

ПРОИЗВОДСТВО СТЕКЛА

Елена Евгеньевна Строганова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», кандидат технических наук

Александр Юрьевич Санжаровский

Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»,
кандидат технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Стекло в современном мире окружает нас повсюду. Нельзя сказать, чтобы в истории человечества оно играло столь же заметную роль, как камень, дерево или металл. Однако достижения в области технологии стекла, накопленные за всю историю его существования и реализованные во второй половине двадцатого столетия, поставили его в ряд стратегических материалов, обеспечивающих научно-технический прогресс человечества.

Стекло — уникальный материал, один из первых, придуманных людьми более четырех тысячелетий назад. Прозрачность и технологичность — великолепное сочетание свойств, которое лежит в основе разработки большинства изделий из стекла любых форм и размеров. Многовековой путь развития технологии стекла раскрыл множество граней этого материала. Представить только, что один базовый состав компонентов позволяет производить изделия из стекла для строительства, автомобилестроения, оформления интерьеров, хранения практически всех видов напитков и множества видов продуктов. Разнообразие составов стекол привело к созданию таких подотраслей, как производство оптического, технического, медицинского, кварцевого стекла, стекловолокна, и разработке материала XX столетия — стеклокристаллического материала, или ситалла.

Стекольная отрасль охватывает широчайшее разнообразие технологических процессов — от мелкосерийного ручного производства до сверхпроизводительного флоат-процесса. Методы производства включают как малые печи мощностью до 20 т стекломассы в сутки с электрическими нагревательными элементами, так и огромные печи с газовым теплоносителем производительностью до 1000 т стекломассы в сутки. В среднем энергия, необходимая для стекловарения, составляет более 75 % совокупной энергии, требующейся для производства продукции из стекла. Стоимость энергии для стекловарения является второй по величине статьей расходов для стекольных предприятий, что является мощным стимулом разработки энергоэффективных процессов.

В 90-е гг. XX в. в мировой стекольной промышленности началась реорганизация, направленная на снижение затрат и повышение эффективности производства. Это связано с экономическими факторами — длительностью инвестиционного цикла в стекольной промышленности, повышением конкуренции большого числа игроков на рынке товаров. И с экологическим аспектом производства стекла как мощного потребителя природных ресурсов, с одной стороны, и не менее мощного производителя промышленных

отходов — с другой. Компании, доминирующие в отрасли, становятся международными, с одинаковыми требованиями и к технологии, и к качеству выпускаемой продукции. На рисунке 1 представлен мировой рынок производителей стекла в конце XX в. (объем производства). К тому времени Китай вышел на первое место по объемам производства всех видов стекольной продукции и продолжает уверенно лидировать. Традиционные лидеры в производстве стекла — страны Европейского сообщества, США, Япония и Россия — становятся игроками другой лиги по объемам производства, но остаются лидерами в разработке технологий. Новое лицо стекольной промышленности сегодня рисуют разработчики технологического оборудования для варки, формования и промышленной переработки стекла.



Рис. 1. Мировой рынок производства стекла в 1990-е гг.

Упрощенная схема отрасли, где все виды изделий можно свести к двум видам — плоское и полое стекло, в зависимости от способа формования, может быть представлена следующим образом (рис. 2).

Львиная доля объема совокупного валового продукта в мире принадлежит листовому (не менее 35–40%) и тарному (более 40%) стеклу. На производство всех остальных видов продукции из стекла в мировом производстве (а это сортовое, медицинское, светотехническое, техническое стекло и стекловолокно) приходится не более 10%. И в обозримом будущем вряд ли можно ожидать существенного изменения этой картины.

Стекольная промышленность России относится к производственным отраслям, выпускающим материальные продукты (блага, изделия). В ее состав входят предприятия, производящие изделия из стекла по классической технологии стекловарения из сырьевых материалов, а также предприятия, занимающиеся изготовлением изделий путем промышленной переработки «сырого» стекла или гладких изделий, то есть без использования процесса стекловарения. Доля предприятий, занимающихся переработкой, растет в геометрической прогрессии и составляет 10–12% от общего выпуска изделий из стекла.



Рис. 2. Основные виды изделий из стекла и способы производства

В России основная продукция стекольной промышленности — это тарное (на уровне 50 % от общего выпуска) и листовое (на уровне 25 %) стекло. На остальные сегменты — сортовое, специальное, техническое стекло и стекловолокно — приходится около 15 %. Такое изменение соотношения основных производителей связано не столько со снижением спроса на листовое стекло в перестроечные годы конца XX столетия, сколько с невозможностью сохранить и модернизировать производственные мощности на заводах листового стекла. Сегодня число заводов по выпуску листового стекла в России растет, и по объемам производства они постепенно приближаются к уровню 1970-х гг., когда СССР занимал первое место в мире по выпуску листового стекла (рис. 3).

Листовое стекло — это бесцветное, прозрачное натрий-кальций-силикатное стекло, изготавливаемое методами флоат- или вертикального вытягивания без какой-либо дополнительной обработки поверхностей, имеющее вид плоских прямоугольных листов, толщина которых мала по отношению к длине и ширине (ГОСТ 111-2001 «Стекло листовое»).

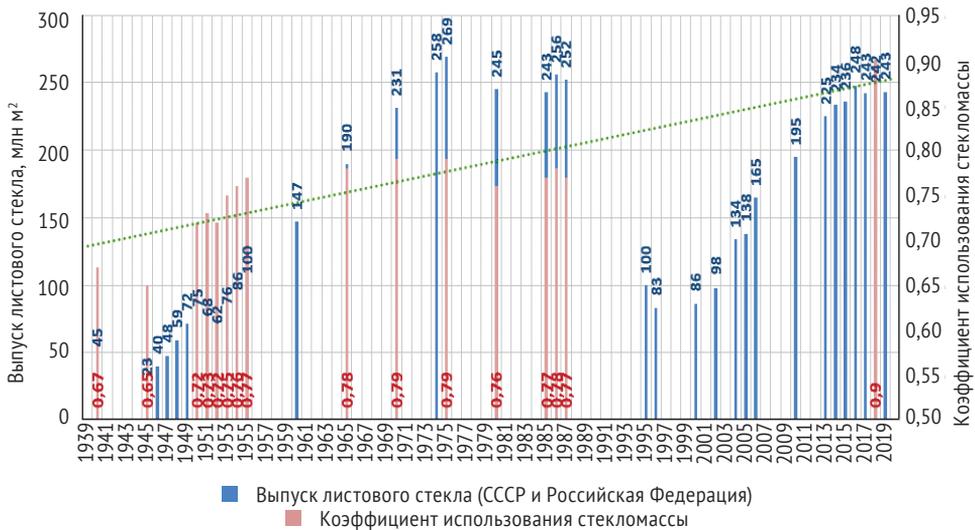


Рис. 3. Динамика производства листового стекла (СССР и Российская Федерация)

Сегодня большинство заводов, выпускающих листовое стекло, наряду с «сырым» бесцветным, прозрачным, необработанным стеклом, выпускают один или несколько видов специальных стекол:

- цветные:
 - окрашенные в массу,
 - с цветными глазурными покрытиями;
- со специальными оптическими свойствами:
 - пропускающие и поглощающие УФ-излучение,
 - поглощающие и отражающие ИК-излучение;
- безопасные стекла:
 - закаленные,
 - ламинированные,
 - пожаростойкие;
- с металлическими и оксидно-металлическими покрытиями:
 - зеркала,
 - стекла-шпионы,
 - антибликовые стекла;
- с полимерными покрытиями:
 - пленочными,
 - лаковыми,
 - принтерными;
- химически или механически декорированные;
- умные стекла:
 - фото- и электрохромные,
 - самоочищающиеся,
 - с жидкокристаллическим покрытием.

Представленный ассортимент стекол очень четко отражает запрос на функции листового стекла у потребителя. Широта использования материала достигнута именно потому, что, играя с присущим стеклу светопропусканием, можно превратить его в новый материал уже после процессов формования и резки. Практически неограниченные возможности и разнообразие способов нанесения покрытий на листы стекла любых выпускаемых сегодня размеров расширяют области применения такого привычного и, казалось бы, хорошо знакомого материала.

Основные потребители листового стекла — это строительная отрасль (75–80%) и машиностроение (15–20%). Следом идут производители мебели, а также производители зеркал и предметов интерьера (около 5%).

В строительстве традиционно используется бесцветное прозрачное листовое стекло с высоким светопропусканием для остекления оконных проемов, а также для изготовления стеклопакетов, растет доля энергосберегающего стекла, которое чаще всего используется для структурного остекления фасадов. Наряду с остеклением, все шире используют ламинированное стекло в качестве конструкционного материала для изготовления стен, полов, потолков и даже лестниц.

В машиностроении плоское и гнутое листовое стекло используют для остекления всех видов гражданского и военного наземного, водного и воздушного транспорта благодаря высокому светопропусканию в заданной области спектра и достаточной прочности. Использование закаленных и ламинированных стекол решает проблему безопасности водителей, пассажиров и окружающих людей при разрушении стекла.

В мебельной промышленности бесцветное, тонированное и безопасное стекло идет для изготовления стеклянных дверей шкафов, столешниц, а иногда стульев и кресел. Очень востребованы стекла в интерьере — кроме традиционных зеркал используют специальные стекла для картин и фотографий, стекла с переменным светопропусканием, стекла для телевизионных экранов и других средств отображения информации.

В настоящее время в Российской Федерации основной способ производства листового стекла — это флоат-процесс — метод формования в ванне с расплавом олова. Качество получаемого стекла предопределяет его использование в строительстве, машиностроении и производстве мебели без дополнительной механической обработки. Ранее в стране функционировали предприятия, выпускающие листовое стекло методами вертикального вытягивания и непрерывного проката. Выпускаемое стекло для использования, например, в производстве зеркал, подвергали шлифованию и полированию.

Листовое стекло в Российской Федерации производят на заводах ведущих международных Guardian Glass (США), Pilkington (Великобритания) в составе NSG Group (Япония), Asahi Glass Co., Ltd. (Япония), Saint-Gobain (Франция), Glaverbel (Бельгия) и российских компаний — АО «Салаватстекло», АО «СаратовСтройСтекло», АО «Каспийский завод листового стекла». Основные производственные мощности расположены в центральном и южном регионах Российской Федерации, а также в Республиках Башкортостан, Дагестан и Татарстан (см. рис. 4 и табл. 2).

В 2019 г. сектором было выпущено приблизительно 243,15 млн м² стекла на 12 флоат-линиях компаний, работающих в Российской Федерации, общей мощностью 3,3 млн т стекла (295,7 млн м²).

Стеклотара — стеклянная упаковка (тара), используемая для хранения и транспортировки промышленных товаров и пищевых продуктов.

Тарное стекло — наиболее крупная подотрасль стекольной промышленности Российской Федерации. В среднем в год в стране производится около 7 млн т тарного стекла.

Основные потребители тарного стекла — производители всех видов напитков, пищевая, медицинская и парфюмерная промышленность. Процентное соотношение потребности и потребления стеклянных банок, бутылок и флаконов можно выразить следующим соотношением: напитки/пищевая продукция/фармацевтика + парфюмерия = 75/20/5. Понятно, что это соотношение достаточно условно и подвержено колебаниям, как и для любого продукта потребления, но основную тенденцию использования, прежде всего бутылок для напитков, показывает достаточно четко.

Стеклянная тара, столь привычная сегодня, достаточно долго пробивала себе дорогу, чтобы стать наиболее доступным и удобным способом хранения жидких и твердых продуктов.

Основным преимуществом стеклянной тары перед металлической является высокая химическая стойкость стекла, которая дает возможность разливать и упаковывать в нее множество видов свежей и консервированной продукции с кислым и нейтральным рН среды. Керамика так же, как стекло, обладает высокой устойчивостью к воздействию пищевых продуктов, однако стекло прозрачно и легко окрашивается в различные цвета, что создает более правильные условия хранения, в частности алкогольной продукции. Кроме того, стеклянная посуда имеет меньшую толщину стенки, и скорость формования стеклянных бутылок и банок существенно выше, чем керамических.

Традиционные упаковочные материалы — металлы, керамика и стекло — получают с помощью высокотемпературных технологий. В настоящее время на рынке упаковочной продукции — бум изделий из полимерных материалов, технология производства которых требует существенно меньшего энергопотребления. К тому же, полимерная банка или бутылка существенно легче, чем керамическая или стеклянная. И, если речь идет о расфасовке продукции, не требующей длительного хранения, полимерная тара уверенно вытесняет изделия из неорганических материалов. Однако в целом стеклянная тара по-прежнему остается востребованной, и мировой и российский уровни ее производства неизменно высоки.

Стеклянную тару по виду изделий делят на узкогорлую (бутылки), и широкогорлую (банки), а также на бесцветную и цветную. По областям применения различают узкогорлую тару для алкогольной, слабоалкогольной, безалкогольной и газированной продукции, а также бутылки для соусов и специй. Широкогорлая стеклянная тара — банка — из бесцветного и полубелого стекла традиционно используется для упаковки консервов и соков,

а также детского питания. Отдельной строкой идет парфюмерная стеклянная бутылка, или флакон, для розлива духов, туалетной воды, одеколонов и другой парфюмерно-косметической продукции. Кроме того, существует стеклянная тара химического и медицинского назначения. Ее используют для хранения неорганических, органических и биологических твердых и жидких веществ и препаратов.

По данным 2015 г., в РФ функционировали несколько десятков предприятий по производству стеклотары, мощность производственных линий которых варьировала от 150 до 300 т стекломассы в сутки. В отличие от производства листового стекла, пока предприятия по производству стеклянной тары — российские компании. Отрадно отметить, что география расположения заводов расширяется, растет доля предприятий с высокой мощностью производства и ассортимент выпускаемой продукции.

В таблице 1 представлены данные о мощности существующих производственных линий и их количестве.

Таблица 1. Линии по производству стеклянной тары на предприятиях Российской Федерации (2015 г.)

Параметр	Мощность производственной линии		
	< 150 т/сут	от 150 до 300 т/сут	от 300 до 600 т/сут
Количество предприятий, ед.	12	63	8
Доля предприятий, %	15	75	10

Производство сортовой посуды в России сегодня значительно уступает по мощности и ассортименту зарубежным производителям. Рынок сортового стекла представлен в основном продукцией из Китая и Турции, а хрустального — из Чешской Республики (Богемия) и Франции. Уверенно говорить о возрождении заводов, выпускающих стеклянную посуду, в настоящее время невозможно, количество работающих предприятий невелико. Однако есть несколько инвестиционных проектов, направленных на возрождение ручного производства стеклянной посуды в России. Это ООО «Опытный стекольный завод» и ООО «Гусевской хрустальный завод им. А. Мальцова» в г. Гусь-Хрустальном, Бахметьевская артель (ранее — завод «Красный гигант», головное предприятие — в Москве) и ЗАО «Никольский завод светотехнического стекла» в г. Никольске Пензенской обл. Объемы продукции на этих предприятиях невелики, но сегодня их главная задача сохранить российскую школу стеклоделия.

Основные предприятия по производству стекольной продукции расположены в центральной части России. Это создает определенные проблемы для потребителей их продукции из Западной и Восточной Сибири, для которых приобретение бутылок и листового стекла в Китае более привлекательно.

Таблица 2. Основные производители листового и тарного стекла в Российской Федерации

№ на карте	Регион	Предприятие
ПРОИЗВОДСТВО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА		
3	Республика Дагестан	АО «Каспийский завод листового стекла»
4	Ростовская область	ООО «Гардиан Стекло Ростов»
6	Московская область	ООО «Пилкингтон Гласс»
		ООО «Эй Джи Си Флэт Гласс Клин»
7	Рязанская область	ООО «Гардиан Стекло Рязань»
9	Саратовская область	АО «Саратовский институт стекла»
		АО «СаратовСтройСтекло»
10	Владимирская область	ООО «Экспо Гласс» (завод «Символ»)
12	Нижегородская область	АО «Эй Джи Си Борский стекольный завод»
14	Республика Татарстан	АО «Тракья Гласс Рус»
15	Республика Башкортостан	АО «Салаватстекло»
ПРОИЗВОДСТВО ТАРНОГО СТЕКЛА		
1	Республика Северная Осетия – Алания	ООО «СОЛЛО» (АО «Иристонстекло»)
2	Ставропольский край	АО «Сен-Гобен Кавминстекло» (Verallia group)
3	Республика Дагестан	ООО «Дагестан Стекло Тара»
4	Ростовская область	АО «Новочеркасский стекольный завод»
		АО «Каменский стеклотарный завод»
5	Калужская область	АО «Березичский стекольный завод»
6	Московская область	АО «Дмитровский стекольный завод» (ООО «Стеллар Гласс»)
		ООО «Сергиево-Посадский стекольный завод» (АО «Авангард-стекло»)
		ООО «Солстек» (ООО «Солнечногорский стекольный завод»)
		ООО ПК «ЭЛЬГЛАСС» (г. Электросталь)
8	Пензенская область	ЗАО «Никольский завод светотехнического стекла»
10	Владимирская область	ООО «РАСКО»
		ООО «Красное Эхо» Площадка Уршельский Площадка Красное Эхо
		Русджам-Гороховец – ООО «Русджам стеклотара холдинг»
		ООО «Великодворский стекольный завод» (АО «Авангард-стекло»)
		Стекольный завод «Гласс Декор»

Таблица 2 (окончание)

№ на карте	Регион	Предприятие
11	Ленинградская область	АО «Киришский стекольный завод» (Русджам-Кириши – ООО «Русджам стеклотара холдинг»)
		ООО «Кингисеппский стекольный завод» (АО «Авангард-стекло»)
		АО «Пикалевская сода»
12	Нижегородская область	АО «Балахнинское стекло»
		Компания «Гласс НН»
13	Вологодская область	ООО «Чагодощенский стекольный завод» (ЧСЗиК)
		Русджам-Покровский – ООО «Русджам стеклотара холдинг»
		ООО «Северная стеклотарная компания»
15	Республика Башкортостан	АО «Салаватстекло»
		Русджам-Уфа – ООО «Русджам стеклотара холдинг»
16	Удмуртская Республика	ООО «Факел»
		АО «СВЕТ»
17	Омская область	ООО «Омский стекольный завод» (АО «Авангард-стекло»)
19	Краснодарский край	Русджам «Кубань» – ООО «Русджам стеклотара холдинг»
20	Волгоградская область	АО «Камышинский Стеклотарный Завод» (Verallia group)
21	Липецкая область	ООО «ЧСЗ–Липецк» (ЧСЗиК)
22	Тульская область	АО «ГЛАНИТ»
23	Новосибирская область	ООО «Сибирское стекло»
24	Кабардино-Балкарская Республика	ООО «ГЛАСС-ТЕХНОЛОДЖИС»
25	Тверская область	ООО «Стеклозавод им. Луначарского»
		ООО «Стекольный завод 9 Января»
26	Тюменская область	ООО «Стеклотех»
27	Республика Мордовия	ООО «Стекольная компания “Развитие”»
28	Смоленская область	ОАО «Ситалл»
ПРОИЗВОДСТВО СОРТОВОЙ ПОСУДЫ		
8	Пензенская область	ЗАО «Никольский завод светотехнического стекла»
		ООО «Бахметьевский завод»
10	Владимирская область	ООО «Опытный стекольный завод»
		ООО «Гусевской хрустальный завод им. А. Мальцова»
18	Брянская область	ООО «Дятьковский хрустальный завод»

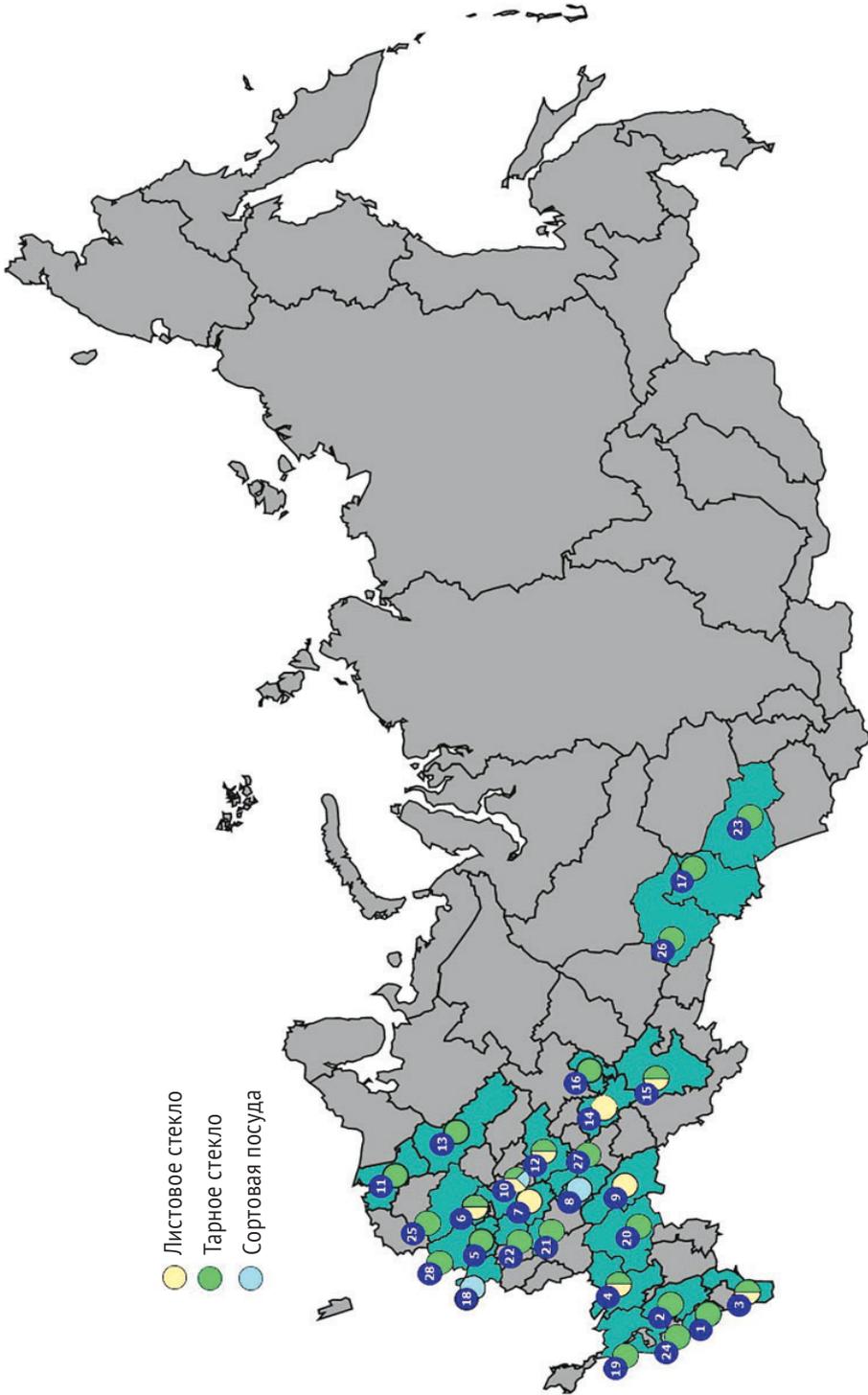


Рис. 4. Карта-схема расположения основных производств листового, тарного стекла и сортовой посуды в Российской Федерации

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛА

Очень хочется начать рассказ о стекле с конкретных данных о том, где, когда и почему возник этот замечательный материал. Отсылки к тому, что древние люди пользовались наконечниками из вулканического стекла, скорее запутывают, а не проясняют ситуацию. Если наложить друг на друга карты мира того времени, то окажется, что места, где использовали природное стекло, и те, где его стали использовать как вновь созданный материал, недостижимо далеки друг от друга. Единственное, что объединяет природные и рукотворные стекла, — аморфная структура твердого материала.

Когда, где и как было получено первое искусственное стекло? Точного ответа на этот вопрос нет до сих пор. Ученые сходятся во мнении, что родиной стекла является сирийское побережье (Месопотамия, Финикия или Древний Египет), конкретнее указать не представляется возможным — между территориями было налажено слишком тесное взаимодействие.

Красивая легенда, рассказанная римским ученым Плинием Старшим в «Естественной истории», далека от истины, как любая сказка: «Однажды, в очень далекие времена, финикийские купцы везли по Средиземному морю груз природной соды. На ночлег они высадились на песчаном берегу и стали готовить себе пищу. За неимением под рукой камней обложили костер большими кусками соды. Поутру, разгребая золу, купцы обнаружили чудесный слиток, который был тверд как камень, горел огнем на солнце и был чист и прозрачен как вода. Это было стекло»¹.

Попытки повторить условия, описанные в этой легенде, в прошлом столетии показали, что получить прозрачный расплав в открытом пламени простого костра невозможно — недостаточно высока температура. Скорее всего, стекло стало побочным продуктом, образующимся при глазуровании керамики, технология которого была доступна мастерам Древнего Египетского царства. Капельки глазури, стекшие с изделия, были очень похожи на природные полудрагоценные камни — бирюзу, малахит, лазурит.

Если анализировать историю технологии стекла по появлению разных видов изделий, то мы увидим следующую последовательность. Самыми первыми самостоятельными изделиями, которые служили мастерам первой пробой пера, были мелкие изделия — украшения. За ними следовали более крупные вещи — предметы быта — посуда и тара, и только потом приходила очередь крупногабаритных изделий — зеркал, витражей и оконных стекол. Как мы увидим, это напрямую связано с порцией стекла хорошего качества, которую можно было получить за один производственный цикл и наличием приемов формования изделий. Ну а без чего все это вообще невозможно? Без хорошего костра, на котором во II тыс. до н. э. варили не только пищу, но и стекло. Если за основу взять такое свойство стекла, как прозрачность, то мы увидим, что это единственный не подверженный влиянию моды признак, уже более двух тысяч лет являющийся главным признаком этого материала. Попробуем проследить

¹ Plin. NH. XXXVI, 191 [Плиний Старший. Естественная история. Кн. 36, гл. 191].

зарождение и развитие технологий по привычным признакам — сырьевым материалам, условиям варки, способам формования-декорирования, видам изделий.

Архаический, или египетский, период

К благоприятным факторам, предшествующим появлению в древнем Египте стекла как самостоятельного материала, следует отнести следующие:

- широкое использование легкоплавкой фритты для глазурования глиняной посуды и облицовочных плиток;
- наличие сырья, необходимого для изготовления стекла, в первую очередь — речного песка, обогащенного ракушечником (солями кальция), и соды (гидрокарбонатов щелочных металлов) как одного из полезных ископаемых;
- поиск новых материалов, аналогов природных драгоценных камней, необходимых для изготовления мужских и женских украшений, а также украшения гробниц.

Стекло Древнего Египта не было прозрачным; это уникальное свойство стекла, которое поставит его на особое место в ряду твердых материалов, еще предстоит открыть. Первые стеклоделы постепенно открывали многообразие и широкие технологические возможности этого удивительного материала.

Сырьем для изготовления глазуровочных фритт служили речной песок и зола от сжигания тростника и других растений, распространенных в дельте Нила, в соотношении примерно 70–75 к 25–30 по массе. Для снижения температуры варки золу смешивали с содой.

Первоначально для варки стекла использовали плоские глиняные горшки, ширина которых была много меньше высоты, — в них можно было получить до 1 кг стекломассы. На рубеже I и II тысячелетий до н. э. появляется двухстадийная варка стекла, отделяющая стадии процесса стекловарения: силикато- и стеклообразование от осветления и гомогенизации. Первая стадия варки обеспечивала протекание процессов силикато- и стеклообразования, для чего шихту сплавляли в высоких узких горшках, отдаленно напоминающих современные тигли, затем их разбивали, вынимали наиболее плотно спеченные, оплавленные и однородные куски и складывали в плоские чаши. Для второй стадии варки, в процессе которой происходило осветление и гомогенизация стекломассы, использовали плоские чаши, таким образом, производили варку в тонком слое, что позволяло более успешно завершить процесс стеклообразования, снизить количество газовых пузырей в готовом стекле и в целом повысить качество получаемой стекломассы.

Для плавления шихты использовали пламя костра, который разводили в специально выкопанной яме, чтобы было удобней регулировать температуру варки. Максимальные температуры, которые можно было получить в таких условиях, не превышали 850–1000°С. Рабочими инструментами служили металлические и глиняные черпаки, ножницы и палочки для отделения порций стекломассы, глиняные формы и плиты для отливки изделий.

Первыми изделиями, которые делали из нового материала — окрашенного в массу стекла, стали женские украшения — бусы и браслеты. Образцами таких изделий могут служить фрагменты стеклянных бус, которые датируются III тыс. до н. э., обнаруженные при археологических раскопках в Египте (рис. 5).



Рис. 5. Бусы из непрозрачного стекла. III тыс. до н. э., Древний Египет

Узнать то, что сегодня мы называем стеклом, в этих изделиях практически невозможно. Но и задачу себе древние стеклоделы ставили совершенно конкретную — имитировать природные камни. Исходным сырьем для изготовления стекла служили песок с примесью ракушечника, иногда известь, зола, содержащая карбонат калия — поташ, или сода — смесь щелочных карбонатов и гидрокарбонатов. В переводе на современный технологический язык это означает, что в состав стекла входили оксиды кремния, кальция и/или калия и натрия. И древние составы так и называли — поташными, характерными для северного или восточного средиземноморья, или содовыми, распространенными преимущественно в Древнем Египте. Содержание щелочных оксидов было высоко, более 25 масс. %, и температура плавления таких стекол была существенно ниже, чем современных, не выше 1100°С. Цветным стеклом делали добавки малахитовой крошки, или сурика, или охры, или другой минеральной краски.

В конце XX столетия археологам из университета в Кардиффе под руководством Пола Николсона удалось обнаружить фрагменты древнеегипетского производственного комплекса, построенного в годы правления фараона XVIII династии — Эхнатона (1352–1336 гг. до н. э.) (рис. 6). Их реконструкция оборудования древней мастерской именуется египетской печью. Такая конструкция, безусловно, способствовала поддержанию температуры в печи на уровне 850–1000°С, что было вполне достаточно для выработки стекол легкоплавких составов.

Ученые восстановили в общих чертах технологию стеклоделия Древнего Египта по фрескам и руинам стекольных мастерских. Однако на приведенном рисунке есть загадка. Можно подумать, что мастер, опуская палку с намотанной массой в костер, держит ее во рту. Нет. Древние египтяне, сирийцы и критяне не владели технологией выдувания, она появилась значительно позже. Практически все дошедшие до нас изделия тех времен интенсивно окрашены, с толстыми стенками и декорированы методами навивания нити другого цвета. На рисунке представлены некоторые приемы изготовления изделия методом навивания на глиняно-песчаный сердечник, а трубку макали в печь, чтобы вытянуть стеклянный жгут (рис. 7).



Рис. 6. Современная реконструкция древнеегипетской печи

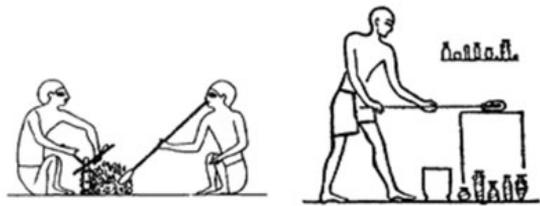


Рис. 7. Процесс изготовления изделий из стекла. XIV в. до н. э., Древний Египет

Технологии формования изделий из стекла были заимствованы из технологии изготовления керамических изделий без гончарного круга. Из влажной хорошо размятой глины делали колбаску диаметром 15–20 мм, укладывали ее вертикальными слоями для получения изделия нужной формы, выглаживали внутреннюю и внешнюю поверхности и обжигали.

Понятно, что лепить руками из жгутов горячей пластичной стекломассы было невозможно, поэтому **первым методом** изготовления бусин разного размера и узкогорлых полых стеклянных изделий — сосудов для масла, косметических средств и благовоний — стал разработанный египетскими мастерами метод навивания стеклянного жгута на песчаный сердечник.

Основными инструментами для изготовления изделий этим методом были две деревянные округлые палки или тростниковые трубки. Одна длиной не менее 1000 мм, конец которой — сердечник длиной около 200 мм — был обмазан смесью глины с песком, служила основой для изготовления изделий. Другая — для окунания в горшок за порцией стекломассы. Диаметр сердечника у палки-основы соответствовал диаметру отверстия бусины или внутреннему диаметру сосуда.

Порцию горячего стекла подносили к глиняному сердечнику, прикрепляли и начинали вытягивать нить, которую сразу же плотно наматывали на сердечник. Нужную форму бусине или сосуду придавали путем варьирования количества слоев стекломассы в разных частях изделия. После окончания навивания

изделие на короткое время помещали в пламя костра для огненной полировки поверхности, остужали на воздухе и выкручивали палку-основу. Характерной особенностью таких изделий является несоответствие внутренней и наружной форм изделия.

Так делали посуду, чаще всего небольшие сосуды для благовоний, а иногда и чаши из египетского стекла. Пример такого изделия представлен на следующем рисунке — древнейший стеклянный кубок фараона Тутмоса III (1450 г. до н. э.) (рис. 8). Египетское стекло ни по составу, ни по внешнему виду еще не похоже на стекла более поздних периодов. Отличительная особенность сосудов и чаш того времени — яркие цвета и сплошное декорирование поверхности методом навивания стеклянной нити цвета, отличного от цвета основного изделия (рис. 9).



Рис. 8. Кубок Тутмоса III
(Музей Египетского
искусства, Мюнхен)



Рис. 9. Египетские сосуды для благовоний.
I тыс. до н. э. (Лувр, Париж)

К XV в. до н. э. стекло массово производилось не только в Египте, а и в Передней Азии и на Крите. Наивысшим достижением мастерства стеклоделов стали сосуды и вазы из непрозрачного многоцветного стекла, которые сейчас занимают видное место в крупнейших музеях мира.

Вторым методом, который использовали для изготовления ритуальных фигурок небольшого размера, было литье в одноразовые глиняные формы, а **третьим** — ручное прессование, или, скорее, подпрессовка для придания необходимого рельефа чаше или блюду, как это было при изготовлении знаменитых муррин.

Секрет изготовления муррин до сих пор остается дискуссионным. Очевидно лишь, что они составлены из «завитков» синего и белого и стекла, внутренняя поверхность гладкая, а внешняя имеет выраженный регулярный рельеф, характерный для прессованных изделий.

Стадия декорирования сопровождается далеко не все технологические циклы изготовления изделий из стекла. Однако заслуга выделения приемов

декорирования в отдельную стадию при изготовлении изделия также принадлежит мастерам Древнего Египта. Главным приемом украшения сосудов для благовоний было навивание на их поверхность тонких стеклянных цветных нитей и «расчесывание» их специальными деревянными гребнями.

