

ДОСТИЖЕНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ ФИЗИКИ В СТЕКОЛЬНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е. К. Сюлливен<sup>1)</sup>, Нью-Йорк

Для химика-исследователя, работающего в стекольной промышленности, скоро становится очевидным, что для разрешения большей части возникающих проблем требуется подготовка в области физики. Полезные свойства стекла, за исключением сопротивления выветриванию и другим химическим разрушениям, являются физическими свойствами, и многие проблемы производства стекла — это проблемы физические. Соответственно этому, хотя производство стекла обычно относится к химической индустрии, в нашем<sup>2)</sup>, например, небольшом штате сотрудников имеется вдвое больше физиков, чем химиков.

Мы считаем, что для физика в стекольной промышленности требуется хорошее знание основ физики и исследовательский опыт, специализация же по молекулярной физике или тем более по стеклу совершенно не обязательна.

Индустриальный физик на стекольном заводе, как и на всяком другом, имеет следующие функции: надзор за качеством продукции, усовершенствование способов производства, развертывание производства новых видов продукции. Кроме того, он оказывает техническую помощь в патентных и юридических вопросах, а также в бесчисленном множестве производственных проблем. Если, например, производятся стеклянные плиты, служащие строительным материалом, физика запрашивают о прозрачности, теплопроводности, звукопроводности стекла, сопротивлении его нагрузке, жару, выветриванию. От физика требуются указания о том, какова должна быть поверхность стекла, чтобы оно отражало в нужной мере падающее снаружи тепловое и световое излучения, чтобы видимость через такое стекло была достаточно плохая или хорошая и т. д.

Если производится оконное стекло, которое поглощает тепло, физик должен подсчитать количество сэкономленной при применении такого стекла энергии на кондиционирование воздуха. От физика могут потребоваться также расчеты всевозможных предметов, от баллонов для электроламп до линз для сигнальных маяков, от бутылок до стеклоплавильных печей.

Печь для непрерывной плавки стекла — это ванна, с одного конца которой засыпается шихта, а с другого — идет непрерывная выдача расплавленного стекла. Физик исследует в стекломассе направление конвекционных токов, которые стремятся смешать частично расплавленный материал с полностью расплавленным и, таким образом, замедляют процесс плавки, и показывает, как надлежащее распределение температуры на поверхности стекла устраняет такое смешивание. Если выплавленное стекло содержит пузырьки газа, частицы нерастворенного песка или кристаллизационного материала, физик оказывает

<sup>1)</sup> Journal of Applied Physics, 1937. Перевод А. Л. Комаровой.

<sup>2)</sup> Автор работает в Corning Glass Works, Corning New-York.

помощь в исправлении этих дефектов. Такие жизненно-важные для стеклоплавания вопросы, как, например, прозрачность выплавленного стекла, зависимость выделения газовых пузырьков от размера этих пузырьков и вязкости стекла, а следовательно, и от температуры, относятся также к деятельности физика.

Может быть наиболее ценный вклад в проблему создания огнеупорного материала для стеклоплавильных печей — самую трудную проблему в стекольной промышленности — был сделан физиком.

Стеклоплавильная печь сложена из кирпичей толщиной в 12 дм, с площадью основания  $2 \times 3$  фута. Эти довольно пористые глиняные кирпичи растворяются в расплавленном стекле, в особенности в его верхних слоях, и разрушаются за несколько месяцев. Каждый год производство обычно останавливалось на несколько недель для охлаждения печей и замены изношенных кирпичей.

Корунд — кристаллическая форма глинозема — и муллит — кристаллическое соединение глинозема с кремнеземом — известны своим противодействием разрушающему действию стекла. В поисках материала для печных кирпичей физик пришел к идее выплавки алюминиевого силиката в электрической печи и отливке его в формах, наподобие того как это делается при литье чугуна. Полученные кирпичи в 2—3 раза более устойчивы разрушающему действию стекла, чем глиняные, и могут подвергаться нагреванию до более высокой температуры без размягчения. Применение таких кирпичей удлинит жизнь печей, заметно улучшило среднее качество стекла благодаря уменьшению числа свилей, получавшихся в большом количестве при применении глиняных кирпичей, и увеличило производительную способность за счет возможности повышения температуры при плавке. Соответственно снизились стоимость плавки и амортизационные расходы на тонну стекла, а также требуемые капиталовложения. Высокая оценка кирпичей нового типа со стороны стеклопромышленников нашла свое выражение в непрерывном росте спроса на такие кирпичи, не прекращавшемся даже во время депрессии. В 1935 г., через 7 лет после появления новых кирпичей, из 250 стеклоплавильных печей, действующих в США, только 20 остались без использования нового материала.

