

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Ю. Г. Павлюкевич, Л. Ф. Папко**

# **ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛЯННЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано*

*учебно-методическим объединением по химико-технологическому  
образованию в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования  
по специальностям 1-25 01 07 «Экономика и управление  
на предприятии» (1-25 01 07 26), 1-25 01 08 «Бухгалтерский учет,  
анализ и аудит» (1-25 01 08-03 14), 1-26 02 02 «Менеджмент»  
(1-26 02 02-03 02), 1-26 02 03 «Маркетинг» (1-26 02 03 16)*

Минск 2015

УДК 666.11.0224(076.5)

ББК 35.41я73

П12

Рецензенты:

кафедра «Экономика строительства» строительного факультета Белорусского национального технического университета (заведующая кафедрой кандидат экономических наук,

доцент *О. С. Голубева*);

заведующий НИЛ бетонов и композиционных строительных материалов Научно-исследовательского и проектно-производственного государственного предприятия «Институт НИИСМ» кандидат технических наук *И. А. Белов*

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».*

**Павлюкевич, Ю. Г.**

П12 Технология и оборудование производства стеклянных изделий. Лабораторный практикум: учеб.-метод. пособие для студентов специальностей 1-25 01 07 «Экономика и управление на предприятии» (1-25 01 07 26), 1-25 01 08 «Бухгалтерский учет, анализ и аудит» (1-25 01 08-03 14), 1-26 02 02 «Менеджмент» (1-26 02 02-03 02), 1-26 02 03 «Маркетинг» (1-26 02 03 16) / Ю. Г. Павлюкевич, Л. Ф. Папко. – Минск : БГТУ, 2015. – 97 с.  
ISBN 978-985-530-465-5.

Лабораторный практикум содержит методики определения эксплуатационных характеристик стекол и стеклоизделий строительного назначения – термических, оптических, химической устойчивости, механических. Также книга включает методики проведения и контроля технологических процессов: расчета и подготовки шихты, стекловарения, отжига. Практикум содержит сведения по классификации стекол и стеклоизделий, сырьевым материалам, применяемым в производстве стеклоизделий строительного назначения. В книге представлены необходимые теоретические основы физико-химических свойств стекол, описание методов, приборов и установок, последовательность проведения анализа или измерения.

УДК 666.11.0224(076.5)

ББК 35.41я73

ISBN 978-985-530-465-5

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2015  
© Павлюкевич Ю. Г., Папко Л. Ф., 2015

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие предназначено для студентов, обучающихся по экономическим специальностям в области производства строительных материалов.

По содержанию и построению пособие соответствует учебной программе дисциплины «Технология и оборудование производства стеклянных изделий» и состоит из трех глав. В первой главе рассматривается классификация стекол и стеклоизделий, во второй – технологические основы их получения, в третьей – качественные и эксплуатационные свойства стекол и стеклоизделий.

Методология выполнения лабораторных работ позволяет студентам ознакомиться со стеклом и стеклоизделиями (по внешним признакам), провести синтез стекол и изучить их свойства.

Для повышения эффективности обучения в пособии изложены методические и теоретические положения, которыми должны овладеть студенты для формирования у них базы знаний по основным видам продукции строительного назначения, выпускаемой стекольной отраслью промышленности, а также технологическим процессам ее производства. В пособии при описании методики выполнения лабораторных работ приводятся основные понятия и определения по изучаемой теме, а постановка и выполнение работ позволяет установить логическую связь между характеристиками материалов и изучаемыми свойствами. Выполнение лабораторных работ должно помочь сформировать у студентов инженерное мышление, выработать самостоятельность и творческий подход к процессу обучения, развить навыки обращения с материалами, приборами, установками, а также освоить основные технологические операции: составление шихты, варку и выработку стекла, отжиг стекла и т. д.

Пособие дает возможность выбрать лабораторные работы и задания, которые наиболее полно соответствуют профилю специальности и решаемым задачам.

Авторы лабораторного практикума благодарны рецензентам за ценные замечания и советы, высказанные при подготовке практикума.

# МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Целью выполнения лабораторных работ является ознакомление студентов с процессами производства стекла и изделий на его основе, изучение эксплуатационных (потребительских) свойств стекла и их объяснение на основе представлений о химическом составе стекла, структуре материалов и технологии производства.

При выполнении лабораторной работы необходимо записать в протокол лабораторной работы ее тему, цель, сформулировать ее теоретическое обоснование, изложить ход выполнения работы, сделать выводы.

К работе следует приступать только тогда, когда ее этапы известны и не вызывают сомнений. Работать в лаборатории нужно аккуратно, без спешки. На рабочем столе должны находиться только необходимые приборы и протокол лабораторной работы.

Перед выполнением лабораторной работы следует ознакомиться с общими правилами по технике безопасности.

Для защиты одежды от действия химических реактивов необходимо работать в халате. При составлении шихты, пользовании реактивами, подготовке образцов к исследованиям нужно соблюдать основные правила техники безопасности.

1. Для исключения термических ожогов и поражения электрическим током при работе с электрооборудованием и высокотемпературными печами необходимо следовать правилам их эксплуатации.

2. При работе со стеклом следует помнить о хрупкости стекла и опасности порезов. Подготавливая образцы стекла для исследований и проводя испытания, нужно надевать защитные очки, а осколки стекла убирать специальным инструментом.

3. Работу с пылящими веществами следует проводить в респираторе в оборудованном вытяжной вентиляцией помещении.

4. При работе с химически активными веществами (концентрированными кислотами, щелочами и т. д.) необходимо надевать очки. Нельзя выливать в раковину остатки кислот и щелочей, их нужно сливать в предназначенную для этого посуду и хранить в вытяжном шкафу.

Все работающие в лаборатории должны уметь оказывать первую помощь при термических и химических ожогах.

При термическом ожоге следует обработать кожу спиртом, а затем мазью от ожогов.

При химическом ожоге пораженное место необходимо сперва промыть большим количеством воды, а затем – 3%-ным раствором карбоната натрия (при ожогах кислотой) или 1%-ным раствором борной кислоты (при ожогах щелочами).

Пренебрежение правилами безопасности в работе может привести к несчастным случаям. Пострадать может не только сам нарушитель правил техники безопасности, но и работающие в лаборатории люди.

# КЛАССИФИКАЦИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКЛОЛ И СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

Стеклом называют все аморфные тела, получаемые переохлаждением расплава (независимо от их химического состава и температурной области затвердевания) и обладающие в результате постепенного увеличения вязкости механическими свойствами твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в стеклообразное должен быть обратимым. Это общее определение стекла как переохлажденной жидкости вытекает из способа получения стеклоизделий. Для перехода кристаллического вещества в стеклообразное состояние его необходимо расплавить, нагрев до температур 1000–1600°C, а затем переохладить. На производствах расплав охлаждают одновременно формуя, т. е. придавая стеклу ту или иную форму.

Стекла подразделяют на природные и искусственные. Искусственные стекла в свою очередь бывают органические и неорганические.

Неорганические стекла в зависимости от типа стеклообразующих компонентов подразделяются на ряд видов (всего 11), основные из которых перечислены ниже:

- силикатные получают на основе оксида кремния  $\text{SiO}_2$ ;
- алюмосиликатные – на основе оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и оксида кремния  $\text{SiO}_2$ ;
- боросиликатные – на основе оксида бора  $\text{B}_2\text{O}_3$  и оксида кремния  $\text{SiO}_2$ ;
- бороалюмосиликатные – на основе оксидов бора  $\text{B}_2\text{O}_3$ , алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и кремния  $\text{SiO}_2$ ;
- алюмофосфатные – на основе оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и фосфорного ангидрида  $\text{P}_2\text{O}_5$ ;
- бороалюмофосфатные – на основе оксида бора  $\text{B}_2\text{O}_3$ , оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и фосфорного ангидрида  $\text{P}_2\text{O}_5$ ;

– алюмосиликофосфатные – на основе оксида алюминия  $Al_2O_3$ , оксида кремния  $SiO_2$  и фосфорного ангидрида  $P_2O_5$ ;

Наряду с приведенными стеклообразующими оксидами в состав большинства стекол входят оксиды различных металлов: лития –  $Li_2O$ , калия –  $K_2O$ , натрия –  $Na_2O$ , кальция –  $CaO$ , магния –  $MgO$ , бария –  $BaO$ , цинка –  $ZnO$ , кадмия –  $CdO$ , свинца –  $PbO$ , железа –  $Fe_2O_3$  и др.

Первые три вида оксидных стекол получили наиболее широкое распространение в промышленности.

## Лабораторная работа № 1

---

# КЛАССИФИКАЦИЯ СТЕКОЛ И СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

## Общие сведения

В зависимости от технических свойств и назначения промышленные стекла подразделяют на следующие группы:

- архитектурно-строительное стекло;
- техническое;
- тарное;
- сортовое.

В группу **архитектурно-строительного стекла** входят: листовое строительное и декоративное стекло; облицовочное стекло (коврово-мозаичная плитка, марблит, смальта); тепло- и звукоизоляционное стекло (пеностекло и стекловолокнистые материалы); стеклянная осветительная арматура (бра, абажуры и др.); стекло для оборудования внутренних помещений и инвентаря (дверки, мебель); конструктивно-строительные элементы из стекла (стеклопакеты, стеклоблоки, профильное стекло, стеклянная черепица и т. д.); пеностекло; волокнистые тепло- и звукоизоляционные материалы из стекла.

**Листовое стекло** получают флоат-способом, методами проката и вертикального вытягивания.

Флоат-стекло – это плоское прозрачное бесцветное или окрашенное натрий-кальций-силикатное стекло с параллельными огненнополированными поверхностями, изготавливаемое методом

непрерывного растекания и протягивания через ванну с расплавом металла (СТБ ЕН 572-1).

Прокатное листовое стекло – это стекло, изготавливаемое из ленты стекломассы путем ее непрерывного проката между двумя валками или путем периодического проката на столе с помощью одного валка.

Тянутое листовое стекло – это плоское прозрачное бесцветное или окрашенное натрий-кальций-силикатное стекло заданной толщины с обеими огненно полированными поверхностями; изготавливается методом непрерывного вертикального вытягивания.

Стекло листовое может быть бесцветным, глушеным, матированным, полированным, солнцезащитным и т. д.

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

Глушеное листовое стекло – это прокатное непрозрачное (молочного или другого цвета) стекло, имеющее одну лицевую поверхность гладкую, другую – мелкорифленую.

Матированное листовое стекло – это непрозрачное просвечивающееся стекло с шероховатой поверхностью с одной стороны.

Полированное листовое стекло – это стекло, обработанное механической шлифовкой и полировкой, имеющее плоскопараллельные поверхности и не дающее оптических искажений в отраженном свете.

Солнцезащитное листовое стекло – это стекло, уменьшающее пропускание солнечной радиации в целом или в отдельной области спектра. Различают три вида стекол: теплоотражающее, теплопоглощающее, электрохимически окрашенное.

Теплопоглощающее листовое стекло – это солнцезащитное листовое стекло из окрашенной стекломассы, уменьшающее пропускание света в инфракрасной области спектра.

Теплоотражающее листовое стекло – это солнцезащитное стекло с тонким светопрозрачным покрытием, придающим стеклу повышенную отражающую способность в инфракрасной области спектра.

Стекло «мороз» – это листовое стекло, имеющее на одной поверхности неповторяющийся узор, напоминающий заиндевшее стекло.

Электрохимически окрашенное листовое стекло – это термополированное солнцезащитное листовое стекло со специальным окрашенным поверхностным слоем, уменьшающим пропускание света в инфракрасной видимой и ультрафиолетовой областях спектра.

Стекло с покрытием – это листовое стекло, на которое нанесено покрытие для изменения одного или нескольких свойств (СТБ ЕН 1096-1).

**Стекло многослойное** – это плоское изделие, состоящее из одного или нескольких листов неорганического стекла и пленочных или жидких полимерных и силикатных материалов, склеивающих и/или покрывающих стекла (ГОСТ 30826).

**Стекло полированное армированное** – это плоское прозрачное бесцветное натрий-кальций-силикатное стекло с параллельными полированными поверхностями, которые обрабатываются методом шлифовки и полировки поверхностей армированного узорчатого стекла (СТБ ЕН 572-1).

**Стекло профилированное строительное, армированное** проволокой или без армирования – это полупрозрачное бесцветное или окрашенное натрий-кальций-силикатное стекло, изготавливаемое посредством отливки и прокатки, с армированием проволокой или без армирования, которое в процессе изготовления подвергается изгибу в профиль U-образной формы (СТБ ЕН 572-1).

**Стекло термически закаленное** натрий-кальций-силикатное однослойное безопасное – это стекло, изготавливаемое методом нагрева до установленной температуры с последующим быстрым контролируемым охлаждением, в результате чего в стекле возникает длительное распределение напряжений, придающее ему повышенную стойкость к механическим и термическим нагрузкам (СТБ ЕН 12150-1).

**Стекло узорчатое** – плоское прозрачное бесцветное или окрашенное натрий-кальций-силикатное стекло, изготавливаемое методом непрерывной отливки и прокатки (СТБ ЕН 572-1).

**Стекло узорчатое армированное** – плоское прозрачное бесцветное или окрашенное натрий-кальций-силикатное стекло, изготавливаемое методом непрерывной отливки и прокатки, в которое в процессе изготовления закладывают сваренную во всех точках пересечения стальную сетку. Поверхности могут быть рельефными или гладкими (СТБ ЕН 572-1).

**Стеклоблоки** – это полученные путем формования (прессования), герметично закрытые полые стеклянные изделия, предназначенные для применения в вертикальных строительных конструкциях, например стенах (СТБ ЕН 1051-1).

**Стеклопакет** – это механически устойчивый и прочный блок, состоящий не менее чем из двух листов стекла, разделенных одной или несколькими дистанционными рамками, и герметично уплотненный по контуру (СТБ ЕН 1279-1).