Перелом в сознании стеклоделов произошел только к IX в. до н. э.: мастера поняли, что стекло может быть не только цветным, но и бесцветным. При этом образцы бесцветного стекла, дошедшие до наших дней, чаще всего получены на основе прозрачного минерала силиката магния.

Отсутствие единой номенклатуры названий химических веществ, региональные особенности областей и сырьевых материалов, в которых осваивали ремесло стеклоделы, привели к тому, что в каждом регионе существовали технологические особенности производства стекла и перечень изделий, которые они вырабатывали. Мастерство и технологии передавались в строжайшей тайне от мастера к ученику. Первое известное «пособие» по стеклоделению датируется 650 г. до н. э. и представляет собой таблички, хранившиеся в библиотеке ассирийского царя Ашшурбанипала.

К моменту завоевания Египта римлянами стеклоделие распространилось с территории современного Египта и Ближнего Востока в Грецию и соседние с ней страны. Но до появления стеклодувной трубки изделия из стекла были в основной массе непрозрачны, толстостенны и являлись уделом богатых и знатных.

- Основные технологические завоевания первого этапа в истории стеклоделия:
- непрозрачное, окрашенное в массе стекло выделилось в самостоятельный материал для изготовления украшений, посуды и мелкой скульптуры как аналог цветных минералов и драгоценных камней;
 - были определены основные массовые соотношения составов стекол, египетское стекло относится к группе содовых стекол, то есть основной щелочной компонент в нем — оксид натрия;
 - для варки стекла используют природные сырьевые материалы, основными являются песок, содержащий щелочноземельные оксиды, зола, сода и известь, а вспомогательными — минеральные красители, содержащие медь, хром, железо, кобальт и олово;
 - варку стекол производят в две стадии, а качество стекломассы оценивают по однородности окрашивания — прозрачные и бесцветные стекла получают случайно;
 - основные приемы формования — литье, навивание на сердечник и пресование, декорирования — навивание и расчесывание цветных нитей;
 - нет стадии отжига изделий.

Римская империя — античный период

Исторический вклад Римской империи в становление производства стекла как необходимого для жизни людей материала трудно переоценить. Изобретение стеклодувной трубки сирийскими мастерами, произошедшее, по данным современной археологии, примерно между 27 г. до н. э. и 14 г. н. э., совершило

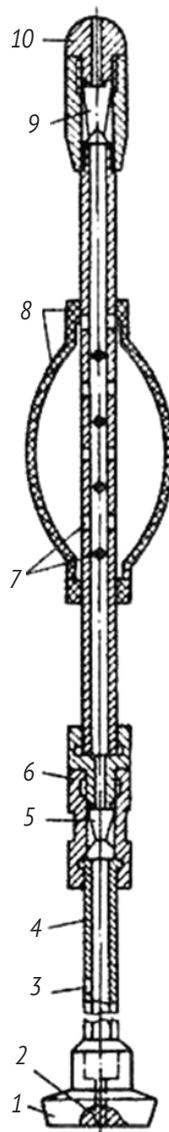
поистине революционный переворот в стеклоделении. Метод выдувания с использованием стеклодувной трубки сделал возможным изготовление практически любых сосудов и емкостей из горячего стекла — полых, плоских, невесомых и массивных, украшенных с помощью известных уже методов прессования и горячего декорирования. Но это лишь одна сторона медали. В период расцвета Римская империя владела территориями Африки и Европы, прилегающими к Средиземному морю, и даже южной частью Англии. И на всей этой огромной территории производили стеклянные изделия и торговали ими. Все это значительно увеличило круг людей, которые стали использовать стекло в повседневной жизни.

Стеклодувная трубка появилась на рубеже тысячелетий. При всей случайности такого факта к нему были и чисто технологические предпосылки. За два с половиной тысячелетия стало ясно, что новый материал годится не только для изготовления бус, что он обладает хорошей стойкостью к воздействию внешней среды во всех ее проявлениях — будь то атмосферное воздействие или пищевые и косметические продукты. Спрос на стеклянные товары возрос и с расширением границ империи. Совершенствование конструкций печей — строительство закрытых помещений, поддув воздуха для увеличения температуры пламени — позволило вернуться к одностадийному процессу стекловарения в высоких горшках. Повышение температуры пламени позволило получать стекломассу более высокого качества, текучую, пригодную для разнообразных способов изготовления изделий.

Из чего делали стеклодувные трубки времен Римской империи? Ну, вряд ли из цельнотянутых стальных труб, как сейчас. Скорее, они были деревянными или тростниковыми с глиняными наконечниками, а позже и металлическими, для набора стекломассы. Но принципиальное их устройство было примерно таким же, как его рисуют в современных учебниках (рис. 10). Конец трубки, служащий для вдувания воздуха, спилен на конус, и на него надет мундштук, который выдувальщик берет в рот. На противоположном конце расположен наборный наконечник, головка, или набель, служащие для взятия порции горячей стекломассы. Клапаны и отверстия внутри трубки предназначены для увеличения мощности дутья.

Рис. 10. Устройство стеклодувной трубки:

- 1 — наборная головка; 2 — выходное сопло; 3 — предохранительное отверстие; 4 — стальная трубка; 5 — ниппель нижнего клапана; 6 — нижний клапан; 7 — отверстие для воздуха; 8 — резиновый баллон; 9 — ниппель верхнего клапана; 10 — верхний клапан



К набору вспомогательных инструментов, которые необходимы для работы с горячим стеклом при работе с выдувной трубкой, добавилась понтия. Это стальной стержень с приваренным к одному концу диском, к которому прикрепляется выдутое изделие для отделки горла, ручек, ножек и переноски его в печь отжига. А остальной ассортимент необходимых приспособлений стеклодувного участка: стальные ножницы и щипцы, долоки и гладилки, — были известны еще мастерам Египта (рис. 11). Формы для выдувания делали из твердых пород дерева и хранили в специальных емкостях с водой.

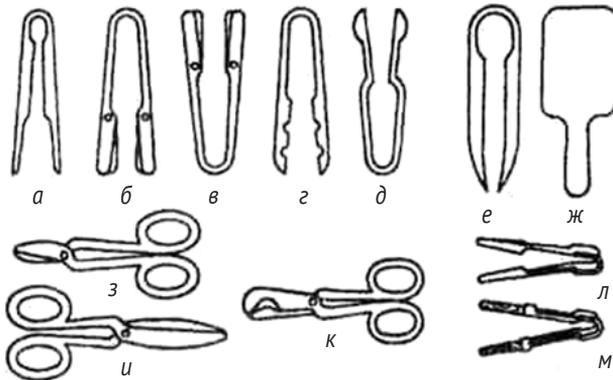


Рис. 11. Инструменты для ручного формирования:

а-е — щипцы для отделки ручек, ножек, горла и декорирования изделий; *ж* — гладилка для выравнивания стенок изделий; *з-к* — ножницы для отрезки горячей стекломассы; *л, м* — сошки для фигурной отделки

Последовательность процесса изготовления изделий с помощью стеклодувной трубки сохранилась и поныне: мастер из печи набирает стекломассу на стеклодувную трубку и делает из нее заготовку — баночку шарообразной, продолговатой или сплюснутой формы, в зависимости от геометрии будущего изделия. Затем, непрерывно вращая трубку, продувает пульку — заготовку, «ответственную» за толщину стенок и дна изделия, и после этого приступает к окончательному выдуванию изделия. Чтобы у изделия появилось горлышко или верхняя кромка, его переносят на понтию и отделяют от стеклодувной трубки. Часть стекла, которое соединяло изделие со стеклодувной трубкой, называют колпачком, после его удаления окончательно оформляют горлышко, приделывают ручки и отправляют готовое изделие в печь отжига.

При свободном выдувании для придания вытянутой, сплюснутой или шарообразной формы изделиям мастер меняет положение стеклодувной трубки: вниз, вверх или горизонтально. Все выдувные изделия, кроме тиходутых, формируют при непрерывном вращении стеклодувной трубки. Тиходутые изделия выдувают без вращения в одноразовые формы, изготовленные из металлической проволоки, дерева, гипса, керамики и т. п. Изделия, изготовленные тихим дутьем, отличаются большой толщиной стенок, неправильной формой, сложным рельефом поверхности.

На рисунке 12 схематично представлены основные приемы формирования полых и плоских стеклянных изделий.

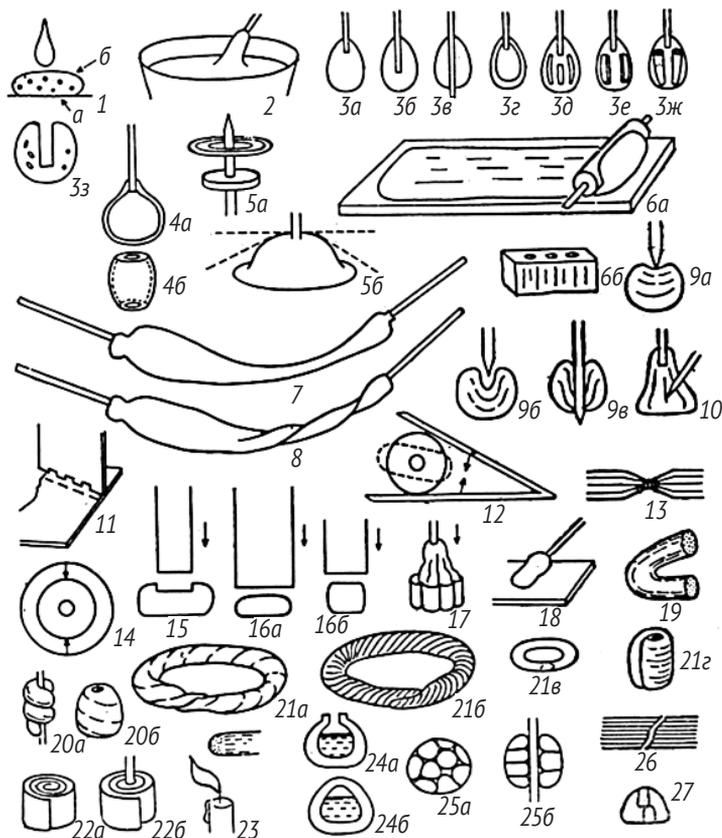


Рис. 12. Приемы формирования изделий, разработанные за два этапа развития стеклоделия (египетский и римский):

1 — объемное литье на плоскость; 2 — вытягивание нитей из тигля; 3 — набор стекломассы на стеклянную, металлическую или глиняную основу; 4 — выдувание; 5 — свободное формование в положении трубки вверх; 6 — прокат; 7, 8 — вытягивание и кручение; 9, 10 — прокол и нанесение полос острием; 11, 15 — применение штампов; 12, 14 — формование пинцетом и щипцами; 13 — разрезание; 16, 17 — формование на плоскость и в форме; 18 — обкатка; 19, 20 — изгибание, навивание; 21, 22 — обертывание; 23 — огневая полировка; 24 — спекание; 25 — запаивание; 26 — сварка; 27 — прокол

Стадия отжига — завершающая в производстве изделий из стекла. Именно благодаря отжигу стекло обладает неограниченным сроком службы, если, конечно, по нему не ударять тяжелыми предметами. В процессе отжига изделие освобождается от 95 % возникающих в нем в процессе изготовления напряжений, которые способны привести к его самопроизвольному разрушению. У мастеров Древнего Египта никаких указаний на специально установленные условия охлаждения изделий нет. По сравнению с технологиями выработки выдувных изделий методы пластического формования достаточно медленные, работают со стекломассой, температура которой не слишком высока и меньше вероятность возникновения критических, разрушающих напряжений в готовых

изделиях. Более скоростной метод выдувания выявил необходимость контролировать процесс охлаждения изделий, поскольку без этого получение годной продукции носит случайный характер. Тогда и появилась стадия отжига и небольшие специально подогретые пространства — печи отжига, специальные условия охлаждения изделий в которых так и называются — режим отжига.

Приемы работы со стеклодувной трубкой, разработанные тогда, актуальны и сегодня. Меняются материалы, из которых ее изготавливают, увеличивается количество вспомогательных устройств, но суть процесса неизменна. Мастер-стеклодув с помощью своих легких, твердой руки и верного глаза может сделать из порции горячей стекломассы любой задуманный предмет. Именно тогда, на рубеже старой и новой эры, стеклянная посуда из прозрачного стекла стала предметом обихода (рис. 13), появилась стеклянная тара, и начались первые опыты получения плоского стекла для остекления оконных проемов.



Рис. 13. Сосуды из прозрачного стекла времен Римской империи (Римско-Германский музей, Кельн)

Примерно в это же время, в Древнем Риме появились первые примеры использования стекла в интерьере, а именно начали применять стекло для вставки в окна и стеклянные пластинки для облицовки стен. Стекло получали методом литья на плоскую отшлифованную каменную поверхность. Качество такого стекла, конечно, не сравнить с современным.

Еще одним видом изделий, которым прославилась Римская империя, является мозаика. При раскопках Помпеи были найдены остатки напольных и настенных мозаик, в которых присутствовали элементы из природных камней и цветных стекол.

Наследники Римской империи, принявшие христианство, начали строить храмы для поклонения Христу. До настоящего времени ни один из храмов, построенных в Раннем Средневековье, не сохранился в первоначальном виде.

Но Софийский собор (на территории современной Турции) служит примером того, какие смальтовые мозаики умели делать в Византийской империи. Цветовая гамма смальт, использованных во внутреннем убранстве собора, говорит о высокой квалификации мастеров, умеющих варить цветные стекла с добавками не только минеральных красок, но и металлических красителей, таких как золото, медь, ртуть. Византийские мастера использовали несколько сотен цветных смальтовых стекол для изготовления мозаик.

Наиболее древние сохранившиеся образцы византийских мозаик относятся к III–IV вв. Такие композиции из аккуратно выложенных мелких и более-менее одинаковых по размеру кубиков из стекла создали славу византийским мозаикам, которые пришли на смену римским, выполненным преимущественно из мелких кубиков камня (рис. 14).

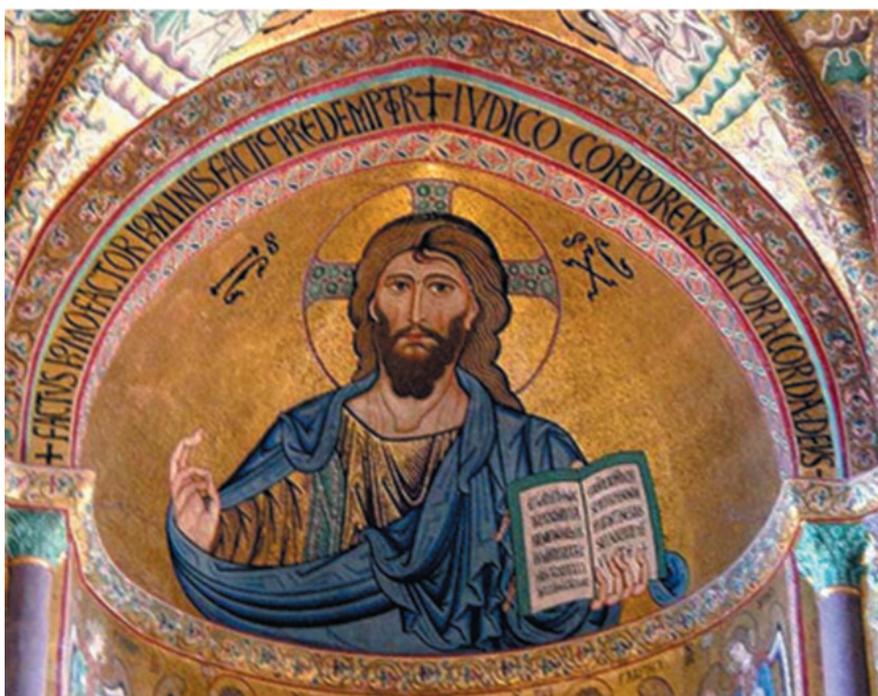


Рис. 14. Мозаика «Христос Пантократор». 1140-е гг. (собор в Чепалу, Сицилия)

Многостадийность процессов ручного выдувания требует участия нескольких человек в создании большинства изделий. Как минимум это двое — мастер и помощник. Как правило, мастер владеет всеми приемами, необходимыми для изготовления разных видов выдувных изделий, а его помощник выполняет одну или несколько простых операций. В современной терминологии, мастер выполняет следующие основные операции: набор стекломассы на стеклодувную трубку, оформление, подготовку к выдуванию и продувание универсальной заготовки из горячего стекла — баночки, выдувание изделия из баночки свободным методом

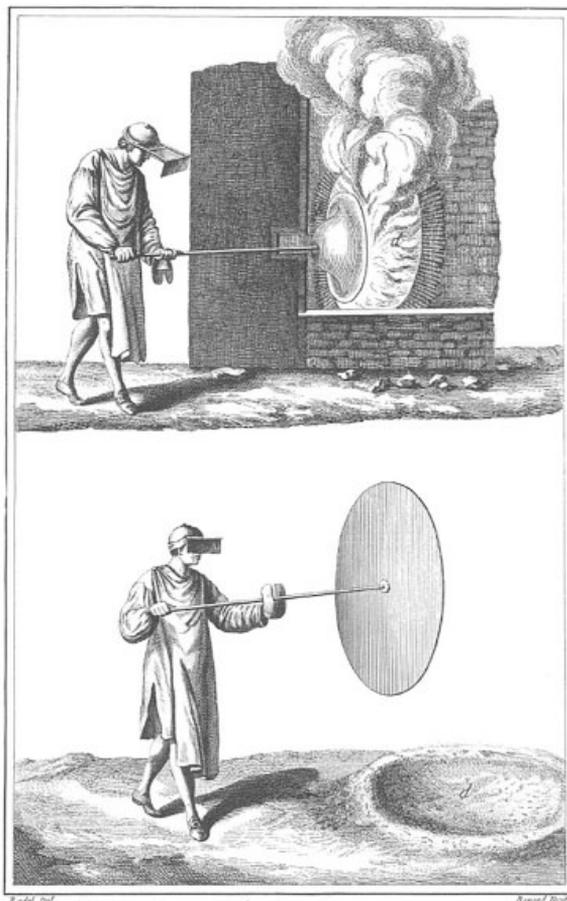
или с использованием формы, оформление горлышка, ручек и ножек изделия. Ему помогают мастера, которые подают дополнительные порции стекла или вспомогательные материалы для горячего декорирования изделий, подогревают изделия горелками для поддержания необходимой температуры, перемещают изделие со стеклодувной трубки на понтию и переносят в печь отжига.

Если обобщить все технологические завоевания римского периода, то получим следующую картину. Стекло обрело статус прозрачного материала и превратилось из предмета роскоши в предмет обихода — в первую очередь, благодаря использованию песков, с меньшим содержанием красящих оксидов. Составы стекол разделились на содовые, происходящие из Египта, и поташные, характерные для стран северного и восточного Средиземноморья; содержание щелочных катионов в них снизилось до 20 масс.%. В качестве красителей для получения окрашенных в массу стекол использовали золотую пыль и соли урана. Варка стекла снова стала одностадийной благодаря совершенствованию топочных частей печей, размещению их в закрытых помещениях и системам поддува воздуха, позволившим повысить и стабилизировать температуру пламени. Основным способом формования изделий становится выдувание, однако остаются востребованными и литье, вытягивание и прессование, появляются устройства типа камерных печей для отжига изделий.

Вклад Средневековья

Средние века — пора возникновения и становления государств Европы, Ближнего Востока и Северной Африки после развала Римской империи. Самым удивительным итогом этого периода следует считать то, что стеклоделие не только не утратило своего значения, но и приобрело новую область применения. Понятно, что когда пушки грохочут, то не до ремесел. Великое переселение народов, становление и угасание Византийской империи, исламизация юга европейской части и, наконец, формирование большинства государств Европы длилось около шестисот лет. И сквозь эти годы мастера, владеющие ремеслами, несли и развивали свои умения. Так, стеклоделам, чтобы варить стекло, необходим был белый песок — уже было известно, что именно он нужен для получения бесцветного стекла. Тугоплавкая глина — для получения огнеупорных горшков. И высококалорийное топливо — для костра. Это кроме всех прочих условий. И нужен был потребитель продукции — иначе никакая мастерская существовать не сможет.

Новые государства стали отстраивать храмы и соборы. Соборы Германии и Франции, датированные X–XII вв. н. э., поражают своими размерами. И огромными оконными проемами, которые необходимо было чем-то закрыть. Именно поэтому Раннее Средневековье можно назвать эрой витражного стекла. Способ получения листового стекла, опробованный римлянами, давал лунное стекло, оно не слишком подходило для остекления больших проемов. При достаточной простоте получения стеклянного круга разница в толщине была слишком большой — несколько сантиметров в центре круга и доли сантиметра по краям (рис. 15).



*Verrerie en bois, opération de chauffer la
Bosse pour l'ouvrir et en faire le Plat et le porter à la platte.*

Рис. 15. Изготовление плоского стекла
с помощью стеклодувной трубки, лунный метод

Несмотря на многие умения стеклоделов тех времен, существовало объективное препятствие для увеличения количества одновременно сваренного стекла. 1 м² современного листового стекла толщиной 4 мм весит 10 кг, то есть для того чтобы закрыть оконный проем площадью более 5 м², нужно сварить не менее 50 кг стекломассы. Эта задача требовала неизвестных в те годы технических приемов. И тогда на выручку пришло умение варить цветные стекла. И отливать их на гладкую каменную или чугунную плиту. И резать полученные листы по размерам и складывать из них мозаику, скрепленную металлической протяжкой. И рисовать по ним обжиговыми красками библейские сюжеты.

Обжиговые краски по стеклу являются легкоплавкими стеклами. Их изготавливали и до сих пор изготавливают на основе свинцовосиликатных, свинцовоборатных и силикоборатных составов. Порошок таких красок

растекается на поверхности изделия при температурах 550–650° С образуя на ней в процессе обжига ровный блестящий прозрачный слой. Мастера ручной художественной росписи наносили каждую краску отдельно, а иногда отдельно и обжигали. Потомки наносят их с использованием трафаретов, пульверизации или готовых картинок — деколи на выгорающем носителе. Еще один способ нанесения обжиговых красок — последовательное нанесение декоративного узора с помощью сеток-масок — шелкография. Рисунки, нанесенные этим способом, отличает тонкость линий и широкая гамма используемых красителей. Средневековые мастера подобных приемов еще не знали, они могли наносить краски только ручным способом, но их высочайшее художественное и технологическое мастерство позволяло создавать истинные шедевры, которыми люди восхищаются до сих пор.

Завоеватели римского наследия нашли весьма достойное применение разри-сованным пластинкам бесцветного и цветного листового стекла. К сожалению, немного сохранилось аутентичных витражей того времени. Но мы можем себе представить уровень мастерства средневековых стеклоделов, рассматривая витражи собора в Шартре (рис. 16). И неудивителен расцвет практически всех ремесел, наступивший в эпоху Возрождения.



Рис. 16. Фрагмент витража «Богородица».
XIII в., Шартр

Эпоха Возрождения и Новое время

Прочный фундамент, созданный безвестными мастерами к началу XI столетия, привел к тому, что начиная с эпохи Возрождения стекло семимильными шагами понеслось по всему миру. Венецианская Республика сделала стекло материалом престижа. Мастерство стеклоделов с острова Мурано было таким, что за их изделиями гонялись все богатейшие правящие династии мира. Как и за секретами их мастерства. Поэтому жителям Мурано под страхом смертной казни было запрещено покидать остров, а в случае побега карали всю семью. Основная заслуга венецианцев состоит в том, что они показали многогранные возможности стекла, разработали технологии изготовления великого множества изделий, умели варить бесцветное стекло высочайшей степени белизны и разработали практически все актуальные и сегодня методы горячего декорирования стеклянных изделий. В XV в. впервые было изготовлено стекло, состав которого изобрели известный мастер стекольных дел Анджело Беровьеро и его сын Марино. Оно по своему внешнему виду — белизне и прозрачности в тонкостенных изделиях — ни в чем не уступало природному горному хрусталу. Именно поэтому оно было названо «кристалло».

Сохраненное авторство мастера — весьма удивительный, если не сказать уникальный факт, в большинстве случаев мы сталкиваемся с тем, что история не хранит имен тех, кто ее делает.

Существующая сегодня классификация основана на положении способа в общей технологической цепочке изготовления изделия, а именно до или после стадии отжига используют тот или иной прием.

Все методы изготовления изделий, для которых необходимо соединить несколько видов стекол, требуют от мастера знания их термических характеристик, и прежде всего — величин коэффициентов термического расширения. При нагревании и охлаждении все материалы расширяются и сжимаются с разной скоростью. Если разница в этих скоростях слишком велика, изделие разрушится. В технологии стекла критической является разница величин коэффициентов расширения на уровне 15%.

Сегодня величину коэффициента расширения с высокой точностью в актуальном диапазоне температур определяют приборы. Самым простым и доступным сравнительным методом, которым пользовались старые мастера, был метод соединения двух нитей. Из горячей стекломассы вытягивали нити одинакового диаметра, накладывали одну на другую в горячем состоянии, получали прочный спай, а при охлаждении общая нить выгибалась в сторону материала с большим коэффициентом расширения. Растрескивание нити свидетельствовало о невозможности совмещения стекол.

Существуют несколько способов декорирования, в результате применения которых мы получаем многоцветные изделия: полный накат, разграниченный накат, акварельное пятно, стеклянная крошка, стеклянная нить и налп. Толщина цветного — накладного — стекла не превышает 1 мм, тогда как толщина стенки изделия из бесцветного стекла, на которую его наносят, всегда больше 2 мм. Изделие из бесцветного стекла с полным цветным накатом выглядит

как изделие из стекла, окрашенного в массу. Практически все способы получения накладного стекла базируются на изготовлении заготовки для выдувания, в которой соединены два стекла — цветное и бесцветное. Перед выдуванием изделия такую заготовку непременно прогревают в печи, добиваясь нужного соединения основного слоя изделия с декоративным.

При изготовлении изделия с полным внутренним накладом, когда слой цветного стекла находится «внутри» изделия, на выдувную трубку делается набор цветной стекломассы. Затем на изготовленную баночку делается второй и, если нужно, третий набор бесцветной стекломассы, и только после этого происходит выдувание изделия. Для получения полного наружного наклада первым делается набор бесцветного стекла и на подготовленную баночку — цветного, в этом случае, цветное стекло располагается «снаружи» изделия.

Для получения изделий с разграниченным накладом, например цветными полосками, заготовки для выдувания делают в специальных формах, в которых соединяют цветное стекло с бесцветным. Наклад в виде акварельного пятна — способ получения на поверхности изделия цветных областей, толщина стекла у которых составляет доли миллиметра и переход от одного цвета к другому не имеет четкой границы, как на рисунке акварелью. Для получения акварельного пятна в изделии используют тонкостенные шары из цветного стекла, которые прислоняют к заготовке для выдувания, получают область бесцветного стекла с покрытием из цветного. Цветной шар при этом раскалывается, а осколки счищают с поверхности заготовки.

При декорировании цветной стеклянной крошкой заготовку для выдувания прокатывают по поверхности, на которой рассыпана крошка определенного размера. Крошка прилипает к горячему стеклу и в результате окончательного выдувания изделия создает заданный рисунок на его поверхности.

Цветную стеклянную нить, которую навивают на поверхность заготовки для выдувания, вытягивают либо из нового набора стекломассы, либо из разогретых цветных прутьев.

Воздушные пузыри в стекле получают с помощью соединений, разлагающихся при температурах 700–900° С (сода, борная кислота, тетраборат натрия, карбонат кальция). Их наносят на поверхность баночки — заготовки, полученной из первого набора стекломассы. При повторном наборе стекломассы происходит интенсивное выделение газовой фазы между слоями стекла и получается изделие с пузырями в стенках.

Кракле — способ декорирования изделий путем создания на поверхности или между слоями стекла трещиноватого слоя — уникален и возможен только в технологии стекла. Горячую заготовку для выдувания прокатывают по мокрым опилкам или опускают в сосуд с водой, с тем чтобы на поверхности образовались трещины. На полученную заготовку берут еще один набор стекломассы и выдувают изделие, в толще которого видна сетка мелких зигзагообразных трещинок, придающих ему неповторимый вид.

Изделия с использованием венецианской нити и миллефиори — уникальное «ноу-хау» венецианских мастеров — не имеют аналогов по сложности изготовления и достигаемому декоративному эффекту (рис. 17). Сами по себе венецианская

нить (витое переплетение цветных стеклянных ниточек) и миллефиори (стеклянные диски с многообразным цветным концентрическим рисунком) являются произведениями искусства стеклоделов, которые использовали их в качестве декоративных украшений для блюд, ваз или кувшинов.

Ассортимент продукции острова Мурано: посуда для напитков, кувшины и графины, стеклянные бутылки, люстры и зеркала, смальты и витражное стекло, листовое оконное стекло. На рисунке 17 представлено несколько примеров изделий мастеров Венецианской республики.



Рис. 17. Изделия мастеров Венецианской республики:

1 – бокал, филигранное стекло; 2 – графин, венецианская нить; 3 – ваза миллефиори

Венецианские мастера отдавали предпочтение бесцветным прозрачным стеклам, хотя, как мы легко можем увидеть, они прекрасно управлялись с цветом, а если была такая необходимость, то умели варить и глушеные стекла, которые войдут в моду XVII в.

Ну и, наконец, наряду с методом отливки на чугунную плиту они разработали способ формования плоского стекла, который стал основой мирового производства листового стекла вплоть до начала XX в. Речь идет о технологии халявного стекла, где халява — это цилиндрическая стеклянная заготовка, которая после разрезания по оси цилиндра под действием температуры превращается в плоский стеклянный лист (рис. 18). Увидеть халяву можно на кафедре химической технологии стекла и ситаллов РХТУ им. Д. И. Менделеева.

В описании Теофила есть стадии, которые сегодня кажутся не слишком понятными: промежуточное сплющивание окружностей дна и горла цилиндра и последующее расправление их перед перемещением в печь. Но, возможно, это было связано с удобством перемещения заготовки до помещения в печь.

Мода на посуду из стекла была такой, что страны, в которых были подходящие сырьевые материалы и топливо, стали производить собственную посуду и бижутерию. Так, в Богемии, Франции и Англии в XVI–XVII вв. появились стекла, которые впоследствии стали называть хрусталем. В 1683 г. появилось

замечательное по своим свойствам и декоративным качествам калиево-кальциевое стекло, которое оставалось прозрачным даже в толстостенных сосудах. Рецепт его изготовления составил Михаил Мюллер. Это стекло известно и сейчас под названием «богемское».

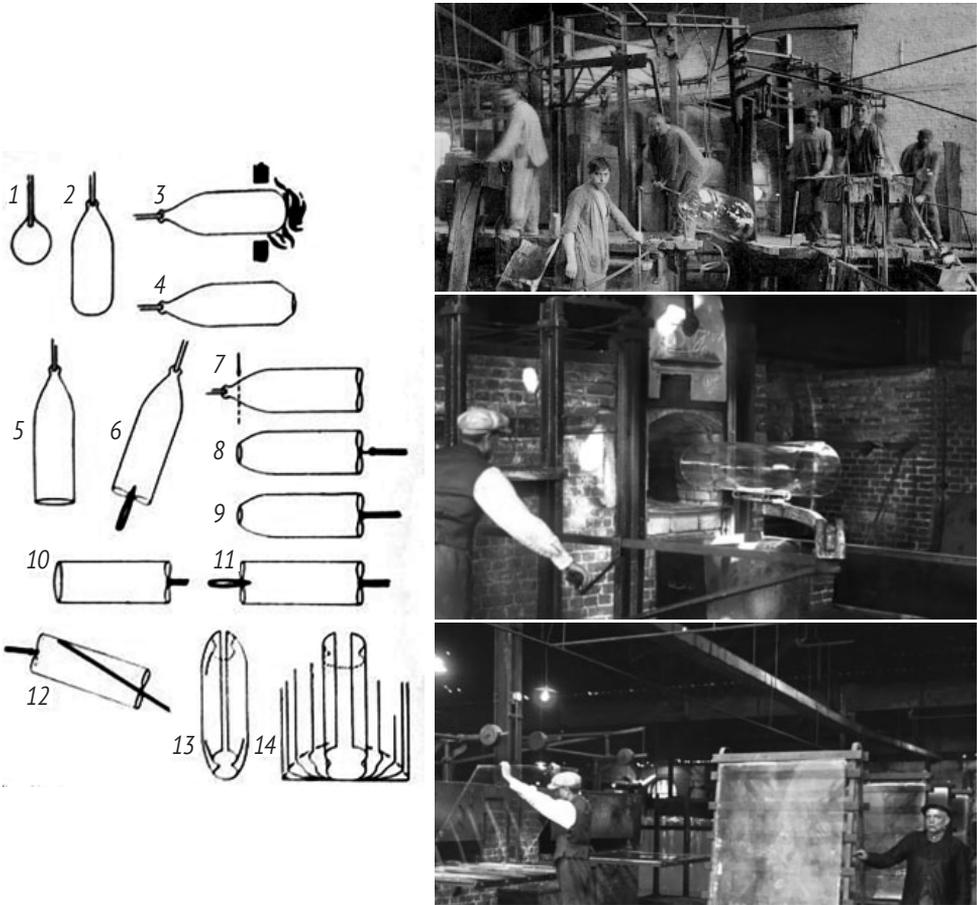


Рис. 18. Халявный способ выработки оконного стекла по Теофилу:

1, 2 – набор стекломассы на стеклодувную трубку и оформление сначала шарика, а затем цилиндра; 3 – выдувание цилиндра для получения стенок необходимой толщины; 4–6 – отрезка доньшка и подготовка к прикреплению понтии; 8–10 – отрезка и расширение горла; 11, 12 – подготовка цилиндра к перемещению в печь в горизонтальном положении; 13 – удаление понтии и разрезание цилиндра по оси; 14 – разворачивание цилиндра в лист под действием температуры

Примерно в это же время английский плавильщик Роберт Манзель впервые использовал для отопления печи каменный уголь вместо древесного. При этом тигли, в которых варили стекло, стали закрывать, чтобы предотвратить заполнение окружающего пространства сажей и гарью. Это в свою очередь дало возможность повысить температуру варки стекла. Кроме того, были обнаружены

химические вещества, которые ускоряли процесс плавления исходной массы. Одним из таких веществ оказался оксид свинца. После его добавления в состав шихты стекло получалось более прозрачным и блестящим даже по сравнению с богемским. Так появился английский хрусталь. Он обладал особенным, приятным для слуха, мелодичным звоном после легкого постукивания по поверхности. И богемское стекло, и английский хрусталь отличались высокой белизной и высоким показателем преломления. Изделия из такого стекла делали с толстыми стенками, а обыгрывая высокий показатель преломления, украшали поверхность гравированием, резьбой и гранением.