Наблюдая за качеством продукции, физик устанавливает стандарты, разрабатывает методику нужных измерений и руководит проведением этих измерений. Свойства, благодаря которым становится возможным специфическое использование каждого сорта стекла, а также свойства, которые наилучшим образом контролируют одинаковость плавок, проверяются постоянно.

Например, электрическое сопротивление некоторых стекол очень чувствительно к изменению состава. Провода, несущие ток к электрической лампе, входят в лампу через ножку — короткую стеклянную трубку, в которую они спаиваются. Если электрическое сопротивление трубки недостаточно высоко, ток замыкается накоротко через стекло, вместо того чтобы проходить через нить лампы. Поэтому необходимо постоянно контролировать сопротивление стекла, идущего на изготовление ножки. Коэффициент расширения этого стекла также должен контролироваться, так как ножка припаяется к проводам и к баллону. Коэффициент расширения следует также внимательно контролировать при производстве стекла для колпаков железнодорожных фонарей, для выпаривательных чашек и других предметов, которые должны пережить изменения температуры, не трескаясь.

Определение точки размягчения стекла, сводящееся к измерению вязкости, является хорошим контролем одинаковости последующих плавок стекла и важно само по себе для случая, например, баллонов электроламп, которые вырабатываются на ламповых заводах при помощи автоматической машины, требующей, чтобы стекло размягчалось в данном пламени всегда до одинаковой степени. Измерению подлежат целый ряд свойств стекла, определяющих его полезность. В течение года число таких измерений достигает многих тысяч.

Как бы хорошо оно ни было, стекло может сломаться, и бывает, что потребитель намеревается возложить ответственность за поломку на промышленника. Здесь снова физик вступает в свои права и на основе изучения поверхности излома и интерференции в поляризованном свете выводит свои заключения — сломался ли предмет от удара, перегрева или переохлаждения, либо он отслужил свой срок и пр. Часто физик может предложить изменения конструкции или способа использования стекла, которые устранят дальнейшие недоразумения такого рода. Измерения высокой температуры в большом масштабе впервые развернулись после того, как около 30 лет назад один физик поместил платино-платинородиевую термопару в стеклоплавильную печь. Несмотря на искусство кофегаров определять температуру на-глазок, фактически температура печи менялась от температуры, при которой размягчаются и разрушаются плавильные горшки, до температуры, недостаточной, чтобы должным образом расплавить стекло. Введение точных температурных измерений устранило этот недостаток и немедленно дало существенный прирост продуктивности печей.

В результате совместной работы физика и химика по улучшению состава стекла было создано стекло для железнодорожных фонарей, которое настолько хорошо противостоит быстрым нагреваниям и охлаждением, что колпак на горящем фонаре не лопается во время дождя и снегопада. Такое стекло должно обладать возможно малым коэффициентом расширения. Вычислить подходящий для этих целей состав еще далеко недостаточно. Это стекло должно, наряду с низким коэффициентом расширения, обладать достаточной легкоплавкостью, пригодностью к обработке, отсутствием склонности к расстеклованию, устойчивостью по отношению к разрушающему действию воды и других реагентов и т. д. Начиная от состава с известными свойствами, приближение к желаемому типу стекла идет шаг за шагом, очень постепенно. В каждой точке нужно проверить, какие изменения произошли в коэффициенте расширения и в других интересующих нас свойствах. Требуется аккуратные физические измерения, чтобы убедиться, что продвижение идет в желательном направлении.

Выработанное в США специально для нужд железных дорог стекло с низким коэффициентом расширения нашло широкое применение и во многих других областях. Производство химической, кухонной и столовой посуды едва ли возникло бы без помощи физика.

Физик сыграл незаменимую роль в таком деле, как производство стекла для ламповых баллонов, которое воспроизводит свойства применявшегося прежде для этих целей флинтгласа и, кроме того, может быть выплавлено в печи. Благодаря этому сделалось возможным современное автоматическое производство баллонов.