**Стеклянные плитки** – это полученные путем формования, полнотелые или полые стеклянные изделия, предназначенные для применения в горизонтальных строительных конструкциях, например перекрытиях.

**Черепица стеклянная** – это стеклянное изделие, изготовленное методом прессования, предназначенное для светопрозрачных покрытий зданий.

Основными компонентами архитектурно-строительных стекол являются  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Типовые химические составы стекол и их физико-химические свойства приведены в табл. П. 1.1 и П. 1.2 прил. 1.

К группе **тарных стекол** относят стеклянные полые изделия, предназначенные для разлива, упаковки, хранения и транспортировки различных продуктов в пищевой, химической, медицинской и парфюмерной промышленности. Сюда относят широкогорлую и узкогорлую тару (бутылки, банки, флаконы и т. д.), выпускаемую методами выдувания, прессования, прессовывдувания.

К группе **сортового стекла** относят изделия, вырабатываемые из хрустальных, бесцветных и окрашенных стекол и предназначенные для употребления в быту, украшения жилища, оформления культурно-бытовых учреждений.

К сортовому стеклу относят стеклянную посуду (столовую, посуду для вина и напитков), пепельницы, вазы, туалетные наборы, сувениры, художественно-декоративные изделия (скульптурные изделия).

Изготавливают сортовые изделия методами выдувания, прессовывдувания, прессования. Применяется механизированное и ручное формование. К изделиям, вырабатываемым механизированным способом, следует отнести: стаканы и графины (выдувная посуда), стаканы, рюмки, блюдца, салатницы, тарелки, сахарницы, масленки,

селечной и прочие виды изделий (прессованная и прессованная посуда).

Ассортимент изделий, вырабатываемых ручным способом, значительно шире: изделия на ножке (рюмки, бокалы, фужеры); вазы для варенья, печенья, конфет, фруктов и цветов; стаканы чайные и пивные; блюда для чая и варенья, кувшины и графины для воды, молока и напитков, художественно-декоративные изделия и др.

Группа **технического стекла** в зависимости от свойств, состояния и предъявляемых к нему требований подразделяется на кварцевое, оптическое, электровакуумное, химико-лабораторное, транспортное, пористое, растворимое, люминесцирующее, тугоплавкое, упрочненное, термостойкое, стеклянное волокно и др.

Кварцевое стекло представляет собой однокомпонентное силикатное стекло и является продуктом охлаждения расплава кремнезема до твердого состояния без кристаллизации. Кварцевое стекло можно разделить на следующие основные виды: непрозрачное; прозрачное техническое; прозрачное оптическое и особо чистое.

Для прозрачного кварцевого стекла характерны высокая химическая чистота ( $\text{SiO}_2 \geq 99,98$  мас. %) и высокое светопропускание в ультрафиолетовой (УФ) и видимой областях спектра. Непрозрачное кварцевое стекло ( $\text{SiO}_2 \geq 99,5$  мас. %) становится таковым из-за сильного рассеивания света, обусловленного наличием большого количества газовых включений. Кварцевое стекло используют в оптике, светотехнике, приборостроении, электротехнике, волоконной оптике, космической технике, металлургии и т. д.

К электровакуумному и электротехническому стеклу относят стеклянные детали электровакуумных приборов различного вида и назначения (ламп, электронно-лучевых трубок, телевизионных кинескопов), а также стекло для рентгеновской и электронной техники, интегральных схем и т. д. Составы электровакуумных и электротехнических стекол весьма разнообразны, основными компонентами являются:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ .

К изделиям из химико-лабораторного стекла относят химическую посуду, приборы и приспособления, а также аппараты, применяемые в лабораторной практике. Промышленные химико-лабораторные стекла являются многокомпонентными силикатными стеклами, отличающимися пониженным содержанием оксидов ще-

лочных металлов и присутствием, помимо  $\text{SiO}_2$ , оксидов  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{ZrO}_2$ , повышающих химическую устойчивость стекла.

Из термостойкого стекла изготавливают термометры, ртутные переключатели, термоконтакты.

К медицинскому стеклу относятся изделия для упаковки и хранения лекарственных средств, инъекционных и бактериологических растворов. Составы этих стекол характеризуются повышенным содержанием  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , пониженным – оксидов щелочных ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ) и щелочноземельных металлов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ ).

Большинство изделий из медицинского, химико-лабораторного и электровакуумного стекла изготавливают из стеклянных трубок, полученных методами вертикального или горизонтального вытягивания. Крупноразмерные изделия изготавливают из расплава методами прессования, прессовывдувания, выдувания.

Упрочненное стекло получают из обычного стекла путем его термической и/или химической обработки (травление кислотами, ионный обмен и т. д.).

Стежлянным волокном называют искусственное волокно, изготовленное различными способами из расплавленного стекла. Различают стекловолокно непрерывное и штапельное (длиной нитей до 50 см). Вырабатывают стеклянные волокна вытягиванием непрерывного волокна из расплавленного стекла и разделением струи расплава стекла (воздухом, паром, газом, центробежным методом и т. д.), сопровождаемым вытягиванием коротких волокон.

На основе штапельного волокна изготавливают тепло- и звукоизоляционные материалы – стеклянную вату, холсты, рулонные материалы, плиты, из непрерывного волокна – стеклянную нить, стеклянные ткани, сетки, ленты, холсты – материалы, применяемые для производства стеклопластиков, а также в строительстве (стеклообои, стеклоарматура, стеклосетка).

Для получения стеклянных волокон стекла синтезируют в различных стеклообразных системах, используя бесщелочные алюмоборосиликатные стекла (электроизоляционного назначения); бесщелочные натриево-кальциево-алюмоборосиликатные стекла (химически устойчивые); натриево-кальциево-силикатные стекла (тепло- и звукоизоляция); магниийалюмосиликатные (высокопрочные); кварцевые (высокотемпературостойкие).

**Ситалл** (стеклокерамика) – стеклокристаллический материал, получаемый на основе стекла путем его направленной регулируемой

объемной кристаллизации. Ситалл состоит из одной или нескольких кристаллических фаз (размер кристаллов не более 0,3 мкм), общее содержание которых составляет 30–95 об. %, и остаточной стеклофазы.

Свойства материала определяются его фазовым составом и структурой. По назначению выделяют технический, строительный, медицинский. Получают методами стекольной технологии (плиты, трубы, листы, посуда) и керамической технологии (пористые материалы, изделия сложной формы).

## Выполнение работы

Классифицировать изделия из стекла и ситаллов на группы по техническим свойствам и области применения. Для этого выданные преподавателем образцы стекла и стеклоизделий по внешним признакам (форма, цвет, прозрачность и т. д.) разделить на группы по назначению и области применения. В зависимости от типа стеклообразующих компонентов по данным, представленным в табл. П. 1.1 прил. 1, подразделить стекла на виды, указать возможный химический состав. Из физико-химических свойств стекла, приведенных в табл. П. 1.2 прил. 1, выделить характеристики, определяющие основные эксплуатационные показатели классифицируемого стекла или стеклоизделий. Пояснить сделанный выбор.

Результаты работы записывают в табл. 1.

Таблица 1

### Классификация стекол и стеклоизделий

№ образца	Наименование стеклоизделия	Группа стекла по назначению	Способ формирования	Вид стекла и стеклообразующие компоненты	Область применения	Основное свойство стекла, определяющее его назначение

## Контрольные вопросы

1. Стекло и его классификация по химическому составу.
2. Классификация стеклоизделий по назначению.
3. Способы получения стеклоизделий различного назначения.

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

Технология производства стеклоизделий включает следующие основные стадии:

- обработка сырьевых материалов и приготовление шихты;
- варка стекла;
- формование стеклоизделий из стекломассы;
- отжиг стеклоизделий.

В лабораторных условиях могут быть осуществлены все стадии процессов получения стекла с изготовлением образцов для последующих испытаний.

## *Лабораторная работа № 2*

---

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ШИХТЫ И ВАРКА СТЕКЛА

#### Общие сведения

**Сырьевые материалы.** Сырьевые материалы для производства стеклоизделий делят на основные и вспомогательные. С основными сырьевыми материалами вводятся компоненты, входящие в химический состав стекла. Введение вспомогательных сырьевых материалов обеспечивает улучшение качества стекла и ускорение процессов стекловарения. К ним относятся осветлители, обесцвечиватели, окислители, восстановители, ускорители, красители.

Качество сырьевых материалов регламентируется стандартами и техническими условиями.

Пригодность сырья для приготовления стекольной шихты оценивается по следующим показателям:

- содержание основного вещества;
- содержание оксидов железа и других красящих примесей;
- однородность по химическому и гранулометрическому составу.

Основным показателем чистоты сырьевых материалов является содержание в них оксидов железа, которые придают стеклу нежелательную окраску.

*Основные сырьевые материалы.* Основным сырьевым материалом для ввода в стекло  $\text{SiO}_2$  является кварцевый песок. Для стекловарения применяют кварцевые пески, содержащие не менее 95% кремнезема. В соответствии с ГОСТ 22551 кварцевые пески для стекольной промышленности делятся на 17 марок по содержанию оксидов кремния и железа. Требования к кварцевым пескам различных марок и области их применения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Марки кварцевых песков**

Марка	Содержание, мас. %		Область применения
	$\text{SiO}_2$ , не менее	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ , не более	
ООВС-010-В	99,8	0,010	Для производства оптического стекла, свинцового хрусталя, художественных изделий
ООВС-015-1	99,3	0,015	Для производства светотехнического стекла; бесвинцового хрусталя; изделий из сортового стекла; силикатов натрия
ОВС-020-В	99,0	0,020	
ОВС-025-1А	98,5	0,025	
ВС-030-В	98,5	0,030	Для производства листового оконного и технического стекла; стеклоблоков, проката; стекловолокна; лабораторного, медицинского стекла; стеклотары из обесцвеченного стекла, светотехнического стекла, силикатов натрия
ВС-040-1	98,5	0,040	
ВС-050-1	98,5	0,050	
С-070-1	98,5	0,07	Для производства технического стекла, стеклоблоков, стекловолокна
С-070-2	98,5	0,07	
Б-100-1	98,5	0,10	Для производства силикат-глыбы, стекловолокна для электротехники, изоляторов, стеклотары из полубелого стекла
Б-100-2	95,0	0,10	
ПБ-150-1	98,0	0,15	Для производства пеностекла, стекловолокна строительного назначения
ПС-250	95,0	0,25	

В обозначении марок буквы означают: ООВС – для особо ответственных изделий высокой светопрозрачности; ОВС – для ответственных изделий высокой светопрозрачности; ВС – для изделий высокой светопрозрачности; С – для изделий светопрозрач-

ных; Б – для бесцветных изделий; ПБ – для полубелых изделий; ПС – для изделий пониженной светопрозрачности.

Первые три цифры марок означают содержание оксида железа в тысячных долях массовых процентов; четвертая цифра или буква – сорт продукции данной марки (высший, первый, второй). Например, кварцевый песок высшего сорта марки ООВС-015-В содержит не более 0,015 мас. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Кварцевый песок марок ООВС-010-В, ООВС-015-В поставляется на стекольные предприятия республики ЗАО «Новоселовский горнообогатительный комбинат» (Украина). Гомельский ГОК поставляет песок кварцевый марки ВС-030-В, который используется в производстве листового стекла.

От гранулометрического состава кварцевых песков зависит продолжительность процесса стеклообразования. Рекомендуются гранулометрический состав представлен фракцией с размером зерен 0,1–0,4 мм. При варке тугоплавких стекол используется молотый кварцевый песок с размером зерен менее 63 мкм.

Химический состав основных сырьевых материалов, используемых стекольными предприятиями республики, приведен в табл. П. 2.1 прил. 2.

Для введения в состав стекол  $\text{Al}_2\text{O}_3$  используются технический глинозем, полевой шпат, каолин. Для варки бесцветных стекол с высоким светопропусканием, а также бесщелочных стекол применяется технический глинозем. При использовании полевых шпатов температура варки снижается, потому что они содержат химически связанные с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оксиды  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$ . Полевые шпаты применяются для варки листовых стекол, при получении гранулята для пеностекла и др. Каолин используется при производстве стекловолокна.

Для введения в состав стекла оксидов  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  используют мел и доломит. Наличие в составе доломита месторождения «Руба» и мела Волковысского месторождения (Республика Беларусь) примесей оксидов железа ограничивает применение данного сырья. Оно применяется при варке тарных и листовых стекол, а также стекол для стекловолокна. При варке оптического, сортового, светотехнического стекла используют синтетическое сырье, например, магнезию жженую, магний углекислый, кальций углекислый.

Оксиды щелочных металлов ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) вводят через соду кальцинированную, сульфат натрия, поташ, селитру натриевую

и калиевую. В настоящее время чаще всего используют легкую кальцинированную соду с размером частиц 0,04–0,2 мм. Для уменьшения пыления соды рекомендуется использовать тяжелую гранулированную соду с размером частиц до 2 мм.

*Осветлители.* В промышленном стекловарении в состав шихты обязательно вводится осветлитель. Осветлители – вещества, которые обеспечивают удаление газообразных включений (пузырей) из стекломассы. Осветлители разлагаются с выделением крупных пузырей после завершения процесса стеклообразования в интервале температур 1300–1450°C. Выбор осветлителя определяется составом стекла. В табл. 3 приведены наиболее распространенные осветлители и их комбинации.

