11

ПРОИЗВОДСТВО СТЕКЛА

Елена Евгеньевна Строганова
РХТУ им. Д. И. Менделеева, кандидат технических наук
Кирилл Александрович Щелчков
Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
зам. начальника отдела стандартизации, методологии и оценки НДТ

ВВЕДЕНИЕ

Оно бывает жидким и твердым, прозрачным и абсолютно черным, гладким и шероховатым. О его изобретении складывают легенды, ибо никто точно не знает, кто первый его придумал, а за разглашение секретов изготовления в Средние века преследовали и убивали. Оно есть и в храме, и в кабаке, под водой и в космическом пространстве, в каждой прихожей и кухне.

Думаю, что вы уже догадались, что речь идет о стекле — удивительном материале, который известен более четырех тысячелетий, но до сих пор хранит тайну своего строения.

Оглянитесь вокруг и сосчитайте, сколько изделий из стекла окружают нас в повседневной жизни.

А началась его история в Древнем Египте, когда мастера-горшечники покрывали голубовато-зеленоватой стеклянной глазурью плитки для украшения стен храма. Глазурь варили из песка с добавками бирюзовой или малахитовой крошки. Оно тогда совсем не было похоже на то, что теперь называют стеклом. Его главное достоинство — прозрачность — никому не было известно.

Так бы до сих пор и покрывали глазурью плитки, если бы однажды мастер не заметил, что после обжига плиток в костре остались круглые голубовато-зеленоватые шарики, напоминающие бирюзу и малахит. Это лишняя глазурь «сползла» с плитки и капнула в огонь, а потом застыла в виде шарика, похожего на драгоценный камень. Цветные камни, из которых делали женские украшения, ценились всегда, и первые цветные стекла старались сделать похожими на натуральные камни — сапфиры, гранаты, малахиты, сердолики и многие другие, в зависимости от того, в чем была потребность. Вот тогда-то и задумались о прозрачности — как иначе сделать сапфир или гранат?

Дальше — больше. Бусы делали с помощью керамического сердечника, чтобы сразу получалась дырочка для нанизывания. А раз можно сделать бусину с отверстием, почему бы не сделать тем же методом сосуд для благовоний? Совсем маленький, высотой не больше 5–7 сантиметров. Первые образцы стеклянной тары, датированные II тысячелетием до н. э., поражают яркостью цветов и разнообразием приемов декорирования, которые придумывали первые мастера, чтобы каждый сосуд был лучше другого, но вмещают в себя не более 100 мл жидкости!

Между тем мастерство стеклоделов совершенствовалось. Они научились получать стекло нужного цвета и доваривать его в плоских чашах, чтобы освободиться от пузырей. Вязко-текучую массу выливали в форму и прессовали, чтобы получить тарелку или блюдо, или наматывали на песчаные сердечники, чтобы получить полые изделия. Фигурки священных животных и египетских богов, глазурованные или прессованные из непрозрачного стекла, сохранились до наших дней. У египтян получались даже бесцветные стекла, но это было, скорее, случайностью, чем желанием получить новый материал.

Древнее египетское царство постигла участь большинства империй — его завоевали римляне и вместе с ним получили все ремесла. Роль римских мастеров в истории стекла трудно переоценить. Им выпала честь придумать предмет, совершивший переворот в технологии стекла, и остаться в истории империей, давшей человеку новый материал, поскольку они изобрели выдувную трубку. К тому времени была отработана технология бесцветного стекла, и вполне естественно, что первые стеклянные рюмки, бокалы и фужеры стали выпускать именно в Римской империи.

Мастерству древних стеклоделов не перестаешь удивляться. Они плавили сырьевые компоненты в глиняных чашах на огне костров, на глаз определяли степень готовности стекла к формованию, не имели ни малейшего представления о согласованности коэффициентов расширения для разных стекол в одном изделии, но создали столько удивительных форм и способов декорирования, что их с лихвой хватило до самой эпохи Возрождения.

СТРУКТУРА СТЕКОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Стекольная промышленность является производственной отраслью, то есть отраслью создания материальных благ.

Отрасль включает в себя предприятия по производству собственно стекла, а также предприятия по производству фарфора и фаянса.

В стекольном производстве следует выделить предприятия по производству стекла листового и тарного. Тарная подотрасль объединяет предприятия по выработке (варке) стекла и линии по формированию емкостей из стекла для напитков и пищевой продукции.

Отдельное направление производства — сортовое стекло — производство столовой посуды, высокохудожественных и часто уникальных изделий — сосудов для вина и напитков.

Производство плоского стекла является основным продуктом для конкретных подотраслей, осуществляющих переработку листового стекла.

Листовое стекло перерабатывается для использования в автомобилестроении, в остеклении вагонов рельсового транспорта, в мебельной промышленности, в сельском хозяйстве для остекления оранжерей и, конечно, в строительной отрасли для остекления промышленных зданий и сооружений в жилищном строительстве. Небольшой подотраслью по производству стекла, но отличающейся весьма широким ассортиментом изделий, является подотрасль специального стекла. Предприятия специального стекла производят светотехническое, медицинское, химико-лабораторное, растворимое стекло, стекловолокно и пр.

Основные подотрасли стекольного производства (оцениваемые по их долям в общем объеме производства стекла в России) ранжируются в соответствии с табл. 11.1.

Таблица 11.1. Соотношение производства стекла по подотрасли

Подотрасль	% от общего числа
Тарное стекло	52,8
Листовое стекло	25,2
Сортовое стекло	3,9
Специальное стекло	3,1
Стекловолокно	2,4
Прочие производства	12,6

Производство листового стекла является вторым по величине сектором в стекольной промышленности Российской Федерации, который составляет приблизительно 25% от общего объема производства стекольной продукции. В настоящее время в Российской Федерации производится только один вид листового стекла — флоат-стекло, которое используется для

изготовления изделий строительного, технического и мебельного назначения. В прошлые годы в стране функционировали предприятия, выпускавшие листовое стекло методом вертикального вытягивания, прокатное стекло (в том числе армированное).

В год сектор производит приблизительно 2,7 млн т стекла на 12 флоат-линиях компаний, работающих в Российской Федерации. Изготовление листового стекла в Российской Федерации представлено как ведущими международными (Asahi Glass, NSG, Guardian Industries, Sisecam, Saint-Gobain), так и такими известными российскими компаниями, как АО «Салаватстекло», АО «СаратовСтройСтекло», АО «Каспийский завод листового стекла».

Основные производственные мощности расположены в центральной и южной частях Российской Федерации, а также в Республиках Башкортостан, Дагестан и Татарстан.

Основными сегментами рынка листового стекла в Российской Федерации являются светопрозрачные конструкции и интерьерное стекло (75–85%), остальные 15–25% приходятся на автомобильную промышленность и транспортное машиностроение, а также производство мебели и бытовой техники. Открытие дополнительных современных стекольных заводов позволило практически полностью заместить импорт стекла стекольной продукцией российского производства. Российская стекольная индустрия является одной из самых конкурентоспособных отраслей отечественной экономики: большинство заводов построены в последние 10 лет в соответствии с лучшими мировыми стандартами и выпускают качественную конкурентоспособную продукцию. Подтверждением тому является активное развитие несырьевого экспорта. Помимо таких традиционных рынков сбыта, как страны СНГ, российская стекольная индустрия активно завоевывает новые рынки.

Тарное стекло — одна из наиболее крупных подотраслей стекольной промышленности Российской Федерации, занимающая более 50% рынка выпускаемой отраслью продукции. В среднем в год в стране производится около 7 млн т тарного стекла.

Потребление данной продукции в разных сегментах экономики показано на рис. 11.1.

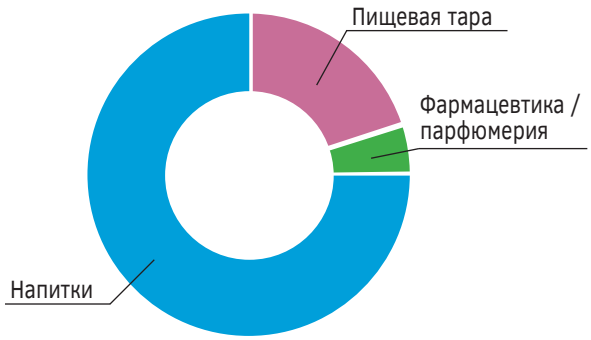


Рис. 11.1. Потребление тарного стекла в разных сегментах экономики

По данным на 2015 г., в Российской Федерации функционировали несколько десятков предприятий по производству стеклотары; характерная мощность производственных линий варьирует от 150 до 300 т стекломассы в сутки. Типичное распределение установок в пределах различных диапазонов производительности отображено в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Распределение установок в пределах различных диапазонов производительности

Диапазон мощности производственных линий (т/сут)	< 150	От 150 до 300	От 300 до 600
Количество предприятий в каждом диапазоне	12	63	8
Доля предприятий в каждом диапазоне, %	15	75	10

Из-за транспортных расходов большая часть стеклянной тары продается в пределах 500 км от места производства. В секторе парфюмерно-косметической промышленности ситуация иная, и импорт может составлять более 40% потребления.

Основные предприятия по производству листового и тарного стекла в Российской Федерации представлены в табл. 11.3 и рис. 11.2.

Таблица 11.3. Основные производители листового и тарного стекла в Российской Федерации

№ на карте	Регион	Предприятие
Производство листового стекла		
2	Ставропольский край	АО «ЮгРосПродукт»
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»
12	Нижегородская область	АО «Эй Джи Си Борский стекольный завод»
14	Республика Татарстан	ЗАО «Тракья Гласс Рус»
15	Республика Башкортостан	АО «Салаватстекло»
Производство тарного стекла		
1	Республика Северная Осетия — Алания	ООО «Луч»
5	Калужская область	ОАО «Березичский стекольный завод»
6	Московская область	ЗАО «Дмитровский стекольный завод»
		ОАО «Клинский стекольный завод»
		ООО «Сергиево-Посадский стеклотарный завод»
		ООО «Солнечногорский стекольный завод»
8	Пензенская область	ЗАО «Никольский завод светотехнического стекла»
10	Владимирская область	ОАО «Гусевский стекольный завод им. Дзержинского»
		ООО «Завод Символ»
		ООО «Красное Эхо»
		ООО «Опытный стекольный завод»
11	Ленинградская область	ОАО «Киришский стекольный завод»
12	Нижегородская область	АО «Балахнинское стекло»
13	Вологодская область	ООО «Чагодощенский стекольный завод»
14	Республика Татарстан	ООО «Васильевский стекольный завод»
16	Удмуртская Республика	ООО «Факел»
17	Омская область	ООО «Омский стекольный завод»

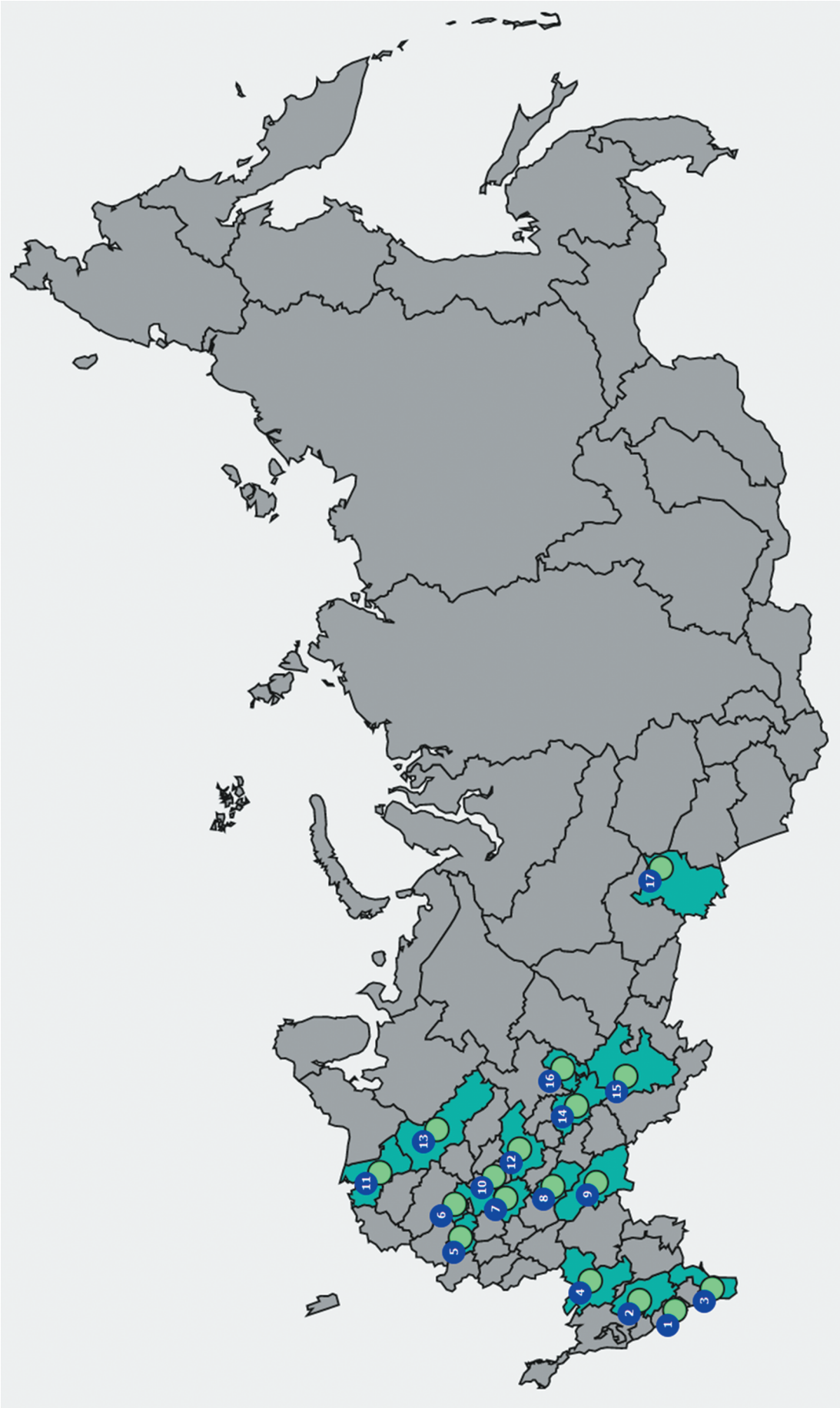


Рис. 11.2. Карта-схема основных производств листового и тарного стекла Российской Федерации

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение стекольной промышленности в мире

Еще в каменном веке люди научились обрабатывать вулканическое стекло (обсидиан), из него делали наконечники стрел, копий и другого режущего инструмента (см. рис. 11.3).