Перерасчет линз для железнодорожных семафоров и стандартизация железнодорожных сигнальных цветов являются другим примером деятельности физика по созданию новой усовершенствованной продукции. Прежде каждая железная дорога независимо от других избирала ряд сигнальных цветов, которые, таким образом, никогда не были одинаковыми на двух дорогах. Такое положение было неудовлетворительным как с точки зрения эксплуатации железных дорог, так и с точки зрения производства стекла. Нынешние стандартные (на железных дорогах США и некоторых других стран) цветные стекла были выбраны с учетом следующих требований: 1) цвет их должен быть наиболее чистым, например, желтый цвет не должен быть ни красноватым, ни зеленоватым; 2) они должны пропускать возможно большую часть света, излучаемого источником. Далее, физик, реконструируя сигнальные линзы на основе учета фактической формы и размеров пламени (взамен прежних расчетов для теоретического точечного источника) удвоил дальность видимости сигнала.

Руководство производством сигнальных стекол осуществляется физиком. Образец каждой плавки подвергается фотометрическим измерениям, и если он не укладывается в предписанные лимиты в отношении

цветности и прозрачности, плавка не пускается в обработку. Каждый кусок произведенного цветного стекла для сигнальных фонарей также проверяется фотометрически.

Физик осуществил ряд коммерческих применений стекол со специальными электрическими свойствами. На основе своих измерений диэлектрической прочности он ввел в употребление подвесные и штыревые стеклянные изоляторы для высоковольтных линий и показал, что они имеют определенные преимущества. Вместе со своим коллегой, инженером-электриком, он сконструировал изолятор непревзойденной прочности. Для трансконтинентальной телефонной линии он предложил стеклянные изоляторы с необычайно низкими потерями в диэлектрике. Такое стекло нашло также применение в изоляции для радиоприемников и передатчиков.

Физик и химик, работая в тесном содружестве, создали стеклянные фильтры, задерживающие или, наоборот, пропускающие отдельные участки спектра от рентгеновских до инфракрасных лучей. Роль физика заключалась в измерении поглощенной или прошедшей через фильтр энергии лучей разных длин волн, в то время как химик подбирал такие составы шихты, чтобы полученные стекла не только являлись нужными фильтрами для лучистой энергии, но, кроме того, были нормальными в других отношениях.

Таковы, например, стекла для очков, употребляемых врачами для защиты от рентгеновских лучей, и, с другой стороны, стекла, специально пропускающие рентгеновские лучи. Определенный сорт стекла пропускает ультрафиолет почти так же хорошо как кварц, другой сорт стекла (употребляемый для ламп «горное солнце») пропускает только область ультрафиолета, обладающую терапевтически полезным действием. Следующий сорт стекла пропускает ультрафиолет, поглощая видимый свет, и употребляется в комбинации с флуоресцирующим материалом для сценических эффектов. Стекло одного сорта, прозрачное и почти бесцветное, пропускает практически весь видимый свет и задерживает все тепловые лучи; стекло другого сорта не пропускает видимых лучей, зато в достаточной степени прозрачно для инфракрасных. Для кондиционирования воздуха применяются стекла, которые ослабляют яркий солнечный свет и поглощают большую часть тепловых лучей, не трескаясь при этом от нагревания из-за малого коэффициента расширения. Существуют фильтры, в комбинации с которыми свет лампы накаливания имитирует прямой солнечный свет или северное небо или облачное небо. Ко всему этому приложил руки физик.

Производство матовых баллонов для электрических ламп, которые теперь почти вытеснили прозрачные баллоны, а также колпаков и абажуров из молочного стекла опирается на физические измерения рассеяния и пропускания лучистой энергии.

Автомобильные ветровые стекла, отражающие свет фар встречных машин на дороге и таким образом предохраняющие шофера от их слепящего действия, появились также благодаря физике.

Мы укажем также классические примеры сотрудничества физика и химика в работе со стеклом, хотя эти физики были скорее университетскими физиками, чем промышленными. В XIX в. химик Харкур с физиком Стоксом и позднее химик Шотт с физиком Аббе на основе научного метода организации производства разработали ряд новых рецептов оптических стекол, вследствие чего смог появиться современный микроскоп и другие оптические инструменты с ахроматическими объективами.