Таблица 3

**Осветлители стекломассы**

Тип стекла	Рекомендуемые осветлители и их комбинации	Концентрация осветлителей, мас. %
Листовое, тарное	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0,2–0,4 в пересчете на $\text{Na}_2\text{O}$
Техническое, сортовое, оптическое	$\text{As}_2\text{O}_3 + \text{KNO}_3 (\text{NaNO}_3)$ ; $\text{Sb}_2\text{O}_3 + \text{KNO}_3 (\text{NaNO}_3)$ ; $\text{CeO}_2 + \text{KNO}_3 (\text{NaNO}_3)$ ; $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NaNO}_3 (\text{KNO}_3)$	$\text{As}_2\text{O}_3$ : 0,1–0,5; $\text{Sb}_2\text{O}_3$ : 0,1–1,0; $\text{CeO}_2$ : 0,15–0,5; $\text{NaNO}_3 (\text{KNO}_3)$ : 0,5–4,0 в пересчете на $\text{Na}_2\text{O} (\text{K}_2\text{O})$
Боросиликатное	$\text{As}_2\text{O}_3 + \text{KNO}_3 + \text{NaCl}$ ; $\text{As}_2\text{O}_3 + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{CaF}_2$ ; $\text{CeO}_2, \text{NaCl}$	$\text{NaCl}$ : 1,0; $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ : 1,0–2,0; $\text{CaF}_2$ : 0,5–1,0; $\text{CeO}_2$ : до 0,5

*Ускорители.* Добавки таких веществ обеспечивают ускорение процессов стекловарения на 15–18% за счет снижения температуры появления жидкой фазы при стекловарении.

Эффективными ускорителями являются соединения фтора: плавленый шпат (основное вещество  $\text{CaF}_2$ ), кремнефтористый натрий  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ . Добавки 0,5–1 мас. %  $\text{F}^-$  снижают температуру завершения реакций силикатообразования на 100–200°C. Недостатком соединений фтора является их летучесть (потери  $\text{F}^-$  составляют до 60%). В безборных составах ускорителем является  $\text{V}_2\text{O}_5$ , вводимый в количестве 0,8–1,5 мас. %. В качестве ускорителей применяются также соли аммония ( $\text{NH}_4\text{NO}_3, (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4, \text{NH}_4\text{Cl}$ ), вводимые в количестве 0,25–1,0 мас. %.

*Окислители и восстановители.* Окислительно-восстановительные условия варки регулируются введением окислителей (натриевой и калиевой селитры, оксида церия, сульфата натрия) либо восстановителей (угля, соединений олова, виннокаменной соли  $\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ ). Окислительные условия создаются для обесцвечивания стекла, а также при введении ряда красителей. Восстановительные условия необходимы для окраски соединениями селена (желтые и красные цветовые тона).

*Обесцвечиватели.* Окрашивание стекла соединениями железа – распространенное явление, так как  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  присутствует во всем минеральном сырье. В стекле железо присутствует в форме ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . В двухвалентной форме железо окрашивает стекло в синевато-зеленый цвет, а в трехвалентной – в желтовато-зеленый или желтый. Однако окрашивающая способность  $\text{FeO}$  примерно в 15 раз выше, чем  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Для устранения нежелательного цветного оттенка стекла проводят обесцвечивание.

Для химического обесцвечивания вводят окислители:  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ . При этом уменьшается содержание  $\text{FeO}$  в составе стекла. При химическом обесцвечивании снижается интенсивность окраски стекла.

При физическом обесцвечивании в состав шихты вводят добавки красителей, которые придают стеклу оттенок, дополнительный к зеленому цвету, связанному с наличием в составе стекла оксидов железа. Эти добавки окрашивают стекло в красный и (или) фиолетовый цвет. Введение в шихту селена  $\text{Se}$  (0,6 г на 100 кг стекла) в сочетании с оксидом кобальта  $\text{CoO}$  (0,2 г на 100 кг стекла) обеспечивает физическое обесцвечивание стекломассы при содержании оксидов железа менее 0,1 мас. %. В качестве обесцвечивателей используются также такие красители, как оксид никеля  $\text{NiO}$ , оксид эрбия  $\text{Er}_2\text{O}_3$ , оксид неодима  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , оксид марганца  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ .

*Красители.* Наибольшее распространение в качестве красителей получили оксиды переходных металлов – кобальта, марганца, хрома, никеля, железа, меди.

Оксид кобальта  $\text{CoO}$  известен как весьма интенсивный и наиболее эффективный краситель, применяемый в стекольной промышленности.  $\text{CoO}$  обеспечивает сине-фиолетовое окрашивание различной интенсивности при концентрации 0,002–0,1 мас. %. Окрашивание кобальтом не зависит от режима варки – окислительных или восстановительных условий.

При введении  $Mn_2O_3$  в количестве до 3 мас. % получают стекло фиолетового цвета. В стекле марганец встречается в форме двухвалентного и трехвалентного ионов. Стекла, содержащие только  $Mn^{2+}$ , почти бесцветны.  $Mn^{3+}$  окрашивает стекла в интенсивный фиолетовый цвет, поэтому при варке марганецсодержащих стекол в состав шихты вводятся окислители.

Оксид хрома  $Cr_2O_3$  окрашивает в зеленый цвет при введении в количестве 0,3–1 мас. %. При введении в состав стекла оксида хрома до 3 мас. % происходит выделение тонких изумрудно-зеленых пластинок  $Cr_2O_3$  и образуется хромовый авантюрин.

Оксид  $NiO$  при концентрации около 3 мас. % окрашивает калийсодержащие стекла в красновато-фиолетовый цвет, натрийсодержащие – в коричневый цвет. Окрашивание не зависит от окислительно-восстановительных условий варки.

Оксид меди  $CuO$  в зависимости от концентрации и состава стекла окрашивает его в голубой или зеленый цвет. Стекла с  $CuO$  варят при окислительных условиях. Оксид меди  $Cu_2O$  в присутствии восстановителя образует коллоидную медь, и тогда стекло окрашивается в красный цвет.

Окрашивание стекла оксидами железа является наиболее распространенным, так как  $Fe_2O_3$  как примесь содержится в сырьевых материалах, особенно в кварцевом песке. В стекле железо встречается в форме ионов  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ . В двухвалентной форме железо окрашивает в синевато-зеленый цвет, в трехвалентной – в желтовато-зеленый. Цветной оттенок листового стекла, связанный с введением примесных оксидов железа, нежелателен. Однако в некоторых случаях оксиды железа применяют для окрашивания, например при варке теплопоглощающих листовых стекол, окрашенных тарных стекол.

**Шихта и ее приготовление.** *Шихта* – однородная смесь подготовленных сырьевых материалов. Подготовка сырьевых материалов зависит от их влажности и гранулометрического состава. Кусковые материалы дробят, при необходимости сушат (при влажности более 1%), затем мелют и просеивают. При просеивании обеспечивается заданный гранулометрический состав сырьевых материалов. Крупные зерна кварцевого песка плохо растворяются в расплаве. Оптимальной является фракция кварцевого песка с размером зерен 0,1–0,4 мм.

Основными показателями качества стекольной шихты являются ее соответствие заданному химическому составу и химиче-

ская однородность. Однородность шихты зависит от гранулометрии сырьевых материалов, точности дозирования и условий смешивания компонентов. При неоднородной шихте возникают такие пороки стекла, как свиля и шихтные камни.

Последующей стадией приготовления шихты является ее перемешивание до достижения однородного распределения отдельных компонентов в смеси сырьевых материалов. Высокая однородность шихты ускоряет провар стекломассы и ее осветление, обеспечивает получение однородного стекла. Неоднородность шихты приводит к появлению включений непровара, свилей, пузырей.

*Контроль качества шихты* включает определение количества компонентов в следующих группах:

- компоненты, растворимые в воде (карбонат натрия);
- компоненты, растворимые в HCl (карбонат кальция, карбонат магния);
- количество остатка, нерастворимого в HCl (н. о.) (кремнезем, глинозем).

Допустимые отклонения основных компонентов шихты от заданного не должны превышать  $\pm 1\%$ . При больших отклонениях шихту считают браком.

**Расчет шихты.** При расчете шихты по заданному составу стекла необходимо учесть содержание оксида в соединении, содержание основного вещества в материале, потери на улетучивание (унос) при стекловарении. Содержание основного вещества в материале определяют по результатам химического анализа поступающих на предприятие партий сырья. Потери на улетучивание зависят от вида компонента и условий варки. Их определяют на основе опытных данных.

Рассмотрим пример расчета шихты листового стекла следующего состава, мас. %:  $\text{SiO}_2 - 72,8$ ;  $\text{Na}_2\text{O} - 13,6$ ;  $\text{CaO} - 9,7$ ;  $\text{MgO} - 2,7$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,2$ .

Кремнезем вводим через песок кварцевый Гомельского ГОКа. Его необходимое количество обозначим через  $x_1$ . В качестве сырьевых материалов используем также мел ( $x_2$ ), доломит ( $x_3$ ), кальцинированную соду ( $x_4$ ), полевой шпат ( $x_5$ ). В качестве осветлителя вводим сульфат натрия ( $x_6$ ). Количество  $\text{Na}_2\text{O}$ , вводимого через  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , составляет 0,4 мас. %. Количество восстановителя (угля каменного) составляет 5 мас. % от массы сульфата натрия в составе шихты.

Химический состав сырьевых материалов приведен в табл. 4.

Таблица 4

**Химический состав сырьевых материалов**

Сырьевые материалы	Обозначение	Содержание оксидов, мас. %					
		SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Песок кварцевый	x <sub>1</sub>	99,4	–	–	–	0,22	0,03
Полевой шпат	x <sub>2</sub>	60,8	15,4	–	–	22,6	0,18
Мел	x <sub>3</sub>	1,2	–	54,3	0,6	0,6	0,1
Доломит	x <sub>4</sub>	1,4	–	32,1	20,5	0,9	0,18
Сода кальцинированная	x <sub>5</sub>	–	58,0	–	–	–	–
Сульфат натрия	x <sub>6</sub>	–	43,4	–	–	–	–

Расчет производится на 100 мас. ч. (100 г, 100 кг) стекла. При определении требуемого количества сырьевых материалов необходимо учесть введение оксида с каждым материалом. Например, кремнезем входит в состав кварцевого песка, мела, доломита и полевого шпата.

Определяем количество SiO<sub>2</sub>, вводимого с данными материалами, мас. %:

– с кварцевым песком:  $(x_1 \cdot 99,4) / 100 = 0,994x_1$ ;

– полевым шпатом:  $(x_2 \cdot 60,8) / 100 = 0,608x_2$ ;

– мелом:  $(x_3 \cdot 1,2) / 100 = 0,012x_3$ ;

– доломитом:  $(x_4 \cdot 1,4) / 100 = 0,014x_4$ .

Всего необходимо ввести 72,8 мас. % SiO<sub>2</sub>. Составляем уравнение:

$$72,8 = 0,994x_1 + 0,608x_2 + 0,012x_3 + 0,014x_4.$$

Аналогичные уравнения составляем для других оксидов и получаем систему уравнений с шестью неизвестными:

$$72,8 = 0,994x_1 + 0,608x_2 + 0,012x_3 + 0,014x_4 \text{ (для SiO}_2\text{)};$$

$$1,2 = 0,0022x_1 + 0,226x_2 + 0,006x_3 + 0,009x_4 \text{ (для Al}_2\text{O}_3\text{)};$$

$$9,7 = 0,543x_3 + 0,321x_4 \text{ (для CaO)};$$

$$2,7 = 0,006x_3 + 0,205x_4 \text{ (для MgO)};$$

$$13,6 - 0,4 = 0,154x_2 + 0,58x_5 \text{ (для Na}_2\text{O)};$$

$$0,4 = 0,434x_6.$$

Определяем количество сульфата натрия:  $x_6 = 0,4 / 0,434 = 0,92$  мас. ч.

Решаем систему уравнений с помощью программы Mathcad.

Рассчитанный состав шихты, мас. ч.:

- песок кварцевый – 70,59;
- полевои шпат – 3,84;
- мел – 10,25;
- доломит – 12,87;
- сода кальцинированная – 21,74;
- сульфат натрия – 0,92.

Рассчитываем количество восстановителя (угля каменного), вводимого в количестве 5 мас. % от содержания сульфата натрия в шихте:

$$(0,92 \cdot 5) / 100 = 0,05 \text{ мас. ч.}$$

Определяем расчетный состав стекла, исходя из рецепта шихты и состава сырьевых материалов. Например, с кварцевым песком в состав стекла войдут следующие компоненты, мас. %:

$$\text{SiO}_2 : (70,59 \cdot 99,4) / 100 = 70,166;$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 : (70,59 \cdot 0,22) / 100 = 0,155;$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 : (70,59 \cdot 0,03) / 100 = 0,021.$$

Аналогично рассчитываем количество оксидов, которые вводятся в состав стекла с каждым сырьевым материалом.

Расчетный состав стекла отличается от заданного, поскольку учтен примесный оксид железа. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 5

Составы шихты и стекла по результатам расчета

Состав шихты			Содержание оксидов, мас. %					
Сырьевые материалы	Обозначение	Содержание, мас. ч.	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Песок кварц.	x <sub>1</sub>	70,59	70,166	–	–	–	0,155	0,021
Полевой шпат	x <sub>2</sub>	3,84	2,334	–	–	0,59	0,868	0,007
Мел	x <sub>3</sub>	10,25	0,123	5,566	0,062	–	0,061	0,010
Доломит	x <sub>4</sub>	12,87	0,180	4,131	2,638	–	0,116	0,023

Состав шихты			Содержание оксидов, мас. %					
Сода кальцин.	x <sub>5</sub>	21,74	–	–	–	12,61	–	–
Сульфат натрия	x <sub>6</sub>	0,92	–	–	–	0,40	–	–
Уголь	–	0,05	–	–	–	–	–	–
Масса шихты	–	120,26	–	–	–	–	–	–
Расчетный состав стекла			72,803	9,697	2,70	13,60	1,20	0,061
Заданный состав стекла			72,8	9,7	2,7	13,6	1,2	–
Отклонение расчетного состава от заданного			+0,003	–0,003	0	0	0	+0,061

Определим потери при варке стекла. Поскольку из 120,26 мас. ч. шихты получаем 100 мас. ч. стекла, то соответственно из 100 мас. ч. шихты получим стекла:

$$(100 / 120,26) \cdot 100 = 83,2 \text{ мас. ч.}$$

Потери при варке стекла составят:

$$100 - 83,2 = 16,8 \text{ мас. ч.}$$

В лабораторных условиях варку стекла ведут в печах периодического действия: газовой пламенной печи либо электропечи. Скорость подъема температуры в печи составляет 250–300°С/ч. Максимальная температура варки составляет 1400–1500°С в зависимости от состава стекла. Температура варки повышается с ростом содержания в составе стекла оксидов SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и снижается с ростом содержания плавней – оксидов Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Пороки стекла.** При нарушении технологии приготовления шихты и варки стекла возникают пороки стекловарения. К ним относятся кристаллические включения, свиля, газовые включения.