Еще больше увеличился ассортимент выпускаемых изделий, когда мастера научились покрывать изделия тонкими слоями различных металлов, в первую очередь золота, серебра и меди. Образующийся на поверхности прозрачного стекла тончайший интенсивно окрашенный слой позволил получать уникальные по художественной ценности изделия (рис. 19).



Рис. 19. Набор для крепких напитков из хрустального стекла с гравировкой, золочением и медной протравой

Параллельно с развитием технологии бесцветного стекла интенсивно развиваются способы получения цветного прозрачного стекла и непрозрачного или рассеивающего молочного стекла. Рецепт изготовления молочного стекла придумал немецкий мастер Иоганн Кункель.

Многие века приоритетом стеклоделов была борьба за прозрачность и белизну стекла, тем более неожиданными и интересными оказались работы Кункеля по получению молочного стекла, рецепты которого он успешно использовал для производства изделий, похожих на костяной фарфор. Ему же принадлежит и открытие «золотого рубина» — особого сорта красного стекла, окрашенного

в массе металлическим золотом. Однако его рецептуру и способ варки Кункель держал в секрете (рис. 20, 21).



Рис. 20. Вазы из молочного стекла



Рис. 21. Кубок и стакан с крышкой из рубинового стекла, украшенного гранением и золочением

Во Франции, где династия Бурбонов строила резиденции небывалой пышности, в XVII в. понадобились огромные зеркала, которые научились делать методом проката стекломассы на чугунной плите. Полученный лист стекла отжигали, а потом обе его поверхности подвергали тщательной механической обработке — шлифованию и полированию до зеркального блеска. На поверхность отполированного стекла методом серебряного зеркала наносили тонкий слой серебра. Так были созданы замечательные версальские зеркала, которые и сегодня можно увидеть в этом дворце. Производство зеркал большого размера стало возможным благодаря тому, что уже появились многогоршковые печи, позволяющие варить достаточное количество стекла. А еще во Франции появился бокал для шампанского, который весь мир называет фужером из-за папоротника (*fougère*), золу которого добавляли в состав стекла в Бретани.

Копилка технологий стекла к началу XVIII в. в странах Европы была такой, что небольшие ремесленные мастерские для выпуска изделий массового потребления не справлялись с растущим ростом ассортимента продукции. Нужно было выпускать аптекарскую, медицинскую и винную стеклотару, посуду для простолюдинов и господ, а также оконное стекло и зеркала. Города росли, строительство требовало все больше готовых материалов. Наступала эра механизации производства.

Началась она в XVIII в. с увеличения объема и количества одновременно находящихся в печи стекловаренных горшков, использования в качестве топлива не только дерева и торфа, но и угля, усовершенствования стеклодувной трубки и создания полуавтоматических прессов. И, безусловно, роста числа мастерских.

А XIX век одновременно с разработкой технологий «большого» стекла — имеются в виду и размеры, и количество изделий — обогатил технологию ручного производства изделий, хотя, казалось, чем еще можно удивить мир стекла после стольких впечатляющих находок мастеров эпохи Возрождения и следующих за ними эпох и мастеров?

Мы расскажем лишь о трех художниках и ювелирах XIX в., сделавших стекло материалом для творчества, из огромной плеяды тех, чьи имена не так хорошо известны.

Американец Луис Тиффани (1848–1933) был из семьи ювелиров, но его страстью стали картины из стекла. Он хотел рисовать картины не красками, а цветными стеклами и для этого усовершенствовал технологию сборки витражных изделий. Использование тонкой медной ленты для соединения двух стекол вместо массивной свинцовой протяжки позволило ему делать не только плоские витражные изделия, но и знаменитые сегодня во всем мире лампы Тиффани, которые стали собирать, чтобы не пропадали мелкие осколки цветного стекла. А еще он экспериментировал с металлическими красками и запатентовал стекло с металлизированной иризирующей поверхностью — фавриль. И показал, как умелое нанесение «живого» покрытия меняет вид изделия (рис. 22).



Рис. 22. Витражная картина (а) и настольная лампа (б), выполненные в витражной технике Тиффани; ваза с иризирующим покрытием фавриль (в)

Эмиль Галле (1846–1904) родился в Нанси, его отец был хозяином стекольного завода. Он был и художником, и помогал отцу на производстве, интересовался многими естественными науками и увлекался искусством востока, Китая и Японии. И, наконец, соединил это все в том, что сегодня называют изделиями Галле. Он отработал технологию химического травления поверхности стекла смесью плавиковой и серной кислот так, что с их помощью как будто бы рисовал картины на вазах из многослойного цветного стекла (рис. 23).



Рис. 23. Стекланные вазы из многослойного цветного стекла, декорированные методом химического травления

Самый молодой из них, Рене Лалик (1860–1945), занялся изготовлением парфюмерной тары из стекла в начале XX в., уже изрядно поработав ювелиром. В его украшениях и флаконах для одеколонов и духов есть что-то общее — филигранность отделки мельчайших деталей, смелое сочетание разных материалов в одном изделии и умение придать объем или, наоборот, некую расплывчатость формы, используя опалесцирующее стекло собственного состава или глубокую гравировку бесцветного. Чтобы получать задуманные им сложные по форме стеклянные флаконы, он использовал метод литья под давлением, заимствованный у металлургов (рис. 24).



а



б



в

Рис. 24. Изделия Рене Лалика:

а, б — парфюмерные флаконы; в — подвеска со стеклянным барельефом

И еще один факт, объединяющий судьбы трех таких разных художников: созданные ими фирмы и школы мастерства существуют до сих пор.

Это последнее лирическое отступление необходимо при переходе к большим технологиям, поскольку большинство наработок малого производства выстрелят и в эпоху большой механизации.

Эпоха большой механизации

Немецкому инженеру Фридриху Августу Сименсу и его брату Вильгельму Сименсу (известному как сэр Уильям Сименс) принадлежит идея и первая конструкция регенеративной печи, которую они построили в 1856 г. в Великобритании. Симменсы использовали не твердое топливо, а генераторный газ, а также придумали систему подогрева воздуха, который смешивали с газом, подаваемым в металлургическую печь. В 1867 г. Фридрих перестал заниматься развитием идеи выплавки стали в регенеративной печи и переехал в Дрезден, где руководил стекольным заводом, основанным его дядей — Гансом Дитрихом Сименсом.

Регенератор — это камера, внутри которой находится насадка из огнеупорного кирпича с системой отверстий. При прохождении через кирпичную насадку сверху вниз отработанные дымовые газы нагревают ее. Когда воздух, идущий на горение снизу вверх, проходит через насадку регенератора, его температура на выходе становится 1200–1350°С. Температура пламени горелки, работающей в паре с регенератором, достигла 1500–1550°С, что привело к повышению и производительности печи, и качества получаемого стекла (пример печи на рис. 25).

Первый шаг к появлению принципиально нового типа стекольного производства, а именно непрерывной выработки изделий, был совершен. Следующий шаг стал логическим продолжением первого. Фридрих Сименс стоит во главе разработки нового типа печи. Горшки со стекломассой заменяют бассейном — ванной из огнеупорного кирпича, накрытой огнеупорным сводом. Появление ваннных печей, работающих в непрерывном режиме, многократно повысило выход стекломассы, готовой к выработке изделий, что дало мощный стимул к развитию механизированных способов формования.

Дальнейшая интенсификация, механизация и модернизация производства стекла в XX в. шла по нарастающей. Начало века — период механизации процессов варки стекла и выработки изделий — был тесно связан и с появлением новых источников энергии — природного газа и электричества и с развитием систем автоматизации различных производственных систем и агрегатов. В больших и экологически небезопасных производствах постепенно снижалась роль ручного труда. Задачи, поставленные появлением печей непрерывного действия, касались всех переделов технологического процесса — составления шихты, загрузки ее в стекловаренную печь, выработки и отжига изделий. Составление и загрузка шихты практически до середины XX в. оставались наиболее архаической и вредной частью производства. Основными рабочими инструментами здесь были вагонетка, лопата и весы, традиционные для периодического производства. Оснащение механическим, а затем электрическим помольным рассеивающим, перемешивающим оборудованием, конвейерными системами перемещения и взвешивания сырья, автоматами в загрузочном кармане стекловаренной печи привели к возникновению единых линий подготовки сырьевых материалов и шихты на современных предприятиях. Но в конце XIX в., когда мощности стекловаренных печей не превышали 20 т/сут, более актуальной была задача механизации выработки изделий.

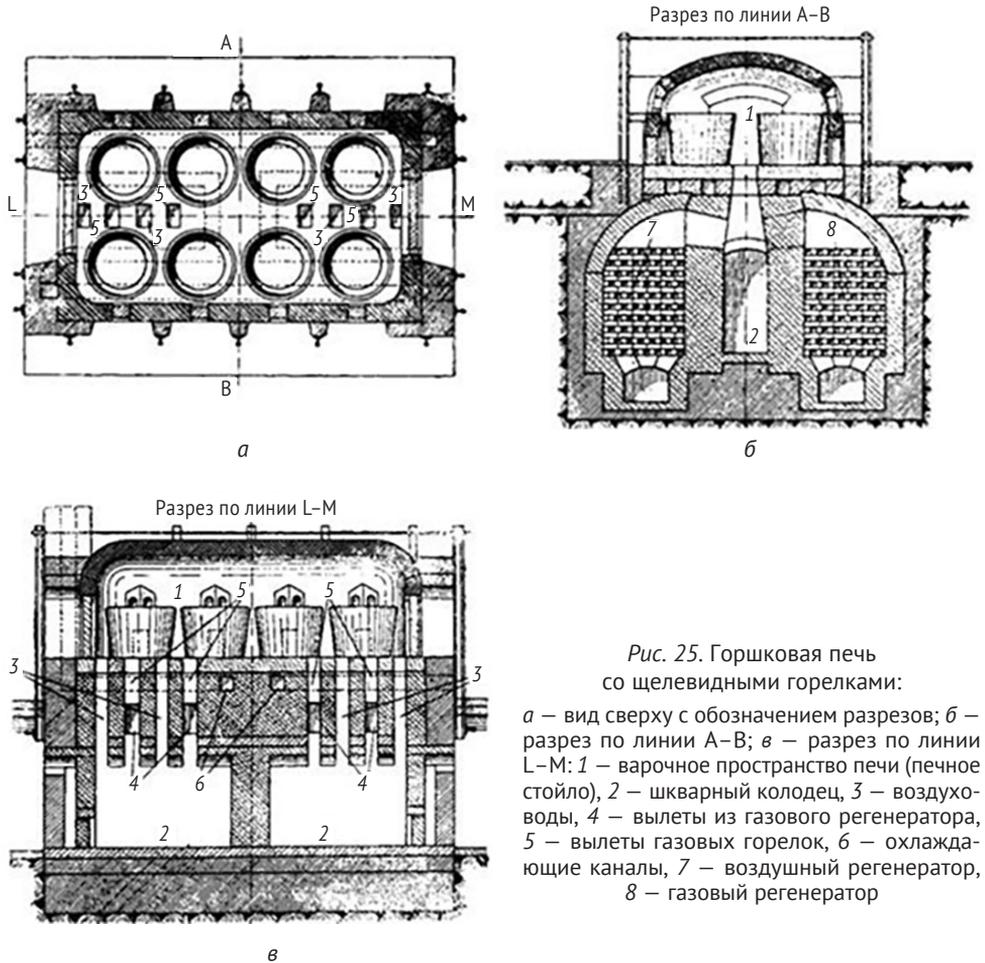


Рис. 25. Горшковая печь
со щелевидными горелками:

a – вид сверху с обозначением разрезов; *б* – разрез по линии А-В; *в* – разрез по линии L-M: 1 – варочное пространство печи (печное стойло), 2 – шкварный колодец, 3 – воздуховоды, 4 – вылеты из газового регенератора, 5 – вылеты газовых горелок, 6 – охлаждающие каналы, 7 – воздушный регенератор, 8 – газовый регенератор

Сначала попытки создания непрерывного процесса выработки листового стекла были имитацией халывного метода. Машина английских стеклоделов — мастера Любберса и заводчика Чемберса, которая вытягивала бесконечные цилиндры, давала больше брака, чем годных листов стекла (рис. 26).

Первым устройством, которое действительно стало новым методом непрерывного производства листового стекла, стала машина вертикального вытягивания ленты через лодочку бельгийского инженера Эмиля Фурко, опробованная в 1905 г. (рис. 27).

Полученное с ее помощью листовое стекло не всегда было ровным и однородным, но выпуск продукции вырос в разы.

В 1916 г. появились машины, вытягивающие ленту стекла со свободной поверхности подмашинной камеры, которые получили название «метод Либбей-Оуэнса», хотя разработчиком машины был американский инженер Кольберн. Качество листового стекла, получаемого с помощью этих машин, было существенно выше, чем у машин Фурко (рис. 28).

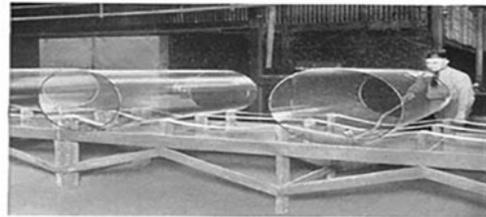
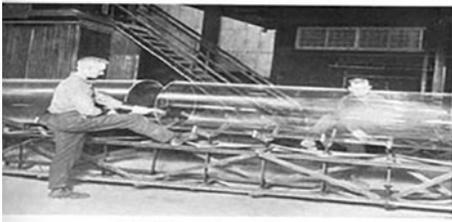
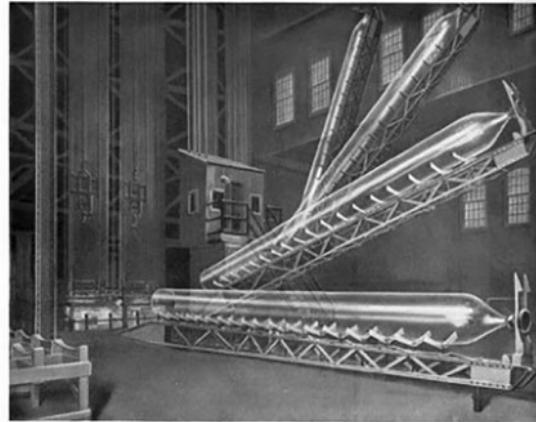
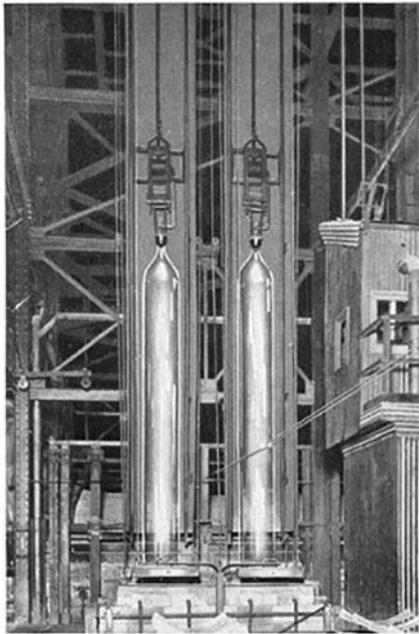


Рис. 26. Стеклоделательная машина Любберса и Чемберса

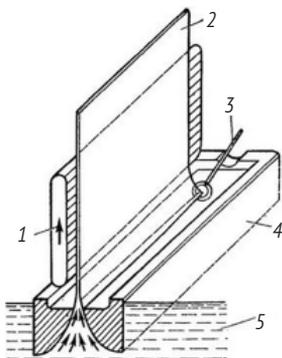


Рис. 27. Схема формирования ленты стекла методом Фурко:

1 – направляющее шамотное тело; 2 – лента стекла; 3 – луковца стекломассы; 4 – шамотная лодочка; 5 – зеркало стекломассы

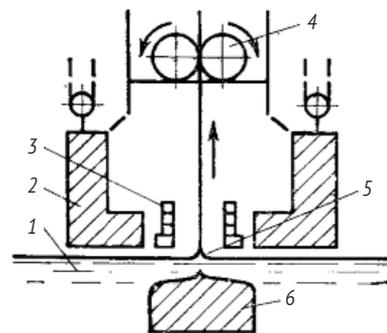


Рис. 28. Вытягивание ленты стекла со свободной поверхностью:

1 – зеркало стекломассы; 2 – L-образный шамотный блок; 3 – холодильник; 4 – тянущие валки; 5 – луковца стекломассы; 6 – центральное погруженное шамотное тело

В 1920-е гг. был опробован и внедрен принцип горизонтального вытягивания ленты стекла. За основу этого метода была взята машина Фурко, только лента стекла после вытягивания проходила через вращающийся вал, который поворачивал ход ленты на 90 градусов. Тогда же бельгийский инженер Эмиль Бишеруа разработал метод непрерывного проката ленты стекла, с помощью которого впоследствии получали армированное и узорчатое листовое стекло (рис. 29, 30). Узор на поверхность ленты стекла наносили с помощью верхнего рельефного вала прокатной машины, и в результате лента стекла имела одну гладкую поверхность, а другую — рельефную. Для получения армированного стекла металлическую сетку соединяли с горячей стекломассой в момент формирования ленты между валками прокатной машины.

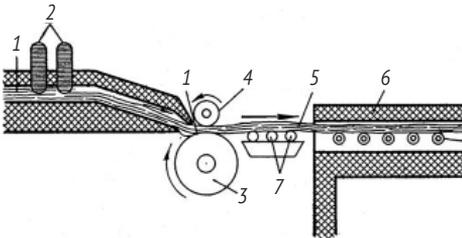


Рис. 29. Схема получения узорчатого стекла методом непрерывного проката:

1 — стекломасса, поступающая на формование; 2 — ограничители; 3, 4 — валы прокатной машины; 5 — лента стекла; 6 — печь отжига; 7 — рольганг для перемещения ленты

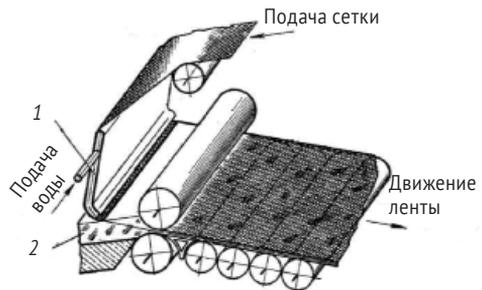


Рис. 30. Схема получения армированного стекла методом непрерывного проката:

1 — экран-холодильник; 2 — стекломасса

Практически одновременно с машиной Фурко английский механик Майкл Оуэнс разработал конструкцию первой карусельной машины для выдувания стеклянных бутылок. Он же заложил двухстадийный принцип выдувания тары, на котором работают и современные автоматы. На первом этапе в черновых формах изготавливают полую заготовку будущего изделия — пульку, а на втором из еще горячей пульки выдувают готовую бутылку. Обе стадии формования (получение пульки и выдувание изделия из нее) производили на вращающихся столах, поэтому такие машины стали называть карусельными. Питала такую машину вакуумная «рука», которая опускалась в горячую стекломассу, засасывала порцию, перемещала ее и выпускала в черновую форму. В начале XX в. это было революционное решение проблемы механизации производства стеклянной тары (рис. 31).

Дальнейшие разработки стеклоформирующего и печного оборудования вплоть до 1956 г. были направлены на совершенствование методов непрерывного вытягивания листового стекла и двойного выдувания стеклянной тары.

До середины 1950-х гг. во всем мире листовое стекло производили методом вытягивания ленты. По основным качественным характеристикам — прежде всего светопропусканию — материал отвечал требованиям строительной индустрии, но использовать его в набирающем обороты машиностроении можно

было только после соответствующей механической обработки. Чтобы выйти на необходимое качество стекол по параметру «оптическое искажение», шлифовали и полировали обе его поверхности. Такая технология была малопродуктивна, она сильно тормозила быстро растущее автомобилестроение. Требовалось новое революционное изменение технологии производства листового стекла, и оно было найдено.

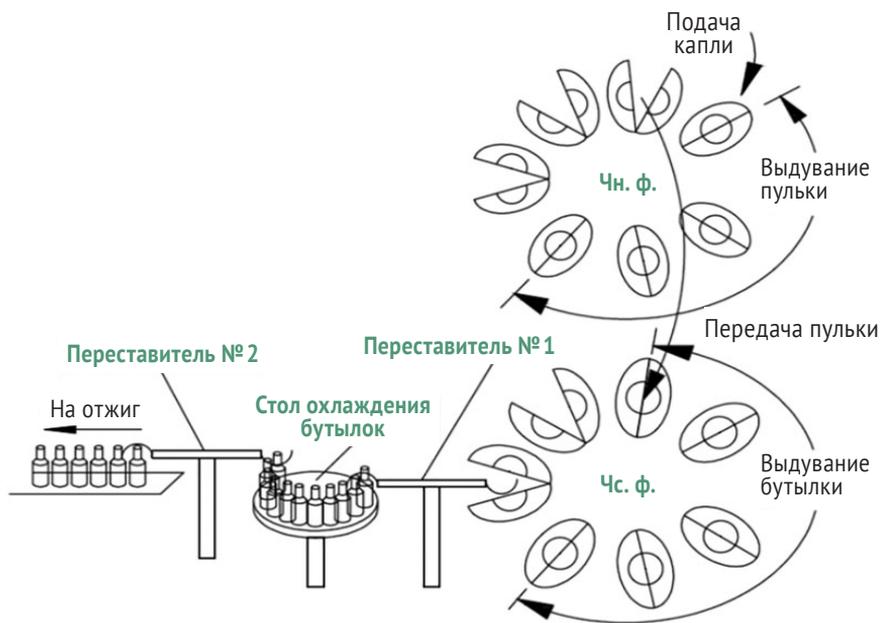


Рис. 31. Схема работы карусельной машины: Чн. ф. — черновая форма и стол формования пульки; Чс. ф. — чистовая форма и стол формования бутылки

В 1956 г. на английском заводе фирмы Pilkington Brothers впервые в мире было получено листовое стекло, отформованное в ванне с расплавом олова (рис. 32). Принцип формования был предложен в 1902 г. американскими изобретателями В. Хиллом и А. Хичкоком, но реализовать их идею удалось только английским инженерам. Эта технология позволяет получать листовое стекло высокого качества без дополнительной обработки.

Суть метода состоит в том, что процесс формования ленты происходит на поверхности расплава металла — олова, с которым горячая стекломасса не взаимодействует, а просто скользит и свободно разливается. Бортоформирующие ролики, расположенные по краям ленты, отвечают за толщину получаемого листа стекла. Таким образом, обе поверхности листа — верхняя, которая формируется свободно, без внешнего воздействия, и нижняя, соприкасающаяся с идеальной поверхностью расплава металла, имеют несравненно высокое качество. Сегодня флоат-стекло вытеснило с рынка практически все виды прозрачного листового стекла для строительства, транспортной, мебельной индустрии и т. п.

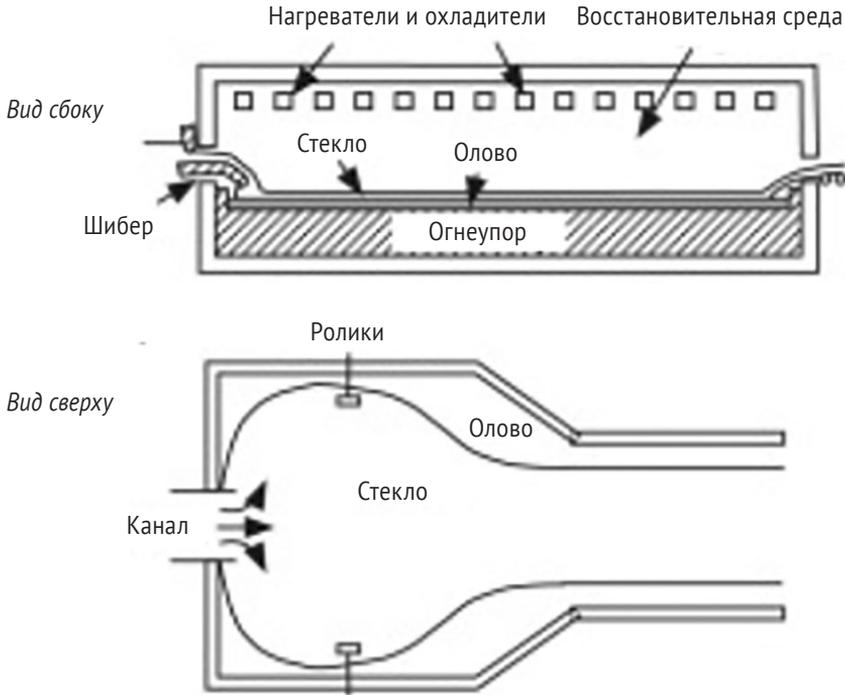


Рис. 32. Схема флот-ванны и процесса формирования ленты стекла

Основные способы производства листового стекла до появления флот-процесса, а также общая «хронология» производства плоского стекла за последние 170 лет представлены на рисунке 33.

Временная шкала

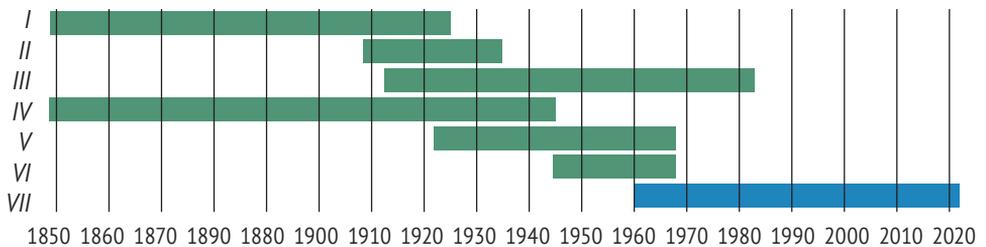


Рис. 33. Общая «хронология» производства плоского стекла за последние 170 лет:

I – Hand-blown Cylinder Glass, изготовление стекла халявным способом (выдувание полого цилиндра с помощью выдувной трубки; см. рис. 18); *II* – Machine-drawn Cylinder Glass, изготовление стекла халявным способом (выдувание полого цилиндра машинным способом, см. рис. 26); *III* – Vertically-drawn Sheet Glass, вертикально-вытяжное листовое стекло; *IV* – Plate Glass Cast from Pots, отливка листового стекла; *V* – Continuous Rolled Plate Glass, изготовление стекла непрерывным прокатным методом; *VI* – Twin-Grinding of Plate Glass, двойное шлифование листового стекла; *VII* – Float Glass, технология производства листового флот-стекла

Одновременно с развитием технологии листового стекла происходило совершенствование методов формования стеклянной тары, которое было невозможно без совершенствования способов подачи стекломассы в черновую форму. Вакуумный метод набора порций стекломассы был недостаточно быстрым и не позволял увеличивать скорость формования изделий и удовлетворять растущий спрос на стеклянную тару. В 1911 г. американцы В. Хоннис и В. Лоренц запатентовали систему фидерного питания, которая дала толчок к появлению стеклоформирующих машин, скорость формования изделий в которых в несколько раз превышала возможности машины Оуэнса. Вместо «руки»-манипулятора, снабженного вакуумной головкой, печи стали заканчиваться узкими каналами — фидерами, по которым стекломасса протекала на выработку. В конце канала вязкая стекломасса свешивалась в виде капли из незакрывающегося отверстия. После этого свисающую каплю отрезали специальными механическими ножницами. Скорость подачи стекломассы на формования возросла многократно. На рисунке 34 представлена современная схема канала питателя.

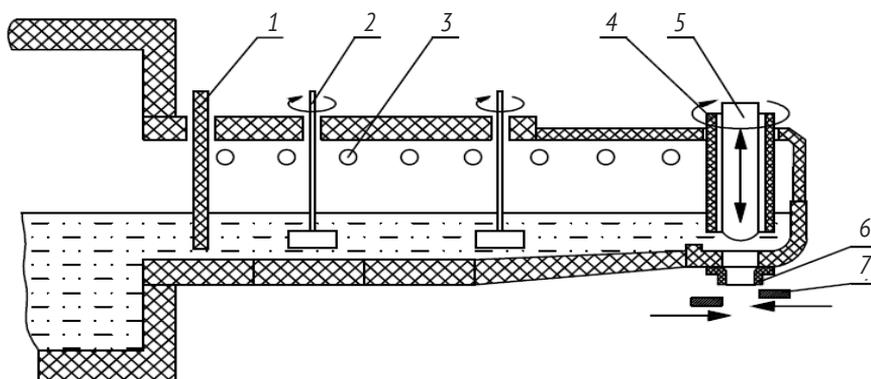
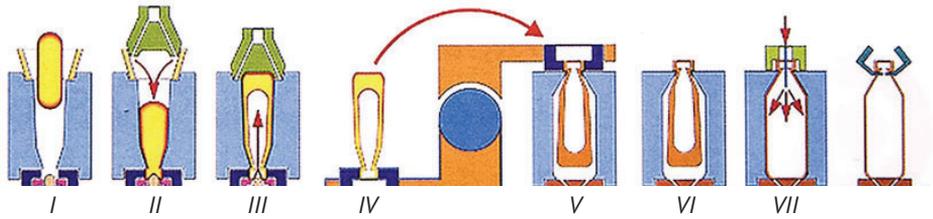


Рис. 34. Фидер, используемый для капельного питания стеклоформирующих машин:

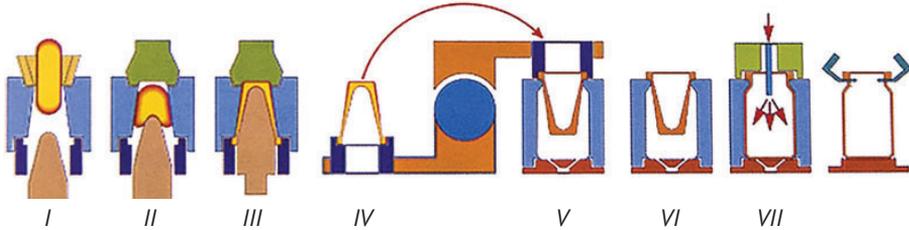
- 1 — шибер; 2 — мешалка; 3 — влет горелки; 4 — бушинг; 5 — плунжер;
6 — каплеобразующий элемент; 7 — ножницы

Фидерный канал с капельным питателем подают каплю стекломассы не в форму, а в специальный поворотный лоток, положением которого можно управлять. Появление фидеров потребовало разработки более производительных машин для выпуска тары. В 1924 г. компанией Hamford Empire (впоследствии Emhart Glass) была запатентована новая машина секционного типа IS, производительность которой почти в 10 раз выше, чем у карусельных.

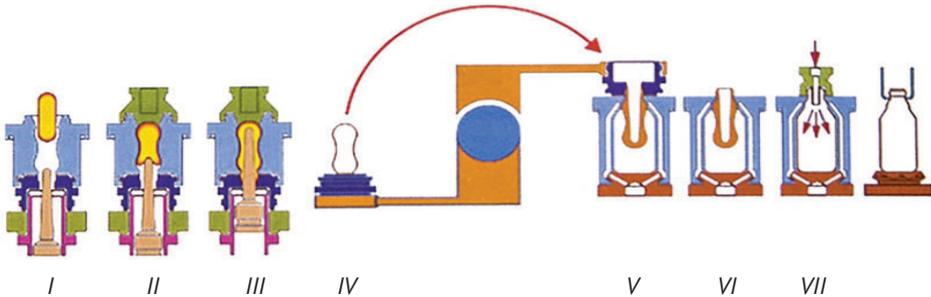
У такой машины нет вращающихся столов, формование каждого изделия производят на двухпозиционном автомате. На первой позиции формируют пульку, на второй осуществляют окончательное выдувание. Таких автоматов, скомпонованных в единую машину, может быть различное количество, в зависимости от требуемой производительности и вида изделия (рис. 35, 36). На протяжении двадцатого столетия эти принципы формования не менялись.



а) процесс формирования узкогорлой бутылки



б) процесс формирования широкогорлой бутылки



в) процесс формирования облепченной узкогорлой бутылки по технологии NNPB

Рис. 35. Схема формирования бутылок на секционной машине:

а) **двойное выдувание (blow-blow)**: I – попадание капли стекломассы в черновую форму; II – уплотнение пульки и формирование горла изделия; III – выдувание пульки; IV – раскрытие черновой формы и передача пульки в чистовую форму; V – фиксация пульки в чистовой форме; VI – выдувание изделия; VII – раскрытие чистовой формы и перемещение изделия в транспортировочное кольцо;

б) **прессовывдувание (press-and-blow)**: I – попадание капли стекломассы в черновую форму; II – прессование пульки и формирование горла изделия; III – прессование пульки; IV – раскрытие черновой формы и передача пульки в чистовую форму; V – фиксация пульки в чистовой форме; VI – выдувание изделия; VII – раскрытие чистовой формы и перемещение изделия в транспортировочное кольцо;

в) **технология NNPB**: I – попадание капли стекломассы в черновую форму; II – уплотнение пульки подъемом поршня; III – выдувание пульки; IV – раскрытие черновой формы и передача пульки в чистовую форму; V – фиксация пульки в чистовой форме для повторного нагрева; VI – выдувание изделия и внутреннее охлаждение; VII – раскрытие чистовой формы и перемещение изделия в транспортировочное кольцо



Рис. 36. Черновая (слева) и чистовая (справа) формы для формования бутылок методом blow-blow

И, наконец, в 1926 г. фирма Corning Glass Works выводит на рынок еще одну стеклоформирующую машину — автомат конвейерного типа со струйным питателем, которая может выдувать до 2000 изделий в минуту (рис. 37).

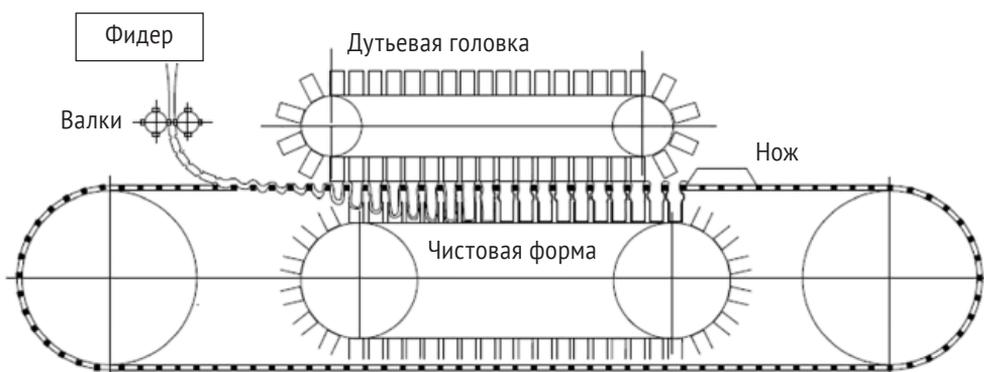


Рис. 37. Схема выдувания полых изделий на формующей машине конвейерного типа

А что же конструкции печей? Высокопроизводительные способы формования были слишком хороши для печей производительностью 20–30 т стекломассы в сутки, с которых начиналось шестидесятилетнее существование ванн непрерывного действия с поперечным направлением пламени горелок образца начала XX в. Конструкция печей включала систему для подогрева воздуха, идущего на горение, регенератор или рекуператор, варочный бассейн — собственно ванну, входной и выходной карманы — один для загрузки сырья, другой для выпуска готовой стекломассы — и систему отвода продуктов горения. Газовые горелки располагались по длинной стороне печи, а загрузка и выпуск стекломассы — на противоположных торцах. Увеличивать производительность печи можно разными путями, и самый простой из них — увеличить ее габариты. В таблице 3 представлена классификация стекловаренных печей в разные годы XX столетия.