Рис. 11.3. Наконечник из обработанного обсидиана

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

Наиболее ранняя «теория» происхождения стекла предложена римским ученым Плинием Старшим в «Естественной истории»: «Однажды, в очень далекие времена, финикийские купцы везли по Средиземному морю груз добытой в Африке 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».

Рис. 11.4. Стеклянные бусы

Эта «теория» является, скорее, красивой легендой, так как образование стекла на открытом пламени простого костра невозможно. Скорее всего, стекло стало побочным продуктом при производстве керамики или металлов.

Открыв для себя новый удивительный материал, люди начали изучать его свойства и внедрять в свою жизнь. Одними из первых обнаруженных изделий из стекла стали украшения.

Наиболее древние фрагменты стеклянных изделий, обнаруженных при археологических раскопках, датируются III тысячелетием до н. э. (рис. 11.4).

Исходным сырьем для изготовления стекла служили песок, известь и щелочь — органическая (зола растений) либо неорганическая (сода).

Древнеегипетские стеклоделы не умели получать прозрачное стекло, ведь для этого нужна температура около 1500° С, поэтому первые бусины были окрашены в разные цвета.

Стекло окрашивали, добавляя в состав различные компоненты. Особенно распространенным было голубое и бирюзовое стекло, окрашенное медью, а зеленое стекло получали окрашиванием медью и железом.

Ученые восстановили в общих чертах технологию стеклоделия Древнего Египта по фрескам и руинам стекольных мастерских.

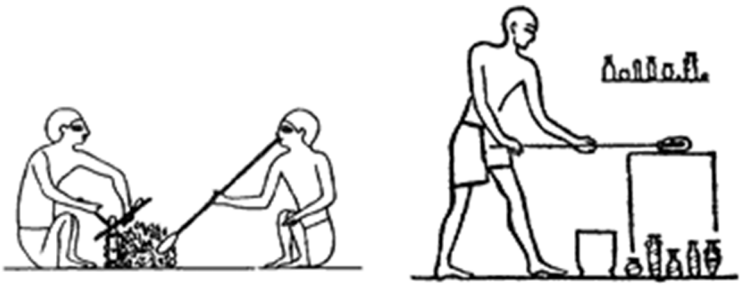


Рис. 11.5. Процесс изготовления стекла, Древний Египет

Рис. 11.6. Кубок Тутмоса III

Следующим шагом стало изготовление посуды из стекла. На фото ниже древнейший стеклянный кубок фараона Тутмоса III (1450 до н. э.).

Хотя к XV в. до н. э. стекло массово производилось не только в Египте, в Передней Азии и на Крите, только к IX в. до н. э. были открыты технологии производства бесцветного стекла.

В каждом регионе существовали свои особенности производства стекла, мастерство и технологии передавались в строжайшей тайне от мастера к ученику. Первое известное «пособие» по стеклоделию датируется 650 г. до н. э. и представляет собой таблички, хранившиеся в библиотеке ассирийского царя Ашшурбанипала.

Во времена распространения греческой культуры на данные регионы произошло дальнейшее развитие технологии стеклоделия, что позволило производить стеклянные изделия большого размера, в том числе столовую посуду. В этот период бесцветное стекло начало цениться особенно высоко, были усовершенствованы технологии его изготовления.

Величайшим периодом в истории стекла (в период Римской империи) стало изобретение стеклодувной трубки сирийскими мастерами между 27 г. до н. э. и 14 г. н. э.; с ее помощью человек научился выдувать стекло и придавать стеклянным предметам желаемую форму и размер.

Изобретение выдувания составило основу не только древнего, но и современного методов изготовления стеклянной посуды, а впоследствии и оконного стекла!

Ранее метод выдувания являлся вспомогательным, но в этот период стал самостоятельным приемом и породил не одну сотню предметов искусства.

В то время Сирия находилась под протекторатом Римской империи, что поспособствовало расцвету стеклодувного дела и распространению его по всем провинциям.

Примерно в это же время в Древнем Риме начали применять оконное литое стекло и стеклянные пластинки для облицовки стен. Его получали методом литья на плоскую каменную поверхность; качество такого стекла, конечно, не сравнить с современным.

Появление листового стекла подтолкнуло мастеров Византии к разработке технологии производства смальты — цветного стекла с добавлением в сырьевую стекломассу металлов (золото, медь, ртуть) в различных соотношениях. В Византии научились изготавливать несколько сотен различных цветов смальты, что существенно расширило возможности искусства мозаики.

Смальту отливали в листы или блины, кололи на относительно одинаковые кусочки и из них составляли мозаику.

Наиболее древние сохранившиеся образцы византийских мозаик относятся к III–IV вв.

Такие композиции из аккуратно выложенных мелких и более-менее одинаковых по размеру кубиков создали славу византийским мозаикам, которые пришли на смену римским, выполненным из мелких кубиков камня (рис. 11.7).

Рис. 11.7. Мозаика, Византия

Зарождение стекольной промышленности в России

Развитие стекольной отрасли в России датируется XVII столетием, когда в стране началось строительство стекольных заводов, освоение известных на тот период технологий стекловарения, освоение достаточно широкого ассортимента стекольных изделий.

Первый стекольный завод в России был построен в 1631 г. в селе Духамино в 50 км от Москвы.

В 1669 г. вошел в эксплуатацию завод стеклянной посуды в Измайлово.

В период 1706–1720 гг. в России было построено шесть стекольных заводов, в том числе пять заводов под Москвой и один на реке Гусь во Владимирской губернии. На заводе на Воробьевых горах российские стеклоделы освоили производство зеркального стекла площадью более 4,5 м^2. Во второй половине XIX в. в России строительство стекольных заводов, освоение существующих в мире технологий и становление российской школы ученых в промышленности, в том числе и стекольной, развивается интенсивно.

Уже в 1879 г. в России насчитывалось 173 стекольных заводов как казенных, так и частных.

В СССР 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 производству оконного стекла СССР превзошел США.

Стекольная промышленность России является достаточно развитой в промышленном отношении отраслью, производящей широкий ассортимент стекольной продукции для различных отраслей народного хозяйства и бытовых целей.

Стекольная отрасль на производство стекла и стекольных изделий потребляет более 5,0% топлива, почти 9% электроэнергии, 7,5% минеральных ресурсов от общего их 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.

В структуре стекольного производства следует выделить процессы стекловарения и последующей переработки для создания стеклянных изделий для отдельных отраслей народного хозяйства, оконного листового стекла для остекления промышленных объектов и гражданского строительства, стекла для автомобильного и рельсового транспорта, для производства мебели, производства тарного стекла, сортового стекла.

В настоящее время в России действует несколько заводов по производству флоат-стекла с 12 производственными линиями. В 2017 г. в России произведено 107 935 тыс. м листового стекла, флоат-стекло составляет основную массу продукции отечественных заводов.

Внедрение флоат-метода позволило существенно повысить качество стекла, расширить ассортимент продукции, производимой на основе флоат-стекла, учитывая возможность создания изделий любой формы при нагреве стекла, обрабатывать поверхность стекольного листа специальными покрытиями с целью регулирования освещенности, теплоизоляции, повышения безопасности и пр.

Массовое производство флоат-стекла высокого качества и снижение цены за счет роста производства значительно расширило область применения стекла в мире и в России.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛА

Появление листового стекла в истории цивилизации не было революционным, а скорее, событием местного значения. Потребность в нем сформировалась с изменением устройства человеческого жилья и организации в нем комфортных условий жизни человека, а именно температуры и освещенности. За тепловые характеристики жилья в большей степени отвечают стены, полы и потолки зданий, а проникновение света возможно только через специально организованные отверстия — окна. Необходимость в дневном освещении внутренних помещений появилась тогда, когда люди начали строить многокомнатные жилища и появились книги. До этого времени отверстия в стенах были разной формы и служили для вентиляции или были сторожевыми, и в холодное время их закрывали шкурами или слюдой и другими прозрачными материалами. Известны случаи, когда в домах римских патрициев делали прямоугольные проемы, которые заполняли плоским литым стеклом. Оно было редким, дорогим, и позволить себе такую роскошь могли далеко не все состоятельные люди. Массовое остекление окон началось только в эпоху Возрождения, откуда и начинается новая эра существования листового стекла. Первые два этапа истории стеклоделия — древний, или египетский, этап до 100 г. до н. э. и римско-средневековый — были подготовительными и показали человечеству пользу от этого материала в устройстве жилищ и других строений.

Стеклоделы Древнего Египта в II тысячелетии до н. э. не знали о прозрачности материала, который они изобрели, поскольку первые стекла, с которыми они работали, были интенсивно окрашены в массе и имитировали природные камни. Основными методами формования в эту эпоху были методы пластического формования — навивания вязкой стекломассы на глиняно-песчаный сердечник для получения сосудов, или раскатывание ее на глиняной плите для получения заготовки для блюда или чаши. Египтяне отработали технологию литья прозрачной стекломассы на плоскую поверхность и получения плоских отливок массой не более 2 кг и толщиной от 6 до 10 мм незадолго до падения царства египетского. Размеры таких «оконных» стекол были не более чем 200 х200 мм, и для того чтобы сквозь них было хоть что-то видно, их шлифовали и полировали.

Во времена Римской империи, до изобретения стеклодувной трубки, предпринимались попытки производства стеклянных зеркал. Для этого прозрачную стекломассу выливали на глиняную или каменную плиту, прокатывали, шлифовали и полировали, а затем наклеивали металлическую пластинку или фольгу. Однако эта технология не получила широкого распространения, поскольку получить пластинку из прозрачного бездефектного стекла было сложнее, чем отполировать бронзовую или медную пластинку.

Технология лунного стекла, которая появилась с изобретением стеклодувной трубки на рубеже Старой и Новой эры, дала новый толчок к появлению оконного стекла.

Изготовление плоского стекла происходило следующим образом. На стеклодувную трубку из стекловаренного горшка брали порцию горячей стекломассы и выдували стеклянный шар. Затем сплющивали горячее стекло, перемещая конец стеклодувной трубки с шаром вверх под действием силы тяжести, и прикрепляли к центру плоской части понтию[1]. После отделения стеклодувной трубки заготовку в виде эллипсоида разогревали в печи и с помощью действия центробежной силы, возникающей при вращении, и дощечек-гладилок добивались полного разворачивания заготовки в плоский диск диаметром от 500 до 700 мм. Затем понтию отделяли и диск отжигали. В центре полученного диска было утолщение и след от удаления понтии, который шлифовали и полировали. Толщина диска уменьшалась от цента к краю, иногда на нем оставались концентрические круги, образовавшиеся при вращении заготовки, однако стекло получалось тонким и прозрачным, через него можно было смотреть и из него можно было вырезать прямоугольники или квадраты для вставления в оконные рамы. В Древнем Риме появились дома, принадлежащие патрициям, с застекленными окнами.

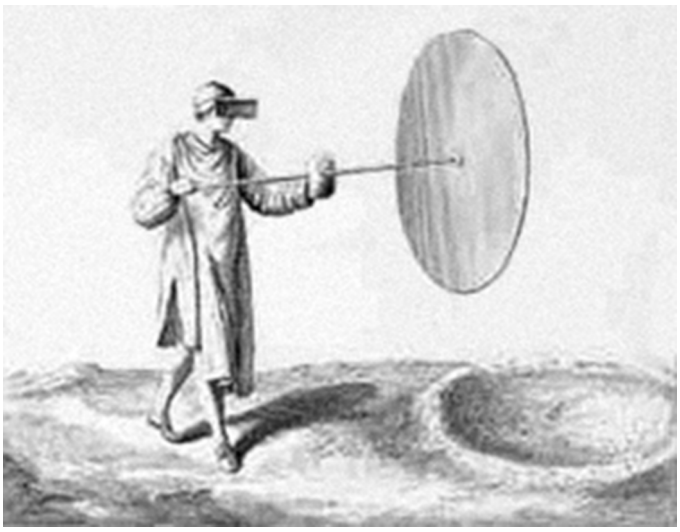


Рис. 11.8. Производство лунного стекла

[1] Понтия — стальной стержень с приваренным к одному концу диском, к которому прикрепляется выдутое изделия для отделки горла, ручек и ножек и переноски его в печь отжига.