*Кристаллические включения (камни).* Камнями называются все кристаллические включения в стекле независимо от их происхождения: непроваренная шихта; нерасплавившиеся кусочки огнеупоров; продукты кристаллизации; инородные включения. Камни являются грубыми пороками, которые нарушают прозрачность стекла, ухудшают внешний вид, снижают прочность и термостойкость изделий.

При варке стекол в лабораторных условиях кристаллические включения чаще всего представляют собой нерастворившиеся зерна кварцевого песка (кремнезема).

Камни, связанные с разрушением огнеупоров, имеются только в образцах стекла промышленных варок.

*Свили* – растянутые в нити и волокна стекловидные включения, которые имеют отличные от основного состава оптические и другие свойства. Свили возникают вследствие неоднородности стеклорасплава.

Причиной возникновения свилей является неоднородность шихты и несоблюдение требований по гранулометрическому составу сырья. При варке в лабораторных условиях из-за небольшого объема тиглей не развиваются конвективные потоки. При отсутствии механического перемешивания сложно обеспечить однородность стекломассы в случае варки тугоплавких составов.

*Газовые включения* делят на пузыри (диаметром более 0,8 мм) и «мошку» (диаметром менее 0,8 мм). Газовые включения в процессе варки стекломассы появляются вследствие того, что шихта содержит большое количество газообразных компонентов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ), которые выделяются при разложении кальцинированной соды, мела, сульфата натрия, борной кислоты и др. При высокой вязкости расплава эти газы не успевают выделиться и остаются в нем в виде пузырей.

## **Выполнение работы**

Приготовление шихты начинают с подготовки сырьевых материалов. Материалы, имеющие комки, растирают в фарфоровой ступке и просеивают. Влажные материалы предварительно сушат до влажности не более 0,5%. Для просева кварцевого песка используют сито № 04, остальные материалы просеивают через сито № 1.

Сырьевые компоненты вводятся в состав шихты в соответствии с рассчитанным рецептом. Взвешивание производят на электронных весах с точностью до первого знака после запятой.

Шихту для лабораторных варок перемешивают вручную в фарфоровых ступках с помощью фарфорового пестика. Длительность перемешивания шихты должна составлять не менее 15 мин.

Приготовленную шихту засыпают в фарфоровые или корундовые тигли. На каждом тигле суспензией  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в воде пишут номер состава стекла.

Тигли с шихтой размещают в газовой стекловаренной печи периодического действия. Варка стекла ведется стекловаром в течение 6–8 ч. При достижении максимальной температуры, составляющей для большинства составов промышленных стекол  $1450^\circ\text{C}$ ,

проводится выдержка в течение 1 ч. Контроль температуры проводится с помощью пирометра.

Готовность стекломассы определяют пробой на нить, которую стекловар вытягивает из расплава прутом из жаростойкой стали. Нить не должна иметь узелков и включений непровара.

При достижении однородности стекломассы тигли извлекают из печи и формуют образцы способом отливки в металлические формы.

Образцы стекол сразу же переносят в электрическую печь, разогретую до 550–580°C, и проводят отжиг, включающий выдержку при данной температуре в течение 30 мин и охлаждение до температуры 400°C со скоростью не более 2°C/мин.

После отжига образцов визуально оценивают качество стекла по следующим показателям:

1) наличию кристаллических включений (камней), кремнеземистой корки, свилей;

2) степени осветления стекломассы – количеству и размеру газовых включений;

3) окраске стекла, ее однородности.

Результаты варки стекол представляют по форме табл. 6.

Таблица 6

**Результаты варки стекол**

Тип стекла	Температура варки, °C	Скорость подъема температуры, °C/ч	Визуальная оценка качества стекла		
			кристаллические включения	газовые включения	окраска

### **Контрольные вопросы**

1. Основные сырьевые материалы, используемые при варке стекол.

2. Вспомогательные сырьевые материалы.

3. Принципы выбора сырьевых материалов для варки стекол различного назначения.

4. Обработка сырьевых материалов и приготовление шихты.

5. Показатели качества шихты.

6. Виды пороков стекловарения и источники их происхождения.

## КРИСТАЛЛИЗАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЕКОЛ

### Общие сведения

Поскольку стекло является метастабильным состоянием твердых тел, при охлаждении стекломассы в процессе выработки возможна его кристаллизация. Наличие кристаллических включений в изделии является недопустимым в производстве стеклоизделий. Кристаллизационную способность стекол необходимо знать, чтобы установить оптимальный режим выработки стеклоизделий.

Для оценки кристаллизационной способности широко используется метод градиентной кристаллизации. Он заключается в термической обработке образцов стекла в течение 1–3 ч в электропечи, в которой создается градиент температур.

Кристаллизационную способность оценивают по температурному интервалу кристаллизации, который ограничен верхней  $T_v$  и нижней  $T_n$  температурами кристаллизации. Выше верхней температуры кристаллизации кристаллы плавятся и кристаллизация стекла невозможна. Ниже  $T_n$  кристаллизация не происходит из-за высокой вязкости стекла.

Температура выработки стекла должна быть на 70–80°C выше, чем верхняя температура кристаллизации.

Различают поверхностную и объемную кристаллизацию. Большинство промышленных стекол при термической обработке кристаллизуются с поверхности с образованием кристаллической пленки или корки. Объемная кристаллизация характерна для ситаллов.

Характер кристаллизации зависит от соотношения скорости образования центров кристаллизации, скорости роста кристаллов и вязкости стекла. Если скорость роста кристаллов большая, в стекле будут выделяться одиночные крупные кристаллы. Если же скорость роста кристаллов мала, а скорость образования центров кристаллизации велика, то образуется много кристаллов с размерами порядка 1 мкм. Чем больше объем выделившейся кристаллической фазы и шире интервал кристаллизации, тем выше кристаллизационная способность.

Кристаллизационная способность стекла в значительной мере зависит от его состава. Для снижения склонности к кристаллизации

в состав промышленных стекол вводят до 3 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Частичная замена  $\text{CaO}$  на  $\text{MgO}$  (до 4 мас. %) также приводит к снижению верхней температуры кристаллизации и уменьшению скорости роста кристаллов. Снижают кристаллизационную способность также оксиды  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{ZnO}$ .

## Выполнение работы

Для изучения кристаллизационной способности градиентным методом применяется градиентная печь, в которой создается зона со стабильным падением температур.

Установка представляет собой трубчатую горизонтальную электрическую печь. Нагреватели в печи установлены таким образом, чтобы в закрытом ее конце достигалась максимальная заданная температура (1000–1200°C), а к открытому торцу печи температура снижалась до 500–600°C. Термопары расположены равномерно по длине печи. Перед проведением испытаний печь предварительно нагревается до заданной максимальной температуры.

Образцы стекла разбивают в металлической ступке до кусочков размером 0,5–1 см. Они помещаются на керамическую подставку («лодочку») по всей ее длине. «Лодочка» со стеклом медленно вставляется в нагретую печь и выдерживается 1 ч. По окончании выдержки снимают показания термопар и строят график распределения температур по длине печи.

Затем «лодочку» извлекают из печи и оставляют до полного остывания на воздухе. Для объективной оценки степени кристаллизации отдельные кусочки стекла раскалывают, отмечая такие признаки кристаллизации, как кристаллическая пленка, кристаллическая корка, объемная кристаллизация и др. По графику распределения температур оценивают следующие показатели:

- 1) верхнюю температуру кристаллизации  $t_{\text{в}}$ ;
- 2) нижнюю температуру кристаллизации  $t_{\text{н}}$ ;
- 3) температурный интервал кристаллизации, т. е.  $t_{\text{в}} - t_{\text{н}}$ ;

По результатам градиентной термообработки может быть определена также температура начала оплавления острых граней, температура начала растекания (для легкоплавких стекол).

По полученным данным для каждого стекла строится графическое изображение результатов кристаллизации, при этом используются условные обозначения различных типов кристаллизации.

Пример качественной оценки кристаллизационной способности стекла приведен на рис. 1.

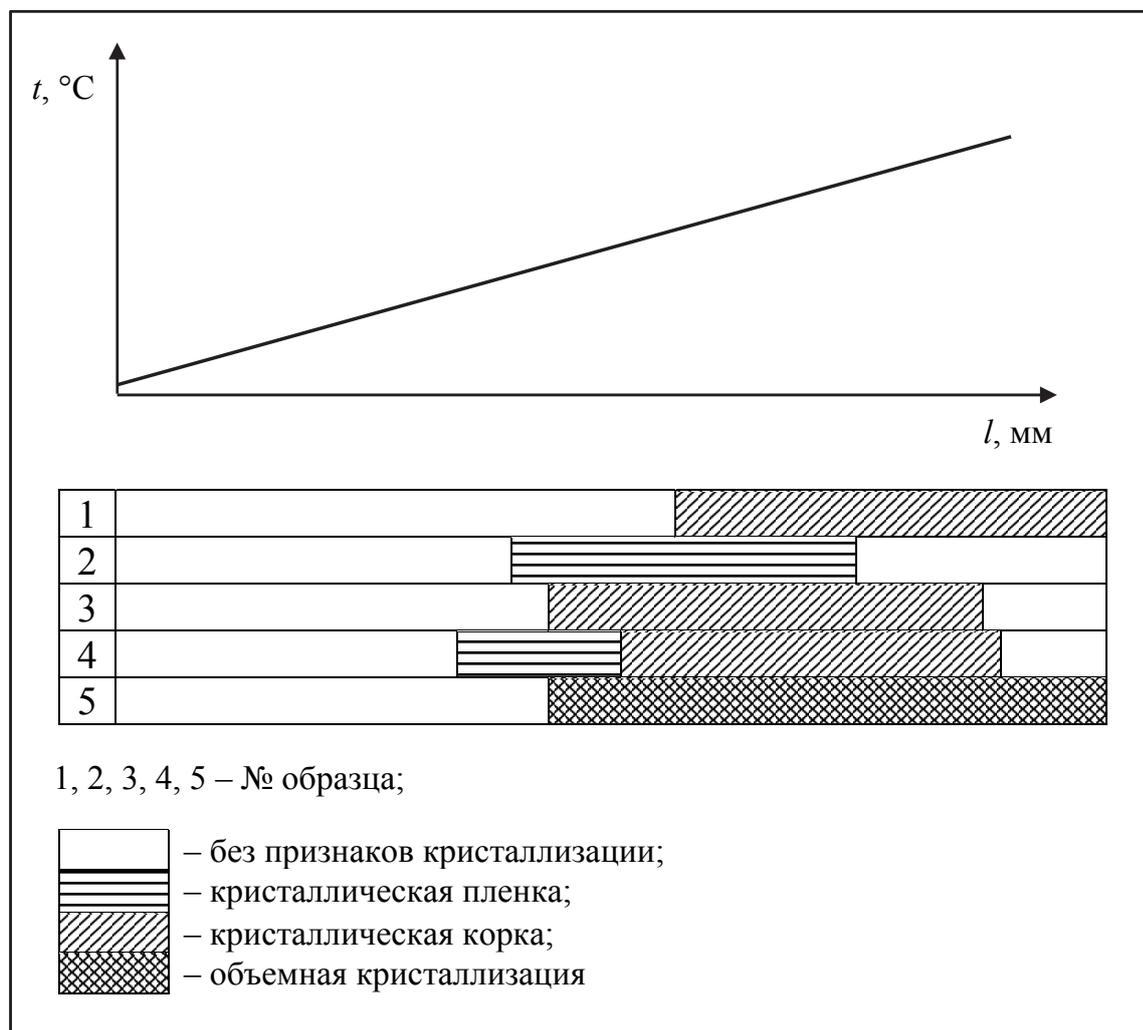


Рис. 1. Результаты градиентной термообработки

Результаты определения кристаллизационной способности стекол заносят в табл. 7.

Таблица 7

**Результаты оценки кристаллизационной способности стекол**

№ образца	Верхняя температура кристаллизации, °С	Температурный интервал кристаллизации, °С	Кристаллизационная способность	Температура плавления, °С

По величине верхней температуры кристаллизации определяют температуру выработки стеклоизделий, которая должна составлять не ниже  $(t_b + 70)^\circ\text{C}$ .

### Контрольные вопросы

1. *Метод оценки кристаллизационной способности стекол.*
2. *По каким показателям оценивается кристаллизационная способность стекол?*
3. *Влияние состава стекла на кристаллизационную способность.*
4. *Каким образом определяется температура выработки стеклоизделий?*

### Лабораторная работа № 4

---

## ОТЖИГ СТЕКЛА И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОТЖИГА

### Общие сведения

При охлаждении отформованных стеклоизделий вследствие низкой теплопроводности стекла устанавливается градиент температур между наружными и внутренними слоями. Это приводит к неравномерному сжатию наружных и внутренних слоев изделия и возникновению внутренних напряжений при твердении сформованных изделий. *Внутренними (собственными)* называют напряжения, уравновешенные в пределах данного тела.

Внутренние напряжения делятся на временные и постоянные (остаточные). Разрушающее напряжение принимают равным 70 МПа. Так как предел прочности стекла при растяжении значительно (в 10–20 раз) меньше предела прочности при сжатии, то разрушение изделия начинается в слоях, испытывающих напряжения растяжения.

*Временные напряжения* возникают при нагревании или охлаждении стекла в области температур ниже температуры стеклования  $T_g$ , которая соответствует вязкости стекла  $10^{12,3}$  Па · с. Температура стеклования – это температура перехода стекла из пластичного состояния в твердое. Временные напряжения являются следствием упругих деформаций, поэтому называются также термоупругими.