Таблица 3. Классификация стекловаренных печей по производительности, т/сут

Временной период	Малые	Средние	Большие
Начало XX в.	до 1	до 5	до 20
Середина XX в.	до 5	5–70	70–500
Конец XX в.	до 20	20–100	100–1000

Однако коэффициент полезного действия стекловаренных печей, использующих природный газ или аналогичное по теплотворности жидкое топливо, остается на уровне 20%. Логичным кажется использование для их отопления электроэнергии. И электрические печи были построены. Их несомненными преимуществами являются и КПД не ниже 60%, и снижение вредных выбросов в атмосферу, и высокое качество получаемой стекломассы. Но затраты электроэнергии на производство продукции в несколько раз увеличивают ее стоимость, что делает использование больших электрических печей экономически нецелесообразным.

Тем не менее некоторые шаги для повышения эффективности работы газовых стекловаренных печей были предприняты. Первое конструкционное решение, направленное на уменьшение числа газовых горелок, привело к появлению печей с подковообразным направлением пламени. В этих печах горелки расположены в торце печи, а загрузочные карманы для шихты — по бокам. Уменьшение числа горелок автоматически снижает расход топлива, а необходимое качество стекломассы достигается за счет оптимального соотношения длины и ширины печи, наличия разделительного порога в зоне максимальных температур и устройства, влияющего на конвективные потоки стекломассы в зоне студки, называемого *deep refiner*. Кроме того, в дне печи можно установить дополнительный электроподогрев стекломассы в зоне максимальных температур, что способствует ускорению процессов осветления и гомогенизации стекла и повышению удельного съема.

XX век в который раз перевернул представления человека о назначении стекла. Вся предыдущая история подготовила нас к тому, что из хрупкого стекла можно построить дом, сделать мебель или сантехнику. Новые задачи, стоящие перед людьми, — сохранить планету пригодной для жизни — сегодня решаются с помощью большой группы материалов, достойное место среди которых занимает стекло.

История стеклоделия в России

Россия не прошла длительный традиционный путь обучения стеклоделию, характерный практически для всех государств Европы, Ближнего Востока и северной Африки. Это связано прежде всего с историей становления государства Российского, сменой династий, зависимостью от Орды, вхождением в состав Великого княжества Литовского, которое пришлось на XI–XVI вв. новой эры.

Первые стеклодельные мастерские появились под Черниговом в XII в. Изделия стеклоделов того времени очень похожи на первые египетские — это браслеты и бусы, но сделанные уже с помощью стеклодувной трубки и со своей специфической цветовой гаммой — желто-коричневой, в отличие от египетской сине-голубой. Делали на Киевской Руси и смальтовое стекло (под Киевом и Черниговом найдены остатки мастерских и смальтовых стекол).

Из трактата монаха-пресвитера Панталеонского монастыря Теофила («Трактат о различных ремеслах»²) мы узнаем, какими изделиями из стекла в X–XII вв. славилась Киевская Русь. Теофил дает подробные описания устройства стекловаренных печей и тиглей, дает рецепты приготовления исходной массы — шихты, а также способы варки и окраски полученного изделия. Он говорит о том, что уже в этот период на Руси поверхность изделий покрывали специальной эмалью, а также украшали стенки сосудов золотой и серебряной краской: это отличало русские изделия от поделок из стекла, изготовленных мастерами других стран. Но широкого распространения в те годы на Руси стекло не получило. Окошки в домах затягивали бычьим пузырем, а стеклянную посуду покупали, где могли.

Возникновение стекольной промышленности в России датируется XVII столетием, когда вокруг Москвы, а потом и Петербурга началось строительство заводов, освоение технологий стекловарения под присмотром иностранных специалистов и постепенное освоение приемов изготовления всего известного на тот период времени ассортимента изделий. Невозможно перечислить всех, кто на протяжении трех столетий создавал историю российского стекла. Но есть предприятия, владельцы и работники которых принесли всемирную славу русскому стеклу: это Императорский стеклянный завод, Николо-Бахметьевский и Мальцовский хрустальные заводы. Судьба трех хрустальных королей сложилась по-разному, но каждый достоин и упоминания, и памяти.

Началом стеклоделия в России считается 1635 г., при царе Михаиле Федоровиче, когда шведом Елисеем Кохтом в селе Духанино в 50 км от Москвы был устроен первый стеклянный завод, на котором работали пятнадцать человек. Производил завод бутылки, аптекарские склянки, посуду для царского стола.

В 1668 г. в селе Измайловском под Москвой появился стекольный завод, который подчинялся дворцовому ведомству и выпускал широкий ассортимент выдувных изделий: кувшины, кружки, рюмки, кубки, тарелки, лампы, подсвечники и т. п. В 1710 г. завод был передан в ведение Аптекарского приказа и сосредоточился на выпуске медицинской посуды.

В начале XVIII в. по указу Петра Великого появились два казенных стеклянных завода на Воробьевых горах и в Можайском уезде, мастеров для которых отправляли обучаться за границу, в том числе и в Венецию. В 1740–1750-х гг. Сенат запретил строительство стекольных заводов в пределах двухсот верст от Москвы и Петербурга, и часть заводов переехала на другие территории, а часть прекратила свое существование.

² Манускрипт Теофила «Записка о разных искусствах» // Сообщения Центральной научно-исследовательской лаборатории по консервированию и реставрации музейных художественных ценностей (ВЦНИЛКР). — Вып. 7. — М., 1963. — С. 101–117.

История Императорского стекольного завода начинается с Ямбургского уезда Санкт-Петербургской губернии. Документы, указывающие дату его основания, отсутствуют, есть запись в архиве А. Д. Меншикова, что Ямбургские заводы учреждены прежде 1710 г. и выпускали оконные круги, лили зеркальные стекла, выдували зеленую и «хрустальную» посуду (так в XVIII в. называлось бесцветное стекло). В 1730 г. завод взял в аренду английский купец В. Эльмзель, который в 1735 г. перенес оттуда оборудование в собственный Петербургский завод на реке Фонтанке. В 1738 г. завод вернулся в казенное управление и к середине столетия специализировался на выпуске художественных изделий, которые выполнялись по заказам двора и частных лиц. В 1774 г. горячие цеха завода перевели в село Назья (с середины XIX в. — Назия) близ Шлиссельбурга. В Петербурге была оставлена мастерская для шлифовки и полировки зеркал, гравировки посуды. В 1777 г. предприятие было отдано «в вечное и потомственное владение» князю Г. А. Потемкину, который перевел его в село Озерки близ Петербурга. После смерти князя завод был выкуплен Екатериной II обратно в казну и назван Императорским стеклянным заводом, при котором существовала отдельная зеркальная мастерская. С 1890 г. завод был соединен с Императорским фарфоровым заводом и находился под общим управлением князя Н. Б. Юсупова.



Рис. 38. Графин из бесцветного хрустального стекла, роспись золотом. Императорский стеклянный завод, 1790 г.



Рис. 39. Графин из Готического сервиза, бесцветный и синий хрусталь, накладное стекло, гранение, алмазная грань, полирование, высота — 16 см. Императорский стеклянный завод, 1825–1850-е гг.



Рис. 40. Кубок из бесцветного хрустала, алмазная грань, золото. Императорский стеклянный завод, 1817 г.

Судьба предприятия, обремененного заказами императорского двора, сложилась непросто. Мастера Императорского завода выполняли уникальные изделия из цветного стекла и хрустала, но не имели возможности расширять ассортимент и выпускать изделия массового спроса. Если в целом охарактеризовать

особенность изделий, выпускаемых Императорским стеклянным заводом, следует указать на их монументальность, некоторую помпезность и любовь к декорированию бронзой, золотом и художественной резьбой (рис. 38–40). Кроме того, мастерам приходилось изготавливать и крупные архитектурные детали внутреннего убранства, такие как стеклянные купола, мозаичные стены, витражные композиции, хрустальный бассейн и ложе с фонтанами.

На территории Императорского стеклянного завода, получившей название Стеклянный городок, размещались фабричные цеха, дома для рабочих и храм во имя иконы Божьей матери «Всех скорбящих радость». В предреволюционные годы на Деминской улице (ныне ул. Профессора Качалова) были основаны Зеркальные мастерские Петроградского стекольного промышленного общества, которые в 1920 г. национализировали. В 1940 г. по инициативе члена-корреспондента АН СССР, лауреата Государственной премии, одного из создателей отечественного оптического стекла Н. Н. Качалова, скульптора-монументалиста В. И. Мухиной, писателя А. Н. Толстого и инженера-технолога Ф. С. Энтелиса на базе мастерских было организовано уникальное экспериментальное производство, техническое руководство которым осуществляла кафедра общей технологии силикатов Ленинградского химико-технологического института им. Ленсовета, научное — Н. Н. Качалов. Положительное решение о создании мастерских состоялось благодаря тому, что хрустальный фонтан высотой 4,25 м и диаметром чаши 2,4 м, представленный в экспозиции советского павильона на Международной выставке в Нью-Йорке 1939 г, изготовили мастера-стеклоделы разных стекольных заводов по проекту, разработанному Ф. С. Энтелисом и скульптором И. М. Чайковым (рис. 41).



Рис. 41. Хрустальный фонтан на выставке в Нью-Йорке

Новое предприятие получило название «Ленинградский завод художественного стекла и сортовой посуды» и производило продукцию массового спроса из стекла и хрусталя. В 1990-е гг. завод, как и многие другие заводы сортового стекла, практически прекратил свое существование. В 2000 г. коллекция музея Ленинградского завода художественного стекла, которая насчитывает более 8 тысяч экспонатов, была передана в Елагиноостровский дворец-музей, размещена в помещениях центральной части и двух галерей Оранжерейного корпуса, где открылся Музей художественного стекла.

Николо-Бахметьевский завод был основан в 1764 г. с разрешения императрицы Екатерины II «соляной конторы прокурором» А. И. Бахметьевым близ сел Никольского и Пестровки Пензенского уезда. С момента основания до 1884 г. заводом управляли три поколения Бахметьевых, а затем он перешел по наследству к их родственнику князю А. Д. Оболенскому.

Особенностью изделий Николо-Бахметьевского завода является использование для их изготовления как бесцветного, так и цветного сортового и хрустального стекла (рис. 42–44), а также применение приемов декорирования, заимствованных у мастеров Венецианской школы, включая венецианскую нить и миллефиори.

Возможно, оттого, что заказчиками изделий начиная с 1795 г. были в основном представители богатого дворянства и Церкви, слава завода была такова, что он заслужил честь стать поставщиком Императорского двора и право изображения на своей продукции Государственного герба России. В 1789 г. сын основателя завода Н. А. Бахметьев создал музей стекла и хрусталя, где начал собирать лучшие образцы производства собственного завода и лучшие изделия европейских стеклоделов, которые мастерами завода использовались в качестве эталонов.

Во время Пугачевского бунта завод был разграблен, однако примерно в 1820 г. были построены каменные здания для печей (гуты), шлифовальные, гравировальные, золотильные и другие мастерские.

Изделия завода неоднократно удостаивались дипломов и медалей на российских и международных выставках. Заводу повезло с владельцами, они вкладывали средства в развитие не только самого стекольного производства, но и вспомогательных цехов, ориентируясь на новейшие достижения своего времени. И последний владелец завода, князь Оболенский, поддерживал эту традицию. Он вкладывал личные средства не только в техническое переоснащение завода, но и в улучшение условий жизни заводских служащих.

«...За последние 25 лет, при новом владельце, хрустальный завод увеличил впятеро обороты своего производства и работает на пяти печах в 12 горшков каждая. Завод занимает в настоящее время до 1000 человек мастеровых и служащих, живущих почти исключительно в собственных домах и на собственной земле... Владелец завода содержит для них 2-классное училище на 400 человек мальчиков и девочек, больницу на 30 кроватей при враче и соответствующем медицинском персонале, библиотеку и театр. Служащими же и рабочими организована собственная ссудо-сберегательная касса, утвержденная местным начальством...»³.

³ Манускрипт Теофила «Записка о разных искусствах». — С. 101–117. См.: Набор «Спасательный круг» // VIP: бизнес, подарки. — URL: https://vip-biznes-podarki.ru/catalog/element/nabor_spasatelnyy_krug/ (дата обращения: 26.11.2021).



Рис. 42. Графин и стопка из бесцветного стекла с золотой протравой, гранением и гравированием. Николо-Бахметьевский хрустальный завод



Рис. 43. Стакан и кубок из бесцветного и янтарного стекла с гранением и гравированием



Рис. 44. Изделия из трехслойного стекла — бесцветного, молочного и синего, с гранением, травлением и гравированием

Были на заводе и династии выдающихся мастеров-стеклоделов. Одна из самых известных — Вершинины-Протасовы. Они работали мастерами и управляющими завода с конца XVIII до начала XX в., а крепостной мастер Александр Вершинин уже в 1807 г. получил от императора Александра I золотые часы за изготовление великолепного сервиза на 70 персон для царского стола. Но самыми известными изделиями Вершинина стали двойные стаканы с картинками, о технологии изготовления которых до сих пор спорят в мире стекла. На сегодняшний день известно о нахождении в лучших музеях мира 12 вершининских стаканов (рис. 45).

Рис. 45. Стакан из бесцветного хрустала с двойными стенками, украшенный золочением, для создания объемной картины использованы дерево и высушенные растения (Государственный исторический музей, отдел керамики и стекла, Москва)



В годы революции и Гражданской войны мастерам и рабочим завода удалось сохранить и основное оборудование завода, и музей. В годы советской власти завод (с 1924 г. — «Красный гигант») выпускал изделия для оборонной промышленности, но при этом сохранилось и художественное стекло. Для оформления станций Московского метрополитена использовали изделия этого завода. Конец 90-х стал переломным моментом в истории ФГУП «Красный гигант». Сокращение

оборонных заказов, отсутствие грамотного управления, огромные долги привели к тому, что в 2005 г. завод был признан банкротом и выставлен на торги. В 2008 часть помещений завода была выкуплена, и сегодня традиции производства высококачественного хрусталя возрождает ООО «Бахметьевская артель».

Самая громкая фамилия в мире российского стекла — безусловно, Мальцовы. Не только потому, что на протяжении двух столетий не выпускали из рук предприятия по производству стекла, а в большей степени потому, что не ограничились одним заводом, а к концу XIX в. создали целую империю производителей стекольной продукции на территории России.

История их успеха начинается с 1723 г., когда орловские купцы Назар Дружинин и Сергей Аксенов основали стекольный завод в Можайском уезде Московской губернии на Ширяевой и Кудиновой пустошах и взяли в компаньоны Василия Мальцова, который в 1730 г. стал единственным владельцем завода, производящего в основном стеклянную тару. Его сыновья Аким и Александр построили в Карачевском уезде Орловской губернии еще один завод, переехавший позже в село Радицы Брянского уезда. В середине 60-х гг. XVIII в. дальнейшее расширение мальцовских предприятий встретилось с серьезными затруднениями. По указу Екатерины II лица недворянского происхождения не имели права на покупку недвижимого имущества и заведение фабрик. Предприимчивые Мальцовы, вспомнив старинную родословную, стали хлопотать о дворянстве и добились своего. В 1775 г. Аким и его двоюродный брат Фома восстановились в дворянстве, доказав, что являются прямыми потомками Богдана Афанасьевича сына Мальцова из Чернигова, внесенного в общий гербовник дворянских родов в 1634 г. После указа Сената об удалении заводов на 500 км от столицы завод Акима Мальцова перебирается на речку Гусь в Мещерском крае Владимирской губернии — ныне город Гусь-Хрустальный. В 1764 г. Фома Мальцов, следуя успеху брата, основал стеклянную и хрустальную фабрику при речке Ястреб (Судогодская фабрика), а в 1775 г. — Золотковскую фабрику в сельце Золоткове. К началу XIX в. Фома Мальцов владел пятью заводами, расположенными во Владимирской губернии. В 1788 г. вдова Акима Мальцова Марья Васильевна становится владелицей Гусевского и Радицкого заводов и начинает строительство 10 новых.

В начале XIX в. семейству Мальцовых принадлежало 15 стекольных заводов, где была сосредоточена почти половина рабочих, занятых в стекольной промышленности России. В 1884 г. Мальцовские стекольные заводы были временно переданы в казенное управление, а в 1894 г. было создано Акционерное общество Мальцовских заводов. Последним владельцем заводов был Ю. С. Нечаев-Мальцов.

Начиная с 1829 г. завод являлся постоянным участником практически всех мануфактурных выставок и неоднократно удаивался золотых медалей за качество продукции. С 1849 г. получено и подтверждено право на использование Государственного герба России на изделиях. В 1856 г. получено право использования государственной символики от Министерства финансов. Мальцовские заводы — Дятьковский и Гусевский — выпускали хрусталь с характерной гранью, именуемой «русский камень», и с особым рисунком из трав, цветов

и вьющейся лозы. Дятьковский же завод удивил мир единственным в мире хрустальным иконостасом. К концу XIX в. изделия Гусевского хрустального завода массового спроса стали своего рода эталонами качества при сравнительно невысокой стоимости.



Рис. 46. Графины из многослойного стекла (бесцветное и медный рубин), резьба и гравирование. Гусевской хрустальный завод



Рис. 47. Набор из цветного стекла с обжиговой росписью и золочением. Гусевской хрустальный завод



Рис. 48. Графины из бесцветного и цветного хрусталя, полный наклад, гранение и резьба «русский камень». Гусевской хрустальный завод

На рубеже XIX–XX вв. по разнообразию методов и приемов украшения стекла завод не знал себе равных (рис. 46–48). Владельцы внимательно следили за новейшими достижениями не только в области стеклоделия, но и в химии и машиностроении и стремились использовать передовые технологии, такие как введение оксида мышьяка в состав шихты для улучшения процесса осветления

стекло, освоение технологий варки цветных стекол, установка паровых машин для подключения шлифовальных станков и многие другие наработки французских и английских стеклоделов, новшества богемских и австрийских производств.

В 1893 г. на Всемирной выставке в Чикаго изделия завода были награждены Бронзовой медалью и Почетным дипломом. Изделия в восточном стиле были приобретены европейскими музеями. В 1900 г. продукция завода экспонировалась на Всемирной выставке в Париже и была удостоена Гран-При.

В начале XX в. отечественное стеклоделие переживало глубочайший кризис, однако Гусевской хрустальный завод был в числе предприятий, переживших промышленный спад. В ассортименте завода находилось более 6000 видов изделий, в том числе посуды массового спроса с несложным рисунком и простой формой. В 1913 г. на заводе была изготовлена серия винных приборов, состоящих из штофов со стопками, украшенных гербом династии Романовых и монограммами разных монархов. Они были приурочены к празднованию 300-летия Дома Романовых. После революции большинство Мальцовских заводов продолжили свое существование, и одни стали основой производства посуды и художественного стекла в Советской России, на базе других было основано производство листового и тарного стекол.

Гусевской хрустальный завод после национализации в 1918 г. долгое время производил лишь чайные стаканы, прессованную посуду и небольшой ассортимент сортовых изделий. В годы Великой Отечественной войны выпускал продукцию для нужд фронта: медицинские ампулы, светотехническое стекло, термосы, фляги, шары для горючей смеси и т. п.

С 1946 г. начинается история советского Гусевского завода. Завод занимался ручной выработкой и механизированным выпуском бесцветной и цветной хрустальной посуды, освоил и внедрил в производство и новые линии и скорректированные составы стекол, неоднократно участвовал в международных выставках, и его изделия получали заслуженные награды. На заводе выросла плеяда мастеров, и с ними работали известные художники. После развала Союза в 1990-е гг. шла дальнейшая модернизация производства.

В 1995 г. на основании изменения организационно-правовой формы предприятия завод стал именоваться ОАО «Гусевской хрустальный завод».

Говоря об истории российского стеклоделия, нельзя не сказать о М. В. Ломоносове, вклад которого в технологию стекла трудно переоценить, а его знаменитое стихотворение «Ода стеклу» пронизано неподдельной любовью к этому замечательному материалу. Ученый Ломоносов не мог не поставить производство стекла на научную основу. Он ввел химические символы в описание сырьевых материалов, разработал систему записи составов стекол в весовых частях, записал технологические регламенты варки и выработки изделий из стекла. Его научной лабораторией стали предприятия по изготовлению цветных стекол на основе древних русских рецептов в Усть-Рудице, которые были построены в 1752–1754 гг. Там же, по разработанным им рецептам, выпускали цветное смальтовое стекло, бисер и стеклярус, а также была устроена и мозаичная мастерская, где по его эскизу была выполнена знаменитая мозаика «Полтавская баталия» (рис. 49).



Рис. 49. Мозаика «Полтавская баталия». Здание Академии наук в Санкт-Петербурге

Ему же было суждено в середине XVIII в. раскрыть тайну состава золотого рубина. Последователь Ломоносова академик К. Г. Лаксман в 1764 г. ввел в стекольную шихту не соду, а глауберову соль, то есть многоводный сульфат натрия на одном из заводов г. Барнаула, тем самым заложив основы процесса освобождения стекломассы от газовых пузырей — осветления.

Известный мастер-самоучка И. П. Кулибин разработал чертежи стекловаренной печи и тиглей для наварки стекломассы в производстве больших зеркал. В конце XVIII — начале XIX в. зеркальные заводы строили по его чертежам, и качество зеркал было по достоинству оценено не только в России, но и далеко за ее пределами.

В 1851 г. химик, юрист, экономист, специалист в области сельского хозяйства А. К. Чугунов на практике доказал полезность брикетирования шихты для снижения улетучивания сырьевых материалов, уменьшения времени стекловарения и повышения качества стекломассы.

Еще один этап в развитии стеклоделия России связан с именем Д. И. Менделеева. Его труды «Основы химии» и «Стекольное производство» (1864) заложили основы в теорию строения стекла и практику промышленного стекловарения. Продолжение этой темы прозвучало и в книге С. П. Петухова «Стеклоделие», изданной с предисловием Д. И. Менделеева, которая до сих пор остается актуальной⁴. В 1897 г. Малышев изобрел первую модель ванной печи непрерывного действия с разделенными бассейнами, которая позволила сделать процесс стекловарения и непрерывным, и более производительным.

⁴ Петухов С. П. Стеклоделие : Руководство для производств: бутылочного, листового, зеркального, посудного и прочаго стекла, с приложением теоретических данных и заводской практики. С 198 рисунками в тексте. — СПб. : изд. К. Л. Риккера, 1898. — 316 с., с ил.

Ход развития стекольной промышленности в XIX столетии был таким, что в 30-е гг. в России насчитывалось около 200 стекольных заводов, к 1865 г. их стало 226, а к середине 1980-х гг. без увеличения общего числа предприятий производительность возросла в два с половиной раза. В 1897 г. в России числится 294 стеклозавода с общей годовой выработкой на сумму около 21 млн руб., что еще в два раза больше в сравнении с уровнем 1880 г.

В начале XX в. теоретические разработки в области стекловарения осуществляли такие известные ученые, как химик-технолог И. И. Китайгородский, химик-органик В. Е. Тищенко, химик-технолог И. В. Гребенщиков, химик Г. Ю. Жуковский.

В Советском Союзе продолжалось развитие стекольной отрасли, велось освоение новых технологий производства, создавались новые предприятия, внедрялось новое высокопроизводительное оборудование, расширялся ассортимент, в том числе с учетом нужд оборонной промышленности.

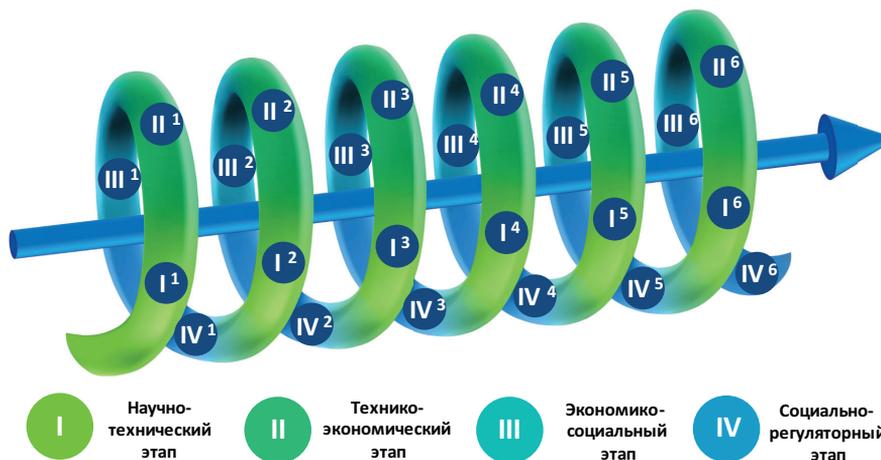
К началу Отечественной войны СССР занимал одно из первых мест в мире по выпуску стекольной продукции, а по производству оконного стекла превзошел США.

Стекольная промышленность России сегодня производит широкий ассортимент стекольной продукции для различных отраслей народного хозяйства и бытовых целей. Стекольная отрасль потребляет более 5 % топлива, почти 9 % электроэнергии, 7,5 % минеральных ресурсов от общего объема потребления в стране. Более 8 % грузооборота железнодорожного транспорта связано с перевозкой сырья и готовой продукции стекольной отрасли. В стекольной отрасли занято до 500 тыс. человек.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Начальные этапы истории и эволюции технологии стекла — цепочка счастливых случайностей, благодаря которым человечество открыло этот уникальный материал. И кропотливый труд стеклоделов раннего средневековья, удержавших этот материал от исчезновения. И буйство фантазии мастеров Эпохи Возрождения, которые открыли массу его декоративных и технологических возможностей. И вклад стеклоделов всего мира, каждый из которых стремился создать свое стекло, не похожее на изделия из других городов и весей. И, наконец, подкрепление технологии силой научной и инженерной мысли, которые дали возможность проникнуть изделиям из стекла везде, где ступает нога человека.

Каждый исторический этап развития технологии включает в себе цикл, началом которого является новый аспект ее использования, новая продукция и т. п., а завершением — новые требования, которых достигнутый уровень технологии обеспечить не может, после чего цикл повторяется (рис. 50, табл. 4, 5), но в новых исторических условиях.



- I** — Научно-технический этап
- II** — Техно-экономический этап
- III** — Экономико-социальный этап
- IV** — Социально-регуляторный этап
- I¹** — появление стекла как нового самостоятельного материала
- II¹** — разработка технологии непрозрачных цветных стекол и методов пластического формования изделий
- III¹** — завоевание изделиями из стекла ниши на рынке металлических и керамических сосудов и украшений
- IV¹** — низкоэффективное малопроизводительное изготовление изделий при дворах фараонов и храмах
- I²** — выявление главного свойства стекла — прозрачности, изобретение стеклудувной трубки
- II²** — разработка технологий интенсификации процесса стекловарения в закрытом пламени печи и приемов получения всех видов полых изделий методом выдувания
- III²** — рост потребления стеклянной посуды, тары, первые опыты остекления оконных проемов «лунным стеклом»
- IV²** — низкая производительность труда при высоких трудозатратах
- I³** — освоение новых источников сырья и теплоносителей, получение полупрозрачных листов стекла методом проката
- II³** — разработка технологии витражного стекла и обжиговой росписи для строительства храмов и костелов
- III³** — расширение географии производителей и потребителей стеклянных изделий
- IV³** — зависимость производства от расположения источников сырья и теплоносителей
- I⁴** — новый качественный уровень всех видов изделий из стекла
- II⁴** — разработка технологии прозрачных стекол высокого качества и множества приемов горячего декорирования изделий и хлявного способа получения листового стекла
- III⁴** — стекло — предмет престижа и материал для остекления жилища
- IV⁴** — повышение производительности стеклodelьных мастерских с помощью многогоршковых печей
- I⁵** — первые попытки научного анализа технологического процесса производства стекла учеными Европы и России
- II⁵** — разработка составов и технологий новых видов стекол — хрустального, оптического и т. д.
- III⁵** — рост численности населения стран Европы, рост потребления всех видов стекольной продукции
- IV⁵** — специализация мастерских по видам изделий, начало укрупнения производства, дефицит теплоносителей
- I⁶** — создание теории строения стекла и выявление закономерности состав-структура-свойство как технологической основы производства серийных и индивидуальных изделий
- II⁶** — разработка технологии и оборудования автоматизированного производства листового, тарного, сортового и др. видов стекол
- III⁶** — формирование мирового рынка производства и потребления стекольной продукции
- IV⁶** — потребность в повышении ресурсо-, энергоэффективности и экологичности многотоннажных производств

Рис. 50. Эволюция технологий производства стекла

Таблица 4. Характеристика циклов развития

Период, годы	Цикл	Описание цикла	Технологические лидеры (страны, компании), орудия производства (оборудование)
IV тыс. до н. э. – 500-е гг. до н. э.	1	<p>Стекло – предмет роскоши. Появление стекла как самостоятельного декоративного материала. – Виды стекол – цветное, окрашенное в массе, прозрачность как случайный результат – Сырьевые материалы – речной песок, зола растений, сода – Варка стекла в плоских глиняных чашах на открытом пламени – Формование изделий пластическими методами – навивание, уплотнение, подпрессовка – Виды изделий: украшения, сосуды для благовоний, мелкая скульптура, чаши-муррины, блюда</p>	<p>Древний Египет и территории его влияния. Оборудование: плоские глиняные чаши, открытое пламя от сжигания дров, деревянные палки с глиняными наконечниками</p>
500-е гг. до н. э. – 500-е гг. н. э.	2	<p>Стеклоянная посуда – предмет обихода. Прозрачное стекло и стеклодувная трубка. – Виды стекол – прозрачное бесцветное и цветное стекло – Сырьевые материалы – белый песок, известняк, зола, сода, красители – Варка стекла – двухстадийная, пламя закрытое, поддув воздуха – Первая революция в истории формирования – изобретение стеклодувной трубки и методов свободного выдувания изделий и выдувания в форму – Виды изделий – посуда для напитков, кувшины и графины, стеклянная тара, блюда и чаши, украшения, лунное стекло, смальтовое стекло</p>	<p>Римская империя. Оборудование: высокие и плоские глиняные горшки, закрытое пламя от сжигания дров, система поддува воздуха для горения, стеклодувная трубка, понтия, щипцы и ножницы, деревянные формы для выдувания</p>
500-е гг. н. э. – XI в.	3	<p>Расширение сырьевой базы и сохранение технологий. Витражное стекло и обжиговая роспись. – Виды стекол – прозрачное стекло бесцветное и цветное, роспись обжиговыми красками.</p>	<p>Страны Средиземноморья на европейском и африканском побережье, Византийская империя, страны Европы.</p>

Таблица 4 (продолжение)

Период, годы	Цикл	Описание цикла	Технологические лидеры (страны, компании), орудия производства (оборудование)
		<ul style="list-style-type: none"> — Сырьевые материалы — песок разного происхождения с примесями железа, известняк, зола, сода, красители — Варка и выработка стекла в специальном помещении — одностадийная, пламя закрытое, поддув воздуха — Формование методами выдувания с помощью стеклодувной трубки и отливка на чугунную плиту с прокатом или подпрессовкой — Виды изделий — посуда для напитков, кувшины и графины, блюда и чаши, украшения, лунное оконное стекло, плоское витражное стекло, обжиговая роспись по плоскому и фигурному стеклу 	<p>Оборудование: высокие глиняные горшки, закрытое пламя от сжигания дров, система поддува воздуха для горения, стеклодувная трубка, понтия, щипцы и ножницы, деревянные формы для выдувания, плиты для отливки, валики для подпрессовки</p>
XII–XV вв.	4	<p>Расцвет выдувных изделий, стеклянная посуда и зеркала — предметы престижа.</p> <p>Роскошь венецианского стекла.</p> <ul style="list-style-type: none"> — Виды стекл — бесцветное прозрачное стекло, цветное стекло, окрашенное в массу, молочное стекло — Сырьевые материалы — белый песок, сода, известняк, красители, глушители, окислители-восстановители — Варка и выработка стекла в закрытых мастерских, появление многогоршковых печей — Формование методами свободного выдувания, выдувания в форму, отливки и прессования, халаявный метод получения листового стекла — Методы горячего декорирования — накладное стекло, филигранное стекло, миллефиори, пузыри в стекле, обжиговая роспись, покрыва — Виды изделий — стеклянная посуда и стеклянная тара, люстры, зеркала, листовое оконное стекло 	<p>Венецианская республика, остров Мурано.</p> <p>Оборудование: многогоршковые печи, глиняные горшки, закрытое пламя от сжигания дров, система поддува воздуха для горения, стеклодувная трубка, понтия, щипцы и ножницы, деревянные формы для выдувания, установк для ручного прессования, столы для раскроя халаявного листового стекла, оборудование для нанесения зеркальных покрытий, оборудование для декорирования стеклянных изделий</p>

Таблица 4 (окончание)