После крушения Римской империи, в раннее Средневековье — эпоху зарождения государств Европы, интерес к листовому оконному стеклу снизился. Но для строительства христианских и католических храмов понадобился материал, украшающий оконные проемы. Особенностью устройства церковных сооружений является необходимость света в алтарной части храма и полумрак в остальных частях. Для таких окон нужно было не прозрачное, а цветное стекло с неровной поверхностью. Этим требованиям вполне удовлетворяло стекло, полученное методом ручного проката отливки на плоской поверхности.

Таким образом, история оконного, в современном понимании, стекла началась в эпоху Возрождения с технологии холявного стекла, когда выдутый с помощью стеклодувной трубки цилиндр разрезали по высоте, разворачивали и получали прямоугольные листы. И тогда прямоугольный оконный проем со стеклом становится непременной архитектурной деталью практически всех зданий и сооружений.

Технология листового стекла, способная обеспечить оконным и зеркальным стеклом дома не только представителей высших слоев и сословий, появилась в эпоху Возрождения усилиями стеклоделов Венецианской республики. К этому времени были усовершенствованы приемы варки, позволяющие получать прозрачное бесцветное стекло хорошего качества, высокой белизны и с минимальным содержанием пороков стекловарения. Кроме того, технологии полых изделий из стекла были доведены до немыслимого совершенства. И немаловажно, развитие городов требовало прозрачных материалов для заполнения оконных проемов. Сочетание этих факторов и породило технологию получения листов стекла более совершенного качества, чем из лунного стекла.

Последовательность приемов была следующая. На стеклодувную трубку набирали не менее 10 кг горячей стекломассы и выдували цилиндр диаметром не менее 400 мм с толщиной стенки 4–5 мм. Затем его укладывали на специальную платформу, отрезали стеклодувную трубку и нижнюю закругленную часть и разрезали вдоль оси. После чего на платформе закатывали в печь, разогревали до температуры выше требуемой для стеклования и разворачивали с помощью специальных приспособлений сначала в печи, а потом уже на воздухе, чтобы зафиксировать форму листа. Затем листы отжигали в печах отжига и резали на необходимые размеры. Поскольку все перемещения листов стекла в горячем и холодном состоянии осуществляли вручную, важно было не нанести царапин на их поверхность и не ухудшить качество формования.

Цилиндры можно было делать широкими, с диаметром более 1000 мм, и короткими, длиной не более 500 мм, тогда длина листа определялась длиной окружности. Если цилиндры выдували диаметром не более 500 мм и длиной до 2000 мм, то длина листа была длиной цилиндра, а ширина — длиной окружности.

В XX в. механизация добралась и до методов формования плоского стекла: вертикального (метод Фурко) и горизонтального (метод Кольберна) вытягивания, непрерывного проката и плавающей ленты (флоат-способ). Механизация производства листового стекла позволяет удовлетворять непрерывно растущий спрос на него в связи с разработкой новых видов продукции и новых областей применения.

История бутылки начинается в Древнем Египте с производства парфюмерной тары — сосудов для благовоний — методами пластического формования. Остановимся подробнее на развитии стеклоделия к началу I тысячелетия до н. э. В начале II тысячелетия до н. э. составы стекол остаются многощелочными в сравнении с современными. Содержание оксидов натрия и калия в них остается на уровне 30, известь — карбонат кальция — вводится в количестве не более 4–5 и на долю песка — оксида кремния — приходится порядка 65 мас.%. К началу периода Античности составы стекол, которые унаследовали стеклоделы Римской империи, содержат около 65–75% кремнезема, 20% оксида натрия и 8% оксида кальция, т. е. содержание основных компонентов в них приближается к показателям, характерным для современных составов стекол. В состав стекла вводят вспомогательные материалы: оксид свинца для увеличения длины стекла, оксид олова для получения молочных стекол и оксиды

марганца, кобальта и сурьмянокислый свинец для получения фиолетовых, синих и желтых стекол.

Технологии варки стекол этого периода удалось установить благодаря раскопкам в местности, расположенной в среднем течении Нила под названием Тель-эль-Амарна. Там было раскопано несколько стекольных мастерских с остатками оборудования, по которым удалось восстановить технологию двухстадийной варки стекол.

Первоначально для варки стекла использовали 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, разделяющая этапы силикато- и стеклообразования с осветлением и гомогенизацией. На первом этапе шихту сплавляли в высоких горшках, затем их разбивали, вынимали наиболее оплавленные куски, которые складывали в плоские чаши. На втором этапе производили варку в тонком слое, что позволяло более успешно завершить процессы 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, для того чтобы было удобней регулировать температуру варки. Максимальные температуры, которые можно получить в таких условиях, не превышали 850–1000° С. Впоследствии место, где варили стекло, стали окружать стенами, что позволяло несколько увеличивать и сохранять температуру пламени. Вспомогательными рабочими инструментами служили черпаки, металлические и глиняные, ножницы и палочки для отделения порций стекломассы, глиняные формы и плиты для отливки изделий.

Первые технологии формования сосудов были заимствованы из распространенной в то время 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 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 их внутренней и наружной форм.

Главным приемом украшения сосудов для благовоний было навивание на их поверхность тонких стеклянных цветных нитей и «расчесывание» их специальными деревянными гребнями.

Следующий период развития технологии стекла назван **римским**, поскольку основное завоевание этого цикла было совершено на территории Римской империи в I столетие до н. э.

Предшествовало этому изобретению распространение стеклянных изделий как дорогостоящего товара по обе стороны от Средиземного моря и активное освоение и развитие

стеклоделия в Древней Греции. Стеклоделы северного побережья использовали для изготовления стекла свои природные материалы и, таким образом, произвели замену щелочного компонента в составе стекла, а именно натрия на калий. Как известно сегодня, увеличение содержания иона калия приводит к увеличению длины стекла и расширению температурного интервала формования. Изменение состава стекла, повышение температуры пламени в закрытых плавильнях с использованием поддува воздуха привело к получению хорошо проваренных, слабо окрашенных однородных стекол, вполне пригодных для изготовления тонкостенных изделий. Оставалось только изобрести способ, который позволял бы их изготавливать. И такой способ появился, хотя имя автора изобретения так и осталось неизвестным.

Изобретение стеклодувной трубки с полным правом называют первой революцией в технологии стекла, поскольку, как впоследствии было показано, с ее помощью можно изготавливать любые виды изделий, практически без ограничения форм и размеров.

В эпоху расцвета Римской империи, а именно за пару столетий, на рубеже старой и новой эры, были разработаны основные приемы **свободного выдувания** и **выдувания в формы** полых и плоских стеклянных изделий.

Однако нельзя сказать, что с появлением метода выдувания стеклянная бутылка стала предметом массового спроса. Традиции хранения продуктов того времени предполагали использование глиняной посуды для хранения и металлических — для сервировки стола. Для воды использовали деревянные бочки, тыквенные или керамические бутыли или кожаные меха. Воины, охотники или крестьяне носили с собой напитки на поясе или приторачивали к седлу. Поэтому стеклянная бутылка без ушек, цилиндрической формы, запечатанная сургучом или воском, не пользовалась спросом ни во времена Римской империи, ни в раннем Средневековье. К началу эпохи Возрождения нормой стали изделия из бесцветного прозрачного стекла, моду на которые утвердила Венецианская республика. Белизну стекла обеспечивало использование чистых песков, обесцвечивателей, вводимых в состав шихты, и соблюдение окислительно-восстановительных условий варки стекол.

Венецианцы внесли неоценимый вклад в технологии производства сортового и листового стекла. Что касается стеклянной бутылки, то венецианские мастера занимались эксклюзивной стеклянной тарой — выдували бутылки в металлические формы с рельефом, изображающим батальные или пасторальные сцены, орнаменты, портреты и т. п. По сути, они стояли у истоков нанесения на бутылки фирменного клейма в процессе ее формования.

История распространения стеклянной бутылки неразрывно связана с историей виноделия, особенностями разных видов виноградных напитков и способами их создания и хранения.

Заводское производство стекла в России началось в 1635 г.. Примерно в то же время освоили и выпуск бутылок. Первая отечественная бутылка была выпущена на стекольном заводе, построенном в районе нынешней подмосковной станции Истра, и предназначалась только для аптекарских целей.

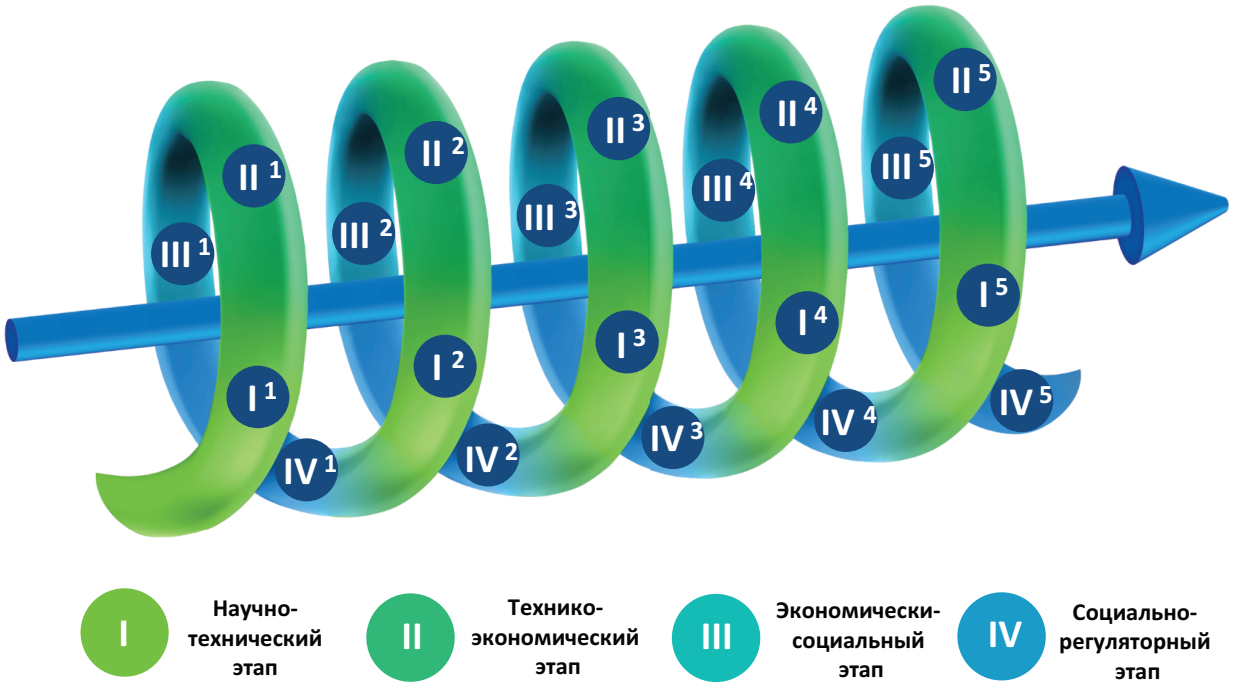
Эволюция технологий производства стекла

Каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется.

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения (табл. 11.5, рис. 11.19).

Таблица 11.5. Основные этапы технологических циклов развития производства стекла

Период	Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономически-социальный этап	Социально-регуляторный этап	Основные источники энергии	Технологические лидеры
IV тыс. до н. э. — 500-е гг. до н. э.	Первый	Появление первых горшковых печей	«Египетская печь»	Украшения — бусы, браслеты; глазурованные керамические фигурки, сосуды для благовоний; чаши и блюда	Ремесленное производство стекла при дворах фараонов и крупных храмовых центрах	Дерево, травянистые растения	Египетское царство
500-е гг. до н. э. — 448 г. н. э.	Второй	Изобретение стеклодувной трубки	Закрытая зона варки, поддув воздуха для увеличения температуры пламени	Бесцветная стеклянная посуда, посуда из цветного стекла, стеклянная тара, плоское лунное стекло и отливки с подпрессовкой или «прокатом»	Образование бригад стеклодувов, рост количества производителей стекла	Теплоноситель — дрова, возможно уголь	Римская империя
XII–XV вв.	Третий	Холявный метод изготовления листового стекла. Новые методы декорирования (накладное стекло; атласное стекло; венецианская нить; миллефиори; кракле; пузыри в стекле)	Многогоршковые закрытые печи с нижним подводом пламени, горшки из огнеупорной глины	Тонкостенная декоративная сортовая посуда из цветного и бесцветного стекла. Узкогорлая стеклянная тара, в том числе аптекарская. Зеркала из плоского стекла, полученного холявным методом, люстры	Первые мануфактуры	Дрова, уголь	Венецианская республика
XVI–XVII вв.	Четвертый	Варка хрустальных стекол. Методы холодной обработки хрустальных изделий: гранение и резьба	Многогоршковые печи с нижним подводом пламени	Посуда из бесцветных и накладных стекол с высоким показателем преломления, украшенная резьбой, гранением и гравированием	Переход от мануфактур к частичной механизации	Дрова, черный и бурый уголь, торф	Богемия, Франция, Англия
XIX–XX вв.	Пятый	Метод Фурко, метод Кольберна, флоат-процесс	Регенеративная стекловаренная печь. Машина для вертикального вытягивания листа стекла.Карусельный автомат для выдувания бутылки	Рост производства листового стекла	Промышленное производство, автоматизация	Уголь, природный газ	Германия, Бельгия, США, Великобритания



I 1 — Появление первых горшковых печей
II 1 — «Египетская печь»
III 1 — Украшения — бусы, браслеты; глазурованные керамические фигурки, сосуды для благовоний; чаши и блюда
IV 1 — Ремесленное производство стекла при дворах фараонов и крупных храмовых центрах