В современном производстве искусственного волокна и ткани из стекла физик постоянно контролирует теплоизолирующие свойства материала. Благодаря высокому электрическому сопротивлению искусственного волокна физик смог использовать его для изоляции электрического провода и кабеля. Измерения прочности искусственного волокна на разрыв показали, что такое волокно толщиной в несколько десятитысячных дюйма обладает прочностью, превосходящей прочность стали

и доходящего до миллиона фунтов на 1 *дм*<sup>2</sup>. Физик вывел отсюда заключение, что стекло по своей внутренней природе является достаточно прочным материалом, и стремление к получению все более прочных стеклянных изделий имеет, таким образом, под собой реальную почву.

Термическая обработка стекла, руководимая физиком, приобретает все большее практическое значение. Отжиг, требуемый для устранения напряжений, которые могут вызвать самопроизвольную трещину, проводился раньше наудачу и давал довольно большой процент брака, пока физик не выработал специальный температурный режим охлаждения.

Как для стали, так и для стекла термическая обработка оказывает влияние на ряд физических свойств. Большая вязкость стекла обуславливает его тенденцию к замедлению внутренних перегруппировок, сопровождающих обычно изменение температуры. При охлаждении, скажем, воды, изменение ее плотности идет параллельно с изменением температуры. Стекло же представляет собой настолько вязкую жидкость, если оно может быть названо жидкостью, что изменение плотности и других свойств наступает не сразу, а требует времени. Таким образом при быстром охлаждении стекла до температуры затвердевания плотность и другие свойства могут быть схвачены в процессе изменения, и количественные значения их, соответствующие высокой температуре, могут быть как бы заморожены в охлажденном стекле. При медленном же охлаждении внутренние перегруппировки успевают следовать за изменением температуры, и, таким образом, получается стекло с нормальными свойствами. Полученные обоими этими способами стекла, одинаковые по своему химическому составу, в равной мере лишены упругих натяжений, но физические свойства их могут отличаться на несколько десятых процента. Это открытие проливает свет на трудность точного воспроизводства стекла. Термическая обработка оптического стекла, например, должна производиться особенно тщательно для обеспечения получения нужного коэффициента преломления.

Термическая обработка другого рода применяется для увеличения в 4—5 раз и более прочности стекла. В парижских такси окна представляют собой не обычные два стекла с пластической прослойкой между ними, но одинарное термически обработанное безопасное стекло, которое в 4—5 раз прочнее обычного стекла такой же толщины, и если оно все же раскалывается, то дает безвредные обломки.

Для получения такой прочности, оконное стекло нагревается и затем подвергается охлаждающему действию множества воздушных струек. Поверхностный слой стекла, таким образом, подвергается сжатию, внутренние слои — растяжению. Прочность стекла на разрыв возрастает по мере увеличения поверхностного сжатия, так как сила, стремящаяся разорвать стекло, сперва должна преодолеть это сжатие. Стеклянные сковородки, кастрюльки и котелки, которые можно нагревать непосредственно на газовом пламени или на электрической плитке, это также новейшие достижения, в которых физик сыграл незаменимую роль.

Выполнение диска для зеркала большого телескопа Калифорнийского института технологии — это почти целиком дело рук физика. Этот диск, плоский с одной стороны и ребристый — с другой, имеет поперечник в 70 футов и толщину 27 *дм* и весит 20 *т* — размеры, не имеющие прецедента. Его надо было изготовить из боросиликатного стекла с коэффициентом расширения, более низким, чем достигнутые до тех пор. Стекло это требовало такого же отжига, как, скажем, стекло для объектива микроскопа. Не существовало установленных способов плавки стекла для этих целей и способов придания ему нужной формы. На каждом шагу надо было вырабатывать новые методы и создавать особое оборудование. Хотя дефект в какой-либо одной из многих деталей планирования или выполнения мог вызвать большую задержку и причинить значительный убыток, проект был успешно доведен до конца из-за искусства и изобретательности промышленных физиков.

Кроме таких чисто практических вопросов, решением которых заняты физики, они также работают над чисто научными проблемами, связанными со стеклом, решение которых, мы убеждены, будет не менее плодотворно, чем усилия, приложенные сегодня непосредственно к производственным методам.

Этим перечнем деятельности и достижений физика в стекольной промышленности я попытался показать, как велика роль физика в установлении и поддержании стандартов качества, преодолении производственных трудностей и выискивании новых путей использования стекла.

---