Период, годы	Цикл	Описание цикла	Технологические лидеры (страны, компании), орудия производства (оборудование)
XVI–XVIII вв.	5	<p>Хрусталь и оконное стекло. Рост объемов производства, научное обоснование рецептов составов и технологии варки стекла и выработки изделий.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Виды стекло – хрустальное стекло, бесцветное, цветное и глушеное стекло – Сырьевые материалы – белый песок, сода, натриевый и/или калиевый полевой шпат, зола, известняк, мрамор, свинцовый сурик, красители, глушители, окислители и восстановители – Варка и выработка стекла в закрытых мастерских, многогоршковые печи с нижним подводом пламени – Формование методами свободного выдувания, выдувания в форму, отливки и прессования, халаяный метод получения листового стекла – Методы горячего декорирования – накладное стекло, филигранное стекло, миллефори, пузыри в стекле, обжиговая роспись, покрытия – Методы холодного декорирования – механическая обработка, художественная резьба, гранение и гравирование – Виды изделий – стеклянная посуда и стеклянная тара, люстры, зеркала, листовое оконное стекло, смальтовое и витражное стекло 	<p>Франция, Германия, Богемия, Англия, Россия.</p> <p>Оборудование: многогоршковые печи огнеупорные глиняные горшки, открытое пламя от сжигания дров, торфа и угля, система поддува воздуха для горения, стеклoduвная трубка, понтия, щипцы и ножницы, деревянные формы для выдувания, установки для ручного прессования, плиты для отливки зеркал, оборудованные для нанесения зеркальных покрытий, столы для раскря халаяного листового стекла, оборудованные для механической обработки хрустальных изделий</p>
XIX–XX вв.	6	<p>Стекло в каждом доме. Автоматизация технологического процесса изготовления любых видов изделий.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Все виды листовых, тарных, сортовых и специальных стекл – Сырьевые материалы – обогащенный песок, сода, натриевый и/или калиевый полевой шпат, мел, известняк, мрамор, глинозем, красители, глушители, осветлители, окислители, восстановители – Варка стекла – печи непрерывного и периодического действия газовые, электрические, газозлектрические – Формование – механизированное вытягивание, выдувание, прессование, прессовывдувание, центробежное формование, прокат – Декорирование – механизированное нанесение обжиговых красок и деколей, полимерных и металлических покрытий, химическое матирование и полирование, механическая обработка изделий, фотопечать, принтерная печать, лазерная обработка 	<p>Германия, Бельгия, США, Великобритания, Италия</p> <p>Оборудование: для подготовки сырьевых материалов, перемешивания и транспортировки шихты, газовые регенеративные печи непрерывного действия, стеклоформующие автоматы для производства листового стекла, стеклянной тары, сортовой посуды и т. д., автоматизированные ленты для раскря и обработки листового стекла, нанесение покрытий, химической обработки стеклянной тары и сортовой посуды</p>

Таблица 5. Основные этапы циклов развития

Цикл развития технологий	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый цикл	Возникновение стекла — нового материала, аналога драгоценных камней; отработка технологии — выбор сырьевых материалов, сосуда для варки стекла, теплоносителя и способов получения изделий, определение оптимальных условий варки стекла и выработки из него годных изделий	Единичные мастерские, работающие на местном сырье, возникшие на базе производства керамических изделий, египетская печь	Стекло — предмет роскоши. Основные виды изделий: глазурированные керамические и храмовые фигурки из египетского фаянса, сосуды для благовоний, чаши и браслеты	Низкая производительность труда Ремесленное производство стекла при дворах фараонов и крупных храмовых центрах
Второй цикл	Изобретение стеклодувной трубки и технологии выдувных изделий, поташные и содовые составы стекол; закрытая зона варки, поддув воздуха для увеличения температуры пламени, увеличение выпуска изделий	Распространение мастерских в границах империи, освоение новых сырьевых и энергетических источников, интенсификация процессов варки стекла и выработки изделий	Стекло — предмет обихода. Бесцветная стеклянная посуда, посуда из цветного стекла, стеклянная тара, плоское лунное стекло	Начало разделения труда в рамках одной мастерской Рост количества мастерских по производству стекла, первые бригады для изготовления каждого изделия
Третий цикл	Разработка технологии отливки с прокатом и росписи витражных стекол, восстановление приемов изготовления стеклянной посуды методом выдувания	Организация первых гут — небольших мастерских, легко перемещаемых с места на место, освоение новых источников сырья и энергии, выбор востребованного вида изделий	Стекло — материал для заполнения оконных проемов. Листовое витражное стекло, стеклянная посуда и тара	Начало специализации мастерских по производству стекла

Таблица 5 (окончание)

Цикл развития технологий	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Четвертый цикл	Появление многогоршковых закрытых печей с нижним подводом пламени; халявный метод изготовления листового стекла; бесцветное стекло с высокой белизной; новые методы горячего декорирования (накладное стекло; атласное стекло; венецианская нить; миллефиори; кракле; пузыри в стекле)	Расширение ассортимента изделий из стекла, универсальность состава и способа формирования для получения листового стекла, тары и посуды	Стекло — материал престижа. От уникальных художественных изделий и крупногабаритных зеркал до качественных изделий массового спроса	Индивидуальное мастерство лидеров отрасли, конкуренция на рынке стеклянных товаров, секреты производства стекол в разных регионах
Пятый цикл	Многогоршковые печи с нижним подводом пламени; полуавтоматическое оборудование для прессования и механической обработки; варка хрустальных стекол; методы холодной обработки хрустальных изделий: гранение и резьба	Формирование производственных подотраслей, появление отдельного направления — оптическое стекло	Стекло — материал для массового производства изделий	Рост производительности ручного труда, переход от мануфактур к частичной механизации и организации массового производства
Шестой цикл	Разработка: – составов стекол для механизированного формирования изделий, – конструкций печей непрерывного действия, – автоматизации методов формирования листового, сортового, тарного, оптического, светотехнического и др. видов стекол, а также процессов ламинирования и нанесения покрытий, окрашивания и т. д.	Переход на автоматизированное производство изделий массового спроса	Стекольная отрасль — ресурсо- и энергоемкая, высокотехнологичная отрасль промышленного производства	Рост производительности труда за счет механизации производства, глобализация рынка стеклоизделий

Первый, или египетский, цикл — самый длительный с точки зрения развития, в истории технологий. Появление нового материала — стекла — было случайным, его заметили лишь потому, что оно имело сходство с драгоценными для того времени камнями — бирюзой, лазуритом, сердоликами. И позволяло производить яркие и красивые украшения. Делая круглые и продолговатые цветные бусины, бисер, стеклярус и витые браслеты, мастера Древнего Египта отработали технологию пластического формования — навивания стекломассы на глиняно-песчаный сердечник, которая продержалась около трех тысячелетий.

Столь медленное движение процесса развития связано с незнанием преимуществ и особенностей прозрачного стекла. Цветные стекла получали из состава глазури — легкоплавкой смеси песка, обогащенного ракушечником, и золы при температуре не выше 1000° С. При таких температурах невозможно получить в прозрачном виде ни один из существующих составов листового, сортового или тарного стекла. Высокое содержание щелочных компонентов в составе стекол компенсировалось большим количеством малых добавок, щелочноземельных и красящих катионов, которые обеспечивали изделиям достаточно высокую химическую стойкость. Движущей силой развития технологии в этот период был заказ на храмовые и интерьерные изделия домов фараона, жрецов и представителей высших каст. Кроме того, регионы, в которых стеклоделие зародилось, обладали слабой топливной базой. Итогом первого этапа стало распространение стекольных мастерских по странам, находящимся под влиянием Древнего Египта, появление двух видов составов стекол — поташных и содовых, и ассортимент продукции: несколько десятков видов флаконов для масел и благовоний, украшения и первые блюда и чаши.

Начало цикла — случайное появление нового материала на основе глазури для глиняных пластин при нанесении глазурных покрытий методами полива или окунания и обжига керамических изделий.

Движущая сила цикла — материал для высшей касты, необходимость в нем возникает по мере укрепления могущества жрецов и храмовых династий: дешевое ручное производство за счет использования рабского труда, местных сырьевых и энергетических источников, методов пластического формования.

Завершение цикла — обнаружение прозрачного стекла.

Второй, или римский, цикл продолжался от середины I тыс. до н. э. до падения западной части империи в 476 г. н. э. Римская империя охватывала территории гораздо большие, чем Египет. На них римляне строили дороги, укрепляли города и культивировали ремесла, расширяли торговлю. В таких условиях выживание ремесла требует его развития.

И мы наблюдаем развитие всего технологического цикла производства стекла. Пошли в ход новые сырьевые материалы и теплоносители: белые речные пески, содовые месторождения и леса европейской части Средиземноморья. В составах стекол уменьшилось содержание красящих примесей, и бесцветное стекло стало получаться не случайно, а намеренно. Гонимый за прозрачностью, мастера вынуждены были улучшать качество провара стекломассы.

И придумали закрытое пространство для варки стекол, поддув воздуха для увеличения температуры пламени и двухстадийную варку, где на первой стадии получали хорошо остеклованный спек в высоких цилиндрических горшках. На второй стадии спек разбивали, отбирали наиболее однородные и полупрозрачные куски и доваривали до превращения прозрачную стекломассу в плоских чашах. Ну, и апофеозом этапа, безусловно, стала стеклодувная трубка! Ни один материал, полученный при высоких температурах в виде расплава, кроме стекла, нельзя раздуть в шар и сохранить его форму после охлаждения.

Собственно, с этого цикла — рубежа старой и новой эры — и начинается поступательное движение привычного сегодня стекла. Сочетание оптических характеристик: прозрачности в видимом диапазоне излучений, твердости и химической стойкости — выделило стекло в ряду твердых веществ. А технологические свойства, в частности вязкость, позволяющая выдувать из расплава все виды стеклянной тары, посуды и даже плоское стекло, открыли человечеству новый жизненно важный материал.

Движущей силой развития технологий в этом периоде можно считать общий подъем ремесел в период расцвета Римской империи, становление стекла как оптически прозрачного материала и изобретение стеклодувной трубки и приемов горячей выработки изделий с ее помощью. В результате стекло из предмета роскоши превратилось в предмет повседневного спроса в виде посуды, стеклянной и аптекарской тары, предметов интерьера и даже мозаичного и оконного стекла. Никакого особенного приоритета ни один из видов изделий не завоевал, но все вместе они прочно укрепились на тогдашнем рынке товаров.

Начало цикла — выделение прозрачного стекла, как основного продукта в массиве цветных стекол, появление способа выдувания изделий и технологий варки прозрачных и окрашенных стекол, массовое производство изделий постоянного спроса.

Движущая сила цикла — необходимость повышения качества прозрачных стекол и разработка более совершенных приемов варки стекол для выдувных изделий, расширение ассортимента изделий и растущий спрос на стеклянную посуду и тару для всех сословий.

Завершение цикла — распад Римской империи.

Третий, или средневековый, цикл ведет свое начало от момента развала Римской империи в 476 г. до начала XII в. — начала Проторенессанса. В эти смутные времена никакого технологического прорыва в технологии стекла не случилось. Прорыв, если можно это так расценивать, получился в осознании необходимости этого материала в строительстве. Мастерские, рассеянные на просторах рухнувшей Западной Римской империи, не сохранились или еле выживали примерно до VIII в., в период становления государств новой Европы. В сформировавшихся государствах ремесла снова стали востребованы, и снова началось освоение новых источников сырья и топлива для производства стекла уже в средней части Западной Европы.

Итогом периода стало использование витражного стекла для заполнения оконных проемов соборов, построенных в романском, а потом и в готическом стиле. Известный во времена Римского периода лунный метод получения стеклянных дисков для этой цели не подходил. Слишком разнотолщинным было «лунное» стекло. Поэтому была отработана технология литья на чугунную плиту с прокатом для получения ровных по толщине кусков стекла, рассеивающих свет. Они хорошо вставали в обрешетку огромных по величине оконных проемов. Украшенные обжиговой росписью, они наполняли внутреннее пространство храмов поистине божественным светом. Так стекло как материал завоевало еще одну позицию. Появился материал, с помощью которого можно было делать светлыми жилища даже в странах с холодным климатом.

Начало цикла — необходимость сохранить мастерство стеклоделов в условиях непрекращающихся войн по разделу сферы влияния в Европе.

Движущая сила цикла — возрождение ремесел как признак стабилизации жизни государства и повышения спроса на продукцию.

Завершение цикла — появление монополий производства стекла.

Четвертый, или венецианский, цикл охватывает эпохи Проторенессанса и Возрождения с начала XII до конца XV в. Этот период в истории стеклоделия, как и в общей истории искусств и ремесел, стоит отдельной строкой по количеству удивительного и нового, возникшего за какие-то триста лет. Глобальное окончание борьбы за территории привело к борьбе на рынке товаров и технологий (вернее, ремесел — технологиями тогдашнее шаманство мастеров можно назвать лишь с натяжкой).

Итак, почему пионером в технологии стекла стала Венецианская республика? Во-первых, ее мастера имели наибольший опыт, восходящий к изобретателям стеклодувной трубки, соединенный с опытом присоединенной Византии. Во-вторых, деньги в развитие стеклоделия вкладывали правители республики, знающие толк и в войне, и в торговле. В-третьих, был остров Мурано — работающий по принципу семейного подряда хранитель тайн венецианского стекла от всех жаждущих к ним прикоснуться. Впрочем, условий можно выделить и гораздо больше. Но факт остается фактом. До сегодняшнего дня никому не удалось придумать что-нибудь, сравнимое с достижениями мастеров острова Мурано в технологии художественного стекла. Кроме того, они же подарили человечеству халявный метод изготовления листового, или оконного стекла. И довели прозрачность стекла до такого состояния, что очки и зеркала тоже были придуманы в Италии. Вся Европа была заворожена успехами итальянских мастеров и мечтала разгадать или украсть их секреты.

Начало цикла — сосредоточение передовых тенденций в стеклоделии на острове Мурано.

Движущая сила цикла — мода на уникальные стеклянные изделия, появление новых форм и применений стекла как материала.

Завершение цикла — крах Венецианской республики и распространение технологий и изделий из стекла на территории Европы.

Пятый, или европейский, цикл возник на излете Позднего Возрождения, на рубеже XVI и XVII вв., и продлился до середины XIX в. Укрепление государств Европы сопровождалось увеличением численности населения, ростом строительства и производства, появлением промышленности. Индивидуальный предприниматель впервые начал проигрывать большому предприятию и был вынужден искать соратников для организации конкурентоспособного производства товаров. Этот этап можно назвать этапом раскрытия тайн технологий и составов. Расширение торговли и коммуникаций между странами, развитие науки, и прежде всего физики и химии, положили начало появлению описаний рецептур составов и последовательности операций единым языком. Разработки Германии, Франции, Англии, Богемии легли в основу технологий хрустального стекла, производства зеркал, оптического стекла. И потребность в изделиях из стекла росла. И стеклянная бутылка, и листовое стекло, и посуда стали нужны всем. Небольшие гуты или мастерские семейного типа не могли справиться с необходимыми объемами производства.

Остановка была за главным. Практически до начала XVII в. основным топливом для варки стекла были дрова, повышение производительности производства могло привести к уничтожению лесов. Было необходимо переводить промышленное производство на каменный уголь, а потом и на газ. И механизировать выработку — иначе производство стекла было нерентабельным.

Начало цикла — многообразие видов стекол и изделий из них.

Движущая сила цикла — необходимость увеличения производительности труда.

Завершение цикла — формирование подотраслей стекольного производства.

Шестой цикл, или период механизации производства, — с середины XIX в. по настоящее время.

XIX век в истории человечества — век революций, которые происходили как раз из-за того, что менялась основа жизни людей. Спрос превышал предложение по большинству видов товаров и услуг. И на смену мастерским пришли заводы и мануфактуры, выпуск продукции на которых в разы превосходил возможности мелких кустарных производств.

Механизация производства стекла началась в конце XIX — начале XX в. с перехода на новые типы печей непрерывного действия: с устройствами для подогрева воздуха для горения топлива регенераторами и с ваннами для расплава стекломассы. И с механизации процессов формования двух основных видов продукции листового стекла и стеклянной тары.

Сегодня это высокотехнологичное ресурсо- и энергоемкое производство.

Начало цикла — переход от малопродуктивного периодического производства к высокопродуктивному непрерывному.

Движущая сила — конкуренция на мировом рынке изделий и технологий.

Завершение цикла — переход на энергосберегающие, ресурсоэффективные, экологичные технологии.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Технология стекла — это последовательность процессов переработки исходных сырьевых материалов, в результате которых получают изделие из стекла с заданным комплексом свойств и параметров. В современной стекольной промышленности существуют два вида предприятий. Первая, и основная, группа — это предприятия, производящие изделия из стекольного расплава, полученного из природных и синтетических сырьевых материалов. Вторая группа — это предприятия по промышленной переработке, для которых исходным сырьем служит стекло-полуфабрикат — листовое, стеклянные трубы, стекловолокно и т. п.

Жизненный цикл получаемого продукта для всех видов предприятий состоит из двух частей. Первая часть — это изготовление изделия и его служба по назначению. Вторая — после окончания срока службы или разрушения изделия. Полный жизненный цикл изделия, полученного из горячего стекла, можно представить следующими стадиями:

- добыча и обработка или синтез исходного сырья;
- составление шихты — исходной смеси сырьевых материалов для получения заданного состава стекла;
- варка стекла в стекловаренной печи непрерывного или периодического действия;
- выработка (формование) изделий из готовой стекломассы;
- отжиг и контроль качества изделий;
- отправка изделий потребителю;
- использование изделия по назначению до окончания его срока службы;
- сбор вторичного сырья и его переработка.

В случае получения изделий из стекла-полуфабриката мы имеем следующую последовательность процессов:

- входной контроль и обработка исходных стекол (резка, мойка, определение необходимых свойств и т. п.);
- изменение вида и свойств исходного стекла (моллирование, закалка, нанесение покрытий, механическая или химическая обработка и т. д.);
- контроль качества изделий;
- отправка изделий потребителю;
- использование изделия по назначению до окончания его срока службы;
- сбор вторичного сырья и его переработка.

На рисунках 51 и 52 представлены схемы жизненных циклов изделий из листового и тарного стекла.

В общем виде технологическая схема производства листового стекла с указанием удельных величин расхода энергетических и материальных ресурсов представлена на рисунке 53. При оценке затрат в производстве тарного и сортового стекла удельные затраты скорректируются в зависимости от качества сырьевых материалов, типа печи и вида формирующего оборудования. Однако основные энергетические затраты связаны с эксплуатацией стекловаренной печи, и доля всех остальных не слишком сильно влияет на общую стоимость производства.



Рис. 51. Схема жизненного цикла листового стекла



Рис. 52. Схема жизненного цикла тарного стекла

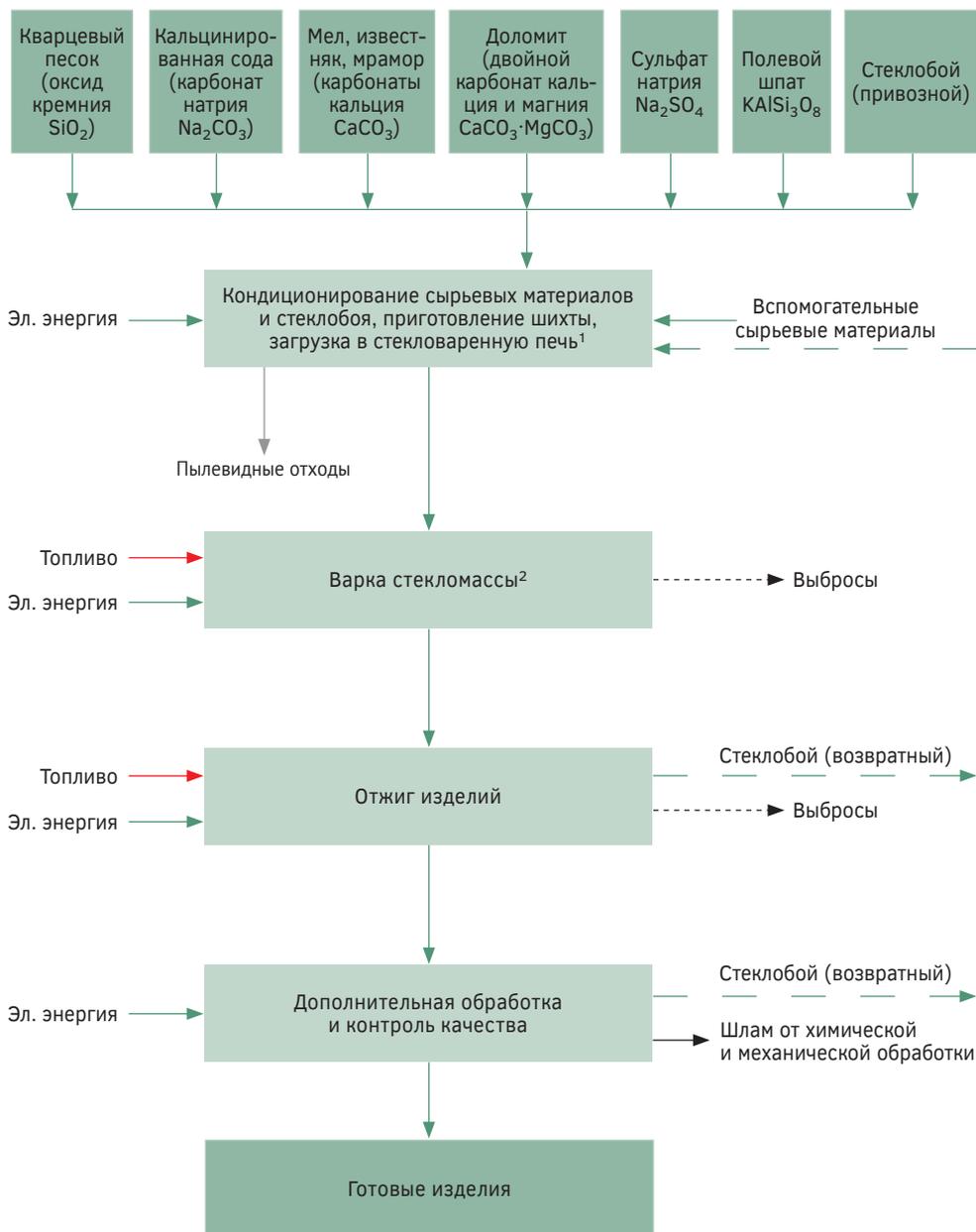


Рис. 53. Общая схема технологического процесса производства продукции массового потребления из стекла

Примечания

¹ Электричество используется для питания конвейеров, дробилок, смесителей, бункеров и рукавных фильтров.

² При варке стекла стекловаренные печи могут быть оснащены дополнительным электроподогревом. Удельный расход электрической энергии может составлять от 5 до 15 % общего энергопотребления печи.

Входной поток на первом этапе технологической схемы включает сырье для производства стекла и теплоноситель. В технологии изделий массового спроса используются составы, принадлежащие к группе натрийкальцийсиликатных стекол. Выбор сырьевых компонентов определяется следующими параметрами: содержанием красящих примесей в природном сырье, видом поставляемого материала (размер частиц, способ упаковки) и стоимостью. Усредненные составы современных промышленных стекол представлены в таблице 6.

Таблица 6. Химические составы промышленных стекол

Вид стекла	Содержание оксидов, масс. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Флоат-стекло	73,0	0,9	8,7	3,6	13,4	0,1	0,3
Вертикально вытянутое стекло	71,5–72,5	0,5–2,5	6,4–7,9	3,7–4,3	13,9–15,5	0,1	0,5
Тарное стекло	71,5–73,2	2,5–3,0	6,0–10,0	3,0–4,0	14,0–16,0	0,05–1,0	0,2–0,5
Сортовое стекло	73,0–73,5	0,2–0,5	6,4–7,5	2,0–2,2	13,0–14,5	0,01–0,05	–

Требование к содержанию красящих примесей в составе сырьевых материалов в основном относится к оксиду железа и обычно нормируется по Fe₂O₃. Этот оксид окрашивает стекло в зеленый (восстановительные условия) или коричневый (окислительные условия) цвет в очень малых концентрациях. Поэтому первым критерием в выборе сырья является соответствие содержания оксида железа оптическим свойствам конечного изделия. Так, для разных марок листового стекла содержание оксида железа может составлять от 0,05 до 0,15 масс. %. Кроме того, повышенное содержание красящих примесей приводит к снижению теплопрозрачности стекольного расплава и снижению интенсивности процесса стекловарения. Химический состав сырьевых материалов, используемых для приготовления стекольных шихт, представлен в таблице 7.

Таблица 7. Состав сырьевых материалов, пригодный для изготовления стекла

Сырьевой материал	Содержание оксидов, масс. %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
Кварцевый песок	98,0–99,5	0,1–2,0	–	–	–	0,05–0,15
Полевой шпат	60,0–70,0	15,0–20,0	–	–	10,0–12,0	0,2–0,5
Известняк	0,3–1,0	0,1–1,0	50,0–55,0	0,5–2,0	–	0,05–0,1
Доломит	0,3–2,0	0,1–1,0	16,0–32,0	16,0–32,0	–	0,1–0,3

Таблица 8. Описание технологического процесса

Входной поток	Стадия технологического процесса	Вид технологического процесса	Метод воздействия на материальный ресурс	Технологический цикл	Выходной поток		Оборудование
					Основные, побочные и промежуточные продукты	Эмиссии	
Сырьевые материалы + стеклобой	Первая	Типовой	Очистка, помол, рассев, взвешивание, перемешивание, транспортировка	Составление и транспортировка шихты	Основной — шихта для стекловарения, побочный — пылевидные фракции сырьевых материалов и стеклобоя	Пылевидные твердые отходы	Мельницы, сита, весовая линия, смеситель, транспортеры
Шихта для стекловарения	Вторая	Типовой	Нагрев	Варка стекла	Основной — стекломасса, побочные — продукты разложения сырьевых материалов и дымовые газы, возвратный стеклобой	Пылевидные и газообразные продукты, возвратный стеклобой	Стекловаренная печь
Стекломасса для формования изделий	Третья	Типовой	Флоат-процесс (выдувание, прессо-выдувание, прокат, прессование и т. д.)	Формование изделий	Основной — лента стекла, (стеклянная тара, посуда и т. д.); побочный — возвратный стеклобой	Возратный стеклобой	Флоат-ванна
Лента стекла (стеклянная тара)	Четвертая	Типовой	Температура	Отжиг изделий	Основной — лента стекла, стеклянная тара, побочные — газообразные продукты процесса упрочнения	Газообразные продукты, возвратный стеклобой	Печь отжига, установки для упрочнения стеклотары
Изделия из стекла	Пятая	Типовой	—	Контроль качества, сортировка, упаковка	Основной — готовые изделия; побочный — возвратный стеклобой	Возратный стеклобой	Линии резки, контроля качества, упаковки продукции

Размер частиц исходного сырья зависит от возможности или желания кондиционировать его в условиях предприятия по производству стекла. Наиболее распространенные типовые сырьевые материалы имеют следующие размеры частиц: песок — 0,1–0,5 мм, допускается увеличение размера до 0,8 мм, известняк (мел, мрамор), полевоы шпат и доломит — до 1,2 мм, сода и сульфат натрия — до 1 мм.

Другая часть входящего сырьевого потока на первой стадии жизненного цикла продукта — бой стекла, облегчающий процесс стекловарения и снижающий энергетические затраты на варку стекла. Современные технологические производственные схемы работают на массовом соотношении шихта : стеклобой 75–80 : 20–25 %. Однако во всем мире наблюдается тенденция к увеличению содержания стеклобоя в исходной сырьевой смеси. Обычно производственный цикл предприятия позволяет собрать около 10–15 масс. % возвратного стеклобоя из необходимых 20 масс.%. Недостающее количество необходимо закупать.

Энергетические затраты на этом этапе — электроэнергия, питающая помольное и рассеивающее оборудование для кондиционирования сырья, транспортеры весовой линии, смесители шихты и транспортеры, перемещающие готовую шихту и молотый стеклобой в печь.

Таблица 9. Материальный баланс производства листового стекла для печи производительностью 800 т/сут

Приход		Расход	
Статья баланса	т/сут	Статья баланса	т/сут
Шихта + стеклобой = 80:20	825	Листовое стекло в пересчете на толщину 4 мм	734,25
		Дымовые газы	4,12
		Бой стекла	86,63
ИТОГО	825	ИТОГО	825,00

Выходные потоки первой стадии — пылевидные отходы сырьевых материалов, характеристики которых представлены в таблице 10.

Вторая стадия — варка стекла. Входной поток здесь — шихта, которая поступает в стекловаренную печь, и природный газ, который поступает в нее для осуществления процесса варки. Расходы сырья и теплоносителя зависят от производительности и типа стекловаренной печи. Наиболее распространенными типами стекловаренных печей в производстве листового и тарного

стекла являются регенеративные ванны печи с поперечным (листовое и сортовое стекло) и продольным (стеклянная тара) расположением газовых горелок. Мощность печей по производству листового стекла составляет от 500 до 1000 т/сут сваренной стекломассы, тарного — от 100 до 350 т/сут, сортового — от 20 до 150 т/сут.

Выходные потоки второй стадии — стекломасса, идущая на формирование готовой продукции, — 82–88 масс. % от массы исходного потока, возвратный стеклобой — 0,5–1 масс. %, потери при улетучивании и разложении сырьевых компонентов — 10–15 масс. % в зависимости от состава сырья и дымовые газы, содержащие продукты сжигания топлива.

На третьей стадии производственного цикла происходит формирование изделий из готовой стекломассы с помощью стеклоформирующих машин — флоат-ванны или машины вертикального вытягивания для получения листового стекла и автоматов карусельного или секционного типа для стеклотары и сортовой посуды. Выходной поток — готовые отформованные изделия — составляет 65–70 % от массы исходного потока, возвратный стеклобой — 10–15 % от массы входного потока третьей стадии.

Четвертая стадия — отжиг изделий — необходима для окончательного оформления изделий, снятия в них всех видов напряжений и приобретения ими заданных физико-химических характеристик. Для отжига используют электрические печи туннельного типа с движущимся транспортером. В производстве стеклянной тары стадию отжига совмещают с нанесением упрочняющих и защитных покрытий. Выходной поток — готовые изделия — составляет 64,5–69,5 % от массы исходного потока, а возвратный стеклобой — 0,5 % от массы входного потока четвертой стадии. В производстве стеклотары добавляется выходной поток газообразных продуктов разложения составов упрочняющих и защитных покрытий, характеристики которых представлены в таблице 10.

На пятой стадии производственного цикла продукция подвергается контролю качества по параметрам, указанным в ГОСТ или ТУ на соответствующее изделие. Контроль габаритных размеров и качества стекломассы осуществляется в режиме онлайн непосредственно на линии транспортировки изделия от печи отжига на склад готовой продукции. Проверку изделий на соответствие физико-химических характеристик заданным, как правило, производит заводская лаборатория. Выходной поток этой стадии — паспортизованная и упакованная продукция, готовая к отправке потребителю, — составляет 64–69 % от массы исходного потока, а возвратный стеклобой — 0,5 % от массы входного потока пятой стадии.

На рисунке 54 представлена обобщенная схема материальных потоков производства стекла, которая свидетельствует о том, что оно относится к производствам незамкнутого цикла и нуждается в технологиях защиты окружающей среды и переработки техногенных выбросов.

Все перечисленные стадии производства изделий являются первой половиной жизненного цикла, которая подчиняется технологическим условиям и регламентам.

Таблица 10. Сведения о химических веществах процесса производства стекла

№ п/п	Наименование химического вещества/продукта	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
1	Кремний диоксид	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья (песок)	60676-86-0	Твердое	SiO ₂
2	Натрия карбонат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья (сода)	497-19-8	Твердое	Na ₂ CO ₃
3	Кальция карбонат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья (мел)	471-34-1	Твердое	CaCO ₃

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{a)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
6/2 по кремнию диоксиду кристаллическому при содержании в пыли от 10 до 70 %)	3	0,3/0,1/- (по пыли неорганической, содержащей двуокись кремния 20–70 %, в т. ч. песок)	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Пыль кристаллического кремния (кварц, кристобалит) может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{c)}.</p>
2	3	0,015/0,05/-	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вредно при вдыхании, может причинить вред при проглатывании и попадании на кожу: LC₅₀ = 2300 мг/м³ (инг., крысы, 2 ч); LD₅₀ = 2800 мг/кг (в/ж, крысы); LD₅₀ > 2000 мг/кг (н/к, кролики). Вызывает раздражение кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{c)}.</p>
-/6 (по известняку/ кальциту)	4	0,5/0,15/- (по карбонату кальция и пыли неорганической, содержащей двуокись кремния менее 20 %, в т. ч. мел)	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании пыли (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вредно для водных организмов: ErC₅₀ > 14 мг/л (водоросли, 72 ч).</p>

№ п/п	Наименование химического вещества/продукта	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
4	Кальций-магний карбонат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья (доломит)	16389-88-1	Твердое	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
5	Калия карбонат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья (поташ)	584-08-7	Твердое	K_2CO_3
6	Алюминия оксид	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья (глинозем)	1344-28-1	Твердое	Al_2O_3
7	Натрия сульфат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья	7757-82-6	Твердое	Na_2SO_4

Таблица 10 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{a)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
-/6 (по доломиту)	4	0,5/0,15/- (по пыли не-органической, содержащей двуокись кремния менее 20 %, в т. ч. доломит)	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение глаз и верхних дыхательных путей. Может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании пыли (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды (магний).</p>
2	3	0,1/0,05/-	4	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вредно при проглатывании: LD₅₀ = 1870 мг/кг (в/ж, крысы). Вызывает раздражение кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вредно для водных организмов: LC₅₀ = 68 мг/л (рыбы, 96 ч).</p>
-/6	4	-/0,01/0,005	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании пыли (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>
10	4	0,3/0,1/-	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды (сульфаты).</p>

№ п/п	Наименование химического вещества/продукта	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
8	Натрия нитрат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья	7631-99-4	Твердое	NaNO ₃
9	Калия нитрат	Основной процесс	Приготовление шихты/дробильно-помольное оборудование	В составе сырья	7757-79-1	Твердое	KNO ₃
10	Олово	Основной процесс	Флоат-процесс/стеловаренная печь	Формование листового стекла на поверхности расплавленного металла	7440-31-5	Твердое	Sn

Таблица 10 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{a)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
5	3	0,05 (ОБУВ)	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Окислитель, может усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Вредно при проглатывании: LD₅₀ = 1267 мг/кг (в/ж, крысы). Минимальная смертельная доза для ребенка при проглатывании 22,5 мг/кг. Вызывает раздражение кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Нитраты в больших концентрациях вызывают неконтролируемый рост биомассы (эвтрофикация водоемов).</p>
5	3	0,05 (ОБУВ)	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Окислитель, может усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Может причинить вред при проглатывании: LD₅₀ = 3015 мг/кг (в/ж, крысы). Вызывает раздражение кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Нитраты в больших концентрациях вызывают неконтролируемый рост биомассы (эвтрофикация водоемов).</p>
–	–	–	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Горючее вещество, пыль может воспламениться на воздухе: T_{св.} = 520°С (аэрогель); 660°С (аэрозоль). Нижний концентрационный предел распространения пламени 190 г/м³.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Вызывает раздражение глаз и верхних дыхательных путей.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Не оказывает негативного воздействия^{c)}.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества/продукта	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
11	Азота оксид	Основной процесс	Варка стекломассы/стекловаренная печь	Эмиссии (выбросы)	10102-43-9	Газ	NO
12	Азота диоксид	Основной процесс	Варка стекломассы/стекловаренная печь	Эмиссии (выбросы)	10102-44-0	Газ	NO ₂
13	Серы диоксид	Основной процесс	Варка стекломассы/стекловаренная печь	Эмиссии (выбросы)	7446-09-5	Газ	SO ₂

Таблица 10 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
5 (по оксидам азота в пересчете на NO ₂)	3	0,4/-/0,06	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании: LC₅₀ = 57,5 ррт (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи и глаз. Может поражать органы (дыхательную систему, ЦНС, систему крови) в результате продолжительного воздействия.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
2	3	0,2/0,1/0,04	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании: LC₅₀ = 88 ррт (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
10	3	0,5/0,05/-	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при вдыхании: LC₅₀ = 884,14 ррт (инг., крысы, 4 ч). Смертельная концентрация для человека 2660 мг/м³ (10 мин). Вызывает химические ожоги кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества/продукта	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/Установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
14	Углерода оксид	Основной процесс	Варка стекло-массы / стекловаренная печь	Эмиссии (выбросы)	630-08-0	Газ	CO

Примечания

- ^{a)} Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”».
- ^{b)} Основные характеристики согласно справочным материалам и сведениям, представленным в базах данных по химическим веществам:
- База данных ChemADVISOR. – URL: <https://www.chemadvisor.com/Online> (дата обращения: 20.12.2021);
 - База данных Европейского Химического Агентства (ECHA). – URL: <https://echa.europa.eu/> (дата обращения: 20.12.2021);
 - База данных АРИПС «Опасные вещества». – URL: <http://www.rpohv.ru/online/> (дата обращения: 20.12.2021);
 - Гусева Т. В. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005.
- ^{c)} Согласно принятым на международном уровне подходам к классификации опасности химических веществ – Рекомендациям ООН «Согласованная на глобальном уровне система классификации опасности и маркировки химической продукции» (GHS). – URL: <https://unece.org/ru/ghs-rev7-2017> (дата обращения: 20.12.2021).