Данные напряжения исчезают при выравнивании температуры по толщине изделия, в частности при его охлаждении до комнатной температуры.

*Постоянные (остаточные) напряжения* возникают при охлаждении стекла от температур, которые выше температуры стеклования, и являются следствием пластических деформаций. По механизму возникновения их называют также термопластичными. Данные напряжения не снимаются при полном охлаждении стеклоизделия. В процессе отжига происходит уменьшение до допустимых пределов остаточных внутренних напряжений.

Величина внутренних напряжений, возникающих в стекле, возрастает с увеличением показателей температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), скорости охлаждения стеклоизделий, толщины стенок изделий. Неравномерно распределяются напряжения при сложной конфигурации изделий.

Неравномерно распределенные по объему стеклоизделия напряжения приводят к резкому снижению прочности вплоть до самопроизвольного разрушения изделия.

Поэтому стеклоизделия непосредственно после формования проходят специальную термическую обработку – *отжиг*. Отжиг является обязательной стадией технологии стекла как в промышленности, так и в лабораторных условиях. В процессе отжига снимаются или ослабляются внутренние напряжения до пределов, исключающих разрушение изделий в процессе эксплуатации. Задачи полностью снять напряжения не ставится, поскольку это возможно при очень длительных режимах отжига.

Температурно-временной режим отжига включает несколько стадий (рис. 2). Выбор режима отжига определяется свойствами стекла, формами и размерами изделий, способом изготовления и другими условиями.

Основные технологические параметры отжига – верхняя и нижняя температура отжига ( $t_{в.о}$  и  $t_{н.о}$  соответственно). Верхней температуре отжига соответствует значение вязкости стекла  $10^{12}$  Па · с. При нижней температуре отжига вязкость составляет  $10^{13,5}$  Па · с. Дальнейшее понижение температуры и рост вязкости делают невозможным возникновение остаточных внутренних напряжений.

Температуры  $t_{в.о}$  и  $t_{н.о}$  могут быть определены следующими экспериментальными способами:

- 1) по температурной зависимости вязкости стекла;
- 2) по дилатометрической кривой.

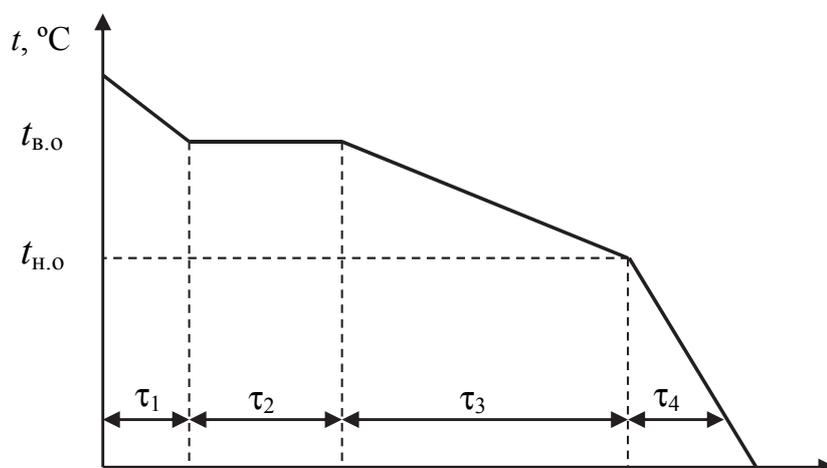


Рис. 2. Температурно-временной режим отжига

Режим отжига включает:

- стадию 1 – охлаждение (или нагрев) изделия до верхней температуры отжига  $t_{B.O}$ ;
- стадию 2 – кратковременную выдержку при  $t_{B.O}$  для снятия напряжений;
- стадию 3 – ответственный отжиг – медленное охлаждение до нижней температуры отжига  $t_{H.O}$  со скоростью, исключающей образование остаточных напряжений;
- стадию 4 – последующее охлаждение изделий с более высокой скоростью (быстрое охлаждение).

Стадия ответственного отжига является важнейшей в процессе термообработки, поскольку она должна обеспечить медленное охлаждение изделий без образования внутренних напряжений.

Качество отжига определяется характером распределения и величиной остаточных напряжений в изделии. При контроле качества отжига используется поляризационно-оптический метод. Метод основан на явлении двойного преломления, которое возникает в напряженном образце стекла при прохождении плоскополяризованного света. Поляризованный свет разлагается на два луча, распространяющихся с различными скоростями (обыкновенный и необыкновенный). Разность хода этих лучей (двойное лучепреломление)  $\Delta$  пропорциональна величине остаточных напряжений и длине хода лучей  $l$ .

Данные параметры соотносятся между собой по уравнению

$$\Delta = B l \sigma,$$

где  $B$  – оптический коэффициент напряжений (фотоупругая постоянная),  $\text{МПа}^{-1}$ . Для листовых стекол  $B = B_1 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$ . Величина разности хода лучей  $\Delta$  является безразмерной. Для удобства при измерении двойного лучепреломления  $\Delta$  выражают в нанометрах на сантиметр пути лучей в стекле (нм/см).

Допускаемые ГОСТами значения остаточных напряжений, которые оцениваются по разности хода лучей  $\Delta$ , составляют для листового полированного стекла 10–70 нм/см, для закаленного стекла – 1300–2400 нм/см.

**Расчет режимов отжига.** Имеются различные методики расчета температурного режима отжига.

Режим отжига флоат-стекла, поступающего в печь отжига при  $t_{в.о}$ , рассчитывается по следующей методике.

Время выдержки при верхней температуре отжига, выраженное в минутах, находится по формуле

$$\tau_1 = \frac{520a^2}{\Delta},$$

где  $a$  – полутолщина пластины, см;  $\Delta$  – допустимое остаточное напряжение, выраженное в разности хода поляризованных лучей, нм/см.

При расчете скорости охлаждения от  $t_{в.о}$  выделяются отдельные интервалы по  $10^\circ\text{C}$ . По мере снижения температуры скорость охлаждения увеличивается.

Скорость охлаждения от верхней температуры отжига в интервале  $10^\circ\text{C}$  определяется по формуле

$$v_2 = \frac{\Delta}{13a^2}.$$

В последующих интервалах скорость охлаждения возрастает через каждые  $10^\circ\text{C}$  соответственно в 1,2; 1,5; 1,9; 2,5; 3,3; 4,5; 6,1; 8,5 раза.

Скорость охлаждения от нижней температуры отжига  $v_3 = 8,5v_2$ .

Максимальная скорость охлаждения в интервале температур 480–100 $^\circ\text{C}$  составляет

$$v_3 = \frac{200}{13a^2}.$$

Рассмотрим пример расчета режима отжига флоат-стекла толщиной 4 мм. Исходные данные для расчета: допустимые остаточные напряжения составляют 10 нм/см; верхняя температура отжига – 580°C; нижняя температура отжига – 490°C.

Время выдержки при верхней температуре отжига равняется

$$\tau_1 = \frac{520 \cdot 0,2^2}{10} = 2,08 \text{ мин.}$$

Скорость охлаждения от верхней температуры отжига в интервале 10°C рассчитывается по формуле

$$v_2 = \frac{10}{13 \cdot 0,2^2} = 19,2^\circ\text{C/мин.}$$

Далее расчет проводим по форме табл. 8.

Таблица 8

**Расчет режима отжига флоат-стекла**

Интервал температур, °C	Скорость охлаждения $v$ , °C/мин	Время $\tau$ , мин
580–570	19,2	10 : 19,2 = 0,52
570–560	19,2 · 1,2 = 23,0	10 : 23 = 0,43
560–550	19,2 · 1,5 = 28,8	10 : 28,8 = 0,35
550–540	19,2 · 1,9 = 36,5	10 : 36,5 = 0,27
540–530	19,2 · 2,5 = 48,0	10 : 48 = 0,21
530–520	19,2 · 3,3 = 63,4	10 : 63,4 = 0,16
520–510	19,2 · 4,5 = 86,4	10 : 86,4 = 0,12
510–500	19,2 · 6,1 = 117,1	10 : 117,1 = 0,08
500–490	19,2 · 8,5 = 163	10 : 163 = 0,06

Суммарное время отжига в интервале температур 580–490°C составляет  $\tau_2 = 2,2$  мин.

Скорость охлаждения в интервале температур 490–100°C равняется

$$v_3 = \frac{200}{13 \cdot 0,2^2} = 384,6^\circ\text{C/мин.}$$

Время охлаждения до комнатной температуры составит

$$(490 - 100) : 384,6 = 1,0 \text{ мин.}$$

Общее время находится по формуле

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 2,08 + 2,2 + 1 = 5,28 \text{ мин.}$$

### Выполнение работы

Этапы выполнения работы по отжигу стекла:

- 1) расчет температурно-временного режима отжига и графическое его представление;
- 2) термическая обработка образцов по рассчитанному режиму в муфельной электропечи с автоматическим регулированием температуры;
- 3) контроль качества отжига образцов.

Отжиг может быть оценен качественно и количественно. В первом случае применяют полярископы, для количественной оценки – поляриметры. На рис. 3 представлен полярископ-поляриметр ПКС-250М.

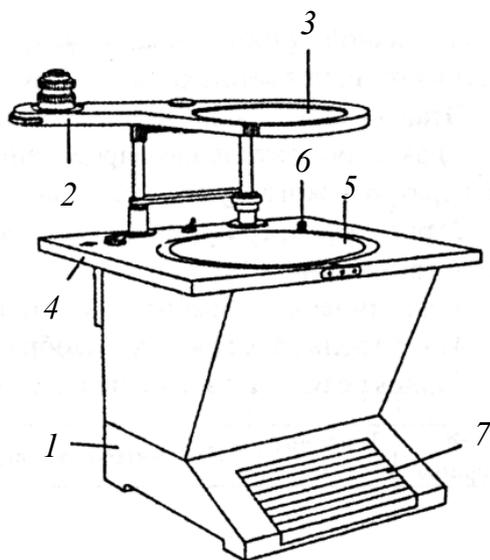


Рис. 3. Полярископ-поляриметр ПКС-250М: 1 – осветлитель; 2 – измерительное устройство; 3 – анализатор; 4 – столик; 5 – матовое стекло; 6 – ручка вращения матового стекла; 7 – педаль для включения электролампы

В оптической схеме полярископа анализатор приводит колебания обыкновенного и необыкновенного лучей в одну плоскость, в результате чего происходит интерференция света и возникает окраска образца. Характер и интенсивность окраски определяются напряжениями в изделии. Разность хода лучей в изделии качественно определяется по интерференционным цветам. Если поворачивать изделие, помещенное между анализатором и матовым стеклом, его окраска изменяется в зависимости от того, суммируются или вычитаются разности хода лучей в данной точке изделия и чувствительной пластинке (табл. 9).

При хорошем отжиге изделия окрашены в фиолетовые и красные

цвета, при удовлетворительном – в оранжевые, голубые и голубовато-зеленые, при неудовлетворительном – в зеленые и желтые цвета.

Таблица 9

**Цвет и разность хода лучей**

Вычитание цветов		Сложение цветов	
Цвет	Разность хода лучей, нм	Цвет	Разность хода лучей, нм
Пурпурно-фиолетовый	0	Пурпурно-фиолетовый	0
Голубой	115	Красный	25
Голубовато-зеленый	145	Оранжевый	130
Зеленый	200	Светло-желтый	200
Желто-зеленый	275	Желтый	260
Желтый	325	Белый	310

Оценка качества отжига на полярископе ПКС-500 проводится в следующей последовательности.

Образец стекла в виде пластины осторожно кладут в центр матового стекла. Подключают прибор к сети. Нажав педаль, включают лампу.

Через анализатор наблюдается интерференционная окраска образца. В соответствии с данными табл. 9 оценивают разность хода лучей и качество отжига. Если исследуемый образец хорошо отожден, то его цвет не будет отличаться от красно-фиолетового фона. Пурпурно-фиолетовый цвет образца свидетельствует об отсутствии напряжений в нем (разность хода лучей равна 0). Если образец отожден плохо, то в его объеме возникает интерференционная окраска. Переход окраски от голубой к желтой свидетельствует об увеличении разности хода лучей от 115 до 325 нм.

В зависимости от степени отжига максимальной разности хода может соответствовать один из цветов или их сочетание, причем в рядах «голубой – голубовато – зеленый – зеленый – желтый – оранжевый – белый» разность хода лучей возрастает.

В случае неотожженного образца преобладает желтая интерференционная окраска. По площади образца интерференционная окраска может изменяться, что свидетельствует о неравномерности распределения напряжений.

Из соотношения  $\sigma = \Delta / B \cdot l$ , где  $l$  – толщина образца, см, по разности хода лучей, представленной в табл. 9, можно рассчитать напряжение  $\sigma$ . Величину  $B$  принимаем равной  $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ МПа}^{-1}$ .

Запись результатов производится в табл. 10.

Таблица 10

**Результаты оценки качества отжига**

№ образца	Толщина, см	Цвет интерференционный	Разность хода $\Delta$ , нм	Напряжение, МПа

**Контрольные вопросы**

1. *Причины возникновения внутренних напряжений в стеклоизделиях.*
2. *Виды внутренних напряжений.*
3. *Стадии режима отжига.*
4. *Технологические параметры режимов отжига.*
4. *Метод оценки качества отжига.*

**Лабораторная работа № 5**

---

**УПРОЧНЕНИЕ СТЕКЛА ИОННЫМ ОБМЕНОМ**

**Общие сведения**

Значительное внимание в производстве стеклоизделий уделяется повышению их прочности. Низкая прочность изделий из стекла обусловлена присутствием в них локальных неоднородностей, повреждением поверхности в ходе технологического процесса либо эксплуатации, а также наличием в них термоупругих напряжений, неравномерно распределенных в стекле. Устранить термоупругие напряжения, как следствие, повысить прочность стеклоизделия возможно путем тщательного отжига. Для борьбы с дефектностью поверхности используют активные методы упрочнения стеклоизделий, которые подразделяются на две группы:

– упрочнение изделий путем нейтрализации дефектов в результате повышения качества поверхности стекла. Сюда следует отнести механическую, огневую и химическую полировку стекла, методы нанесения защитных пленок;

– упрочнение стеклоизделий путем создания в них сжимающих напряжений в результате закалки или ионного обмена. Разрушение таких стекол происходит при приложении нагрузки, значение которой превышает предел прочности стекла на величину созданных в стекле напряжений.