I 2 — Изобретение стеклодувной трубки
II 2 — Закрытая зона варки, поддув воздуха для увеличения температуры пламени
III 2 — Бесцветная стеклянная посуда, посуда из цветного стекла, стеклянная тара, плоское лунное стекло и отливки с подпрессовкой или «прокатом»
IV 2 — Образование бригад стеклодувов, рост количества производителей стекла

I 3 — Холявный метод изготовления листового стекла. Новые методы декорирования (накладное стекло; атласное стекло; венецианская нить; миллефиори; кракле; пузыри в стекле)
II 3 — Многогоршковые закрытые печи с нижним подводом пламени, горшки из огнеупорной глины
III 3 — Тонкостенная декоративная сортовая посуда из цветного и бесцветного стекла. Узкогорлая стеклянная тара, в том числе аптекарская. Зеркала из плоского стекла, полученного холявным методом, люстры
IV 3 — Первые мануфактуры

I 4 — Варка хрустальных стекол. Методы холодной обработки хрустальных изделий: гранение и резьба
II 4 — Многогоршковые печи с нижним подводом пламени
III 4 — Посуда из бесцветных и накладных стекол с высоким показателем преломления, украшенная резьбой, гранением и гравированием
IV 4 — Переход от мануфактур к частичной механизации

I 5 — Метод Фурко, метод Кольберна, флоат-процесс
II 5 — Регенеративная стекловаренная печь. Машина для вертикального вытягивания листа стекла. Карусельный автомат для выдувания бутылки
III 5 — Рост производства листового стекла
IV 5 — Промышленное производство, автоматизация

Рис. 11.19. Эволюция технологий производства стекла

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Современный мир озадачен проблемой рационального использования природных ресурсов и снижения вредного воздействия на окружающую среду. Для решения этих проблем необходимо соответствующим образом подходить к современным технологиям, особенно когда они касаются многотоннажных и энергозатратных производств, таких как производство стекла. Но прежде чем анализировать современные производства, необходимо разобраться в вопросах их возникновения и формирования, поскольку невозможно что-то менять в привычном порядке действий, если не знаешь, по каким причинам этот порядок именно такой.

Наибольший объем производства изделий из стекла приходится на стеклянную тару, затем идет листовое стекло, затем сортовое и большая группа специальных стекол, куда относятся и оптические стекла, и медицинские, и электровакуумные, и стекловолокно и т. д.

В производстве стекла существует единая технологическая схема — последовательность основных операций, которая эффективна при получении большинства видов изделий. Поэтому анализировать и сравнивать технологии целесообразно именно по ним.

Мы выделим в технологии стекла следующие основные переделы:

– **сырьевые материалы**, требования к ним, методы подготовки, составление шихты и ее подача в стекловаренную печь;
– **варка стекла**, стадии процесса стекловарения, влияние состава стекла на условия варки, температурно-временные режимы варки, типы печей, их конструктивные особенности и эффективность работы;
– **формование изделий**, способы формования и виды получаемых с их помощью изделий, отжиг изделий, критерии и способы оценки их качества.

Технология листового стекла

Листовое стекло сегодня — это обширная отрасль промышленного производства, включающая как изготовление самого стекла, так и переработку его в материалы, обладающие разным сочетанием физико-химических, оптических, механических и других специальных свойств (рис. 11.9).

Рис. 11.9. Ассортимент специальных стекол, производимых на основе листового стекла

Из материала, традиционно используемого для оконного остекления и изготовления зеркал, стекло превратилось в многофункциональный конструкционный материал благодаря разработке целого ряда видов и технологий нанесения покрытий, ламинирования, декоративной обработки и т. п. Достаточно сказать, что все современные гаджеты оснащены тонкими и плоскими стеклянными экранами. Сегодня большинство заводов, выпускающих листовое стекло, наряду с «сырым» бесцветным, прозрачным, необработанным стеклом, выпускают один или несколько видов специальных стекол.

Основные потребители листового стекла — это строительная отрасль и машиностроение; кроме того, есть целый ряд специальных стекол, применение которых не столь широко. Существует несколько классификаций листовых стекол: по габаритным размерам, ведущим свойствам, областям применения и т. д.

Строительство: сегодня львиная доля стекла, применяемого в строительстве, используется для изготовления стеклопакетов, где основа по-прежнему бесцветное прозрачное листовое стекло с высоким светопропусканием. Однако появились такие популярные позиции, как структурное остекление фасадов, стеклянные стены, полы и потолки и даже лестницы. Вот основной перечень и краткая характеристика используемых для этих целей стекол:

- **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;
- **армированное** — бесцветное безопасное стекло, изготавливается методом проката с запрессовкой в расплавленную стекломассу металлической сетки, используется для изготовления фонарей, дверей, межкомнатных и разделительных перегородок, толщина 6–8 мм;
- **узорчатое** — бесцветное или окрашенное в массе 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 абразиво-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°С, стекло теряет прозрачность и препятствует распространению инфракрасного излучения, толщина одного стекла в стеклопакете не менее 4 мм.

Машиностроение: плоское и гнутое 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. 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 окнах в различных транспортных средствах, возможно соединение прозрачного и тонированного листового стекла, общая толщина конструкции не менее 6 мм;
– **тонированное —** цветное листовое стекло, окрашенное в массе, 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.

Кроме того, сегодня листовое стекло широко используют в мебельной промышленности для изготовления стеклянных дверей, 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. Приведем некоторые примеры таких стекол:

– **умное** (smart window) — бесцветное или окрашенное в массе листовое стекло, в состав которого введены компоненты, изменяющие его светопропускание под действием внешних условий — фотохромные, электрохромные, стекла-шпионы, или нанесены покрытия с жидкими кристаллами — телевизионные экраны, толщина не менее 4 мм;
– **стекло для дисплеев гаджетов —** бесцветное упрочненное листовое стекло толщиной не более 2 мм;
– **антибликовое** — бесцветное листовое стекло с покрытием, показатель преломления которого ниже, чем показатель преломления стекла, обладает более низким поверхностным отражением, чем обычное, используется для остекления картин, фотографий и т. п., толщина не более 3 мм.

Производство листового стекла относится к ресурсоемким и энергоемким, поскольку для него необходимы природные материалы: песок, мел, известняк, доломит и полевой шпат, и синтетические: сода, поташ, карбонаты щелочноземельных и других металлов, в зависимости от состава стекла. Наиболее распространенным энергоносителем для отапливания стекловаренных печей является природный газ, а для работы остального оборудования технологической линии необходима электроэнергия. Кроме того, в производстве используется вода для охлаждения устройств, обслуживающих стекловаренную печь, и мешалок, установленных между зонами варки и студки стекломассы.

Отходами производства являются:

– газообразные — оксиды серы, углерода и азота, поступающие в окружающую атмосферу из дымовой трубы стекловаренной печи;
– полужидкие — шлам от механической обработки (резка, шлифование, полирование), содержащий пылевидные частицы стекла, частицы абразивного инструмента и полировальных паст;
– твердые — пылевидные частицы сырьевых материалов, огнеупорные материалы после текущего и холодного ремонта печи.

Сегодня во всем мире выпускают листовое стекло толщиной от 1 до 25 мм, длиной от 500 до 6000 мм и шириной от 400 до 3210 мм.

Все плоское стекло, производимое вплоть до XVI в., были крайне дорого и дефицитно, поэтому использовалось, как правило, для остекления жилищ состоятельных людей, правителей или храмов. С появлением и распространением холявного метода оконное стекло становится более доступным и постепенно приобретает широкое распространение. Вместе с тем вредность производства стекла и трудоемкость изготовления большого количества листов сдерживало повсеместное использование оконного стекла. На помощь пришел научно-технический прогресс, и в начале XX в. бельгийский изобретатель Э. Фурко запатентовал способ механизированного вытягивания листового стекла.

Метод вертикального (Фурко) и горизонтального (Кольберн) вытягивания

Суть метода вертикального вытягивания сводится к тому, что в расплавленную стекломассу погружают так называемую «лодочку» — специальное керамическое тело с продольной щелью (рис. 11.10*б*). Металлическую затравочную рамку опускают в щель, поднимают и при этом вытягивают стекломассу, которая прикрепилась (прилипла) к рамке и по мере подъема вытягивается в непрерывную ленту. Вытяжка производится в специальной вертикальной шахте, оснащенной устройствами, не позволяющими ленте деформироваться. На выходе из шахты лента стекла подается в печь отжига и затем на линию механизированной резки. Качество стекла, полученного этим способом, зависит от однородности распределения температуры стекломассы в подмашинной камере.

Метод Фурко быстро распространился по всей Европе, так как позволял выпускать значительное количество листового стекла. Качество поверхности полученного этими методами стекла было недостаточно высоким, и поэтому для получения изделий с высоким качеством поверхности (витрин и зеркал) его подвергали механической обработке (шлифованию и полированию). Толщина тянутого стекла составляла от 2 до 12 мм.

Другой способ вертикально-горизонтального вытягивания листового стекла разработал и реализовал американец Ирвинг Кольберн в 1916 г. Он отличался от метода Фурко тем, что на высоте 60 см от поверхности стекломассы лента перегибалась через отполированный валик и двигалась уже в горизонтальном направлении (рис. 11.10*а*).

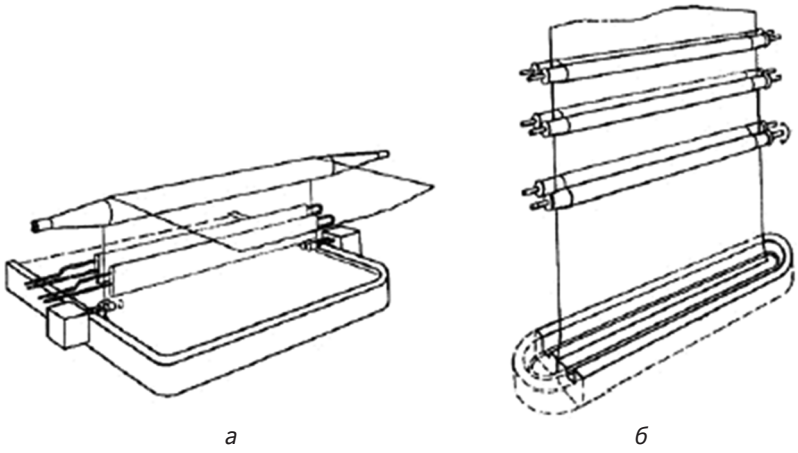


Рис. 11.10. Производство стекла методом вытягивания:
а) вертикально-горизонтальное вытягивание; *б*) вертикальное вытягивание

Однако изготовленное методами лодочного и вертикально-горизонтального вытягивания листовое стекло имело один существенный недостаток — волнистость, не обнаруживаемую визуально, которая проявлялась в искажении предметов, находящихся за стеклом. С целью улучшения качества стекла в 1928–1930 гг. был изобретен безлодочный способ вертикального вытягивания стекла, основанный на создании направленного потока стекломассы за

счет поднятия или опускания специального «поплавка». Качество стекла, полученного таким способом, было выше, но технологически его выпуск был более сложным.

Сегодня метод вертикального вытягивания используют для получения стекол толщиной менее 2 мм.

Метод непрерывного проката

Методом непрерывного проката получают узорчатое и армированное стекло. Процесс изготовления заключается в формировании непрерывной ленты стекла путем продавливания стекломассы с температурой около 1200°С между двумя вращающимися валками. Валки могут быть полированными, тогда получают прозрачное стекло, или рифлеными, тогда одна поверхность листа становится рифленой или узорчатой. Если одновременно со стекломассой между валками поместить сетку, то получится армированное стекло. Толщина прокатного стекла бывает от 3 до 15 мм.

Метод плавающей ленты. Флоат-способ

В середине XX в. прогресс в науке, промышленности и общественной жизни привел к тому, что высококачественного листового стекла стало не хватать, поэтому на смену методу вертикального вытягивания стекла пришел принципиально новый метод, дающий идеально плоский лист стекла. Это метод плавающей ленты, или флоат-метод (см. рис. 11.11).

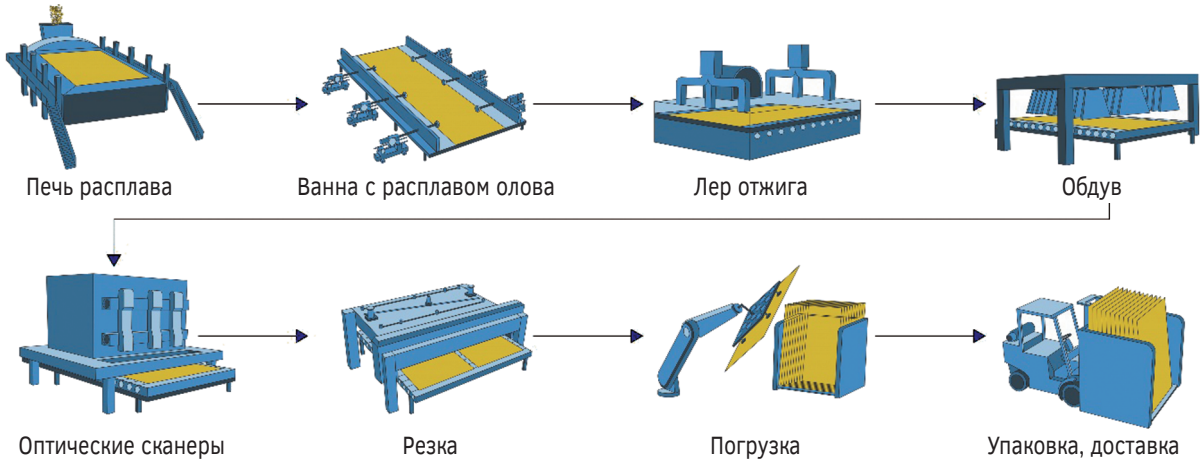


Рис. 11.11. Производство листового стекла флоат-методом

Идею получения листового стекла на расплаве олова придумали американцы В. Хилл и А. Хичкок, но до промышленного внедрения ее не довели. Флоат-метод производства листового стекла был доработан и внедрен в производство британской компанией Pilkington в 1950-е гг. и произвел переворот в стекольной промышленности. С тех пор он стал основным в производстве листового стекла во всем мире. Его популярность связана с высокой производительностью и высоким качеством поверхности стекла без какой-либо дополнительной обработки.