Идентификационные данные вещества:

Номер CAS (Chemical Abstracts Service), или CAS Number – уникальный численный идентификатор химического вещества, внесенного в Реестр Химической Реферативной службы (подразделение Американского химического общества).

Таблица 10 (окончание)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{a)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{b)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
20	4	5,0/3,0/3,0	4	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Чрезвычайно легковоспламеняющийся газ: образует воспламеняющиеся смеси с воздухом в концентрации 10,9 об. % и более.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Токсично при вдыхании: LC₅₀ = 1300 ppm (инг., крысы, 4 ч). Поражает органы (ЦНС, систему крови, иммунную систему и др.) в результате продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество может отрицательно повлиять на способность к деторождению (репродуктивная токсичность).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Не оказывает негативного воздействия^{c)}.</p>

Показатели опасности, обусловленной физико-химическими свойствами вещества:

T_{св.} – температура самовоспламенения – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества.

Показатели опасности, обусловленной токсикологическими свойствами вещества:

LC₅₀ (Letal Concentration) – средняя смертельная концентрация в воздухе – концентрация вещества, вызывающая гибель 50 % животных при 1- или 4-часовом ингаляционном (инг.) воздействии.

LD₅₀ (Letal Dose) – средняя смертельная доза – доза вещества, вызывающая гибель 50 % животных при однократном введении в желудок (в/ж) или нанесении на кожу (н/к).

Показатели опасности, обусловленной экотоксикологическими свойствами вещества:

LC₅₀ (Letal Concentration) – средняя смертельная концентрация – концентрация вещества в воде, вызывающая гибель 50 % водных организмов (гидробионтов) при установленном времени воздействия (96-часовом для рыб, 48-часовом для ракообразных, 72- или 96-часовом для водорослей) в течение заданного периода наблюдения.

ErC₅₀ (Effective Reduction Concentration) – средняя эффективная концентрация в части снижения скорости роста – концентрация вещества в воде, вызывающая угнетение роста водорослей на 50 % при установленном времени воздействия в течение заданного периода наблюдения.

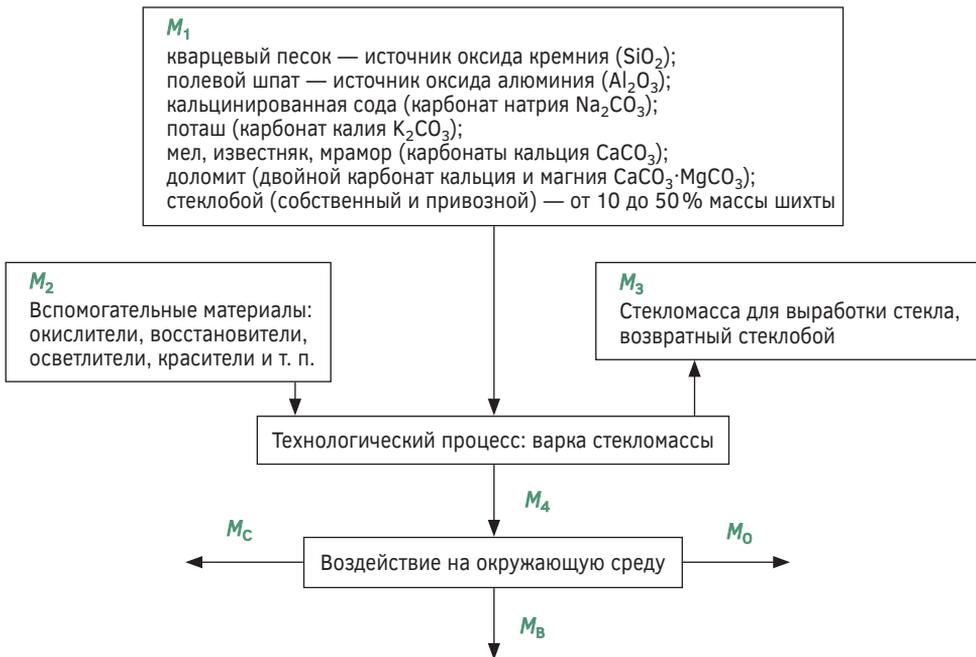


Рис. 54. Материальные потоки процесса производства стекла:

M_1 — поток основных сырьевых материалов для производства стекла; M_2 — поток вспомогательных материалов — окислителей, восстановителей, осветлителей, красителей и т. п.; M_3 — поток готовых изделий из стекла (листового) и отходов возвратного стеклобоя; M_4 — суммарный поток продуктов, загрязняющих внешнюю среду; M_5 — сбросы промывных вод химической обработки изделий; M_6 — выбросы в атмосферу пылевидных фракций сырья и отходящих дымовых газов; M_0 — твердые отходы механической и химической обработки изделий

Следующий этап жизненного цикла продукции связан с ее эксплуатацией. Рассчитать длительность этого этапа не представляется возможным, поскольку она зависит от вида изделия, области его применения, срока годности, заложенного в регламенте, и массива случайных факторов. Чаще всего окончание рабочего срока жизни изделия означает его полное или частичное разрушение. Полнота разрушения — один из факторов, влияющих на возможность вторичной переработки стекла.

Вторичная переработка бытовых и промышленных отходов означает использование осколков стеклянной продукции в виде возвратного боя в производстве стеклоизделий или в виде наполнителей композиционных материалов, например в дорожном строительстве или других отраслях.

Если же стекло попало в невозвратные отходы, то оно оказывается на свалках, где должно «перерабатываться» в естественных условиях окружающей среды. Срок переработки изделий из стекла занимает не одно тысячелетие.

Для более полной характеристики стекольной отрасли проиллюстрируем воздействие ее предприятий на окружающую среду на примере конкретных подотраслей, а именно на производстве листового и тарного стекла.

Производство листового стекла

Многотоннажное и энергозатратное производство листового стекла сегодня является примером эффективности производства для отрасли в целом. Это и самые производительные печи — 1000 и более тонн в сутки сваренной стекломассы, и флоат-процесс, позволяющий выпускать изделия широкого диапазона номиналов, и полностью автоматизированное управление всеми стадиями производственного цикла, начиная от приема сырьевых материалов и заканчивая упаковкой изделий для отправки потребителю.

Номиналы выпускаемой продукции:

- толщина стекла от 2 до 25 мм;
- габаритные размеры: длина до 6000 мм, ширина до 3210 мм.

Другие характеристики основных марок бесцветных листовых стекол нормируются ГОСТ 111-2014 «Стекло листовое бесцветное».

Основные виды листовых стекол для строительства:

- **листовое (оконное)** — бесцветное прозрачное стекло, изготавливается флоат-методом, используется для остекления оконных проемов, толщина 2–6 мм, светопропускание не менее 85–90 %;
- **витринное** — бесцветное прозрачное стекло, изготавливается флоат-методом, с идеально полированной поверхностью, используется для остекления витрин и стеллажей в торговых и выставочных залах, толщина 6–10 мм;
- **узорчатое** — бесцветное или окрашенное в массу стекло с рельефной поверхностью, изготавливается флоат-методом или методом непрерывного проката, используется для изготовления дверей, перегородок, толщина от 4 до 6 мм;
- **теплопоглощающее** — бесцветное прозрачное стекло со специальным металлическим или оксидно-металлическим покрытием, регулирующим потери тепла, используется для остекления оконных проемов и структурного остекления зданий, толщина от 3 до 4 мм;
- **закаленное** — бесцветное прозрачное безопасное стекло или стекло с функциональным покрытием, упрочненное методом воздушной закалки, имеет прочность при изгибе в 5–8 и термостойкость в 2 раза выше, чем у обычного стекла, используется для структурного остекления, изготовления перегородок, полов, лестниц и т. п., толщина от 3 до 8 мм;
- **стемалит** — бесцветное прозрачное стекло с цветным прозрачным или глухим эмалевым покрытием, предназначено для облицовки стен, строительства перегородок и другой внутренней и наружной декоративной отделки, толщина от 6 мм;
- **матированное** — бесцветное прозрачное стекло с пониженным светопропусканием, поверхность которого обработана методами химического или абразивно-струйного матирования, толщина от 3 до 6 мм;
- **самоочищающееся** — бесцветное прозрачное стекло с реакционно-активным покрытием, очистка его поверхности от пыли и грязи происходит под действием воды и солнечного освещения, толщина от 3 до 6 мм;

- **пожаростойкое** — прозрачное бесцветное термостойкое стекло, собрано в стеклопакет, в котором пространство между стеклами заполнено кремнийорганическим мономером, он полимеризуется при температуре выше 300°C , стекло теряет прозрачность и препятствует распространению инфракрасного излучения, толщина одного стекла в стеклопакете не менее 4 мм.

Перечень стекол, используемых в машиностроении:

- **закаленное** — характеристики см. выше, используется для остекления боковых окон в различных транспортных средствах, толщина от 4 мм;
- **триплекс** — бесцветное прозрачное плоское или гнутое многослойное стекло, полученное путем склеивания двух стекол с помощью бесцветной полимерной пленки, используют в качестве лобовых, боковых и задних окон в различных транспортных средствах, возможно соединение прозрачного и тонированного листового стекла, общая толщина конструкции не менее 6 мм;
- **тонированное** — цветное листовое стекло, окрашенное в массу, или бесцветное листовое стекло с цветным пленочным покрытием (прозрачным или зеркальным), как правило, предварительно закаленное, используется как для остекления боковых окон в транспортных средствах, так и в многослойных стеклах для лобовых и задних окон, толщина от 3 мм.

Новые виды листовых стекол:

- **умное** (smart window) — бесцветное или окрашенное в массу листовое стекло, в состав которого введены компоненты, изменяющие его светопропускание под действием внешних условий: фотохромные, электрохромные, бесцветные стекла с покрытием — стекла-шпионы с отражающим оксидно-металлическим, телевизионные и телефонные экраны — с жидкокристаллическим;
- **антибликовое** — бесцветное листовое стекло с покрытием, показатель преломления которого ниже, чем показатель преломления стекла, поэтому обладает более низким поверхностным отражением, чем обычное листовое стекло, используется для остекления картин, фотографий и т. п., толщина не более 3 мм.

Технология листового стекла начинается с выбора и подготовки сырьевых материалов.

Состав листового стекла, который используют в производстве, представлен следующими компонентами: SiO_2 — 72%, R_2O — 14,6%, CaO — 8,2%, MgO — 3,5%, Al_2O_3 — 1,3%, SO_3 — 0,3%, Fe_2O_3 — 0,1%, где $\text{R}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O}$, а оксиды серы и железа не являются компонентами состава стекла — оксид серы используют для процесса осветления стекломассы, оксид железа является основной красящей примесью в большинстве природных материалов.

Сырьевые материалы, которые используют для введения перечисленных компонентов состава, выбирают по максимальному содержанию основного вещества и минимальному присутствию примесей (табл. 11).

Таблица 11. Состав сырьевых материалов, масс. %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	Na ₂ CO ₃	NaCl	Na ₂ SO ₄	Fe ₂ O ₃
Песок	98,5	0,6	–	–	–	–	–	–	0,030
Полевой шпат	70,0	17,0	–	–	11	–	–	–	0,100
Известняк	1,0	0,5	0,6	54	–	–	–	–	0,100
Доломит	1,5	1,0	19,0	32	–	–	–	–	0,050
Сода	–	–	–	–	–	98,9	0,4	0,04	0,003
Сульфат натрия	–	–	–	–	–	–	0,5	97,50	0,010

Расчет состава шихты делается на 100 массовых частей стекломассы с учетом летучести сырьевых компонентов. Наибольшие потери при нагреве характерны для карбонатов щелочных компонентов шихты — 15–20 масс. % и осветлителя — сульфата натрия — 3 масс. %. Исходя из этого, потери газообразных продуктов при стекловарении в производстве листового стекла составляют не более 20 масс. % от массы приготовленной шихты. Для облегчения процесса стеклообразования и снижения количества выделяемых газообразных продуктов в шихту добавляют молотый стеклобой. При этом наблюдается снижение количества шихтных газов на 200 кг/т введенного стеклобоя и дымовых газов — на 62 кг/т стеклобоя.

В таблице 12 представлен расчет потребности в шихте для стекловаренной печи производительностью 800 т стекломассы в сутки при заданном соотношении «шихта : стеклобой» — 80 : 20.

Таблица 12. Потребность в шихте и стеклобое для стекловарения

Наименование материала	Потребность		
	Годовая, т/год	Суточная, т/сут	Часовая, т/час
Шихта	295 576	810	34,0
Стеклобой	58 400	160	6,7
ВСЕГО	353 976	970	40,7

На весовой линии производят взвешивание компонентов шихты, подаваемой из расходных бункеров, и перемещение по ленте транспортера в смеситель, где перемешивают и увлажняют. Готовую шихту помещают на транспортер, ведущий к стекловаренной печи. Транспортер проходит под дозаторами бункеров с молотым стеклобоем, который насыпают на поверхность слоя шихты, и вместе они отправляются на загрузку в стекловаренную печь (рис. 55, 56).

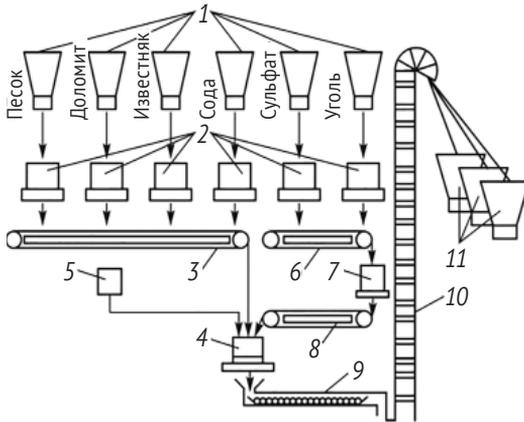


Рис. 55. Весовая линия сырьевых материалов:

1 – расходные бункера сырьевых материалов; 2 – весы-дозаторы; 3, 6, 8 – транспортеры; 4, 7 – смесители; 5 – вода; 9 – транспортер готовой шихты; 10 – элеватор готовой шихты; 11 – кубели – загрузчики готовой шихты

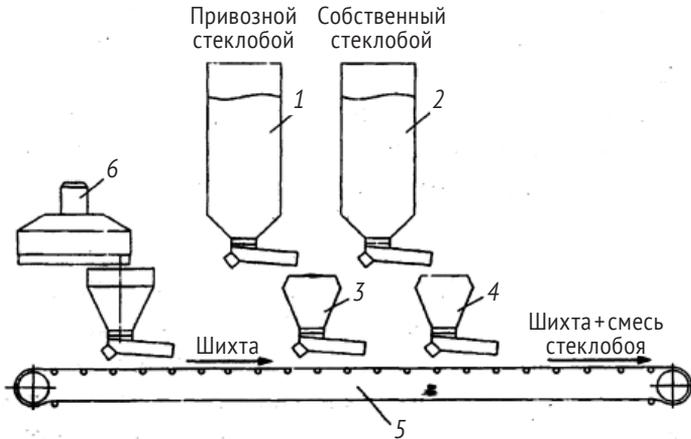


Рис. 56. Линия транспортировки в печь шихты под слоем стеклобоя:

1, 2 – расходные бункера стеклобоя; 3, 4 – весы-дозаторы; 5 – транспортер смеси шихты и стеклобоя к загрузочному карману стекловаренной печи; 6 – расходный бункер готовой шихты

Загрузка шихты в ванную регенеративную газовую стекловаренную печь с поперечным направлением пламени производят при помощи стальных загрузчиков, расположенных в ее торцевой части. Печь производительностью 800 т стекломассы в сутки имеет следующие плановые технические показатели: удельный съём стекломассы с 1 м² отапливаемой части 2500 кг/м² в сутки; энергетический КПД на уровне 30 %.

Оборудование машинно-ванного цеха включает (рис. 57) систему загрузки в печь сырьевых материалов, флоат-ванну, печь отжига, оптическую систему контроля качества и роликовый резчик ленты стекла на габаритные размеры, соединенные общим транспортером, который начинается на выходе из флоат-печи. На схеме приведены температуры, которые поддерживаются на разных стадиях изготовления листового стекла. Для стекловаренной печи

указана максимальная температура, характерная для зоны осветления-гомогенизации стекломассы.

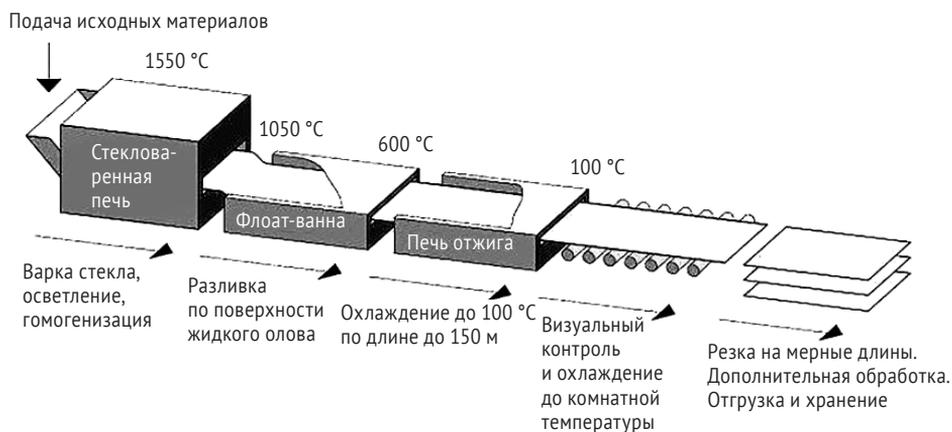


Рис. 57. Схема оборудования машинно-ванного цеха производства листового стекла

У ванных печей большой производительности варочная и выработочная (студочная) части разделены перешейком, где, как правило, устанавливают мешалки, которые интенсифицируют процессы гомогенизации и осветления стекломассы. Обогрев печи производят до семи пар горелок, устанавливаемых вдоль варочной части печи. Такое расположение горелок позволяет регулировать температурный режим по длине печи.

Формование ленты стекла во флоат-ванне происходит непрерывно, скорость процесса зависит от толщины стекла (рис. 58, 59).

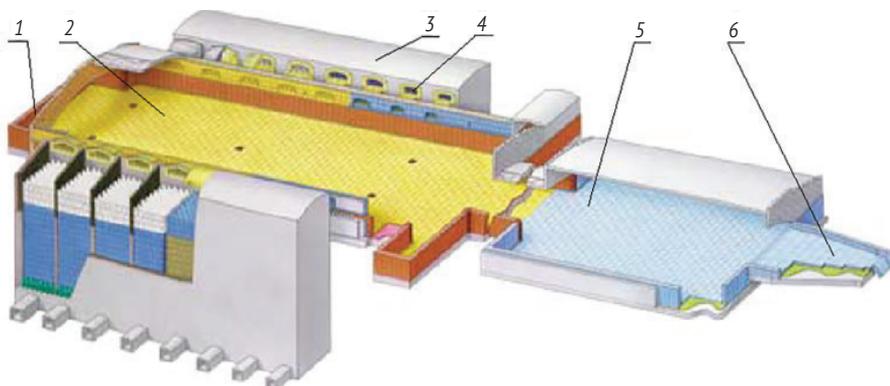


Рис. 58. Ванная регенеративная стекловаренная печь с поперечным направлением пламени, предназначенная для производства флоат-стекла:

- 1 – загрузочный карман; 2 – варочная часть печи; 3 – регенераторы; 4 – влеты горелок;
5 – выработочная часть печи; 6 – сливной лоток

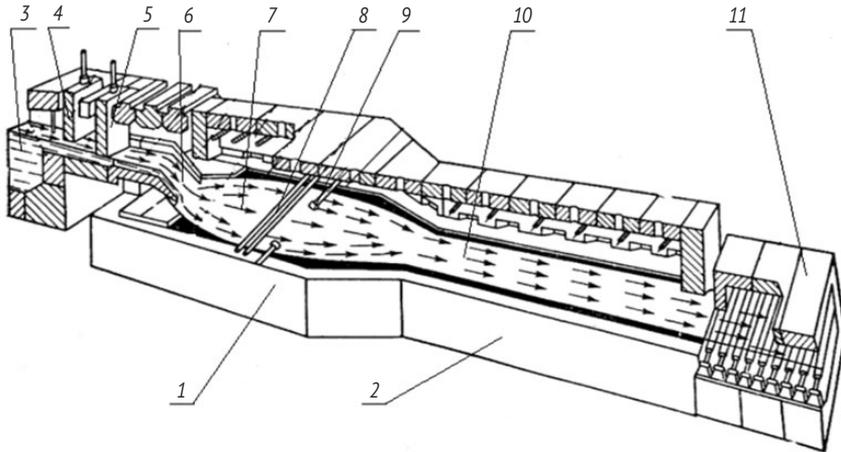


Рис. 59. Схема устройства флоат-ванны:

1 — широкая часть флоат-ванны; 2 — узкая часть флоат-ванны; 3 — выработочный канал стекловаренной печи; 4 — отсечной шибер; 5 — регулирующий шибер; 6 — сливной лоток; 7 — лужа стекломассы; 8 — водяной холодильник; 9 — бортодержатели; 10 — лента стекломассы; 11 — печь отжига

Изменение толщины ленты производится с помощью бортоформирующих роликов, расположенных по краям ванны, которые растягивают или сдвигают растекающуюся стекломассу. Как видно из таблицы 13, ни один из способов формирования ленты стекла не сравним с флоат-процессом.

Таблица 13. Сравнительная характеристика методов формирования листового стекла

Толщина стекла, мм	Скорость вытягивания, м/ч			
	ВВС	БВВС	ВГВС	Флоат
2	80–120	110–130	185	914
3	60–75	75–90	125	540–600
4	–	–	90	420–480
6	25–30	30–37	55	200–240

Примечание: ВВС — метод вертикального вытягивания стекла, БВВС — метод вертикального безлодочного вытягивания листового стекла, ВГВС — метод вертикально-горизонтального вытягивания стекла.

Современные производства листового стекла ориентированы на переработку полученного бесцветного прозрачного изделия в готовую продукцию с функциональными характеристиками. Поэтому узел резки на конвейере, как правило, является и распределительным узлом, с которого часть продукции отправляется на склад, а часть — на линии окрашивания, тонирования, нанесения энергосберегающих, отражающих и других видов покрытий.

Производство стеклянной тары

Стеклянная тара сегодня — необъятный рынок изделий, поражающих формой, цветом и способом укупорки. Очень подвижный и практически

мгновенно откликающийся на веяния времени. И отстаивающий свое право на существование в борьбе с другими видами упаковки для жидких продуктов. На рисунке 60 представлены современные банки и бутылки из прозрачного, окрашенного в массу и декорированного цветными пленками стекла для разных видов пищевой продукции. Объединяет их главное: в них можно длительно хранить продукцию, не боясь вредного воздействия материала тары.



Рис. 60. Образцы широкогорлой (слева) и узкогорлой (справа) стеклянной тары

Потребителями стеклянной тары являются производители следующих видов пищевой продукции:

- ликеро-водочные заводы — узкогорлая бутылка из бесцветного тарного стекла емкостью от 100 до 1500 мл с горлышком под корковую или полимерную пробку, винтовую крышку или крышку-дозатор;
- пивные и винные заводы — узкогорлая бутылка из цветного стекла (коричневая, зеленая, оливковая, синяя) емкостью для пива от 300 до 500 мл, горлышко под крышку твист-офф, для вина — от 750 до 1000 мл, горлышко под пробку или винтовую крышку;
- предприятия, выпускающие газированные напитки, — узкогорлая толстостенная бутылка из бесцветного или цветного стекла емкостью от 500 до 1000 мл — для минеральной воды, фруктовых и ягодных напитков с горлышком под крышку твист-офф, емкостью от 200 до 750 мл — для игристых, шипучих и шампанских вин, с горлышком под корковую или полимерную пробку и проволочный крепеж «мюзле»;
- заводы по производству парфюмерной продукции — узкогорлая бесцветная бутылка емкостью от 10 до 200 мл с горлышком под пробку и винтовую крышку;
- заводы по выпуску консервированной продукции — широкогорлая тара из бесцветного стекла емкостью от 50 до 2000 мл для варений, солений, компотов, соусов, уксуса и т. п., а также для хранения сыпучих продуктов — муки, круп, соли, сахара, специй и т. д., горлышко отформовано под пробку, крышку твист-офф, крышку с бюгельным замком или пробку;
- заводы по производству детского питания — широкогорлая бесцветная тара емкостью от 20 до 200 мл с горлышком под крышку твист-офф.

При выборе состава стекла для производства стеклянной тары главными отправными точками являются цвет и способ формования. В таблице 14 представлены типовые составы стекол для производства разных видов стеклянной тары.

Таблица 14. Марки и химический состав тарных стекол согласно ГОСТ Р 52022-2003

Группа стекла	Марка стекла	Содержание оксидов, мас.%						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ , не более	CaO + MgO	Na ₂ O или Na ₂ O + K ₂ O	SO ₃ , не более	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Бесцветная	БТ-1	72,0	2,5/0,1	11,0	14,0	0,5	–	–
	БТ-2	72,5	1,4/0,1	12,5	13,2	0,5	–	–
Полубелая	ПТ	71,6	3,0/0,5	11,0	14,0	0,4	–	–
Зеленая	ЗТ-1	71,0	3,5/0,8	11,0	14,0	0,3	–	0,2
	ЗТ-2	69,0	4,2/–	11,0	14,0	0,3	1,5	–

Сегодня стеклянная тара паспортизируется, кроме привычного набора прочностных и других физико-химических характеристик, по цвету бутылки, а именно по спектру поглощения красителя. Соответственно, требования к составу красящих компонентов в сырьевых материалах в производстве стеклянной тары строже, чем в производстве листового стекла. Цвет бутылки становится своего рода брендом, особенно для вин и крепких алкогольных напитков.

Для получения нужного цвета в состав шихты наряду с красящими компонентами вводят добавки, которые создают в стекломассе окислительно-восстановительные условия, влияющие на цвет стекла. В таблице 15 представлен состав сырьевых материалов для производства бесцветной стеклянной бутылки. Оксид церия и калиевая селитра вводятся как окислители и осветлители. Оксид церия обеспечивает преимущественное присутствие в расплаве Fe³⁺, который окрашивает стекло менее интенсивно, чем Fe²⁺, что благоприятно сказывается на белизне стекла. С калиевой селитрой в состав стекла вводят оксид калия, который улучшает выработочные свойства стекломассы, необходимые для получения бутылок методом двойного выдувания.

Здесь, как и в производстве листового стекла, все расчеты ведутся на 100 мас. частей стекломассы. Кроме потерь 15–20 мас. % карбонатов щелочных компонентов шихты и 3 мас. % сульфата натрия, в составе тарного стекла присутствует калиевая селитра — 5 мас. % потерь — и оксид церия, который не входит в состав компонентов стекла.

Несмотря на это, общие потери газообразных продуктов при стекловарении остаются на уровне 20 мас. % от массы приготовленной шихты. В таблице 16 представлен расчет потребности в шихте для стекловаренной печи производительностью 230 т стекломассы в сутки.

Таблица 15. Состав сырьевых материалов для состава бесцветной стеклянной бутылки

Наименование сырьевого материала	Массовое содержание оксида в составе материала, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CeO ₂
Кварцевый песок	98,5	0,6	–	–	–	–	0,03	–
Сода	–	–	–	–	57,9	–	0,05	–
Доломит	1,5	1,0	32	19	–	–	0,05	–
Известняк	0,5	–	50,4	–	–	–	0,00	–
Глинозем	0,02	99,5	–	–	0,4	–	0,03	–
Сульфат натрия	–	–	–	0,03	43,4	–	0,01	–
Селитра калиевая	–	–	–	–	–	46,2	0,01	–
Декол	–	–	–	–	–	–	–	0,036

Таблица 16. Потребность в шихте и стеклобое для стекловаренной печи мощностью 230 т/сут

Наименование материала	Потребность		
	Годовая, т/год	Суточная, т/сут	Часовая, т/ч
Шихта	73 933	202	8,44
Стеклобой собственный	6 570	18	0,75
Стеклобой покупной	21 170	58	2,42
ВСЕГО	101 673	278	11,61

Весовая линия производства стеклотары отличается от линий производства листового стекла номенклатурой оборудования, которое рассчитано на обработку меньших объемов сырья, и отсутствием транспортера для шихты в печь. В производстве тарного стекла приоритетно используют печи с продольным направлением пламени, загрузка шихты в которые производится через боковые карманы, расположенные рядом с регенераторами. Готовая шихта из смесителей подается в расходные бункера над загрузочными карманами стекловаренной печи с помощью элеваторов. Стеклобой, необходимый для стекловарения, в процессе производства тары не образуется, обычно в условиях предприятия собирают не более 15 % стеклобоя. Для повышения эффективности производства соотношение «шихта : стеклобой» увеличивают до 10 : 90. Но в реальных условиях российской экономики остро стоит проблема сбора и обработки вторичного стеклобоя. Поэтому большинство российских предприятий работают на соотношении «шихта : стеклобой» — 80 : 20.

Печь производительностью 230 т стекломассы в сутки имеет следующие плановые технические показатели: удельный съем стекломассы с 1 м² отапливаемой части 2500 кг/м² в сутки; энергетический КПД на уровне 38 %.

На общей схеме технологического цикла (рис. 61) производства бутылок представлено основное оборудование линии. Показаны расходные бункеры сырьевых материалов дозирочно-смесительного отделения, смеситель шихты, элеваторы для перемещения смеси шихты и боя в расходные бункеры и система подачи шихты в загрузочный карман стекловаренной печи.

Процесс стекловарения происходит в печи с подковообразным направлением пламени (рис. 62), барботажем в зоне максимальных температур и дополнительным электроподогревом в зоне загрузки.

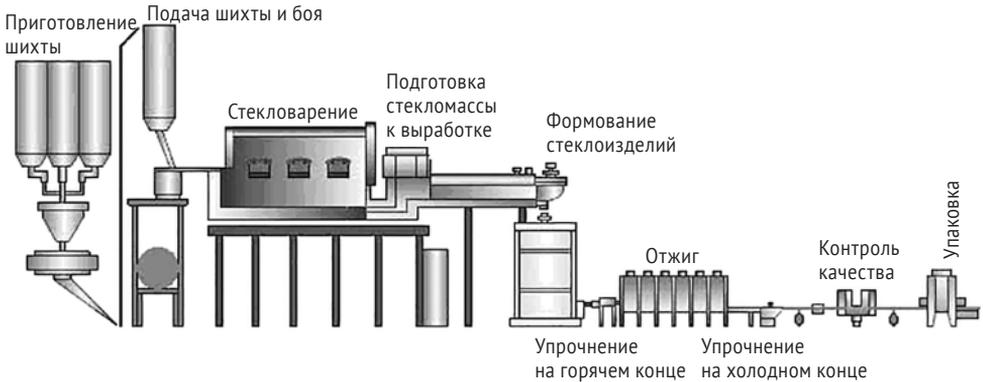


Рис. 61. Технологическая схема производства тарного стекла

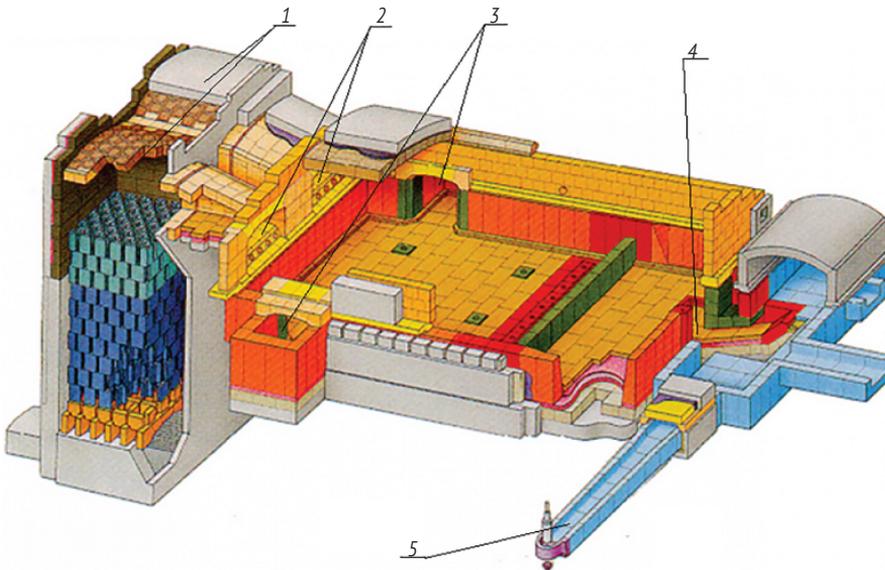


Рис. 62. Ванная регенеративная стекловаренная печь с подковообразным направлением пламени:

1 – регенераторы; 2 – влеты горелок; 3 – загрузочные карманы; 4 – проток; 5 – фидер

Затем стекломасса попадает в фидер — канал, который ведет к капельному питателю секционной стеклоформирующей машины типа IS. Формование толстостенных бутылок производят методом прессовыдувания, а тонкостенных — двойного выдувания (см. рис. 35).

