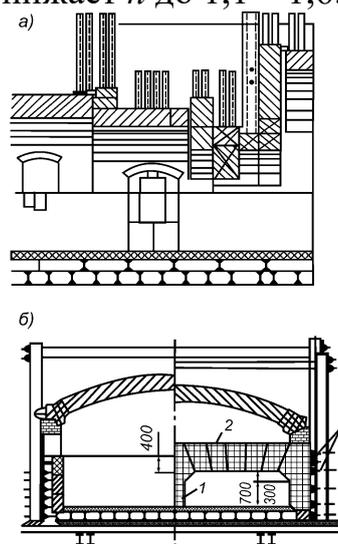


Рисунок 3.2. Схема заградительного устройства конструкции ГИС

Для интенсификации охлаждения стекломассы бассейн при переходе из варочной части в студочную сужается, иногда значительно, до 40 %, а свод снижается (устраивают пережим между зоной освещения и студочной частью). Кроме того, устраиваются различные преграды и пороги (рис. 3.3).

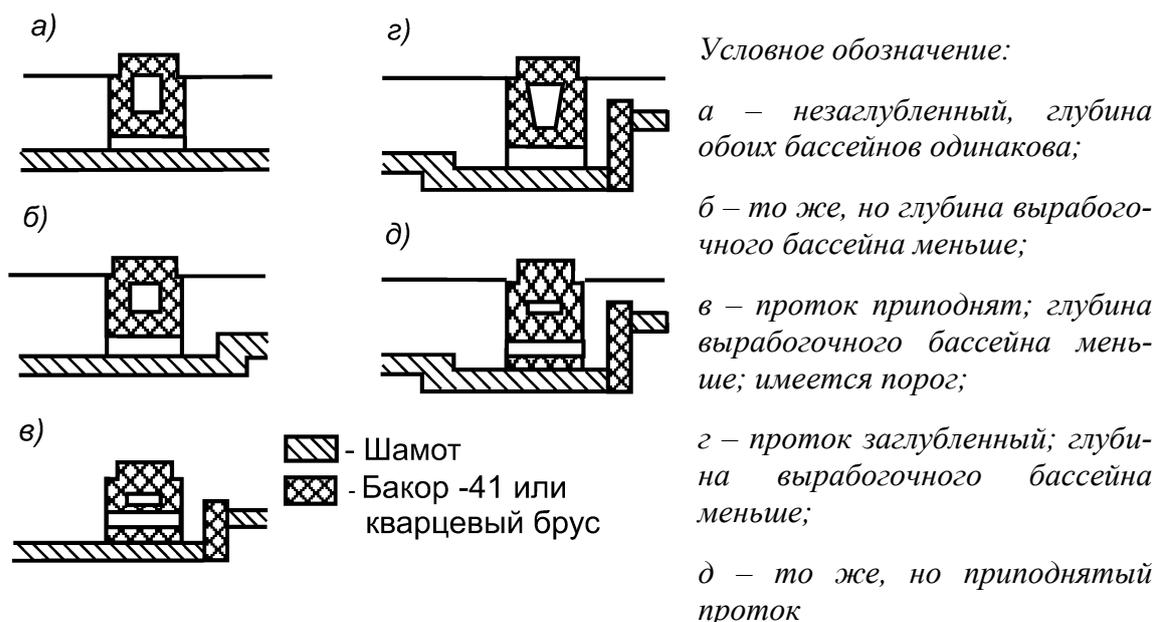


Рисунок 3.3. Схемы устройства протоков продольный разрез бассейна «по течению» стекломассы

С целью интенсификации процессов стекловарения и следовательно, повышения производительности внедряются следующие мероприятия:

- стекло варят при максимальной температуре варки от 1580 до 1600 °С (определяется видом используемых огнеупоров);
- используют дополнительный электроподогрев (ДЭП) (до 30 % от необходимого для стекловарения тепла может вноситься установкой ДЭП);
- используют предварительную подготовку шихты (компактирование, спекание);
- используют барботаж, т.е. продувание стекломассы импульсными газовыми потоками через сопла в дне печи;
- используют современную тепловую изоляцию печи в сочетании с охлаждением отдельных элементов кладки бассейна и верхнего строения.

Учебное издание

ВЕРЕЩАГИН Владимир Иванович
ПЕТРОВСКАЯ Татьяна Семеновна
ДИТЦ Александр Андреевич

ТЕХНОЛОГИЯ СТЕКЛА

Учебное пособие

Издано в авторской редакции

Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Уч.-изд. л.

Заказ Тираж 3 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