Формование происходит в ванне с расплавом олова, которую называют флоат-ванной. Стекломасса при температуре около 1050°С из студочной части стекловаренной печи попадает на сливной порог, через который выливается на поверхность расплава олова флоат-ванны. Обе поверхности ленты формируются с помощью сил поверхностного натяжения на границах стекло / олово и стекло / инертная атмосфера и получаются идеально гладкими,

не требующими дополнительной механической обработки. Ширина и толщина ленты регулируется при помощи бортоформующих роликов, скорости движения транспортера и постепенного снижения температуры до 800° С. Процесс формования и отжига ленты стекла идет в одной плоскости, что существенно снижает возможность ее деформации. Флоат-процесс дает возможность получать стекло толщиной от 0,5 до 25 мм, но в строительстве обычно применяются стекла от 2 до 19 мм.

Технология тарного стекла

Стеклянная тара, столь привычная сегодня, достаточно долго пробивала себе дорогу среди керамических и металлических изделий, чтобы стать наиболее доступным и удобным способом хранения жидких и твердых продуктов К слову сказать, традиционные упаковочные материалы — металлы, керамика и стекло, которые получают с помощью высокотемпературных технологий, в настоящее время существенно уступают для этих целей полимерным материалам.

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 pH 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.

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. 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.

Широкогорлую тару из бесцветного стекла емкостью от 50 до 2000 мл используют для упаковки и хранения консервированной продукции — варений, солений, компотов и т. п., а также для хранения сыпучих продуктов — муки, круп, соли, сахара, специй и т. д.; для расфасовки детского питания.

Узкогорлая бутылка из бесцветного тарного стекла используется, главным образом, для крепких алкогольных напитков, таких как водка, коньяк, бренди, ликеры, наливки и настойки; емкость бутылок составляет от 100 до 1500 мл, горлышко может быть отформовано под корковую или полимерную пробку, винтовую крышку или крышку-дозатор.

Узкогорлая бутылка из цветного стекла (коричневая, зеленая, оливковая, синяя) — основная упаковка для пива и вина; бутылки для пива выпускаются емкостью от 300 до 500 мл, для вина — от 750 до 1000 мл, горлышко пивных бутылок отформовано под крышку твист-офф, винных — под пробку или винтовую крышку.

Узкогорлая толстостенная бутылка из бесцветного или цветного стекла для газированных напитков — минеральной воды, фруктовых и ягодных напитков, игристых, шипучих и шампанских вин; бутылки для воды, как правило, емкостью от 500 до 1000 мл, для остальных напитков — от 750 до 1000 мл, горлышко бутылок для воды отформовано под крышку твист-офф, для шампанских вин — под корковую или полимерную пробку и проволочный крепеж «мюзле».

Широкогорлая бутылка из бесцветного стекла для соусов, уксуса и вина, емкостью от 300 до 1000 мл, горлышко отформовано под пробку или крышку твист-офф.

Банка из бесцветного полубелого или обесцвеченного стекла для компотов, консервов, соков и сыпучих продуктов и т. п., емкостью от 200 до 5000 мл, с горлышком под крышку твист-офф, с бюгельным замком или пробку.

Основным инструментом производства тарного стекла уже 2000 лет является стеклодувная трубка, изобретенная на Ближнем Востоке в эпоху Римской империи. Стеклодувная трубка состоит из стальной трубы, из бесшовной тянутой стали с толщиной стенок 4–5 мм, наружным диаметром от 8 до 25 мм и длиной от 90 до 150 см. Конец трубки, служащий для вдувания воздуха, спилен на конус и на него надет мундштук, который берет в рот выдувальщик. 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.

Важным вспомогательным инструментом при работе с выдувной трубкой является понтия. Кроме того, в ассортимент необходимых приспособлений стеклодувного участка входят: стальные ножницы и щипцы для удаления лишней стекломассы и придания необходимой формы горлу, ручкам и ножкам изделий; долоки и гладилки — деревянные приспособления для выравнивания стенок баночки, разглаживания поверхности изделия (рис. 11.13). Формы для выдувания делали из твердых пород дерева и хранили в специальных емкостях для замачивания форм и охлаждения металлических инструментов.

Процесс изготовления изделий ручным способом включает следующие основные стадии (схемы *а* и *б* на рис. 11.14):

- набор стекломассы из печи на стеклодувную трубку и изготовление баночки-заготовки, масса которой равна массе будущего изделия (набор стекломассы на трубку может быть многократным) (схемы *а*, позиции *1*, *4* и *5*;
- придание баночке шарообразной, продолговатой или сплюснутой формы, в зависимости от формы изделия (схема *а*, позиции *2* и *3*);
- изготовление пульки — продувание баночки при непрерывном вращении трубки таким образом, чтобы обеспечить равномерную толщину стенок изделия (схема *б*, позиция *1*);
- окончательное выдувание пульки с использованием формы или без нее и перенесение выдутого изделия с выдувной трубки на понтию (схема *б*, позиции *2* и *3*);
- отрезка колпачка и оформление горла изделия (схема *б*, позиции *4*, *5*, *6* и *7*);
- прикрепление ручек кувшинов или графинов или ножек рюмок, бокалов, конфетниц и т. п. (схемы *в* и *г*);
- отделение от понтии и помещение готового изделия в печь отжига.

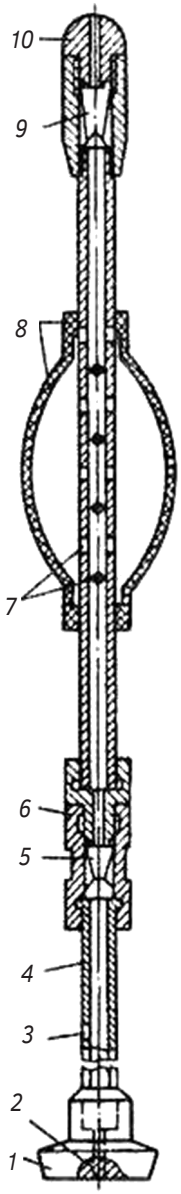


Рис. 11.12. Устройство стеклодувной трубки:

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

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

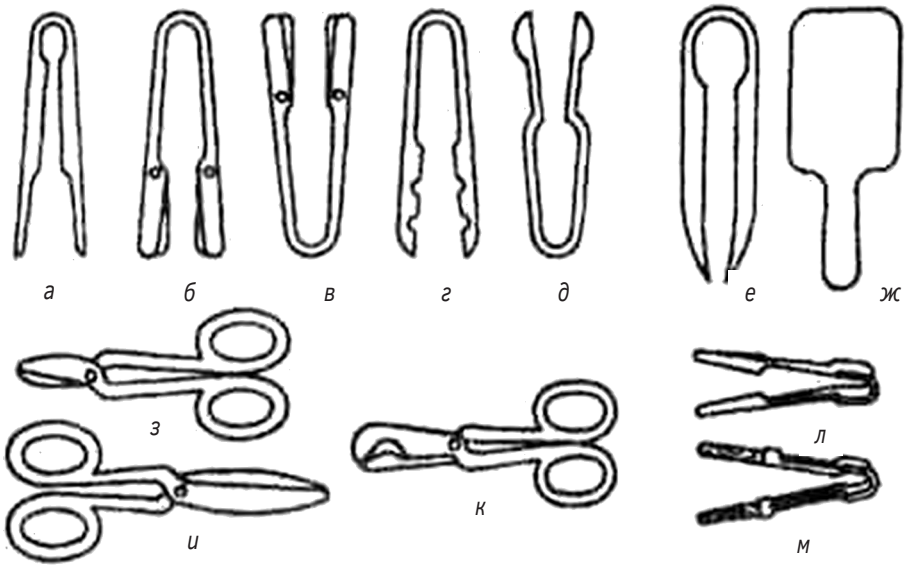


Рис. 11.13. Инструменты для ручного формования:
а–е — щипцы для отделки ручек, ножек, горла и декорирования изделий; *ж* — гладилка для выравнивания стенок изделий; *з–к* — ножницы для отрезки горячей стекломассы; *л, м* — сошки для фигурной отделки

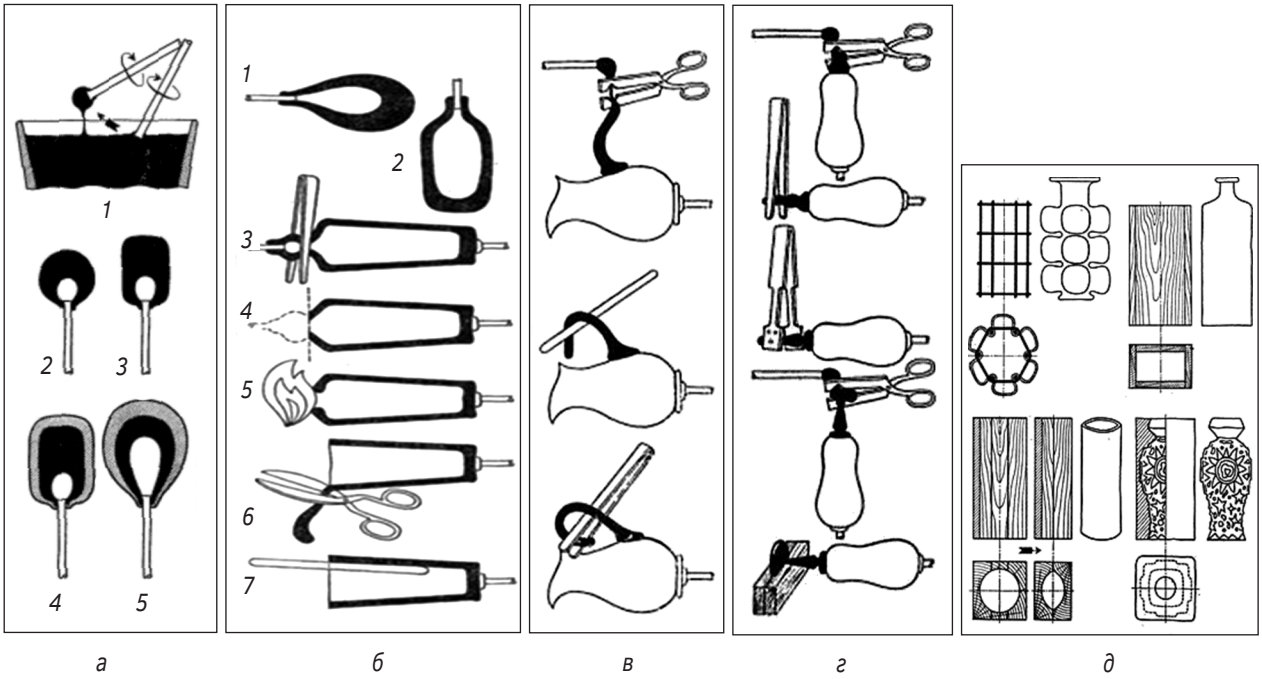


Рис. 11.14. Стадии свободного выдувание изделий (*а*, *б*, *в*, *г*) и формы и виды тиходутых изделий (*д*)

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, формуют 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 (рис. 11.14*д*).

Примерно в это же время появился способ изготовления стекол для оконных проемов, который называют лунным. Если мастер выдувал заготовку из прозрачного стекла, поднимая стеклодувную трубку вверх, он получал сплюснутый шар, к плоскости которого прикрепляли понтию и отделяли стеклодувную трубку. Затем разогревали края стекла и раскручивали заготовку до тех пор, пока не получали плоский диск, края которого были намного тоньше, чем середина. После отделения понтии, отжига и обработки места ее прикрепления получали оконное стекло, через которое проходил свет.

Многостадийность процессов ручного выдувания требует участия нескольких человек в создании каждого изделия. Сегодня специализации мастеров-выдувальщиков выглядят следующим образом (см. табл. 11.4), при этом один человек может выполнять как отдельные операции, так и несколько. В художественных мастерских, как правило, мастер владеет всеми приемами, необходимыми для изготовления всех видов выдувных изделий.