В настоящее время стеклянные банки и бутылки формируют при помощи секционных машин (рис. 63).

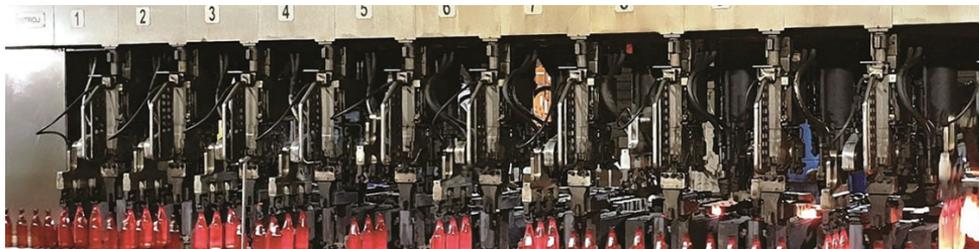


Рис. 63. Внешний вид двенадцатисекционной стеклоформирующей машины

Стеклоформирующая машина передает выдутые изделия на ленточный транспортер, который ведет к печи отжига. В производстве стеклянной тары стадия отжига — снятия напряжений в стеклянном изделии — совмещена с нанесением на поверхность банок и бутылок упрочняющих покрытий. Дело в том, что температура изделия, поступающего в печь отжига, составляет около 700°C . При такой температуре оксидно-металлическая пленка, осажденная на его поверхность, прочно сцепляется с ней по механизму реакционного сцепления перед входом в печь. В результате прочность изделия повышается на 20%. После отжига температура изделия составляет около 100°C , и здесь на его поверхность наносят полимерное покрытие, которое защищает оксидно-металлическое от истирания в процессе эксплуатации.

Затем транспортер перемещает бутылки к инспекционной машине, находящейся на линии, где в автоматическом режиме происходит проверка габаритных размеров, пороков стекловарения и формования.

Последняя стадия технологического процесса — упаковка изделий. В стеклотарном производстве упаковочные линии полностью автоматизированы.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

История развития технологий стекла такова, что сравнение технологий до начала последнего цикла по численным параметрам мало что даст. По сути это был широкомасштабный опыт опробования разных видов сырьевых материалов, разработки условий варки бесцветных и цветных стекол и способов формования изделий. Натрийкальцийсиликатный состав бесцветных стекол корректировался незначительно и по соотношению основных четырех компонентов — оксида кремния, доли щелочных и щелочноземельных компонентов близок к современным промышленным составам. Производство стекла

до середины XIX в. было ручным, стекло варили в горшковых печах, а формовали изделия преимущественно методом выдувания. Количество выпущенных изделий зависело от их массы, формы и способов декорирования. Условия труда и техники безопасности на предприятиях разных стран и народов были примерно одинаковы. Вредное воздействие на окружающую среду носило местный характер, а самый большой урон производство стекла наносило лесам — вплоть до XVIII в., когда в странах Европы начали использовать каменный уголь. Поэтому сравнение технологических процессов изготовления изделий из стекла до XX в. вряд ли целесообразно.

В XX в. специализация предприятий по видам изделий и механизация всех стадий процесса позволили организовать выпуск одинаковых изделий с разными материальными затратами, условиями труда и воздействием на окружающую среду. Механизированный выпуск продукции превратил стекольную промышленность в энерго- и ресурсоемкую отрасль, оказывающую влияние на экологическую обстановку регионов.

Стандартная технологическая цепочка получения изделий из стекла состоит из последовательности следующих процессов:

- приготовление шихты — подготовка и перемешивание в заданной порции сырьевых материалов и стеклобоя;
- варка стекла — силикатообразование, стеклообразование, осветление, гомогенизация, студка;
- формование изделий — флоат-методы, вытягивание, выдувание, прессование, прессовывдувание и т. д.;
- отжиг — снятие напряжений в изделии;
- контроль качества, сортировка, упаковка.

Факторы, которые свидетельствуют об эффективности того или иного производства и по которым следует проводить их сравнение, включают объемы и характеристики сырьевых материалов, энергетические затраты на изготовление продукции, отходы, образующиеся в процессе производства изделий.

В технологии изделий из стекла массового спроса — листового, тарного и сортового — используемый набор сырьевых материалов практически одинаков. Это кварцевый песок — источник основного стеклообразующего компонента в составе стекла — оксида кремния, доля которого составляет от 65 до 72 масс. %. Карбонаты кальция (мел, мрамор, известняк) — с помощью них в состав стекла вводят оксид кальция, который необходим для снижения вязкости стекла в области температур формования изделий, его вводят от 6 до 10 масс. %. Доломит или двойной карбонат магния и кальция используют для введения двух оксидов кальция и магния, оксид магния снижает кристаллизационную способность расплава, его содержание 5 масс. %. Полевой шпат (щелочной алюмосиликат) используют для введения оксида алюминия одновременно с введением щелочного катиона, натрия или калия. Оксид алюминия необходим в составе стекла для снижения кристаллизационной способности расплава, обычно его вводят в количестве 0,5–2,0 масс. %. Карбонаты натрия и калия используют для введения в состав стекла оксидов щелочных металлов, которые снижают температуру варки стекла и вязкостные характеристики расплава, содержание оксида натрия

от 10 до 15 масс. %, а оксида калия — от 1 до 5 масс. %. И сода, и поташ — дорогостоящие синтетические материалы, поэтому оксид калия зачастую вводят через калиевую селитру, а часть оксида натрия — через сульфат, поскольку SO_3 , образующийся при его разложении, — сильный окислитель. Соединения свинца, которые необходимы при варке свинцового хрустала для введения в состав оксида свинца в количестве от 5 до 25 масс. %. Все перечисленные сырьевые материалы и продукты их разложения относятся к 3-му или 4-му классам опасности и не несут прямой угрозы здоровью людей. Исключением являются оксиды азота, углерода и серы, и их содержание в отходящих газах может служить одним из критериев деятельности предприятия.

Энергетические затраты в производстве стекла являются второй по размеру статьей затрат в себестоимости продукции (табл. 17). При этом доля расхода электрической энергии из расчета на 1 т продукции составляет примерно 1/5 часть от расхода природного газа. Эффективность работы предприятия можно оценивать и по самой величине расхода природного газа и электричества, и по соотношению этих статей. Увеличение потребления электроэнергии означает снижение потребности в природном сырье и соответственно уменьшение объемов его добычи.

Таблица 17. Теоретическое энергопотребление процесса стекловарения

Статья расхода тепла	Вид стекла, энергопотребление, ГДж/т стекломассы		
	Натрий-кальций-силикатное	Боросиликатное	Свинцовосиликатное
Силикатообразование	0,49	0,41	0,40
Нагрев стекломассы до температуры варки	1,89	1,70	1,69
Нагрев шихтных газов	0,30	0,14	0,16
ИТОГО	2,68	2,25	2,25

Экологический аспект деятельности промышленных предприятий включает широкую гамму различных параметров. Наиболее значимые из них в отношении производства стекла — газообразные и пылевидные отходы.

Сравнение технологий производства листового стекла

Существуют разные технологии производства листового стекла (см. раздел «История зарождения производства стекла»), но к настоящему моменту основной объем продукции выпускается с помощью самого «молодого» метода — метода плавающей ленты, или флоат-метода. Вторым по значимости остается метод вертикального вытягивания стекла (ВВС), или лодочный метод Фурко. Поэтапное сравнение этих двух технологических схем представлено на рисунке 64.

Энергетические затраты на варку стекол по этим методам близки, поскольку сырьевые материалы аналогичны и, следовательно, процессы стекловарения протекают в одинаковых температурно-временных условиях, с поправкой

на производительность печи. В среднем затраты при стекловарении в обоих случаях составляют от 5,0 до 8,0 ГДж на 1 т стекломассы.

Следующим пунктом сравнения в производстве листового стекла идет метод формования. Параметры сравнения — скорость вытягивания ленты стекла и качество получаемых изделий. Скорость формования листа любого номинала флоат-методом почти в десять раз выше, чем методом ВВС (см. табл. 13). В пользу флоат-процесса говорит еще такой фактор, как отсутствие необходимости обрыва ленты стекла на обновление лодочки или внутрилодочного пространства, который происходит при использовании метода ВВС через 300–700 ч работы. Срок непрерывной работы флоат-ванны при этом составляет не менее 5 лет. Что касается качества флоат-стекла, то благодаря принципу свободного формирования поверхности на непрерывных линиях получают стекло марки М0 без применения дополнительной механической обработки. Стекло, полученное методом ВВС марок М0-М3 получали с помощью механического шлифования и полирования после полного окончания технологического процесса выработки изделий.

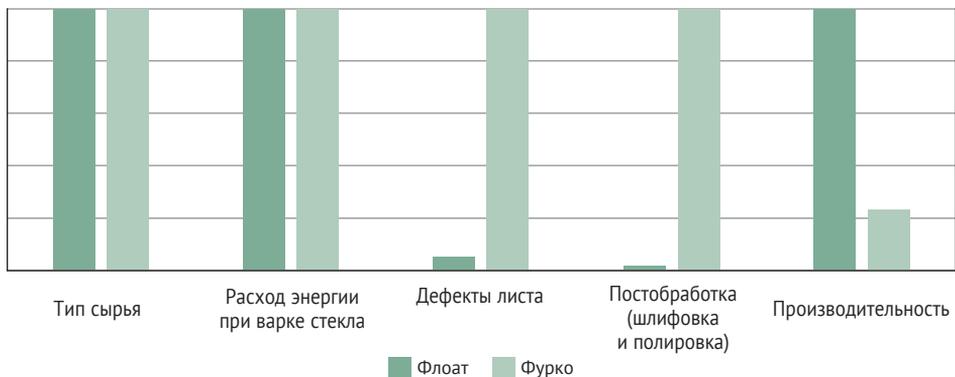


Рис. 64. Сравнительная оценка производства листового стекла методами вертикального вытягивания (метод Фурко) и плавающей ленты (флоат-процесс)

Таким образом, основные преимущества флоат-процесса получения листового стекла перед классическим методом вертикального вытягивания состоят в следующем:

- одноэтажное расположение оборудования всей технологической цепочки от загрузки шихты до готового изделия;
- одна флоат-ванна может обеспечить выработку стекловаренной печи мощностью 700–800 т стекломассы в сутки;
- возможность получать номиналы стекол толщиной от 2 до 30 мм и шириной до 4 м;
- возможность получения стекла высоких марок, согласно ГОСТ, без дополнительной механической обработки.

Единственная задача, которая в настоящее время не решается с помощью флоат-процесса и достижима методом ВВС, — это получение стекол толщиной менее 2 мм.

Вредные выбросы в атмосферу зависят от производительности стекловаренных печей (табл. 18).

Таблица 18. Валовый выброс загрязняющих веществ от регенеративных стекловаренных печей

Мощность печи, т/сут	Валовый выброс (усредненные данные), т/год				
	Взвешенные вещества (пыль)	Диоксид азота NO ₂	Монооксид азота NO	Сернистый ангидрид SO ₂	Оксид углерода CO ₂
270	75	30	450	60	100
300	90	40	480	70	100
350	150	60	500	120	150

Сравнение технологий производства тарного стекла

Стекланную тару производят по общей схеме изготовления стеклоизделий. Современное производство бесцветных и цветных бутылок работает на секционных машинах, которые обладают наиболее высокой производительностью. Но карусельные машины были первыми в механизированном комплексе производства стеклянной тары и, уступив свои позиции в этой подотрасли, перекочевали в производство сортовой посуды. Впрочем, оба формующих устройства имеют право на жизнь в технологии производства стеклотары. Рассмотрим это подробнее и сравним достоинства и недостатки двух технологических схем производства стеклянной бутылки (рис. 65).

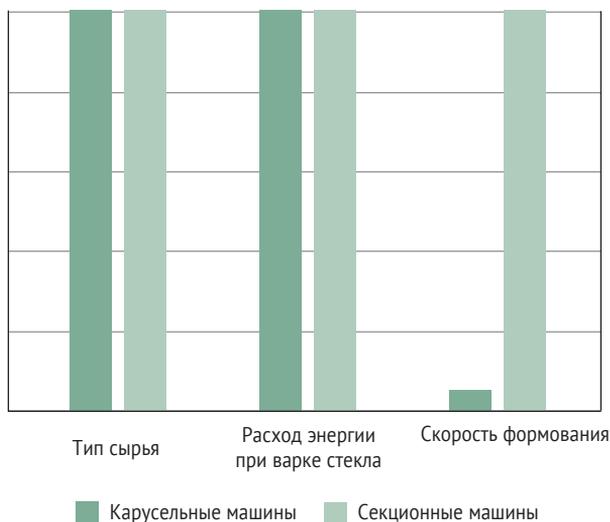


Рис. 65. Сравнительная оценка производства стеклянных бутылок на линиях, оснащенных карусельными и секционными машинами

Энергетические затраты на варку тарных стекол примерно одинаковы и ниже, чем в производстве листового стекла, благодаря использованию печей с продольным направлением пламени. В среднем затраты при стекловарении, в зависимости от содержания стеклобоя, составляют от 4,5 до 7,5 ГДж на 1 т стекломассы.

Качество бутылки больше зависит от способа питания стеклоформирующей машины, чем от скорости выработки. Сравнивая продукцию, полученную на автоматах с капельным питателем, следует отметить, что оно мало зависит от типа машины. Таким образом, последним параметром сравнения остается производительность секционных и карусельных автоматов, которая у первых выше на 20–40 %.

На стадии отжига вся стеклянная бутылка проходит двухстадийное упрочнение на горячем и холодном конце, и на стадии упаковки соответствует заданным параметрам. В отличие от производства листового стекла, в процессе упрочнения стеклянной тары состав отходящих производственных газов пополняется летучими продуктами. Хлорсодержащие продукты разложения компонентов смеси формируют оксидно-металлическую пленку на поверхности бутылок и выделяются на горячем конце печи, а пары полиэтилена, моностеарата полиоксиэтилена, стеарата триэтаноламина или их смеси — на холодном.

Таким образом, можно говорить о том, что среднестатистическую стеклянную бутылку, цветную или бесцветную, выгоднее производить, используя секционные машины:

- их производительность выше, чем у карусельных, и ее можно регулировать, изменяя количество секций;
- на разных секциях машины можно выпускать бутылки разной формы, если они имеют одинаковую массу;
- они проще в управлении и надежнее в работе.

К недостаткам секционных машин относятся их габаритные размеры, они выше карусельных и могут не поместиться под фидером стекловаренной печи при реконструкции действующего производства.

Таблица 19. Сравнительная характеристика стеклоформирующих машин для производства стеклянной тары

Характеристика	Типы машин для производства стеклотары				
	Вакуумные BC-24 BK-24	Фидерные			Струйная Корнинг-Риббон
		BP-24	BB-7	AB 6-2	
Ассортимент емкостей, л	Тонкостенные изделия до 0,5		Бутылки до 1,0	Бутылки, банки до 1,0	Тонкостенные изделия до 0,5
Производительность, шт./мин	18–36	до 54	70–100	до 130	до 2000

В защиту карусельных автоматов следует сказать, что при небольших объемах производства или выпуске эксклюзивной стеклянной тары они экономичнее высокопроизводительных секционных собратьев.

Струйные автоматы в настоящее время не используют широко для производства обычной бутылки, принцип формования, который в них заложен, чаще используют в автоматах, изготавливающих тонкостенную сортовую посуду, колбы для электроламп и т. п.

Сравнение доли стеклобоя

Таблица 20. Влияние содержания стеклобоя на количество газообразных отходов и энергетические затраты при стекловарении

Наименование материала	Потребность, кг/т стекломассы		
	Без стеклобоя	20 % стеклобоя	50 % стеклобоя
Песок	708	566	354
Полевой шпат	36	29	18
Известняк	38	30	19
Доломит	195	156	97,5
Сода	213	171	106,5
Сульфат натрия	10	8	5
Шихта, кг	1200	960	600
Стеклобой, кг	–	240	600
Итого	1200	1200	1200
Газообразные отходы, кг	200	160	100
Наименование затрат	Энергия, затраченная на стекловарение для получения 1 т стекломассы		
Теоретическое количество теплоты для плавления шихты (2,68 ГДж/т)	3,2	2,6	1,6
Теплоемкость стеклобоя (0,79 кДж·кг·градус)	–	0,28	0,7
Суммарная энергия на стекловарение (теоретич.)	3,2	2,9	2,3
Среднее реальное значение для листового стекла	7,8	6,2	3,9
Суммарная энергия на стекловарение	7,8	6,5	4,6

Тепловой баланс

Таблица 21. Типовой тепловой баланс стекловаренной печи на примере производства листового стекла (газовая стекловаренная печь с поперечным направлением пламени мощностью 800 т стекломассы в сутки)

№ п/п	Наименование статей баланса	Количество, кВт
Приход теплоты		
1	Теплота от горения топлива	16 839
2	Теплота подогрева воздуха	9003
3	Теплота, вносимая шихтой и боем	180,51
4	Теплота, вносимая электроподогревом	180,51
	ИТОГО	26 201
Расход теплоты		
1	На процесс стекловарения	6164
	На нагрев стекломассы до $T_{\text{осв}}$	218
2	Теплота нагрева продуктов горения	14 877
3	Потери через загрузочный карман	2938
4	Потери через влеты	495
5	Потери через кладку печи	549
6	Потери с газами, выбивающимися через отверстия	667
7	Уносимая конвективным потоком	296
	ИТОГО	26 204

Энергетический баланс

В производстве изделий из стекла используется и электрическая, и тепловая энергия. В технологическом процессе стекловаренные печи являются главным потребителем энергии.

В целом, как видно из таблицы 22, печь на сегодняшний день является основным потребителем газа на стекольном заводе. Поэтому проекты по снижению тепловых потерь и повышению энергоэффективности данных агрегатов будут наиболее интересными в ближайшее время.

Таблица 22. Доля потребления энергии на разных стадиях производства стекла, %

Показатель	Печь	Выработочная часть печи	Формование	Отжиг	Холодный конец	Иное	Общая энергия
Газ	87	5	0	5	1	2	85
Эл. энергия	30	1	45	1	10	13	15

Структура тепловых потерь регенеративной стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени показана на рисунке 66. Согласно приведенному энергетическому балансу, 38,6 % тепловой энергии (газа) восстанавливается в виде предварительно подогретого воздуха.

Были проведены исследования, в рамках которых были получены достижимые минимальные энергетические характеристики стекловаренной печи (рис. 66, табл. 23). Для демонстрации возможностей модели в работе представлены результаты исследования стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени мощностью 100 т в сутки.



Рис. 66. Диаграмма Санкей. Энергетические потоки в стекловаренной печи

Согласно разработанной модели, оцениваемое минимальное потребление энергии для рассматриваемой печи составляет примерно 3,9 ГДж/т.

Энергия, затрачиваемая на расплавление стекломассы, составляет 53 % от входного количества (вынос тепла со стекломассой 41 %, поглощение в эндотермической реакции 6 % и тепловые потери с газами шихты 6 %), получаемого при горении топлива.

Таблица 23. Подробная оценка потерь энергии для разных потоков

Характеристики печи

Производительность печи	100 т/сут стекломассы
Вытяжка стекла из стекломассы	90 т/сут продукта
Тип топлива	Природный газ
Продукция	Тарное стекло
Тип печи	С подковообразным направлением пламени
Цвет стекла	Цветное
Стеклобой (масс./масс. шихты)	40%

Показатель	Удельное потребление энергии	
	кДж/кг	%
Приход теплоты		
Энергия топлива	3833	100,0
Энергия вторичного подогретого воздуха	1481	38,6
Расход теплоты		
Потери теплоты боковыми стенками варочной части печи	87	2,3
Потери теплоты торцевой стенкой варочной части печи	68	1,8
Потери теплоты через дно варочной печи	36	0,9
Потери теплоты в перешейке между варочной и выработочной частью печи	5	0,1
Потери теплоты сводом	74	1,9
Потери теплоты каркасом боковых стенок	25	0,7
Потери теплоты каркасом торцевых стенок	22	0,6
Потери теплоты через наружные ограждения регенератора	188	4,9
Потери теплоты при охлаждении мундштука горелки	17	0,5
Потери теплоты из-за утечки дымовых газов из печи	251	6,6
Потери теплоты в газах шихты	213	5,6
Потери теплоты через смотровые отверстия	7	0,2
Потери теплоты от двуглавых балок	36	0,9
Вынос теплоты со стекломассой	1563	40,8
Теплота эндотермических реакций	261	6,8
Потери теплоты на испарение влаги шихты	84	2,2
Оборотные потери теплоты	31	0,8
Потери теплоты с отходящими газами	864	22,5

Основными потерями энергии являются: тепло, переносимое дымовыми газами, — 22,5%, потери через стенки печи и потери через отверстия — около 15%. Анализ чувствительности параметров показал большое влияние содержания стеклобоя, процесса вытягивания стекла и влажности шихты на удельное энергопотребление печи. Оценен вклад факторов снижения производительности, таких как эффективность регенератора. Обнаружено, что при увеличении на каждые 50°С температуры отходящих газов удельное энергопотребление увеличивается на 5%; аналогично при увеличении утечек воздуха из печи на каждые 2% удельное энергопотребление увеличивается на 1,6%. Одной из возможностей для снижения общего потребления стекловаренных печей является предварительный подогрев сырьевых компонентов. Утилизация энергии, заключенной в отходящих газах, наиболее привлекательна с точки зрения экономии.

Увеличение доли стеклобоя на 50% уменьшает удельное энергопотребление на 9,5%, в то время как уменьшение доли стеклобоя на 75% увеличивает удельное энергопотребление на 17,5%.

Уменьшение усилия на вытягивания стекла (в тех процессах, где оно применяется) на 33% увеличивает удельное энергопотребление на 3,7%, в то же время увеличение усилия на 22% увеличивает удельное энергопотребление всего на 0,4%.

Увеличение (уменьшение) влажности шихты на 50% от базового уровня приводит, соответственно, к увеличению на 2,8% (уменьшению на 2,7%) удельного энергопотребления.

Попытка уменьшения потерь на нагрев стенок печи приведет к увеличению внутренней температуры и способствует усиленной коррозии стенок и сокращению срока службы печи. Установки с подковообразным направлением пламени лучше всего подходят для печей, в которых используется большой процент стеклобоя, однако склонность к засорению сокращает их рабочий ресурс.

Эксергетический анализ технологических процессов.

Эксергетический КПД

Полный энергетический баланс дает возможность одновременно с энергетическими получить и эксергетические характеристики процесса. Осуществимость любого технологического процесса определяется количеством подведенной к нему эксергии, поэтому очень важно наряду с прогнозированием энергопотребления проводить также оценку потребности в эксергии и выявлять резервы ее экономии за счет технического прогресса в стекловаренном производстве.

Показатель качества энергии, определяемый как максимальная работа, которую может совершить система в обратимом процессе при таком взаимодействии, в результате которого все ее параметры перейдут в состояние термодинамического равновесия с параметрами окружающей среды, был назван эксергией, а метод, использующий это понятие, — эксергетическим.

В понятии «эксергия» учитываются оба начала термодинамики: (1) работу можно извлечь лишь в том случае, если тело не находится в равновесии с окружающей средой, (2) максимальную работу можно получить только при обратимом протекании процессов.

Различные формы энергии можно представить в виде суммы неограниченно превратимой энергии — эксергии, и энергии, которую нельзя преобразовать — анергии. Эксергия может превращаться в любые формы энергии и в анергию, но обратный переход анергии в эксергию невозможен.

В процессе превращения энергии в другие виды часть энергии переходит в менее ценные формы, следовательно, потеря энергии — это фактически потеря эксергии.

Все формы энергии предлагается представлять как сумму эксергии и анергии, причем каждая из них может быть равна нулю.

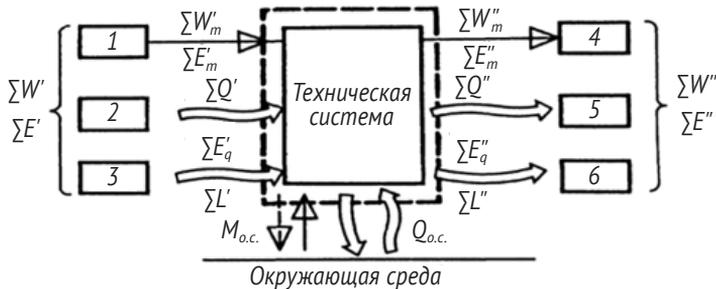


Рис. 67. Схема взаимодействия технической системы с окружающей средой и находящимися в ней объектами:

- 1-3 — внешние объекты — источники потоков вещества, тепловых потоков и работы;
- 4-6 — внешние объекты — приемники потоков вещества, тепловых потоков и работы

Как видно из рисунка 67, эксергетический баланс системы может быть представлен в виде уравнения:

$$\sum E_{\text{вх}} = \sum E_{\text{вых}} + \sum D,$$

$$\text{или } \sum E'_m + \sum E'_q + \sum L' = \sum E''_m + \sum E''_q + \sum L'' + \sum \Delta E_v + \sum D,$$

где $\sum \Delta E_v$ — приращение эксергии вещества в объеме (для стационарных процессов $\sum \Delta E_v = 0$),

$\sum D$ — диссипация (суммарные потери от необратимых процессов).

Для обратимых процессов $\sum D = 0$, таким образом $\sum E_{\text{вх}} = \sum E_{\text{вых}}$.

Основой эксергетического баланса является расчет КПД, который показывает потери от необратимых процессов горения и регенерации (рис. 68).

В 1980-х гг. были выполнены исследования, результаты которых позволили выявить возможно устранимые источники потерь эксергии и легли в основу совершенствования конструкции печей. В таблице 24 показан выполненный в 1985 г. эксергетический баланс стекловаренной печи. Расчеты выполняли для стекловаренной печи (варочная часть), применяемой в производстве тарного стекла.

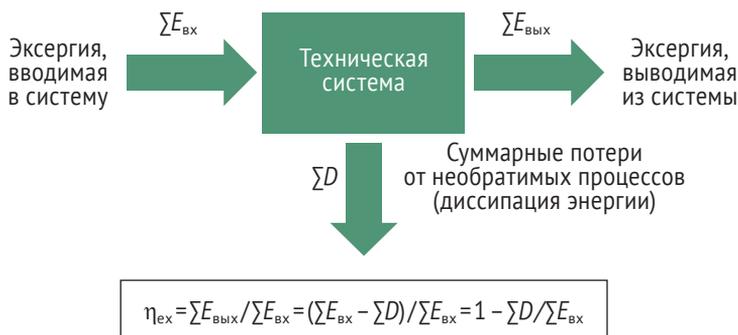


Рис. 68. Расчет эксергетического КПД

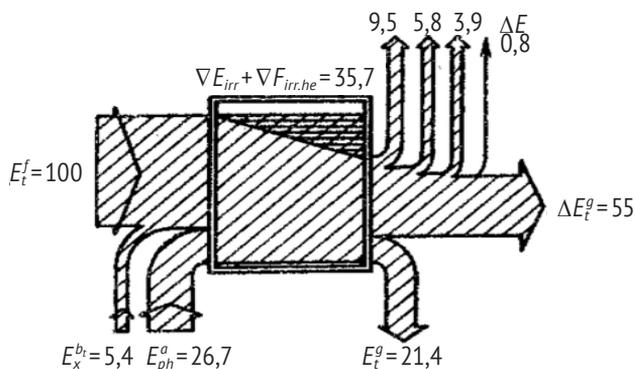


Рис. 69.
 Диаграмма Грассмана.
 Эксергетический баланс
 стекловаренной печи
 (варочная часть). Эксергия
 топлива была принята
 за 100 %

В стекловаренной печи потери эксергии в результате необратимых процессов горения топлива и теплообмена в регенераторах и футеровке являются наиболее значительными. Ресурсы научных сотрудников должны быть направлены прежде всего на разработку мер по снижению этих потерь и, конечно же, на меры по экономии топлива. Определение способов эффективного использования и сохранения эксергии должно быть целью любого эксергетического анализа работы печи и любых инженерных расчетов энергии.

Использование эксергетического баланса позволяет специалистам, занимающимся проектированием и усовершенствованием стекловаренных печей, более глубоко и детально оптимизировать конструкцию печи в целом и ее отдельных элементов, а также определять наиболее подходящие режимы работы печи: оценить качество и промышленный уровень оборудования по отношению к энергетическим характеристикам; заложить основу и разработать нормы удельного расхода энергии и разработать оптимальные режимы работы оборудования с технико-экономической точки зрения. Это закладывает основу дальнейшего совершенствования конструкции печей для дальнейшего увеличения производительности печи и экономии топливно-энергетических ресурсов.

Таблица 24. Расчет эксергии для стекловаренной печи (варочная часть)
Характеристика печи: производительность – 120,1 т/сут; общая площадь – 168 м²,
 площадь варочной части – 148 м²; топливо – мазут

Энергетический и эксергетический баланс* стекловаренной печи (melting-end: варочная часть печи)	Энергия		Эксергия	
	МДж	%	МДж	%
Теплота и эксергия:				
топлива Q_f, E_x^f	51 022	66,9	53 603	75,7
воздуха на горение топлива Q_a, E_{ph}^a	25 268	33,1	14 313	20,2
шихты Q_b, E_{bt_x}	–	–	2 884	4,1
ИТОГО	76 290	100	70 800	100
Теплота и эксергия:				
стекла Q_g, E_g	14 465	19	11 481	16,2
продуктов сгорания топлива $Q_d, \Delta E_{dt}$	42 797	56,1	29 950	41,6
потока тепла через футеровку $Q_{ln}, \Delta E_{ln}$	11 117	14,6	5 109	7,2
продуктов сгорания топлива, рассеиваемых через отверстия в футеровке и радиацией $Q_{da} + Q_{rd}, \Delta E_{da}, + \Delta E_{ln}$	5 380	7,0	3 100	4,4
Потери теплоты и эксергии от несгоревшей части топлива Q_{un}, E_x^f	2 290	3,0	2 117	3,0
Потери, обусловленные необратимостью процессов:				
сжигание топлива ΔE_{irr}	–	–	15 010	21,2
теплообмен $\Delta E_{irr,he}$, в т. ч.:	–	–	4 108	5,8
– в пламенном пространстве	–	–	528	0,7
– футеровка	–	–	3 580	5,1
Неучтенные потери $Q_{ls}, \Delta E$	241	0,3	425	0,6
ИТОГО	76 290	100	70 800	100

* Сумма энергии (тепла) топлива и воздуха, а также сумма эксергии топлива, воздуха и шихты были приняты за 100%.

Таким образом, повысить энергоэффективность стекловаренной печи можно при следующих условиях:

- максимальная эффективность регенератора отходящих газов;
- дальнейшее использование энергии отходящих газов после регенерации, например для подогрева шихты;
- снижение температуры отходящих газов на выходе из зоны горения благодаря конструкции печи и технологии горелки;
- стены печи хорошо изолированы с учетом коррозии огнеупорных материалов, особенно в месте оплавления;
- энтальпия процесса оплавления шихты низкая;
- объем газов, выделяемый шихтой, максимально сокращен;
- избыток воздуха (или кислорода) поддерживается небольшим и дополнительный приток со стороны исключен.

ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

Практически любая деятельность, направленная на производство полезной для человека и его жизнедеятельности продукции, сопровождается образованием отходов. Доля отходов и опасность их для жизни человека и окружающей его экосистемы зависит от способа производства. Проблема вредных производственных выбросов не нова. Она появилась, как только человек научился использовать огонь не только для приготовления пищи, но и для отопления жилищ. Но в глобальную проблему, несущую угрозу существованию человечества, она превратилась в XX столетии еще и потому, что к промышленным отходам добавились бытовые. Наложённые на рост численности населения, а соответственно производства и потребления, количества произведенных и не переработанных отходов дают в перспективе экологические условия, не пригодные для ныне существующих биологических форм жизни.

В производстве стекла основная масса газообразных выбросов образуется на стадиях приготовления шихты и варки стекла. С 1980-х гг. предприятия по производству и большого, и малого стекла предпочитают работать с готовыми сырьевыми материалами, кондиционирование которых происходит на горно-обогатительных комбинатах, поэтому ушли в прошлое составные цеха, которые вагонами разгружали природное сырье и занимались не только помолом, но и очисткой и обогащением. Сегодня системы очистки устанавливают только на линиях подготовки покупного стеклобоя. Кроме того, практически любое перемещение сырьевых материалов происходит в закрытых транспортировочных конвейерах, смесителях и другом оборудовании, оснащённом мощными вентиляционными системами, что превращает подготовительные цеха в помещения с содержанием пылевидных частиц в воздушном пространстве малоопасным для здоровья работников предприятия.

Отходы стекла, которые образуются на каждой стадии технологического процесса изготовления изделий, не идут в отвалы, они относятся к возвратным, и, в виде боя, направляются обратно в производственный цикл. Пылевидные мелкодисперсные фракции сырьевых материалов, которые улетают на стадии взвешивания и при загрузке шихты в стекловаренную печь, а также газообразные продукты горения топлива и разложения карбонатных сырьевых материалов образуют поток газов, которые выходят через дымовую трубу. Пылевидные частицы постепенно осаждаются и загрязняют любую поверхность, на которой оказываются. Пыль может быть причиной профзаболеваний кожи и легких, порчи одежды, обуви, оборудования, водоемов и т. п.

Главными «производителями» пыли в составных цехах стекольных заводов являются участки сушки и просева кварцевого песка, где запыленность частицами размером менее 5 мкм достигает 10 до 100 мг/м³. Аналогичное положение наблюдается на участках дробления и смешивания компонентов, где пыль насыщается щелочными компонентами (до 25 %).

Выбросы продуктов газового пространства печи представлены в таблицах 25 и 26. Как видно из представленных данных, разница в размере выбросов высокопроизводительных производств тарного и листового стекла невелика

и определяется большим расходом газа в стекловаренной печи с поперечным направлением пламени. Суммарная доля выделяющихся оксидов азота примерно в два с половиной раза больше суммы остальных вредных продуктов. Снизить эти цифры достаточно сложно, поскольку оксид азота является основным в составе земной атмосферы и воздуха, необходимого для горения топлива. Диоксид углерода является продуктом горения топлива и разложения карбонатного сырья, а диоксид серы — продукт разложения сульфатного сырья. Необходимость снижения выбросов этих газообразных веществ означает переход на новые виды сырьевых материалов

Таблица 25. Влияние вида производства на количество пылевидных и газообразных выбросов в отходящих газах

Наименование выброса	Вид производства / количество выброса, кг/т	
	Листовое	Тарное
Шихтная пыль	0,36–1,40	0,40–0,86
Диоксид серы (SO ₂)	0,99–1,70	0,90–2,10
Оксиды азота (NO _x)	2,50–4,70	1,51–4,10
Оксид углерода (CO)	0–0,045	0–0,23

Таблица 26. Влияние производительности печи на содержание вредных веществ в выбросах из газовых регенеративных стекловаренных печей с подковообразным направлением пламени (усредненные данные)

Мощность печи, т/сут	Твердые вещества, т/год	Газообразные вещества, т/год			
	Шихтная пыль	Диоксид азота (NO ₂)	Монооксид азота (NO)	Диоксид серы (SO ₂)	Диоксид углерода (CO ₂)
270	75	30	450	60	100
300	90	40	480	70	100
350	150	60	500	120	150

Поскольку все выделяющиеся газообразные оксиды являются водорастворимыми, то системы очистки дымовых газов от них основаны на переводе их в раствор и последующей утилизации этих вод.