Основным недостатком способов упрочнения первой группы является существенное снижение прочности стекол при повреждении поверхности стекла в результате механического или химического воздействия. Серьезным препятствием для широкого применения химической полировки служат необходимость использования токсичных сред, большие затраты фтористоводородной кислоты, непроизводительные потери стекла.

Широкое распространение в производстве стеклоизделий, обладающих высокой прочностью, термостойкостью, сравнительно малой массой и «безопасным» характером разрушения, получила технология воздушно-струйной закалки. Она заключается в термической обработке стекла, при которой его нагревают до начала размягчения и затем резко охлаждают. Наружные слои стекла оказываются в состоянии сильного сжатия, а внутренние – в состоянии растяжения, что обеспечивает высокую механическую и термическую прочность.

Несмотря на свою сравнительную простоту аппаратного оформления и низкую стоимость, данный метод характеризуется существенными недостатками: низкая эффективность упрочнения тонких стекол (3 мм и менее), изменение оптических характеристик стекла (появление «закалочных пятен»), а также частая деформация изделий в ходе термообработки. Особо следует отметить существование вероятности взрывоподобного саморазрушения закаленного стекла (даже при хранении), которое делает непредсказуемой надежность его эксплуатации.

Ионообменное упрочнение стекол применяют в случаях, когда недопустимо саморазрушение, ухудшение оптических свойств, плоскостности, когда требуется изготовление многослойной композиции высокой надежности при упрочнении тонких стекол толщиной менее 2 мм или для стекол большой толщины, когда

невозможно или малоэффективно использование других методов (закалки).

Ионообменное упрочнение эффективно для различных видов рассеивателей автомобильных фар, очковых, часовых, приборных стекол и светофильтров. Оно требуется для повышения механической прочности различных бесцветных и цветных линз, колпаков светотехнического назначения, оболочек перфораторов для газо- и нефтеразведки, т. е. во всех случаях, где необходима высокая надежность.

Способы упрочнения стекла и достигаемый при этом уровень показателей прочности представлены в табл. 11.

Таблица 11

**Зависимость прочности при изгибе от способа упрочнения**

Состояние стекла	Прочность при изгибе, МПа
Сформованное листовое стекло	30–80
Упрочненное листовое стекло:	
– воздушной закалкой;	120–180
– жидкостной закалкой;	200–400
– ионным обменом;	300–500
– травлением;	1000–1700
– комбинированными способами	1500–2000

**Упрочнение стекла высокотемпературным ионным обменом** состоит в замене в поверхностном слое стекла катионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  катионами лития  $\text{Li}^+$ . При такой замене происходит образование поверхностного слоя стекла с меньшим температурным коэффициентом линейного расширения. При охлаждении внутренний (неизменный) слой стекла будет сжиматься больше, чем наружный, в связи с чем в последнем образуются напряжения растяжения. Величина напряжений сжатия в поверхностном слое толщиной 200–500 мкм намного выше, чем величина напряжения растяжения в центре образца. Это значит, что стекло после упрочнения можно подвергать механической обработке, сверлить, резать и т. п. Поскольку поверхностный слой представляет собой по существу литиево-силикатное стекло, повышается химическая стойкость упрочненного стекла или изделий из него, возрастает микротвердость.

Упрочняющая обработка стекла при высокотемпературном ионном обмене проводится в расплавах солей при температуре,

которой соответствует вязкость стекла  $10^{13}$ – $10^{12,5}$  Па · с, т. е. при температуре выше интервала отжига. Для ионного обмена существует определенный интервал обработки, неодинаковый для стекол различных составов. С целью уменьшения времени обработки повышают температуру, однако это может приводить к деформации изделия в процессе упрочнения.

Высокотемпературный ионный обмен за сравнительно короткое время в обычном листовом стекле обеспечивает сжатый слой в 160–250 мкм и упрочнение стекла в 3–5 раза.

**Упрочнение стекла низкотемпературным ионным обменом** состоит в замене в поверхностном слое стекла катионов с меньшим ионным радиусом на катионы с большим радиусом, например катионов  $\text{Na}^+$  катионами  $\text{K}^+$ . В этом случае крупные катионы, диффундируя из расплава соли в стекло и обмениваясь с катионами стекла, испытывают большую потребность в объеме и заполняют пространство между структурными кремнийкислородными группировками. Если температура обработки будет выше, чем верхний интервал отжига, то напряжения, возникшие в результате обмена ионами, релаксируют, стекло не упрочнится. Поэтому упрочнение стекла ведут в расплавах солей при температурах обработки ниже температуры отжига. Для низкотемпературного ионного обмена используют соли с относительно невысокой температурой плавления:  $\text{NaNO}_3$  –  $307^\circ\text{C}$ ,  $\text{KNO}_3$  –  $334^\circ\text{C}$ ,  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$  –  $300^\circ\text{C}$ ,  $\text{RbNO}_3$  –  $317^\circ\text{C}$  и  $\text{CsNO}_3$  –  $414^\circ\text{C}$ .

Низкотемпературный обмен способен обеспечить поверхностный сжатый слой толщиной не более 30–40 мкм и упрочнение обычного промышленного листового стекла в 2–3 раза. Степень ионообменного упрочнения стекол специальных составов может быть увеличена до 10 раз.

**Упрочнение стекла двойным ионным обменом** сочетает преимущества двух разновидностей обмена и позволяет значительно повысить эксплуатационную надежность стеклоизделий. Сначала стекло подвергают высокотемпературному ионному обмену, а затем – низкотемпературному.

## Выполнение работы

Для упрочнения стекла используют не менее пяти образцов листового стекла толщиной 2–3 мм и размером 40×40 мм.

По заданию преподавателя выполняют низкотемпературное или высокотемпературное ионообменное упрочнение. Обработку стекол выполняют в электрической муфельной печи с опускающимся подом.

При низкотемпературном ионном обмене металлическую ванну, заполненную солью  $\text{KNO}_3$ , устанавливают на поддон и вводят в печь, где нагревают до температуры  $400\text{--}470^\circ\text{C}$ . Через 60 мин после установления в печи максимальной температуры (выдержка необходима для полного плавления соли) поддон с ванной опускают, в расплав соли погружают кювету с образцами стекла. Стекла должны быть установлены в кювете вертикально на расстоянии друг от друга не менее 5–10 мм. После установки ванны с расплавом и образцами в печь упрочняющую обработку ведут в течение 0,5–3,5 часа. После обработки кювету извлекают и охлаждают в течение 20–30 мин до температуры окружающей среды. Остатки соли смывают с образцов стекла теплой водой.

При выполнении работы следует помнить, что  $\text{KNO}_3$  является окислителем, способствует самовозгоранию горючих веществ, по степени воздействия на организм относится к веществам третьего класса опасности. При нагревании разлагается с образованием кислорода, способствующего как возникновению горения, так и быстрому развитию пожара.

При высокотемпературном ионном обмене стекла обрабатывают в расплаве солей  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , взятых соответственно в количестве 80 и 20 мас. %. Упрочняющую обработку ведут в печи по изложенной выше методике при температуре  $650\text{--}750^\circ\text{C}$  в течение 10–20 мин.

В соответствии с заданием преподавателя степень упрочнения стекла определяют по значению свойств стекла до и после ионообменной обработки. При этом определяют следующие показатели:

- вариант 1 – механическая прочность при изгибе (лабораторная работа № 12);
- вариант 2 – микротвердость (лабораторная работа № 13);
- вариант 3 – прочность стекла на удар, оцененная по высоте падения металлического шара массой 50 г, которое вызывает разрушение стекла (лабораторная работа № 12).

Степень упрочнения  $K$  вычисляют по формуле

$$K = P_2 / P_1,$$

где  $P_1, P_2$  – прочность (микротвердость) стекла соответственно до и после упрочнения.

Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 12.

Таблица 12

**Результаты упрочнения стекла ионным обменом**

№ образца	Размер образца, длина × × ширина × × толщина, мм	Режим упрочнения		Свойство стекла		Степень упрочнения К
		температура, °С	время обработки, ч	до обработки	после обработки	

### **Контрольные вопросы**

1. Упрочненное стекло: назначение, свойства.
2. Способы упрочнения стеклоизделий (закалка, травление, ионный обмен).
3. Низкотемпературный ионный обмен.
4. Высокотемпературный ионный обмен.

### **Лабораторная работа № 6**

## **ЛАМИНИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО СТЕКЛА**

### **Общие сведения**

Многослойное стекло представляет собой плоское изделие, состоящее из одного или нескольких листов неорганического стекла, склеенных по всей поверхности с помощью пленочных или жидких полимерных и силикатных материалов.

Многослойное стекло характеризуется повышенными эксплуатационными свойствами и предназначено для безопасного остекления светопрозрачных строительных конструкций (фасадного, структурного остекления, элементов горизонтального остекления, оконных и дверных блоков, витрин, полов и т. д.), используемых для защиты людей и ценностей. Многослойное стекло может применяться

для других целей в соответствии со своими техническими характеристиками. Оно широко используется на транспорте (автомобильном, железнодорожном, авиационном) при изготовлении защитных очков и т. д.

В зависимости от назначения многослойное строительное стекло подразделяют на стойкое к механическим воздействиям (безопасное при эксплуатации (стойкое к удару мягким и/или твердым телом), пулестойкое, взрывобезопасное); огнезащитное; шумозащитное; морозостойкое; многослойное со специальными свойствами (с защитой от радиопомех, биологической или информационной защитой, повышенной несущей способностью и др.).

Сочетание в многослойном стекле хрупкого стекла с эластичной пленкой придает ему свойство безосколочности. При разрушении такого стекла от удара, толчка, значительного одностороннего давления или же от резкого изменения температуры (теплового удара) все части (осколки) стекла остаются на своих местах прикрепленными к эластичному промежуточному слою – поливинилбутиральной пленке (ПВБ) или другому полимерному материалу, т. е. отлетающих или отпадающих осколков не возникает.

Среди защитных безопасных безосколочных стекол многослойное стекло отличается наиболее совершенными защитными свойствами.

Согласно ГОСТ 30826 многослойное стекло строительного назначения, стойкое к удару твердым телом, в зависимости от класса защиты должно выдерживать падение металлического шара массой 4,108 кг (4108 г) с высоты 1500–9000 мм (при испытании шаром) или от 30 до 70 ударов молотком или топором массой 2 кг (при испытании молотком и топором). Стекло, стойкое к удару мягким телом (мешком, имитирующим механическое воздействие тела человека), должно выдерживать падение мешка массой 45 кг с высоты от 300 до 2000 мм.

Также многослойное стекло строительного назначения должно выдерживать расчетные значения эксплуатационных нагрузок (механических, климатических и других) с учетом конкретных условий его применения согласно действующим строительным нормам и правилам.

Многослойное стекло, предназначенное для эксплуатации при отрицательных температурах, должно быть морозостойким и выдерживать минимальную расчетную температуру эксплуатации.

В соответствии с ГОСТ 10377 стекла бесцветные многослойные для защитных очков должны выдерживать без разрушения удар стального шара массой 0,1 кг (100 г) с высоты 1000 мм.

По ГОСТ 5727 многослойное безопасное стекло (триплекс) для наземного транспорта должно выдерживать удар стального шара массой 0,227 кг (227 г) с высоты 8500–12 000 мм (в зависимости от толщины стекла) и быть стойким к пробиванию шаром массой 2,260 кг (2260 г) с высоты 4000 мм.

Основными параметрами, характеризующими многослойное стекло, являются: геометрические (размеры и форма), оптические (в том числе светопропускание, неискажаемость изображений, безмутность), механические (в том числе безосколочность), термofизические (теплостойкость, термоустойчивость, морозостойкость) свойства.

Выпускаемое в настоящее время многослойное стекло отличается большим разнообразием по форме поверхности и ее обработке, по форме и обработке контура, по толщине изделия и его способности к поглощению, по отражению и окраске проходящих сквозь него лучей.

Технологический процесс производства многослойного стекла, склеенного с помощью поливинилбутиральной пленки, состоит из следующих основных операций: подготовка стекла, подготовка пленки, сборка многослойного стекла, нагрев многослойного стекла в электрической печи, предварительное прессование многослойного стекла, автоклавная обработка, отделка стекла.

## **Выполнение работы**

Для изготовления многослойного стекла используют образцы листового стекла толщиной 2–3 мм размером 40×40 мм или 50×50 мм. Отбирают не содержащее включений и хорошо отожженное стекло, так как в процессе изготовления при его нагреве или охлаждении оно может расколоться. Отобранное стекло обезжиривают 1%-ным раствором соды, после чего ополаскивают теплой водой с температурой 20°C. Затем стекло сушат в сушильном шкафу при температуре 40–50°C.

Поливинилбутиральную пленку, предварительно очищенную сухой щеткой, нарезают на требуемые размеры, обеспечивая припуск по отношению к образцам стекла 2 мм, и собирают пакет многослойного стекла.

Для составления пакета берут два или более листов стекла и перекладывают его ПВБ пленкой. Пакет помещают в сушильный шкаф, где нагревают до температуры 100°C и выдерживают в течение 10–20 мин. Эта операция необходима для размягчения пленки и лучшей склейки стекол. Затем пакет извлекают и подпрессовывают при давлении 0,8–1,8 МПа с помощью ручного пресса.

После прессования пакеты охлаждают в течение 10 мин на воздухе и испытывают на прочность.

Испытание проводят по методике, представленной в лабораторной работе № 12, в соответствии с заданием преподавателя.