Таблица 11.4. Состав бригады и технологические операции, выполняемые при ручном выдувании изделий

Член бригады	Технологическая операция
Баночник	Набор стекломассы на стеклодувную трубку и оформление баночки
Поддувальщик	Подготовка баночки к выдуванию, при необходимости второй набор стекломассы, первичное продувание баночки
Выдувальщик	Выдувание изделие — свободное или в форму
Отдельщик	Снятие выдутого изделия на понтию, оформление горла ручек и ножек изделий
Наборщик	Набор новых порций стекломассы и изготовление ручек, ножек, донышек изделий, деталей для налепа и других способов формования
Леечник	Набор стекломассы и изготовление «леек» или воронок из цветного стекла для декорирования изделий полным или частичным накладом
Грельщик	Подогрев изделий для оформления горла, прикрепления ручек и ножек, горячего декорирования и перенос готовых изделий 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;
– получение обесцвеченных прозрачных стекол стало возможным из-за использования, в первую очередь, более чистых 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 мас. %;
– отработаны режимы получения прозрачных окрашенных в массе стекол, в том числе и розалинового, окрашенного частицами золота, и золотисто-зеленого, окрашенного солями урана;
– варка стекла снова стала одностадийной благодаря совершенствованию топочных частей печей, размещению их в закрытых помещениях и системам поддува воздуха, позволивших повысить и стабилизировать температуру пламени;
– основным способом формования изделий становится выдувание, однако остаются востребованными и литье, вытягивание и прессование;
– появляется стадия отжига изделий и устройства типа камерных печей для этой цели;
– из бесцветного и цветного стекла изготавливали следующие виды тонкостенных и толстостенных изделий: украшения, узкогорлую стеклянную тару, сортовую посуду (рюмки, бокалы, кувшины, чаши), мелкую стеклянную скульптуру.

Технология сортового стекла

Сортовым стеклом называют стеклянную посуду: стаканы, кувшины, масленки и изделия на ножке — рюмки. К сортовому стеклу также относят изготовляемые по сходной технологии пепельницы, туалетные приборы, сувенирные изделия. Требования к качеству сортового стекла очень высоки, поэтому для варки сортового стекла применяют особо чистые сырьевые материалы и, в частности, песок, содержащий минимальное количество окислов железа. В состав сортового стекла механизированной выработки вводят 2–3% K_2O. Сырьевые материалы, содержащие этот окисел (поташ и др.), дороже натриевого сырья, однако введение в состав K_2O благоприятно сказывается на внешнем виде сортовых изделий, улучшая их блеск и прозрачность. Для получения изделий особо высокого качества применяют хрустальные стекла, содержащие окись свинца, повышающую коэффициент преломления и усиливающую блеск изделий.

В производстве сортовых изделий широко используют цветные стекла самых разнообразных оттенков. Для окраски стекол применяют окислы металлов, в том числе редкоземельных, а также золото, селен, селениды. Цветные стекла можно применять как для изготовления самих изделий, так и в качестве накладных. В последнем случае на изделие из бесцветного стекла накладывается внешний слой цветного накладного стекла.

Варка сортовых стекол производится в небольших ванных и горшковых печах. В ванных печах варят стекла для механизированной выработки, а также более простые составы стекол, вырабатываемых вручную. В тех случаях, когда варка стекла требует применения особо сложного режима, используют горшковые печи. Сортовое стекло вырабатывают вручную или механизированным способом. В настоящее время удалось механизировать выработку более простых изделий, однако значительную часть сортовых изделий изготовляют вручную. Это прежде всего сложные изделия, особенно из сортового стекла, а также изделия, выпускаемые небольшими партиями.

Ручная выработка изделий обычно осуществляется бригадами в составе 4–6 человек. При выработке сортовых изделий основным инструментом является железная стеклодувная трубка длиной 1–1,5 м, снабженная деревянной ручкой. Рабочий опускает трубку в стекломассу и, вращая ее, набирает на трубку порцию стекломассы — баночку. Затем, обкатывая баночку на металлической плите, придает ей необходимую форму. При производстве изделий из накладного стекла на полученную баночку набирается из другого горшка слой цветного стекла. После окончания набора рабочий, раскачивая трубку, поднимая и опуская ее, придает баночке форму, по возможности близкую к готовому изделию. Окончательное выдувание изделия производится в металлической форме. Цилиндрические или раскрывающиеся кверху изделия выдуваются в цельных (нераскрывных) формах. Изделия другой формы изготовляют в раскрывных формах. При выдувании изделий их вращают для повышения качества поверхности.

В процесс ручной выработки изделий входят также операции окончательной отделки, осуществляемые после формования. Окончательная отделка заключается в формовании носиков кувшинов, придании частям изделия плоской формы, прикреплении ручек к кувшинам, а также ножек к рюмкам.

В процессе выработки сортовых изделий ручным способом осуществляется также их украшение, выполняемое различными способами. Один из способов украшения изделий — обвивание изделий стеклянными нитями другого цвета. Так называемое мраморное стекло изготовляют, закатывая в баночку из глушеного стекла кусочки цветного стекла. Стекло «мороз», покрытое заплавленными трещинами, получают, попеременно опуская баночку в холодную воду и вновь разогревая ее в печи.

Прессованием изготовляют относительно толстостенные сортовые изделия сравнительно простой формы: салатники, граненые стаканы, пепельницы и др. Нанося на внутреннюю поверхность форм различные рельефные узоры, получают соответствующие узоры и на

изделии. Прессование изделий осуществляется на ручных полуавтоматических и автоматических прессах.

Ручным прессованием изготовляют более сложные и крупные изделия. Набранную вручную каплю стекломассы помещают в форму пресса, после чего пуансон пресса, усилие которого обеспечивается пружинным или эксцентриковым механизмом, воздействует на каплю, придавая изделию необходимую форму.

На автоматических прессах изготовляют сортовые изделия сравнительно небольшой величины. При формовании на автоматических прессах капля стекломассы подается в одну из форм, установленных на рабочем столе пресса. После подачи капли стол пресса поворачивается, и форма с каплей поступает под пуансон. После остановки стола пуансон пневматическим цилиндром опускается в форму, прессуя изделие.

Машинным выдуванием изготовляют тонкостенные стаканы и некоторые другие изделия.

Питание автомата стекломассой осуществляется вакуумным питателем, снабженным четырьмя наборными головками, являющимися также черновыми формами автомата. Питатель, установленный на рабочем столе машины, двигаясь по наклонным салазкам, опускает наборные головки в стекломассу, после чего к наборным головкам подключается вакуум, под действием которого осуществляется засасывание в наборные головки капель необходимой массы. После возвращения питателя в исходную позицию наборные головки закрывают снизу поддонами и осуществляется предварительное прессование баночек. Баночки передаются на выдувные трубки и удлиняются под действием собственной массы, после чего происходит окончательное выдувание изделий в раскрывных формах.

При производстве тонкостенных сортовых изделий на высокопроизводительных конвейерных машинах с ленточным питанием, применяемых за рубежом, сначала формуется прокатом между двумя валками лента стекломассы. Верхний валок имеет углубления, что обеспечивает формование ленты с утолщениями. При дальнейшем движении лента поступает на горизонтальный конвейер, снабженный отверстиями, над которыми располагаются утолщения ленты. Провисая в отверстия, утолщения ленты образуют баночки. Над лентой синхронно с первым конвейером движется второй, несущий выдувные головки, при помощи которых осуществляется сначала предварительное раздувание баночки, а затем окончательное выдувание изделий в раскрывных формах, установленных на третьем горизонтальном конвейере, расположенном под первым. После раскрывания форм изделия молоточком откалываются от ленты и падают на ленточный конвейер, на котором поступают в отжигательную печь. Остатки ленты возвращаются в стекловаренную печь на переплавку. Производительность конвейерных машин достигает 170 тыс. изделий в сутки.

В последние годы удалось осуществить механизацию производства изделий на ножке. По одному способу изделия прессуют на автоматическом прессе, а полую часть формуют на вакуумном автомате, затем обе части сваривают. По другому способу изделия формуют вакуумно-выдувным способом с последующей раскаткой ножки.

После формования изделий осуществляется их отжиг, а затем операции отколки и оплавки изделий, полученных выдуванием (откалывают колпачок, соединяющий изделие с выдувной трубкой). Удаляют колпачок либо механической отрезкой, либо огневой отколкой. При огневой отколке на изделие на границе с колпачком наносят линию надреза, которую затем нагревают горелкой, что вызывает отколку колпачка. После отколки край изделия обрабатывают абразивным диском и подвергают оплавке. Прессованные изделия обычно оплавляют полностью для получения гладкой и блестящей поверхности.

Заключительной стадией обработки сортовых изделий является декоративная обработка, к которой относятся абразивная обработка, кислотное травление и декорирование изделий. Изделия механической выработки обычно подвергают только простейшему виду абразивной обработки — валовой шлифовке, при которой на поверхность изделия абразивными дисками наносят простейшие узоры, состоящие из овалов, кругов, полосок. При

изготовлении изделий более высокого качества применяют номерную шлифовку для получения как неглубоких, так и глубоких узоров. Глубокие узоры называют алмазной гранью.

Наиболее сложный вид абразивной обработки, применяемый для получения высокохудожественных изделий, — художественная гравировка, выполняемая вращающимися медными колесиками при помощи наждачной пасты, используемой в качестве абразива. В результате художественной гравировки на стекло наносят наиболее сложные и тонкие рисунки. Участки изделий, подвергнутые абразивной обработке, имеют матовую поверхность. Для придания блеска их полируют деревянными дисками или щетками или подвергают кислотной полировке — обработке смесью плавиковой и серной кислот.

Кислотная обработка (травление) может применяться для получения на поверхности сортовых изделий тонких рисунков различной глубины. При травлении изделий на поверхность стекла наносят защитный слой из мастики или воска. Затем вручную или при помощи пантографа прорезают в защитном слое рисунок. После этого изделия погружают в ванну с кислотой, где незащищенные мастикой участки поверхности травятся с образованием рисунка. В зависимости от состава травящей жидкости и продолжительности травления рисунок может быть блестящим или матовым и иметь различную глубину.

При декорировании рисунки на изделия наносят с помощью керамических красок. Для нанесения рисунка применяют, в частности, трафарет, в котором прорезан рисунок. Трафаретом закрывают поверхность изделия, а затем незакрытую поверхность изделия покрывают при помощи кисти или пульверизатора краской. По другому способу для получения рисунка используют шелковую сетку. На такую сетку наносят фотоэмульсию и освещают ее, пропуская свет через диапозитив рисунка. Обработанная таким образом сетка пропускает краску только в местах, соответствующих темным участкам диапозитива. Сетка прижимается к изделию, покрывается краской и прокатывается резиновым валиком, продавливающим краску на поверхность изделия. Наиболее массовым способом нанесения рисунков является декалькомания (переводные картинки). После нанесения рисунка изделия подаются в туннельную печь, где краски обжигаются.

Классификация и основные способы декорирования стекла

Способы декорирования стеклянных изделий нарабатывались веками, и до сих пор не всегда можно точно указать автора того или иного приема. 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.

Способы декорирования изделий принято подразделять на горячие и холодные. Горячее декорирование осуществляют в интервале температур формования в процессе изготовления изделия и после него обязательна стадия отжига, тогда как холодное декорирование проводят на хорошо отожженных готовых изделиях.

К методам горячего декорирования относят:

– методы соединения в одном изделии нескольких стекол (все виды наклада; декорирование венецианской нитью и миллефиори);
– методы декорирования стекла с не стеклянными элементами (воздушными пузырями, трещинами, гипсовыми, керамическими, металлическими и др. вставками);
– методы нанесения декоративных покрытий (люстровые и иризирующие покрытия, обжиговые краски и деколи).

Способы холодной обработки разделяются на:

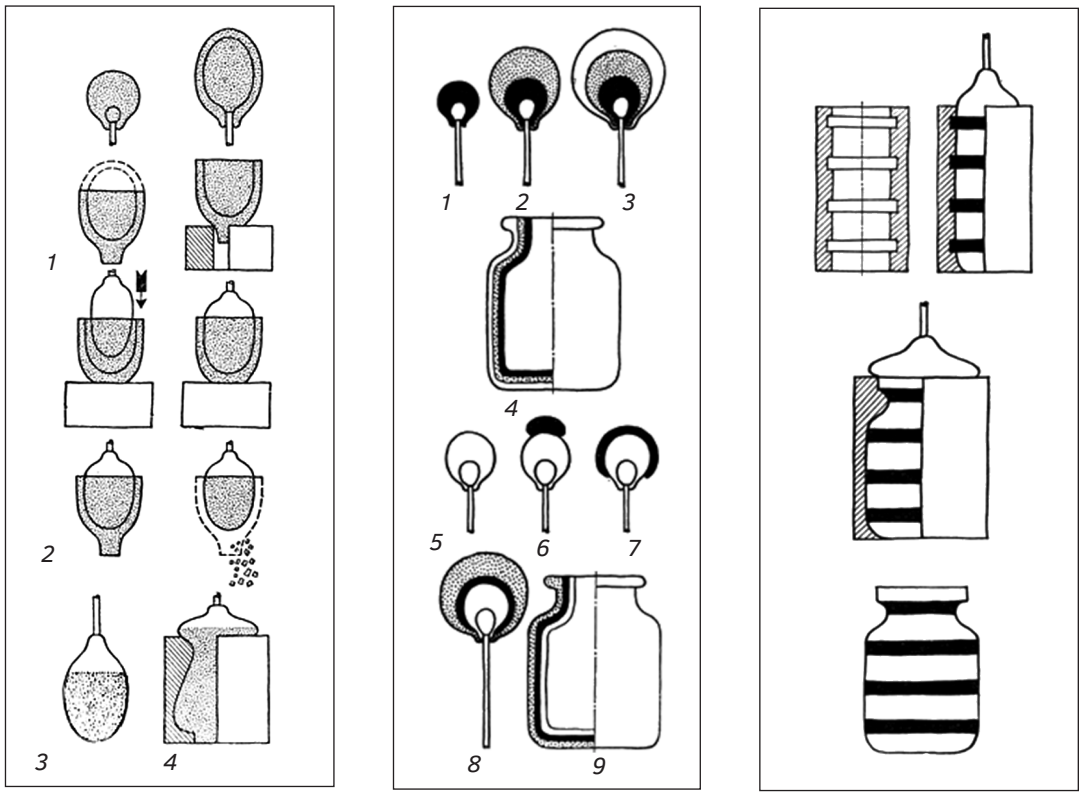
– механическую (гранение, резьба, гравирование, абразиво-струйная обработка);
– химическую (матирование и полирование);
– ультразвуковую и лазерную;
– нанесение лаковых и пленочных покрытий.