Первоочередная задача систем очистки от пыли — локальное удаление взвешенных частиц из состава воздушной среды и предотвращение ее осаждения в окружающем пространстве. Расширенная задача — использование высушенного осадка в качестве вторичного сырья, а промывных вод щелочного состава — в качестве жидкости для увлажнения стекольной шихты.

Обычно системы очистки ставят на дымовые трубы стекловаренных печей, в которые уходят газы атмосферы печи и продукты улетучивания сырьевых компонентов.

Существует несколько систем очистки. Прежде всего это газоуловители сухого и мокрого типа, работающие в диапазонах температур до 250°С и от 250 до 460°С. При сухом способе используют систему из нескольких

гидроциклонов, разгоняющих частицы с разной скоростью. Для мокрой очистки используют гидродинамический пылеуловитель, действие которого основано на принципе объемно-испарительного осаждения (рис. 70). Конструкции установок в зависимости от места их размещения могут быть разными: рукавные, картриджные фильтры, циклоны с встречно-закрученными потоками, скрубберы, промышленные пылесосы и другое. Производительность предлагаемых установок от 2000 до 20 000 м³/ч. Эффективность улавливания пыли составляет для рукавных фильтров не ниже 99%, для картриджных — 99,99%. Рукавные и картриджные установки комплектуются пультом управления системой импульсной регенерации сжатым воздухом фильтрующих элементов без остановки рабочего цикла.

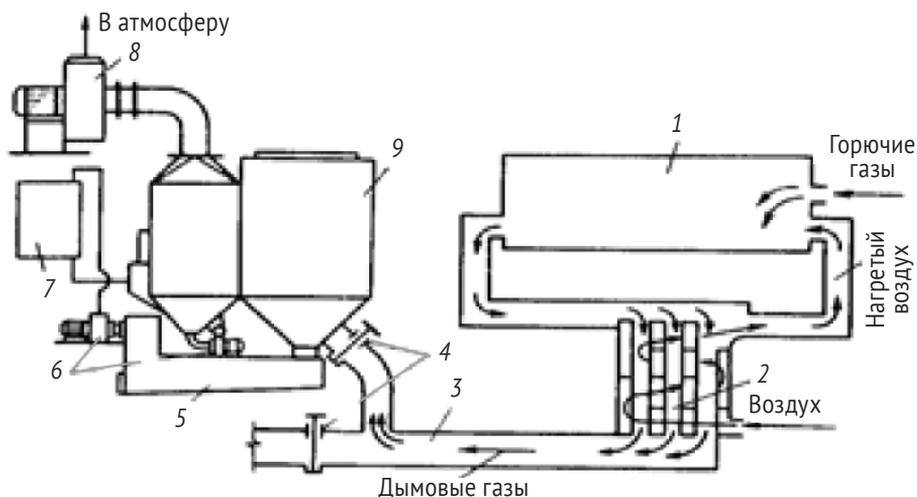


Рис. 70. Схема очистки отходящих газов стекловаренной печи:

1 — печь; 2 — рекуператор (регенератор); 3 — дымоход; 4 — шибер; 5 — отстойник; 6 — насос; 7 — резервуар повторного пользования; 8 — вентилятор; 9 — пылеуловитель ПВТ

Еще одна группа систем очистки от пыли отходящих газов — электрофильтры. Работа их основана на принципе ионизации и последующего осаждения заряженных частиц (рис. 71), степень очистки в среднем составляет 97–99%.

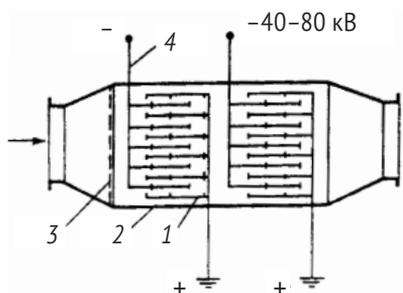


Рис. 71. Схема однозонного двухполюсного электрофильтра:

1 — электроды для осаждения частиц; 2 — корпус фильтра; 3 — газораспределительная решетка; 4 — электроды коронного разряда

В производстве и листового, и тарного стекла есть продукция, которую получают с использованием методов химической обработки поверхности стекла смесью солей плавиковой и серной кислоты, то есть химического матирования или полирования изделий. Для утилизации образующихся паров кислот, фтористых соединений и других летучих составляющих травильных растворов используют абсорберы (рис. 72).

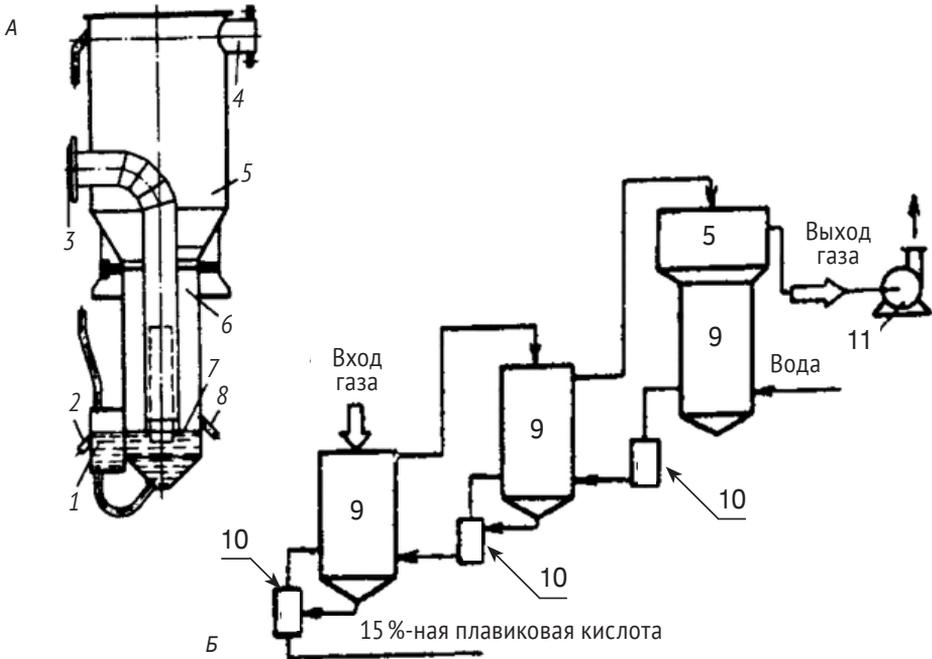


Рис. 72. А – принципиальная схема абсорбера пенного слоя с высокоразвитой поверхностью; Б – схема установки с тремя абсорберами:

1 – гидрозатвор; 2 – штуцер подачи свежей воды; 3 – входной патрубок; 4 – выходной патрубок; 5 – каплеотделитель; 6 – корпус; 7 – пенообразующая решетка; 8 – штуцер отработанной воды; 9 – подрешеточное пространство адсорбера; 10 – гидрозатвор; 11 – вентилятор

Вторая составляющая процессов полирования и матирования — соли серной и плавиковой кислот, образующиеся в процессе химических реакций поверхности стекла с травильным раствором. Катионный состав в таких солях определяется химическим составом стекла. В натрийкальцийсиликатных стеклах это преимущественно растворимые соли со щелочными катионами, в хрустальных — малорастворимые с катионами свинца, кальция и бария, в оптических — малорастворимые с катионами элементов переменной валентности и т. д. Для очистки промывных растворов, содержащих такие компоненты, используют методы нейтрализации-осаждения соединениями кальция, а образующийся шлам нейтрализуют и отправляют в отвалы (рис. 73).

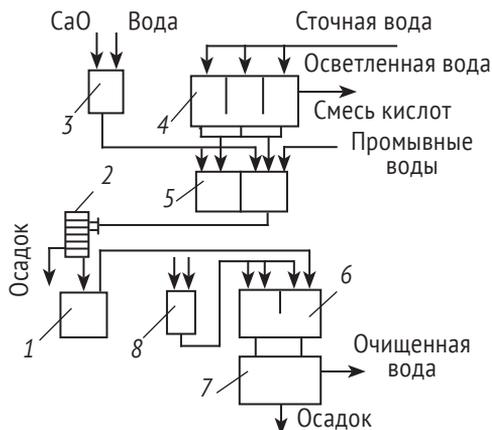


Рис. 73. Принципиальная схема очистки сточных вод после химического полирования:

1 – резервуар для фильтрата; 2 – фильтр-пресс; 3 – резервуар для оксида кальция; 4 – отстойник отработанной кислоты; 5 – реактор первой стадии очистки соединениями кальция; 6 – реактор второй стадии очистки кремнекислотой; 7 – отстойник осадка для очищенной воды; 8 – резервуар активной кремнекислоты

Таким образом, на состав атмосферы и парниковый эффект влияют преимущественно отходы производства «большого» — тарного и листового — стекла, а количество твердых отходов, образующихся на стадиях механической и химической обработки стекла, — незначительно, особенно в сравнении с производством металлов.

Рынок вторичного сырья в России пока еще в состоянии формирования. Доля стеклянных отходов в общем потоке колеблется от 3 до 20%, в зависимости от места сбора.

Российский рынок отходов стекла формируется в основном за счет внутреннего сбора, импорт составляет незначительную цифру. В структуре потребления отходов преобладает доля бесцветного стекла, которая составляет около 55,8% общего объема спроса. На стекло зеленого цвета приходится примерно 20%, коричневого — 14,9%, и 9,3% — это цветное, зеркальное, оптическое и другие (рис. 74).



Рис. 74. Спрос на разные виды вторичного стекла

Стекло относится к группе материалов, которые необходимо и возможно использовать в качестве вторичного сырья, поскольку это на 100% рециркулируемый материал. В составе отходов 96% собираемого стекла представляет стеклянная тара, которая, после очистки и дезинфекции, может быть повторно использована для упаковки напитков. Листовое стекло попадает в отвалы в виде стеклобоя, и его доля составляет примерно 3% от собираемого стекла, и всего около 1% приходится на бой всех остальных видов стеклянной продукции.

Идеальный вариант переработки — возвращение отходов в производство стекла — отягощен плохой организацией сбора. Покупной возвратный бой сегодня в большинстве своем российские предприятия самостоятельно готовят к использованию. И дело здесь вовсе не в стадиях очистки, помола и рассева, а в том, что нет единого состава стекла, в изделиях, производимых разными заводами. Поэтому необходим анализ состава стекла на входе и индивидуальный расчет подшихтовки при введении «чужого» боя. Но даже с учетом всех дополнительных затрат — это самый логичный и полноценный способ утилизации вторичного стекла.

Перечислим лишь некоторые экологические и технологические результаты возвращения переработанного стекла в производственную цепочку:

- снижение энергетических затрат на варку стекла: приблизительно на 2–3% для каждых 10% стеклобоя, используемого в производственном процессе;
- снижение потребности в природном сырье: тонна переработанного стекла экономит около 650 кг песка, 186 кг соды и 200 кг известняка;
- снижение площади мусорных полигонов: примерно 10000 га земли ежегодно.

К высокотемпературным методам переработки возвратного боя относится производство пеностекла — высокопористого неорганического тепло- и звукоизоляционного материала, получаемого спеканием тонкоизмельченного стекла и газообразователя. Пеностекло можно использовать в качестве строительного материала в любой климатической зоне и, при прочих равных условиях, оно выигрывает в сравнении с органическими утеплителями практически ненормируемым сроком эксплуатации и отсутствием выделения вредных продуктов при горении. Мировым лидером по производству пеностекла является корпорация Pittsburg Corning (США). Однако его производство налажено и в Китае (Lanzhou Pengfei Heat Preservation Co., Ltd.), Белоруссии (ОАО «Гомельстекло»), а с недавнего времени и в России (ЗАО «Пеноситал», ООО «Экспресс-Стройиндустрия», Penostek).

Порошок возвратного боя можно использовать в производстве полых и массивных микроизделий с использованием технологий оплавления в высокотемпературных камерах (микрошарики, микросферы, бисерные шарики) для медицины, изготовления различных функциональных и декоративных изделий.

Порошок стекла или микросферы актуальны для изготовления различных фильтрующих систем, в этом случае, стеклянные фильтры хорошо подходят для очистки нейтральных и кислых сред.

Кроме того, существует несколько низкотемпературных технологий, в которых применяют порошкообразный бой стекла. Одна из них — получение вяжущих автоклавного и безавтоклавного твердения с использованием боя в пределах

от 10 до 95 % и ряда строительных материалов на их основе с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Возможности использования возвратного боя стекла в качестве наполнителя опробованы при изготовлении композиционных декоративно-облицовочных материалов (фасадные, интерьерные и тротуарные плитки), покрывных высоконаполненных композиций (стеклочерепица, лакокрасочные материалы, антикоррозионные мастики), основы верхнего слоя беговых дорожек и иных спортивных площадок на спортивных сооружениях.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Особенностью XXI в., в сравнении со всеми предыдущими, является громадность информационного пространства, длительность жизни новостей в котором бесконечно мала. Создается ощущение, что мир несется куда-то без руля и без ветрил, и предсказать его конечный путь и даже промежуточные станции весьма непросто.

Неповоротливые большие технологии, такие как производство стекла, не могут меняться вместе с окружающим миром, но не могут и остановиться или отстать, поскольку это означает, что они останутся невостребованными.

Сегодня стекло выходит на новый виток популярности, поскольку с ним связано дальнейшее развитие систем коммуникации, энергосбережения, дополненной реальности и т. д. Сможет ли технология ответить на вызовы сегодняшних устремлений людей?

Попробуем выделить технологические и экологические факторы, сдерживающие развитие отрасли в конце XX и начале XXI в.

К концу XX столетия произошла реорганизация, в результате которой около 50 % мирового объема производства листового стекла пришлось на долю четырех крупных объединений: группу компаний Nippon Sheet Glass (NSG), Asahi Glass Company (AGC), Saint-Gobain и группу компаний Guardian. Они проводили единую политику укрупнения производственных объектов, повышения на них уровня автоматизации и экологической безопасности, выведения предприятий в страны третьего мира, унификации ассортимента выпускаемой продукции. И первое десятилетие XXI в. отрасль выдавала стабильный ежегодный прирост на уровне 5 %. С конца 1990-х гг. на рынок вышел Китай. К 2009 г. там построено такое количество флот-линий и предприятий по производству стекла, что в настоящее время, невзирая на существующий миропорядок, Китай уверенно вырабатывает более 50 % валового мирового стекольного продукта, то есть страна на этом этапе одержала чистую победу методом экстенсивного ведения хозяйства. Но ассортимент продукции, который он представляет на специализированных выставках, вполне соответствует ассортименту традиционных мировых лидеров. Основные факторы, которые сдерживали рост производства в США и Европе, — энергосбережение, борьба за экологическую чистоту производства и транспортные расходы. Не случайно их новые предприятия, которые вступили

в действие в последнее десятилетие, расположены в России, странах Ближнего Востока и Южной Америки.

Мировые тенденции развития инфраструктуры и улучшения условий жизни в больших и маленьких городах могут быть реализованы на принципах строительства «умных» домов с климат-контролем, энергосбережением, системами личной гигиены, доставки товаров и утилизации бытовых отходов и удобством размещения разного числа людей. Это означает рост спроса на новые виды функциональных материалов и на основе стекла.

Какова вероятность появления принципиально новых составов стекол, новых технологий варки и выработки, новых принципов устройства предприятий? Существенных изменений в составе промышленных стекол вряд ли следует ожидать, во всяком случае, пока мировые запасы кварцевого песка и кремний-содержащих материалов достаточно велики.

Рассмотрим возможности и перспективы развития трех наиболее значимых составляющих производства стекла: энергосбережения, ресурсосбережения и экологической безопасности.

Обсуждая проблему энергосбережения, следует понимать, что в обозримом будущем нет альтернативы природным источникам энергии — газу, нефти и каменному углю — в промышленном производстве. Следовательно, пока мы можем говорить лишь о путях снижения расхода природных ресурсов.

Наиболее затратная по потреблению энергии часть производственного цикла — стекловарение. Процесс стекловарения многостадийный. Наиболее длительная и требующая высоких температур стадия — стеклообразование. При нем происходит растворение в первичном расплаве силикатов щелочных и щелочноземельных компонентов зерен кварцевого песка, содержание которого в составе промышленных стекол близко к 70 масс. %. Кроме этого, более короткой, но и протекающей при более высоких температурах является стадия осветления и гомогенизации, когда стекломасса освобождается от пороков стекловарения и подготавливается к выработке. Чтобы, с одной стороны, облегчить эти процессы, а с другой — уменьшить энергозатраты, можно использовать следующие приемы:

- увеличить содержание стеклобоя в составе шихты;
- использовать актуальные технологии подготовки сырьевых материалов и шихты (гранулирование, механоактивация, компактирование, гидротермальная и синтетическая шихта);
- использовать комплексные системы подогрева шихты перед загрузкой в печь;
- использовать дополнительный электроподогрев в зонах загрузки шихты и квельпункте;
- использовать огнеупоры и теплоизоляцию для повышения температуры пламенного пространства, КПД стекловаренных печей и продления их кампаний, то есть длительности работы без промежуточных и капитальных ремонтов;
- использовать тонкослойную варку и/или осветление для повышения качества стекломассы.

Из всех перечисленных способов самый прямой, логичный связан с использованием возвратного стеклобоя. Есть несколько сложностей, стоящих на пути продвижения этого способа. Первая — организация отдельного сбора боя стекла по цвету. Вторая — строительство современных предприятий по его переработке, способных на выходе предоставлять достоверную информацию о его составе. Третья — готовность действующих линий к перестройке под новый состав шихты и онлайн-контроль входящего сырья.

Методы улучшения параметров сырья и шихты, как правило, положительно сказываются на скорости процесса силикатообразования, но могут удлинить стадии гомогенизации и осветления, тогда энергетический выигрыш получается не столь существенным.

Внесение конструктивных изменений в печь, таких как системы бурления, электроподогрева, новые виды огнеупоров и теплоизоляции, требуют долгосрочных больших капитальных вложений.

Тонкослойная варка стекол, о которой впервые заговорили в середине XX в., кажется панацеей от всех проблем, поскольку все процессы варки протекают одновременно и успешно. Однако пока нигде в мире нет внятной промышленной установки, доказывающей преимущества этого способа в многотонном производстве изделий.

Ресурсосбережение и пути его реализации

Основными природными ресурсами, которые используют в производстве стекла, являются кварцевый песок, мел, известняк, доломит, полевые шпаты. Известно, что пригодность песков для стекловарения зависит от размера частиц и содержания в них оксида железа. Современные требования к белизне большинства бесцветных промышленных стекол заставляют ужесточать требования по содержанию оксида железа до значений менее 0,05 масс. %. Размеры частиц песка, оптимальные для промышленного стекловарения, составляют 0,8–1,2 мм, причем более важной является нижняя граница. Появление частиц песка с меньшими размерами приводит к увеличению количества пузырей и усложнению стадии осветления.

Доля чистых природных песков существенно уменьшилась за годы добычи, а переход на искусственное сырье в разы удорожит продукцию. Разумным выходом из ситуации является развитие обогатительной отрасли, направленной на использование в производстве стекла любых песков нужного размера после соответствующей очистки и кондиционирования. Для производства цветной стеклотары целесообразно использовать альтернативные пескам источники оксида кремния, такие как трепел и диатомит. Проблема размеров частиц в этих материалах может быть решена методами гранулирования и компактирования порошков.

Второй способ снизить потребление природных ресурсов для варки стекол — увеличить долю стеклобоя в составе шихты. Увеличение доли стеклобоя

в шихте до 50% позволяет снизить длительность процесса стеклообразования и приблизить энергозатраты на стекловарение к теоретическим.

Кроме того, в качестве сырьевых источников можно использовать отходы промышленного производства (шлаки, золы и т. п.). В России есть массив неопробованных в промышленном производстве наработок по использованию в числе прочего золы и шлаков, образовавшихся в металлургии и при работе ТЭЦ, для получения окрашенных в массу стекол и стеклокристаллических материалов с превосходными прочностными, декоративными и другими характеристиками.

Экологическая безопасность

Вопросы экологической безопасности стекольной промышленности связаны прежде всего с выделением в окружающую среду продуктов горения органических энергоносителей. И дело здесь не столько в составе отходящих газов, поскольку основу там составляют соединения углерода, сколько в их количестве. К сожалению, КПД современных печей-гигантов только-только подбирается к 30%. Один из путей увеличения этого параметра состоит в изменении смеси, подаваемой в газовые горелки. В конце 80-х гг. прошлого столетия многими передовыми компаниями по производству стекла были опробованы печи, в которых использовали кислородное дутье. Идея эта дала блестящие результаты с точки зрения снижения длительности процесса стекловарения и уменьшения объема выбросов в атмосферу оксида азота. Но повышение температуры в пламенном пространстве выше 1600°С резко увеличивает тепловую коррозию огнеупоров и снижает длительность кампании печи, а использование кислорода требует принятия мер повышенной безопасности производства. В качестве альтернативного и компромиссного варианта появились печи, в горелки которых, расположенные в зоне кельяпункта, подается кислородно-воздушная смесь.

Второй ахиллесовой пятой стекольного производства остаются пылевидные отходы, связанные с подготовкой шихты в составных цехах и улетучиванием сырьевых материалов при загрузке шихты в печь.

Частично эта проблема решается одним из следующих способов:

- превращением составных цехов, которые занимались полной подготовкой природного сырья — очисткой, помолом и рассевом, в дозировочно-смесительные отделения, где сырье взвешивают и перемешивают;
- использованием современного оборудования, в котором все линии транспортировки сырья являются закрытыми;
- транспортировка шихты в печь должна происходить под «шапкой» из слоя стеклобоя, что предотвращает пыление при транспортировке и снижает улетучивание в зоне загрузки;
- использованием электрических стекловаренных печей.

Стекловаренные печи, работающие на электричестве, — безусловно, панацея от комплекса проблем варки стекла. Пока ничего лучше, с точки зрения

экономии сырьевых материалов, снижения вредных выбросов и скорости процесса производства, человечеством не придумано, но экономически затруднительно вырабатывать такое количество электрической энергии, чтобы насытить все потребности высокотемпературного производства стекла.

РОЛЬ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Современные рыночные условия, учитывающие стоимость производства и логистику, часто делают невыгодным использование плоского и тарного стекла при перевозке на большие расстояния.

Более 90 % продукции стекольной промышленности используется в смежных отраслях; таким образом, производство стекла существенно зависит от состояния строительной отрасли, автомобилестроения и пищевой промышленности. Тем не менее есть также секторы меньшего объема, которые производят техническую или потребительскую продукцию.

До финансового кризиса 2008 г. глобальный ежегодный рост спроса на листовое стекло составлял 5 %, что было обусловлено растущим спросом в строительстве и автомобильной промышленности. Этот рост остановился с падением мирового спроса в 2008 г.; в 2009 г. он сократился на 3,6 %. Степень снижения была наиболее серьезной в Северной Америке и Европе, где падение спроса сопровождалось резким снижением загрузки производственных мощностей. Спрос на листовое стекло упал в ЕС примерно на 20 % с 2007 по 2010 г. Загрузка производственных мощностей, которая до наступления рецессии приблизилась к 100 %, понизилась до 85 % в 2011 и 2012 гг. Тем не менее к 2017 г. наметился отчетливый тренд роста производства листового стекла.

Значение Китая на рынке стекла неуклонно растет с начала 1990-х гг., когда на его долю приходилось около одной пятой мирового спроса на стекло, но уже с 2009 г. Китай является крупнейшим производителем стекла и изделий из стекла (чуть более 50 %). В Китае находится наибольшее количество предприятий по производству стекла и линий по производству флоат-стекла в мире. Выпуск стекла рос более чем на 10 % в год с 2000 по 2009 г., а к 2016 г., несмотря на некоторое снижение до 8,2 % в год, достиг 3,4 млрд м².

В 2019 г. совокупная мощность мирового производства стекла оценивалась в 20 млн т, а доля выпуска стекла в Европейском союзе возросла на 1,8 % по сравнению с 2018 г. и достигла 37,2 млн т, что является свидетельством постоянства высокого спроса на изделия из стекла.

Листовое стекло по-прежнему играет ключевую роль в стекольной промышленности. После рецессии 2008 г. мировой спрос на листовое стекло неуклонно рос и продолжает расти на уровне 4,0 % в год, и достигнет в 2021 г. 11 млрд м².

Согласно недавним аналитическим оценкам, в 2019 г. объем мирового рынка стекла составил 127,1 млрд долл., а к 2027 г. он достигнет 174,9 млрд долл., что означает впечатляющий среднегодовой темп роста, превышающий 4,1 % в течение прогнозируемого периода.

Европейский союз является одним из крупнейших в мире рынков стекла с точки зрения как производства, так и потребления. Европейская стекольная промышленность объединяет около 1000 компаний и составляет более четверти неметаллического минерального сектора. Стекольная промышленность в Европе, как и во всем мире, имеет высокую концентрацию: более 80% стекла производится менее чем дюжиной транснациональных корпораций, в каждой из которых работает более 1000 сотрудников. Другие компании — маленькие или средние, в основном производящие специализированные изделия из стекла.

На сегодняшний день в России самый большой сегмент рынка занимает производство листового стекла. Стекольная промышленность Российской Федерации представлена 12 действующими заводами, производящими листовое стекло. Крупнейшие заводы отрасли: ОАО «Эй Джи Си БСЗ» (Борский стекольный завод, Нижегородская обл.), ОАО «СаратовСтройСтекло» (Саратовская обл.), ОАО «Салаватстекло» (Башкортостан), ООО «Эй Джи Си Флэт Гласс Клин», ООО «Пилкингтон Гласс» (Московская обл.). На долю пяти крупнейших заводов приходится более 90% выпускаемого в России листового стекла. 70% объема российского стекольного рынка принадлежит отечественным производителям.

В 2019 г. объем производства листового стекла в России остался практически на уровне прошлого года, показав символический рост на 0,7%, и составил 243,15 млн м² стекла. В то время как в 2019 г. оценочный объем рынка листового стекла всех видов составил 87,6 млрд руб., или 229 млн м², увеличившись, по сравнению с 2018 г., на 15% в стоимостной оценке и на 7% — в натуральной. Экспортные поставки стекла в 2019 г., по сравнению с 2018 г., показали снижение, в натуральном выражении — около 15%, а в стоимостном — 7%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Бондарев К. Т.* Стекло в строительстве / К. Т. Бондарев. — Киев : Будівельник, 1969. — 348 с.
2. *Бреховских С. М.* Стекло за рубежом : Производство и применение / С. М. Бреховских. — Москва : Госстройиздат, 1960. — 287 с.
3. *Бродянский В. М.* Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. — Москва : Энергоатомиздат, 1988. — 288 с.
4. *Гулоян Ю. А.* Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гулоян. — Владимир: Транзит-Икс, 2003. — 480 с.
5. *Гулоян Ю. А.* Физико-химические основы технологии стекла / Ю. А. Гулоян. — Владимир: Транзит-Икс, 2008. — 736 с.
6. *Дзюзер В. Я.* Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — Москва : Теплотехник, 2009. — 339 с.
7. *Крупский А. К.* Стеклопроизводство / А. К. Крупский // Россия в конце XIX века / Под общей ред. В. И. Ковалевского. — СПб., 1900. — С. 404–417.
8. *Макаров Р. И.* Управление качеством листового стекла: флоат-способ / Р. И. Макаров, В. В. Тарбеев, Е. Р. Хорошева, Ю. М. Попов ; под ред. Р. И. Макарова. — Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2004. — 152 с.
9. *Маневич В. Е.* Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В. Е. Маневич, К. Ю. Субботин, В. В. Ефременков. — Москва : РИФ «Стройматериалы», 2008. — 223 с.

10. Манускрипт Теофила «Записка о разных искусствах» // Сообщения Центральной научно-исследовательской лаборатории по консервированию и реставрации музейных художественных ценностей (ВЦНИЛКР). — Вып. 7. — Москва, 1963. — С. 101–117.
11. *Мелконян Р. Г.* Аморфные горные породы и стекловарение / Р. Г. Мелконян. — Москва : НИИ–Природа, 2002. — 264 с.
12. *Минько Н. И.* История развития и основы технологии стекла / Н. И. Минько, В. М. Нарцев, Р. Г. Мелконян. — Белгород : БГТУ, 2008. — 395 с.
13. *Панкова Н. А.* Стекольная шихта и практика ее приготовления / Н. А. Панкова, Н. Ю. Михайленко. — Москва : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1997. — 80 с.
14. *Патрушева К. В.* История выдувания оконных стекол / К. В. Патрушева, Н. В. Патрушев // Молодой ученый. — 2017. — № 1(135). — С. 378–380.
15. Производство стекла : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС) 5-2015. — Москва : Бюро НДТ, 2015. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128665> (дата обращения: 30.11.2021).
16. Промышленность СССР : Статистический сборник. — Москва : Госстатиздат, 1957. — 448 с.
17. Промышленность СССР : Статистический сборник / Госкомстат СССР. — Москва : Финансы и статистика, 1988. — 286 с.
18. *Ромашова О. Ю.* Эксергетический анализ и технико-экономическое обоснование технологий преобразования энергии / О. Ю. Ромашова // Методические материалы Национального исследовательского Томского политехнического университета. — 2017. — URL: <https://docplayer.com/129462773-Eksergeticheskiy-analiz-i-tehniko-ekonomicheskoe-obosnovanie-tehnologiy-preobrazovaniya-energii.html> (дата обращения: 30.10.2021).
19. Рынок переработки стекла в России // Исследовательская компания «Abercade». — 2010. — Февраль. — URL: <http://www.abercade.ru/research/analysis/3661.html> (дата обращения: 30.09.2021).
20. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» // Консорциум «Кодекс» : Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010> (дата обращения: 31.10.2021).
21. *Сергеев Ю. П.* Выполнение художественных изделий из стекла: учебник для художественно-промышленных вузов и училищ / Ю. П. Сергеев. — Москва : Высшая школа, 1984. — 240 с.
22. Стеклосоюз России : [сайт]. — URL: <http://www.steklosouz.ru/> (дата обращения: 30.10.2021).
23. Технология стекла : Справочные материалы / ред.: П. Д. Саркисов, В. Е. Маневич, В. Ф. Солинов, К. Ю. Субботин. — Москва : ИПК «Чувашия», 2012. — 647 с.
24. *Товажнянский Л. Л.* Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве : Монография / Л. Л. Товажнянский, В. М. Кошельник [и др.]; под ред. В. М. Кошельника. — Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. — 628 с.
25. Химическая технология стекла и ситаллов / [М. В. Артамонова, М. С. Асланова, И. М. Бужинский и др.] ; под ред. Н. М. Павлушкина. — Москва : Стройиздат, 1983. — 432 с.
26. *Храмков В. П.* Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий / В. П. Храмков, Е. А. Чугунов. — Москва : Высшая школа, 1987. — 104 с. — URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/hramkov/text.pdf> (дата обращения: 30.10.2021).
27. *Цейтлин М. А.* Очерки по истории развития стекольной промышленности в России / М. А. Цейтлин. — Москва, 1939. — 204 с.

28. Чехов О. С. Вопросы экологии в стекольном производстве / О. С. Чехов, В. И. Назаров, В. Г. Калыгин. — Москва : Легпромбытиздат, 1990. — 144 с.
29. Шапилова М. В., Тимофеева И. Т. Охрана атмосферного воздуха стекольной промышленности / М. В. Шапилова, И. Т. Тимофеева. — Москва : Легпромбытиздат, 1992. — 176 с.
30. Annual Report of Glass Alliance Europe : State of the EU Glass Industry in 2020–2021 // WKO. — URL: <https://www.wko.at/branchen/industrie/glasindustrie/annual-report-of-gae.html> (дата обращения: 31.10.2021).
31. Flat Glass Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2019–2024 // Research and Market. — 2019. — August.
32. Flat Glass Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2021–2026 // imarc. — URL: <https://www.imarcgroup.com/flat-glass-market> (дата обращения: 31.10.2021).
33. Galitsky C. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry / C. Galitsky [et al.]. — Berkeley (CA), 2008. — 113 p. — URL: <https://www.energystar.gov/sites/default/files/buildings/tools/Glass-Guide.pdf> (дата обращения: 30.10.2021).
34. Glass Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Construction, Transportation), By Product (Container, Flat, Fiber), By Region, And Segment Forecasts, 2020–2027 // Grand View Research (CA). — URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/glass-manufacturing-market#:~:text=b.,the%20glass%20manufacturing%20market%20growth%3F/> (дата обращения: 30.09.2021).
35. History of glass // Van Ruysdael. — URL: <https://www.van-ruysdael.com/glass/library/history-of-glass/item275> (дата обращения: 30.10.2021).
36. Kozlov A. S. Exergy balance of glass-melting furnaces / A. S. Kozlov [et al.] // Glass&Ceramics. — 1985. — Vol. 42, iss. 12. — P. 535–539. — URL: <https://link.springer.com/journal/10717/volumes-and-issues/42-12> (дата обращения: 30.10.2021).
37. Sardeshpande V. Model based energy benchmarking for glass furnace / V. Sardeshpande [et al.] // Energy Conversion and Management. — 2007. — Vol. 48, iss. 10. — P. 2718–2738. — DOI: 10.1016/j.enconman.2007.04.013.
38. Scalet B. M. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for The Manufacture of Glass Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control / B. M. Scalet [et al.]. — Seville (Spain) : Joint Research Centre, 2013. — 485 p. — URL: <file:///D:/%D0%97%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BA%D0%B8/LFNA25786ENN.en.pdf> (дата обращения: 30.11.2021).
39. The global glass economy and its wider social consequences : Towards an International Year of Glass in 2022 // International Committee for Museums and Collections of Glass. — URL: <https://www.iyog2022.org/images/files/77-economicsiyog-200925.pdf> (дата обращения: 31.10.2021).
40. Tomaino A. Are sheet glass and float glass the same? — URL: <https://www.quora.com/Are-sheet-glass-and-float-glass-the-same> (дата обращения: 30.10.2021).