Прочность стекла оценивают по высоте падения стального шара массой 100 г, вызвавшего разрушение стекла. Испытание начинают с высоты 0,5 м. После каждого испытания высоту падения шара увеличивают на 0,1 м. Испытания считаются законченными, если стекло при ударе шара разрушилось.

Результаты испытаний заносят в табл. 13.

Таблица 13

**Результаты определения прочности многослойного стекла**

№ образца	Характеристика пакета			Температура нагрева пакета, °С	Давление прессования, МПа	Механическая прочность при ударе, оцененная по высоте падения шара, м
	толщина стекла, мм	толщина ПВБ пленки, мм	количество стекол в пакете, шт.			

**Контрольные вопросы**

1. Многослойное стекло: назначение и свойства.
2. Получение многослойного стекла.
3. Факторы, влияющие на прочность многослойного стекла.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКОЛ И СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

Эксплуатационные характеристики стекол и стеклоизделий, выпускаемых промышленностью, должны соответствовать требованиям действующих стандартов и технических условий.

Контролируемые показатели, определяющие качество стекла и стеклоизделий строительного назначения, приведены в табл. 14.

Таблица 14

Показатели качества листовых стекол и стеклоизделий

Наименование стекла и стеклоизделия	Назначение	Контролируемые показатели качества	Величина показателей
Листовое стекло ГОСТ 111	Остекление светопрозрачных строительных конструкций, средств транспорта, мебели, а также изготовление стекол с покрытиями, зеркал, закаленных и многослойных стекол и других изделий строительного, технического и бытового назначения	Внешний вид	Пороки и их количество
		Допустимые отклонения по толщине <sup>1</sup>	от $\pm 0,1$ до $\pm 4,0$
		Разнотолщинность <sup>1</sup>	0,05–0,5
		Коэффициент направленного пропускания света <sup>1</sup>	0,67–0,9
		Водоустойчивость	Не ниже класса 4/98
		Остаточные внутренние напряжения	Не более 70 нм/см
		Оптические искажения	В соответствии с требованиями ГОСТа
Закаленное стекло ГОСТ 30698	Безопасное остекление светопрозрачных строительных конструкций (оконных и дверных блоков, витрин, элементов ограждения лоджий, балконов, структурного остекления фасадов и т. д.)	Внешний вид	Пороки, царапины и т. д.
		Оптические характеристики	В соответствии с требованиями к исходному стеклу
		Термостойкость (способность стекла выдерживать резкий перепад температур без разрушения)	Не менее 120°C

Наименование стекла и стеклоизделия	Назначение	Контролируемые показатели качества	Величина показателей
Закаленное стекло ГОСТ 30698	Безопасное остекление светопрозрачных строительных конструкций (оконных и дверных блоков, витрин, элементов ограждения лоджий, балконов, структурного остекления фасадов и т. д.)	Стойкость к удару (без разрушения) стальным шаром массой $227 \pm 2$ г	2–3 м в зависимости от класса защиты
		Стойкость к удару мягким телом массой $45 \pm 1$ кг	0,3–2 м в зависимости от класса защиты
Многослойное стекло ГОСТ 30826	Безопасное остекление светопрозрачных строительных конструкций (фасадного, структурного остекления, элементов горизонтального остекления, оконных и дверных блоков, витрин и т. д.)	Внешний вид	Пороки и их количество
		Стойкость к воздействию ультрафиолетового излучения	Не менее 100 ч
		Влагостойкость	Не менее 14 сут
		Стойкость к удару: – мягким телом (по высоте падения мешка с песком массой 45 кг); – твердым телом: а) молотком или топором; б) стальным шаром массой 4,108 кг (по высоте падения)	30–70 ударов  1,5–9,0 м
Стеклоблоки ГОСТ 9272	Кладка светопрозрачных не несущих ограждающих конструкций зданий и сооружений	Внешний вид	Пороки и их количество
		Коэффициент светопропускания блоков	0,3–0,50
		Коэффициент светопропускания стекла для изготовления блоков	Не менее 0,85 при пересчете на 4 мм
		Термостойкость	Не менее 40°C
		Предел прочности блоков при сжатии	Не менее 1,5 МПа
		Остаточные внутренние напряжения (качество отжига)	Не более 100 нм/см
		Водоустойчивость	Не ниже класса 4/98
		Сопротивление удару	Не менее 0,8 Дж

Стеклопакеты ГОСТ 24866	Остекление светопрозрачных конструкций: оконных и дверных блоков, перегородок, зенитных фонарей и др.	Сопротивление теплопередаче <sup>2</sup>	0,32– 0,72 м <sup>2</sup> · °С/Вт
		Коэффициент направленного пропускания света <sup>2</sup>	65–80%
		Звукоизоляция <sup>2</sup>	25–34 дБ
		Точка росы <sup>2</sup>	Не выше ниже нуля 45–55°С
Стекловоло- кно на при- мере ваты ми- неральной ГОСТ 4640	Изготовление теплоизоляционных, звукоизоляционных и звукопоглощающих изделий, а также в качестве теплоизоляционного материала в строительстве и промышленности для изоляции поверхностей с температурой до 700°С	Средний диаметр волокна	Не более 0,5–12 мкм
		Плотность <sup>3</sup>	80–100 кг/м <sup>3</sup>
		Теплопроводность при температуре: – (298 ± 5) К; – (398 ± 5) К; – (573 ± 5) К	0,045– 0,050 Вт/(м · К) 0,064– 0,066 Вт/(м · К) 0,110– 0,116 Вт/(м · К)
		Влажность	Не более 1 мас. %
		Водостойкость	Не более 4–7 рН
Пеностекло СТБ 1322	Блоки из пеностекла предназначены для тепловой изоляции строительных конструкций и промышленного оборудования при температуре изолируемых поверхностей от 243 К (минус 30°С) до 673 К (400°С) в условиях относительной влажности до 97%	Плотность	Не более 190 кг/м <sup>3</sup>
		Теплопроводность при температуре: – (298 ± 5) К; – (398 ± 5) К	Не более 0,083 Вт/(м · К); Не более 0,110 Вт/(м · К)
		Предел прочности при сжатии	Не менее 0,7 МПа
		Водопоглощение	Не более 5,0%

*Примечание.* Величина показателей зависит: 1 – от толщины стекла; 2 – типа и вида стеклопакета (однокамерный, многокамерный, солнцезащитный, энергосберегающий, шумозащитный и т. д.); 3 – от размера волокна.

Важное значение имеют и другие характеристики, определяющие эксплуатационную надежность и долговечность стекломатериалов. Так для листового стекла и изделий из него, которые используются в качестве архитектурно-строительных элементов зданий и сооружений, испытывающих ветровую и другие нагрузки, определяют прочность на изгиб. Для стеклоблоков, пеностекла,

работающих в условиях статических нагрузок, важным показателем является предел прочности при сжатии, для стекловолокна – предел прочности при растяжении.

Проверка соответствия качества изделий техническим требованиям производится согласно методам испытаний, приведенным в действующих нормативных документах (ГОСТах и ТУ).

## Лабораторная работа № 7

---

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ СТЕКОЛ

#### Общие сведения

Температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) называют относительное удлинение образца при его нагревании на один градус.

Средний ТКЛР ( $\alpha$ ) определяется по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0(t - t_0)},$$

где  $l_0$  – начальная длина образца при  $t_0$ ;  $\Delta l$  – прирост длины образца при его нагреве до температуры  $t$ .

Температурный коэффициент линейного расширения зависит от химического состава стекла и может изменяться от  $5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  до  $120 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Минимальное значение ТКЛР имеет кварцевое стекло –  $5,4 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ . Введение оксидов щелочных и щелочноземельных металлов приводит к существенному повышению ТКЛР, например, для листового стекла данный показатель составляет порядка  $90 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ .

Вклад каждого компонента в величину ТКЛР можно оценить по парциальным числам  $\bar{\alpha}_i$ , определенным А. А. Аппеном, который разработал метод расчета свойств стекол по химическому составу. Расчет производится по формуле

$$\alpha \cdot 10^7 \frac{\sum M_i \cdot \bar{\alpha}_i}{\sum M_i} = \frac{\sum m_i \cdot \bar{\alpha}_i}{100},$$

где  $M_i$  и  $m_i$  – содержание оксида в стекле в мол. долях и мол. % соответственно;  $\bar{\alpha}_i$  – усредненные парциальные числа ТКЛР для оксидов или химических соединений.

Числовые характеристики усредненных парциальных чисел ТКЛР в силикатных стеклах приведены в табл. 15. В случае наличия в стекле таких компонентов, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , на величину парциальных чисел влияет состав стекла. Для расчета показателей ТКЛР стекол по их составу необходимо провести пересчет состава из массовых процентов в молярные, при необходимости рассчитать парциальные коэффициенты, например для оксида кремния, и далее вести расчет по указанной выше формуле.

Таблица 15

**Парциальные коэффициенты ТКЛР**

Оксид	Молекулярная масса, %	Пределы приложимости, мол. %	$\bar{\alpha} \cdot 10^7, \text{K}^{-1}$	Формулы для расчета парциального числа ( $m_i$ – содержание оксида в мол. %)
$\text{Li}_2\text{O}$	29,9	0–30	270	–
$\text{Na}_2\text{O}$	62,0	0–25	395	–
$\text{K}_2\text{O}$	94,2	0–20	465	–
$\text{MgO}$	40,3	0–25	60	–
$\text{CaO}$	56,1	0–25	130	–
$\text{SrO}$	103,6	0–30	160	–
$\text{BaO}$	153,4	0–40	200	–
$\text{ZnO}$	81,4	0–20	50	–
$\text{PbO}$	223,2	0–50	130–190	$\bar{\alpha}_{\text{PbO}} \cdot 10^7 = 130 + 5(m_{\text{R}_2\text{O}} - 3)$
$\text{B}_2\text{O}_3$	69,6	0–30	(–50)–0	$\bar{\alpha}_{\text{B}_2\text{O}_3} \cdot 10^7 = 12,5(4 - \psi) - 50$ , где $\psi = \frac{m_{\text{R}_2\text{O}} + m_{\text{RO}}}{m_{\text{B}_2\text{O}_3}}$ ; если $\psi > 4$ , то $\bar{\alpha}_{\text{B}_2\text{O}_3} \cdot 10^7 = -50$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	101,9	0–20	–35	–
$\text{SiO}_2$	60,06	45–100	5–38	$\bar{\alpha}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^7 = 38 - 1,0(m_{\text{SiO}_2} - 67)$ ; $m_{\text{SiO}_2} < 67 \quad \bar{\alpha}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^7 = 38$
$\text{TiO}_2$	79,9	0–25	от –20 до +30	$\bar{\alpha}_{\text{TiO}_2} \cdot 10^7 = 3 - 1,5(m_{\text{SiO}_2} - 50)$
$\text{ZrO}_2$	123,2	0–12	–60	–

Примечание.  $\text{R}_2\text{O}$  –  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{RO}$  –  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{SrO}$ .

Термическое расширение – одно из наиболее важных свойств стекла. ТКЛР необходимо учитывать при выработке накладных стекол, спаивании стекол с металлами или керамикой либо стекол различных составов, подборе составов эмалей и глазурей. ТКЛР стекла определяет их термостойкость: чем ниже ТКЛР, тем выше их термостойкость. Поэтому показатели ТКЛР стекол во многих случаях являются важной эксплуатационной характеристикой.

Средний ТКЛР стекла зависит от температурного интервала определения ( $t-t_0$ ). Поэтому в ГОСТ 10978 установлен температурный интервал определения ТКЛР, который составляет 20–300°C. Все справочные данные по ТКЛР приведены для данного интервала температур.

Для определения ТКЛР используется dilatометрический метод. Имеется две разновидности dilatометров: горизонтальный и вертикальный.

На рис. 4 показана схема устройства горизонтального кварцевого dilatометра. Прибор состоит из трубчатой электрической печи, кварцевой трубки с кварцевым стержнем и индикатора часового типа.

Горизонтальная трубчатая электрическая печь обеспечивает нагревание образца, помещенного в кварцевую трубку, от комнатной температуры до температуры измерения. Температуру в печи измеряют с помощью термопары. В трубку с образцом вставляется кварцевый стержень таким образом, чтобы был плотный контакт с образцом. Другой конец кварцевого стержня соединяется со стержнем индикатора часового типа.

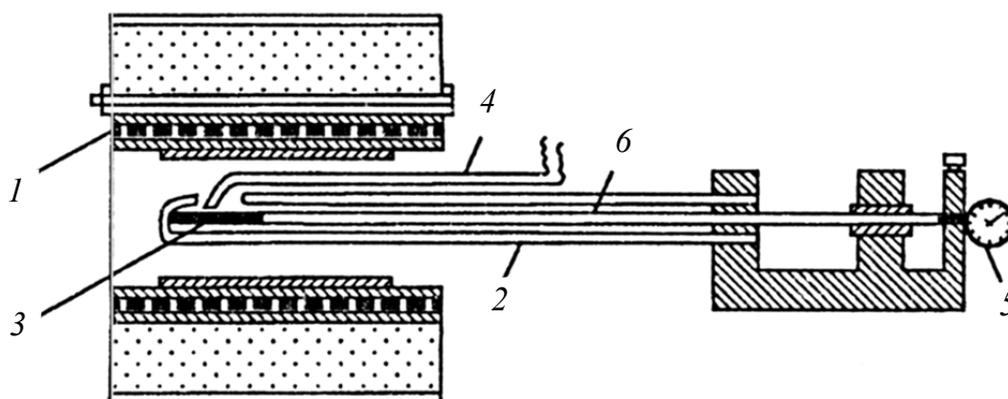


Рис. 4. Схема горизонтального кварцевого dilatометра:  
1 – электрическая печь; 2 – кварцевая трубка; 3 – образец;  
4 – термопара; 5 – индикатор часового типа; 6 – кварцевый стержень

Схема вертикального кварцевого дилатометра приведена на рис. 5. Он состоит из шахтной электрической печи, кварцевого держателя образца, индикатора часового типа и пульта управления. Температуру в печи измеряют хромель-алюмелевой термопарой, рабочий конец которой помещают в отверстие кварцевой трубки над образцом. Постоянство скорости нагрева обеспечивается равномерным увеличением напряжения, подаваемого на нагреватель. В нижней части печи установлен вентилятор для охлаждения печи после ее отключения.