Практически все перечисленные способы горячего декорирования были разработаны в эпоху Ренессанса мастерами Венецианской республики. Жесткие законы удерживали мастеров-стеклоделов на острове Мурано. И они, унаследовавшие мастерство от предшественников — египтян, греков, римлян и византийцев, довели его до немыслимого совершенства.

Все методы, в которых требуется соединить несколько видов материалов, требуют от мастера знания их термических характеристик и, прежде всего, величин коэффициентов термического расширения. Самым простым и доступным сравнительным методом, которым пользовались старые мастера, является метод соединения двух нитей, которые накладывают одну на другую в горячем состоянии и при охлаждении общая нить выгибается в сторону материала с большим коэффициентом расширения. Растрескивание будет свидетельством невозможности совмещения таких стекол.

Существует несколько способов наложения одного стекла на другое: полный наклад, разграниченный наклад, акварельное пятно, стеклянная крошка, стеклянная нить и налеп. Полный наклад, в свою очередь, подразделяют на внутренний и наружный. Толщина накладного стекла не превышает 1 мм, тогда как толщина стенки изделия, на которую его наносят, всегда больше 2 мм. Изделие из бесцветного стекла с полным цветным накладом выглядит как изделие из стекла, окрашенного в массе.

При изготовлении изделия с полным **внутренним накладом** 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 формование изделия из нескольких равномерно распределенных слоев стекла. Для полного **наружного наклада** первым делается набор бесцветного стекла и на подготовленную баночку — цветного. Вместо набора горячего стекла для нанесения цветного слоя можно использовать заготовки — воронки (лейки) (рис. 11.15 *а*) или цапфы (рис. 11.15 *б*).



а *б* *в*

Рис. 11.15. Ручное формование, полный наружный наклад (*а*), полный внутренний наклад (*б*), разграниченный наклад (*в*)

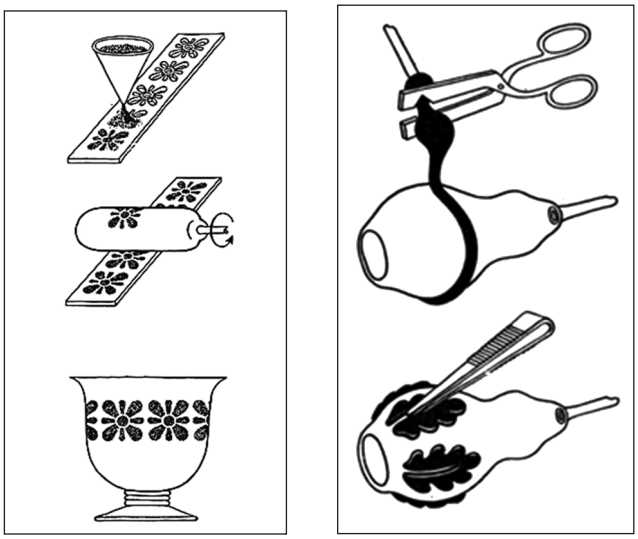
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Воронка — это заготовка из цветного стекла в виде воронки, диаметр которой меньше диаметра выдуваемого изделия, а толщина стенок около 2 мм, которую используют для получения полного наружного наклада (рис. 11.15 *а*, позиция *1*). Цапфа — это стержень из цветного стекла диаметром от 2 до 50 мм и длиной до 1000 мм, с помощью которого выполняют изделия как с внутренним, так и наружным накладом (рис. 11.15 *б*, позиции *5–9*).

Для получения **разграниченного наклада** кусочки цветного стекла помещают в пазы разогретой формы для изготовления заготовки для выдувания Горячую пульку помещают в раскрывную форму и выдувают до полного слияния цветных полосок стекла с ее поверхностью. Затем заготовку подогревают в печи, опускают в форму и окончательно выдувают изделие, в котором чередуются цветные и бесцветные полосы (рис. 11.15 *в*).

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 тонкостенный шар из цветного стекла прислоняют к заготовке для выдувания, а оставшееся стекло просто откалывают. Количество таких пятен зависит от наносимого рисунка. Затем, как и в случае разграниченного наклада, заготовку разогревают и окончательно выдувают.

Декорирование **цветной стеклянной крошкой** — один из наиболее простых и эффектных способов украшения изделий (рис. 11.16 *а*). Навивание на поверхность изделия цветной стеклянной нити и расчесывание ее специальным гребнем применяли еще египтяне во II–III тысячелетии до н. э. В настоящее время кроме нити на поверхности баночки или выдутого изделия закрепляют бисер, нанизанный на стекловолокно, стеклоткань, расшитую бисером и стеклярусом, и т. п. Украшение поверхности декоративными элементами из стекла (рис. 11.16 *б*) осуществляют, совмещая декорирование с формованием или прикрепляя на горячее выдутое изделие готовые элементы из керамики, гипса, слюды, металлической фольги.



а *б*

Рис. 11.16. Ручное формование, декорирование стеклянной крошкой (*а*), декорирование налепом (*б*)

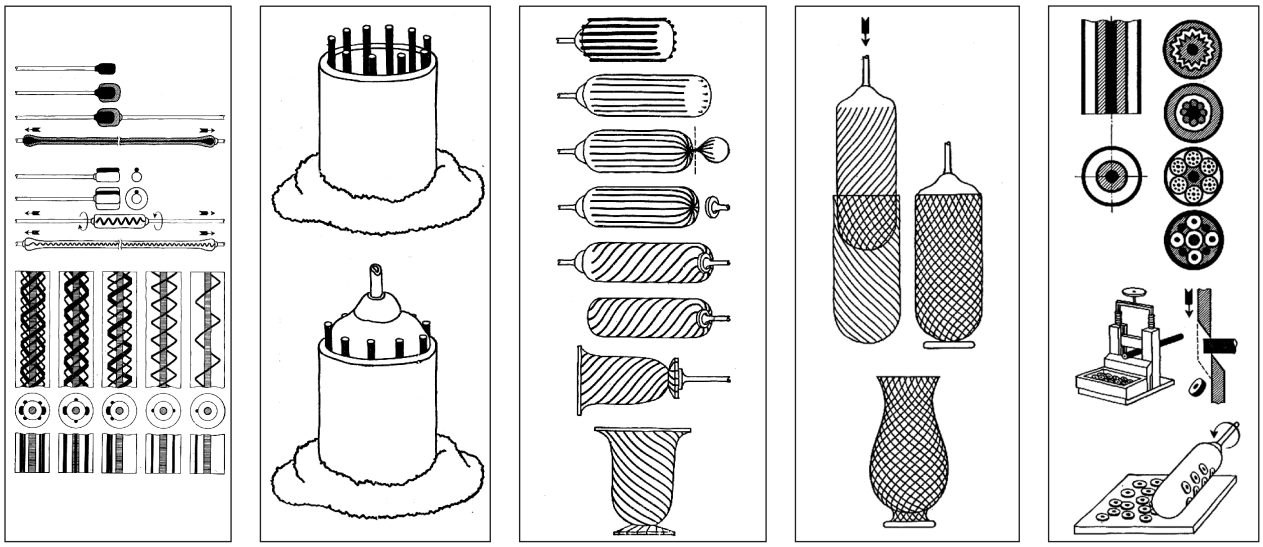
Воздушные пузыри между слоями стекла получают с помощью соединений, разлагающихся при температурах 700–900°С (сода, борная кислота, тетраборат натрия, карбонат кальция), которые наносятся на поверхность баночки, полученной из первого набора стекломассы. Интенсивное выделение газовой фазы при повторном наборе стекломассы позволяет получить изделие, в объеме которого равномерно распределены газовые пузыри.

Кракле — способ декорирование путем создания на поверхности или между слоями стекла трещиноватого слоя, — уникален и возможен только в технологии стекла. Горячую пульку прокатывают по мокрым опилкам или опускают в сосуд с водой, с тем чтобы на поверхности образовались трещины, а затем берут еще один набор стекломассы или заготовку, позволяющие сохранить целостность изделия, и окончательно выдувают.

Венецианская нить и миллефиори не имеют аналогов по сложности изготовления и достигаемому декоративному эффекту. Для изготовления **венецианской нити** на выдувную трубку делается набор стекла и оформляется продолговатая баночка (рис. 11.17 *а*). На оформленную баночку набирается второе стекло, затем к ним прикрепляется понтия и заготовка растягивается до получения двуцветного стержня диаметром 5–6 мм. Для изготовления многоцветной нити на продолговатую баночку, выполненную из первого набора стекла, прикрепляют один или несколько стержней из цветного стекла, которые закрывают еще одним набором горячего бесцветного стекла. Если растягивать такую заготовку с вращением, то получается стержень с одной или несколькими цветными спиралями.

Для получения изделия, декорированного венецианской нитью, стержни помещают в подогретую форму, установленную на глиняную подложку, посыпанную песком, и опускают в нее баночку, подготовленную для формования изделия. Стержни прилипают к горячему стеклу, и после этого начинается выдувание изделия (рис. 11.17 *б*). Для получения донышка, декорированного нитью, часть стекломассы пережимают, закручивают и отрезают, затем прикрепляют к донышку понтию и продолжают выдувать изделие с вращением трубки и понтии в разные стороны таким образом, чтобы нити закрутились спиралью. Для получения сетчатого рисунка спиральную заготовку на стеклодувной трубке помещают в заранее подготовленную заготовку, у которой спирали закручены в противоположную сторону. Окончательное выдувание такой сложной заготовки позволяет получить знаменитое филигранное стекло (рис. 11.17 *в*, *г*).

Для декорирования изделий в технике **миллефиори** изготавливают диски диаметром 3–6 мм и толщиной до 3 мм с концентрическими полихромными рисунками. Схема изготовления диска и один из вариантов украшения ими изделий из бесцветного стекла приведены на рис. 11.17 *д*.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 11.17. Схемы: *а*) изготовление венецианской нити; *б*) закрепление венецианской нити на поверхности пульки; *в*) изготовление однослойного изделия с однонаправленным кручением нити; *г*) изготовление «сетчатого изделия»; *д*) изготовление дисков миллефиори и декорирование с их помощью изделия

Декоративные покрытия относят к горячим способам декорирования, поскольку их закрепление на поверхности изделия происходит при температурах выше температуры стеклования, но ниже температуры деформации. А в температурно-временной режим закрепления покрытия входит стадия отжига изделия. **Люстровые краски** (резинаты благородных металлов) наносят кистями, шпателями или пульверизацией (рис. 11.18). После обжига образуется рисунок из сверкающего металлического слоя золота или серебра. **Иризация** — окуривание поверхности изделия в печи при температурах 550–700°С легковозгоняющимися солями элементов переменной степени окисления. Радужные разводы образуются на поверхности изделия благодаря осаждению на ней оксидно-металлической пленки олова, висмута, титана, бария, стронция. При увеличении толщины получаемого покрытия появляется перламутровый блеск.

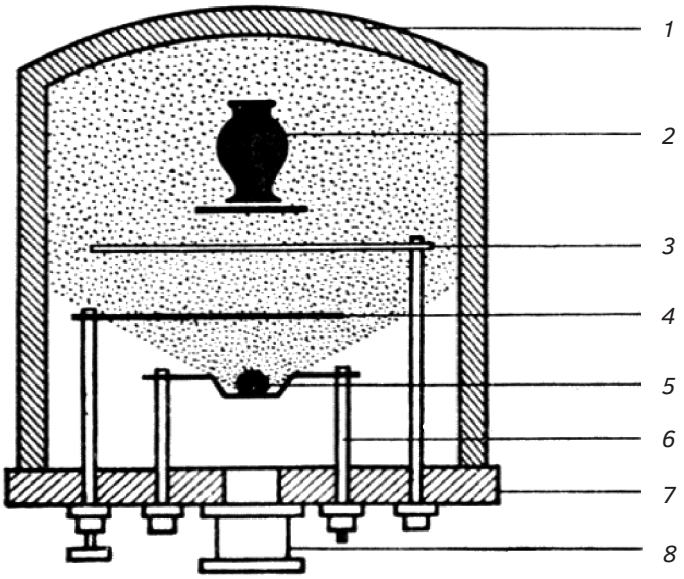


Рис. 11.18. Нанесение декоративного ирризирующего покрытия: *1* — печь; *2* — обрабатываемое изделие; *3* и *4* — нагреватели; *5* — сосуд с иризирующим составом; *6* — держатель; *7* — под печи; *8* — основание

Обжиговые краски по стеклу на основе легкоплавких свинцовосиликатных, свинцово-боратных и силикоборатных стекол растекаются на поверхности изделий при температурах 550–650°С. Их наносят с использованием трафаретов, пульверизации или художественной ручной росписи. С помощью обжиговых красок изготавливают готовые картинки — деколи на выгорающем носителе (например, бумажном или полимерном), которые прочно прикрепляются к поверхности готового изделия в результате выгорания носителя на стадии обжига. Еще один способ нанесения обжиговых красок — последовательное нанесение декоративного узора с помощью сеток-масок — называется шелкография. Рисунки, нанесенные этим способом, отличает тонкость линий и широкая гамма используемых красителей.

Завершая обзор декоративных приемов, появившихся в эпоху Ренессанса, следует отметить, что все они успешно преодолели последующий многовековой путь, распространились по всем странам и континентам, в которых есть производство стекла. В настоящее время они широко используются в массовом производстве посуды из сортового и хрустального стекла, для декорирования узкогорлой стеклянной тары, изготовления стемалита — листового стекла с цветным покрытием, и, безусловно, уникальных художественных изделий ручной работы.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

В процессе производства листового стекла в целом соблюдаются следующие этапы:
– обработка и хранение сырьевых материалов;
– приготовление шихты (смеси с определенным соотношением сырьевых материалов);
– высокотемпературная варка шихты и получение расплавленной стекломассы;
– формование изделий;
– отжиг изделий.

Основными сырьевыми материалами для стекольного производства являются:
– кварцевый песок — источник оксида кремния (SiO_2) — основного компонента в составе стекла;
– кальцинированная сода (карбонат натрия Na_2CO_3) — для введения оксида натрия (Na_2O), который снижает температуру варки;
– поташ (карбонат калия K_2CO_3) — для введения оксида калия (K_2O), увеличивающего «длину» (вязкостную характеристику при формовании) стекла;
– мел, известняк, мрамор (карбонаты кальция $CaCO_3$) — источники оксида кальция (CaO);
– доломит (двойной карбонат кальция и магния $CaCO_3 \cdot MgCO_3$) — введением оксидов кальция (CaO) и магния (MgO) можно регулировать температуру плавления и вязкость; они улучшают механические и химические свойства;
– глинозем (оксид алюминия Al_2O_3) — добавляют, чтобы улучшить стойкость к химическому воздействию.

Производство стекольной массы представляет собой многоэтапный комплексный процесс, на первой стадии которого приготовленная смесь нагревается в стеклоплавильной печи до 400° С; из нее испаряется содержащаяся влага и происходит температурное разложение солей. Затем температура повышается до 800–900° С для завершения химического взаимодействия между всеми исходными компонентами. Далее температура повышается до 1100° С, и в итоге образуется прозрачная неоднородная стеклянная масса с большим количеством пузырьков газа, которая разогревается до 1500° С. При данной температуре газовые пузырьки либо поднимаются к поверхности расплава и лопаются, либо растворяются в жидком стекле.

Эта процедура занимает до 90% времени, отведенного на весь процесс. В ходе варки также выполняются процедуры осветления и гомогенизации, после чего температура массы медленно и плавно понижается до уровня 700–1000° С. В этом диапазоне стекло приобретает нужную вязкость и готово для формирования листов.

Как говорилось выше, производство стекла имеет в своей основе две основных технологии — флоат и Фурко.

Общее сравнение методов производства листового стекла представлено на рис. 11.20.

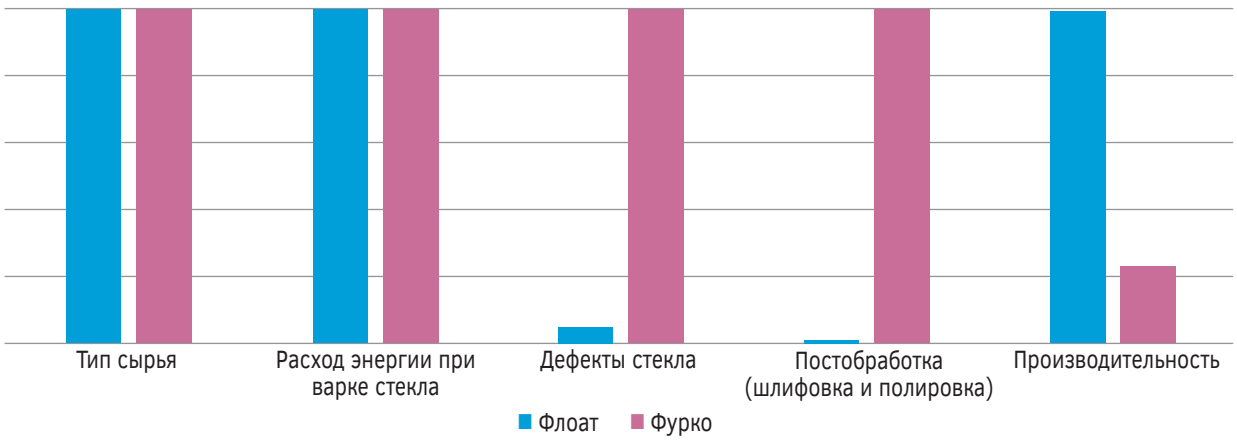


Рис. 11.20. Основные параметры производства листового стекла по методу Фурко и с помощью флоат-процесса

Сравнение параметров технологий Фурко и флоат-процесса позволяет сделать вывод о том, что последняя обладает рядом важных достоинств:

– обеспечение стабильной толщины листов;
– практически полное отсутствие дефектов на поверхности стекла;
– возможность декоративного оформления;
– отсутствие оптических искажений;
– нет необходимости в дополнительной шлифовке и полировке.

РОЛЬ СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 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.

Производство листового и тарного стекла большей частью автоматизировано.

До финансового кризиса 2008 г. глобальный ежегодный рост спроса на листовое стекло составлял 5%, что было обусловлено растущим спросом в строительстве и автомобильной промышленности. Тем не менее этот рост остановился, так как мировой спрос упал 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 как рынка стекла быстро растет с начала 1990-х гг. В начале 1990-х гг. на долю Китая 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 — наибольшее количество предприятий по производству стекла и самое большое количество линий по производству флоат-стекла в мире. Рынок рос более чем на 10% в год с 2000 по 2009 г., а к 2016 г. рынок начал расти со скоростью на 8,2% в год, достигнув 3,4 млрд м^2.

Стекольная промышленность сильно сконцентрирована; например, в производстве листового стекла на долю четырех компаний: группы компаний Nippon Sheet Glass (NSG), Asahi Glass Company (AGC), Saint-Gobain и группы компаний Guardian — в 2010 г. пришлось более 50% мирового объема производства.

Европейский Союз является одним из крупнейших в мире рынков стекла как с точки зрения 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.

Производство стекла является энергоемким; в Европе затраты на энергию составляют около 22% производственных затрат, а затраты на рабочую силу — около 16%. Производство стекла также является значительным источником выбросов парниковых газов (ПГ), особенно углекислого газа (CO_2). За последние несколько десятилетий европейская промышленность смогла сократить потребление энергии на единицу продукции, что в период между 1970 и 2000 гг. привело к впечатляющему сокращению на 55% энергопотребления для отрасли плоского стекла при одновременном удвоении производства.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Опыт предыдущих поколений и потребности современного мира позволяют предполагать, что спрос на изделия из стекла в обозримом будущем вряд ли снизится. С другой стороны, должно появиться на свет новое лицо стеклянных изделий. Каким оно будет, судить не нам, но пути его изменения можно предположить.

Существенных изменений в составе промышленных стекол вряд ли следует ожидать, во всяком случае в нынешних условиях эксплуатации основных видов изделий.

Рассмотрим возможные изменения в технологии по трем наиболее важным для организации производства направлениям:

– энергосбережение;
– ресурсосбережение;
– экологическая безопасность.

Энергосбережение и пути его реализации

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 снижении расхода природных ресурсов.

Наиболее затратная по потреблению энергии часть производственного цикла — это стекловарение. Среди стадий стеклообразования, составляющих процесс стекловарения, наиболее длительная и требующая высоких температур стадия стеклообразования та, на которой происходит растворение в расплаве зерен кварцевого песка.

Каким образом можно облегчить этот процесс и уменьшить энергозатраты:

– приготовить шихту, более подходящую к процессу стеклообразования (гранулирование, компактирование, механоактивация, силикатообразование в шихте);
– обеспечить оптимальное соотношение «шихта — стеклобой»;
– снизить потери летучих компонентов при загрузке шихты в печь;
– изменить график зависимости максимальной температуры от длины печи;
– использовать тонкослойную варку или осветление для повышения качества стекломассы;
– использовать наиболее эффективные огнеупоры и теплоизоляцию для повышения КПД стекловаренных печей и, в первую очередь, продления срока их кампаний, т. е. длительности работы без промежуточных и капитальных ремонтов.

Ресурсосбережение и пути его реализации

Основными природными ресурсами, которые используют в производстве стекла, являются:

– энергоносители;
– сырьевые материалы.

Главными расходными сырьевыми материалами (основными материалами для приготовления шихты) являются кварцевый песок, мел, известняк, доломит, полевые шпаты. Львиная доля расхода приходится на кварцевый песок, поскольку его массовое содержание в составе промышленных стекол не менее 70 мас. %.

Известно, что пригодность песков для стекловарения основана на содержании в них оксида железа и размера частиц. Современные требования к белизне большинства бесцветных промышленных стекол заставляют ужесточать требования по содержанию оксида железа

до значений менее 0,05 мас. %. 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.

Понятно, что чистых природных песков не так много и доля их существенно уменьшилась за годы добычи. Поэтому выходом из ситуации может быть 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. По сути, увеличение доли стеклобоя в шихте до 50% позволяет снизить длительность процесса стеклообразования и приблизить энергозатраты на стекловарение к теоретическим. Задача, собственно, сводится к созданию вменяемой системы сбора, сортировки и подготовки возвратного боя у населения, поскольку собственный стеклобой предприятия используют в полной мере.

Кроме того, в качестве сырьевых источников можно использовать отходы промышленного производства (шлаки, золы и т. п.). В технологии стекла в России есть массив неопробованных в промышленном производстве наработок по использованию разного сырья для получения окрашенных в массе материалов и стекла 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, если учесть, что КПД современных печей-гигантов только-только подбирается к 30%. Доля вредных соединений растет, когда мы имеем дело с производством свинцового хрусталя и большинства оптических и специальных стекол, но масштабы их производства существенно меньше, как и вклад в экологическую обстановку региона.

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

Частично эта проблема решена следующими путями:

– превращением составных цехов, которые занимались полной подготовкой природного сырья — очисткой, помолом и рассевом, в дозировочно-смесительные отделения, в которых производится, в основном, их отвешивание и перемешивание;
– использование современного оборудования, в котором все линии транспортировки сырья являются закрытыми;
– транспортировка шихты в печь происходит под «шапкой» из слоя стеклобоя, что предотвращает пыление при транспортировке и снижает улетучивание в зоне загрузки.

Можно использовать также гранулированную или компактированную шихту, но эта практика пока неоднозначна в нынешнем ее исполнении.

И третья группа экологически опасных отходов — отходы механической обработки стекла. Механическая обработка — резка и обработка края листового стекла, отрезка колпачка у выдувных сортовых изделий и художественная обработка хрустальных. В состав отходов, кроме собственно стеклянной пыли, входят соединения, образовавшиеся при нейтрализации промывных вод после механической и химической полировки изделий, т. е. соли серной

и плавиковой кислот. Проблема их утилизации по-прежнему остается острой, хотя были попытки использования их как наполнителей в дорожном строительстве.

Таким образом, можно говорить о том, что производство стекла имеет достаточно «точек роста», которые могут преобразоваться в новые технологические регламенты более совершенных технологических схем производства будущего.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Гулоян, Ю. А*. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гулоян. — Владимир : Транзит-Икс, 2003.
2. *Гулоян, Ю. А*. Физико-химические основы технологии стекла / Ю. А. Гулоян. — Владимир : Транзит-Икс, 2008.
3. *Дзюзер, В. Я.* Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009.
4. ИТС 5–2015. Производство стекла. — М. : Бюро НДТ, 2015.
5. *Макаров, Р. И.* Управление качеством листового стекла (флоат-способ) / Р. И. Макаров, В. В. Тарбеев, Е. Р. Хорошева, Ю. М. Попов, В. Н. Чуплыгин. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004.
6. *Маневич, В. Е.* Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В. Е. Маневич, К. Ю. Субботин, В. В. Ефременков. — М. : РИФ «Стройматериалы», 2008
7. *Мелконян, Р. Г*. Аморфные горные породы и стекловарение / Р. Г. Мелконян. — М. : НИА-Природа, 2002.
8. *Панкова, Н. А.* Стекольная шихта и практика ее приготовления / Н. А. Панкова, Н. Ю. Михайленко. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1997.
9. *Сергеев, Ю. П*. Выполнение художественных изделий из стекла : учебник для худ. вузов и училищ / Ю. П. Сергеев. — М. : Высш. шк., 1984.
10. Технология стекла. Справочные материалы / под ред. П. Д. Саркисова, В. Е. Маневича, В. Ф. Солинова, К. Ю. Субботина. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012.
11. *Храмков, В. П.* Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий / В. П. Храмков, Е. А. Чугунов. — М. : Высш. шк., 1987.
12. *Чехов, О. С.* Вопросы экологии в стекольном производстве / О. С. Чехов, В. И. Назаров, В. Г. Калыгин. — М. : Легпромбытиздат, 1990.
13. *Шапилова, М. В.* Охрана окружающего воздуха в стекольной промышленности / М. В. Шапилова, И. Т. Тимофеева. — М. : Легпромбытиздат, 1992.
14. *Шелби, Дж*. Структура, свойства и технология стекла / Дж. Шелби ; пер. с англ. Е. Ф. Медведева. — М. : Мир, 2006.