В современных дилатометрах показатели прибора (относительное удлинение и температура) фиксируются измерительной системой на экране компьютера во времени.

При определении температурного коэффициента линейного расширения строят график зависимости относительного удлинения образца  $\Delta l / l$  от температуры. Такой график называют дилатометрической кривой. Типичная дилатометрическая кривая относительного удлинения стекла приведена на рис. 6.

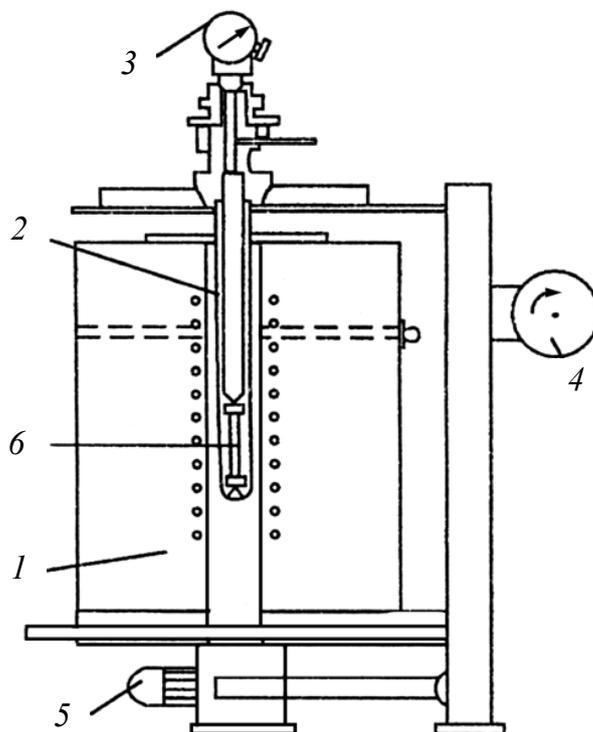


Рис. 5. Схема вертикального кварцевого дилатометра:  
1 – электрическая печь; 2 – кварцевый держатель образца; 3 – индикатор; 4 – механизм опускания держателя образца; 5 – вентилятор; 6 – образец

$\Delta l / l_0$

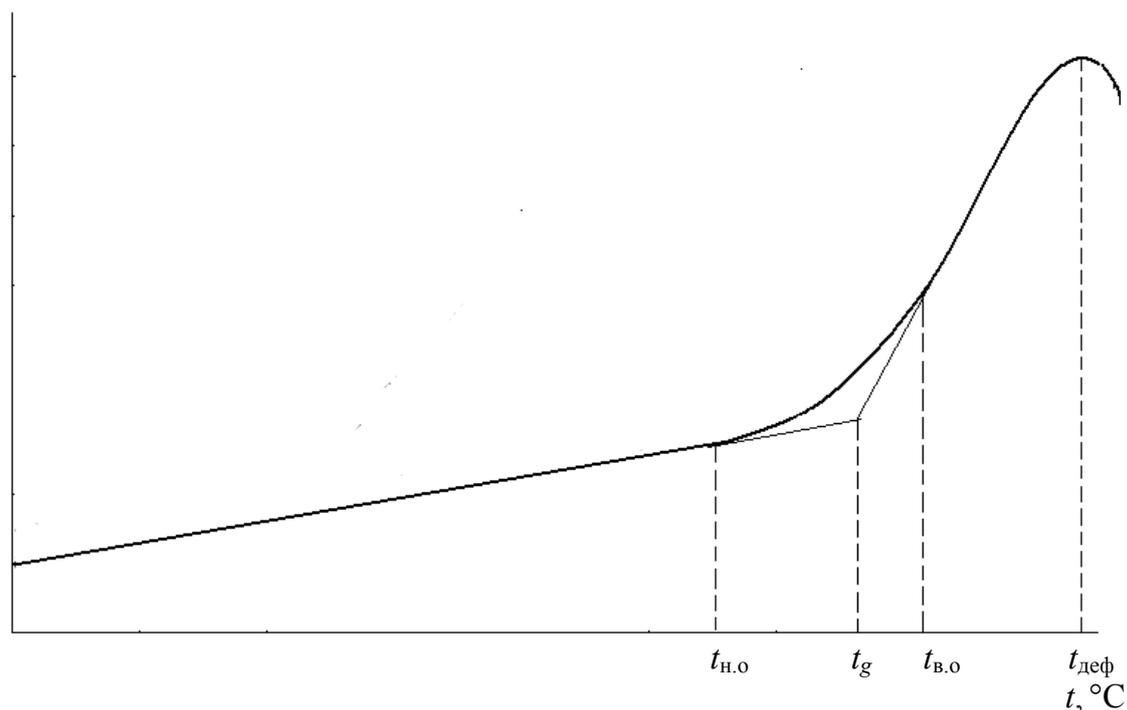


Рис. 6. Дилатометрическая кривая стекла

По дилатометрической кривой определяют следующие характеристические температуры, т. е. температуры, соответствующие определенным значениям ТКЛР:

- температуру начала стеклования  $t_g$ , т. е. перехода из твердого состояния в пластичное, которая соответствует вязкости  $10^{12,3}$  Па · с (точка пересечения прямолинейных участков кривой). Для большинства стекол промышленных составов  $t_g$  находится в интервале  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ ;

- нижнюю температуру отжига  $t_{н.о}$ , соответствующую вязкости  $10^{13,5}$  Па · с;

- верхнюю температуру отжига  $t_{в.о}$ , соответствующую вязкости  $10^{12}$  Па · с;

- дилатометрическую температуру размягчения (вязкость около  $10^{10}$  Па · с).

### Выполнение работы

Согласно ГОСТ 10978, для определения ТКЛР используют цилиндрические образцы длиной  $50 \pm 2$  мм и диаметром  $4 \pm 0,4$  мм,

но в зависимости от конструкции дилатометра допускаются другие размеры образцов.

Для испытания берут хорошо отожженные образцы. Подготовка образцов включает их механическую обработку – резку и шлифовку торцов. Длину образца измеряют штангенциркулем с точностью до 0,1 мм.

Образец устанавливают в кварцевую трубку строго по оси кварцевого стержня. Расширение образца передается через кварцевый стержень на индикатор. Для создания плотного контакта между кварцевой трубкой, образцом и кварцевым стержнем стрелке индикатора после его установки придают вращение на два-три оборота. После этого стрелку устанавливают в нулевое положение. При измерении на горизонтальном дилатометре кварцевую трубку при помощи каретки вдвигают в печь. При измерении на вертикальном дилатометре кварцевую трубку с образцом опускают в печь с помощью маховика опускания.

Скорость подъема температуры в печи должна составлять не более 4°С/мин.

Измерение показания индикатора (количество делений на индикаторе часового типа) проводят начиная с 50°С через каждые 50°С. Поскольку кварцевая трубка, в которой находится образец, при нагревании двигается в обратном направлении относительно кварцевого стержня, к величине рассчитанного ТКЛР ( $\alpha$ ) необходимо прибавить поправку на расширение кварца. Поэтому окончательный расчет ТКЛР производится по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t} + 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1},$$

где  $l_0$  – начальная длина образца при  $t_0$ ;  $\Delta l$  – удлинение образца,  $\Delta l = n \cdot c$  ( $n$  – число делений,  $c$  – цена деления индикатора), мм.

Данные измерений и расчетов заносят в табл. 16. По результатам измерений строят дилатометрическую кривую.

Таблица 16

**Результаты определения ТКЛР**

Длина образца $l_0$ , мм	Начальная температура $t_0$ , °С	Температура нагрева $t$ , °С	Разность температур, $(t - t_0)$ , °С	Показания индикатора $n$	Удлинение образца $\Delta l$ , мм	$\alpha \cdot 10^7$ , К <sup>-1</sup>

## Контрольные вопросы

1. Показатель термического расширения стекол.
2. Влияние состава стекол на величину ТКЛР.
3. Расчетный метод определения ТКЛР.
4. Дилатометрический метод определения ТКЛР и особенности конструкций дилатометров.

## Лабораторная работа № 8

---

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕКЛА И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### Общие сведения

*Теплопроводность* характеризует способность вещества проводить теплоту при градиенте температур в направлении от более горячих участков к более холодным. Для оценки теплопроводности материалов чаще всего используют коэффициент теплопроводности.

В изотропных твердых телах распространение теплоты подчиняется закону Фурье:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x},$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Дж/м<sup>2</sup> · с:  $q = Q / S \cdot \tau$ ;  $Q$  – тепловой поток, Дж;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время, с;  $\partial T / \partial x$  – градиент температур вдоль оси  $x$ , К/м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/м · с · К или Вт/м · К.

Отсюда следует, что коэффициент теплопроводности  $\lambda$  характеризует количество тепла, проходящего в единицу времени через пластину с сечением 1 м<sup>2</sup> при градиенте температур 1 К/м.

Коэффициент теплопроводности стекол изменяется в небольшом интервале – от 0,7 до 1,34 Вт/м · К. Наибольшее значение коэффициента теплопроводности у кварцевого стекла. При замене SiO<sub>2</sub> любым другим компонентом теплопроводность снижается. Так, коэффициент теплопроводности листового стекла составляет 0,87 Вт/м · К. В наибольшей мере теплопроводность снижается с увеличением содержания оксидов BaO, PbO, K<sub>2</sub>O.

В общем случае коэффициент теплопроводности зависит от плотности вещества, пористости, состояния поверхности и других параметров. Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов на основе стекла составляет 0,03–0,08 Вт/м · К.

Коэффициент теплопроводности строительных материалов является важным эксплуатационным показателем, особенно для теплоизоляционных материалов. Для оценки теплозащитных свойств строительных материалов применяется также показатель теплового (термического) сопротивления. Термическое сопротивление слоя материала равно отношению толщины слоя к его коэффициенту теплопроводности и имеет размерность м<sup>2</sup> · К/Вт.

Две основные группы теплоизоляционных материалов, получаемых на основе стекла – это пеностекло и волокнистые материалы.

Пеностекло получают путем спекания смеси стекольного порошка с газообразователем, в качестве которых чаще всего используют углеродистые газообразователи (кокс, сажа, графит). Средняя плотность различных видов пеностекла, производимых в виде блоков, крошки или гранул, изменяется от 100 до 300 кг/м<sup>3</sup>. Чем ниже плотность пеностекла, меньше размер пор, тем ниже коэффициент теплопроводности и соответственно более высокие теплозащитные характеристики обеспечивает данный материал.

Теплоизоляционные материалы на основе штапельного или непрерывного волокна производят в виде минеральной ваты, рулонных материалов, матов, плит различной жесткости. Коэффициент теплопроводности волокнистых материалов составляет 0,030–0,06 Вт/м · К и зависит от плотности материала, толщины волокна, наличия неволокнистых включений.

Значения коэффициента теплопроводности стекол и теплоизоляционных материалов на их основе приведены в табл. 17.

Таблица 17

**Коэффициенты теплопроводности материалов и изделий (25°С)**

Материал	$\lambda$ , Вт/м · К	Изделия	$\lambda$ , Вт/м · К
Кварцевое стекло	1,34	Стекловата (штапельное волокно)	0,03–0,04
Листовое стекло	0,87		
Пеностекло с плотностью, кг/м <sup>3</sup> : – 100–130; – 175; – 190	0,040–0,046	Плиты из штапельного стекловолокна	0,047–0,057
		Рулонный материал	0,041
	0,087	Нетканые материалы из рубленого волокна	0,035

## Выполнение работы

**Определение коэффициента теплопроводности с помощью измерителя теплопроводности ИТ-λ-400.** Для определения коэффициента теплопроводности стекол в температурном интервале 25–200°С используется измеритель теплопроводности ИТ-λ-400 (рис. 7).

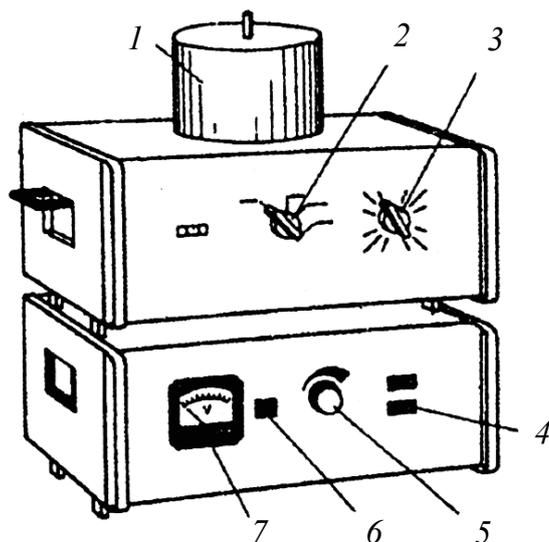


Рис. 7. Измеритель теплопроводности ИТ-λ-400:  
1 – измерительная ячейка; 2, 3 – переключатели  
«Измерение» и «Температура»; 4 – кнопка «Сеть»;  
5 – рукоятка для установки напряжения;  
6 – кнопка «Нагрев»; 7 – вольтметр

В измеряемом образце создается градиент температуры, который может быть определен экспериментально. Одновременно измеряется количество теплоты, поступающей в образец.

Для измерения готовят образцы стекла в виде дисков диаметром  $1,5 \pm 0,3$  мм и высотой 0,5–5 мм. Отклонения размеров, формы и увеличение степени шероховатости поверхностей образцов приводят к увеличению погрешности измерений.

Тепловой поток от основания измерительной ячейки передается через пластину, образец и поглощается стержнем. В ходе измерения термопарой регистрируют перепад температур на образце  $\Pi_0$  и на пластине измерительной ячейки  $\Pi_r$ .

Коэффициент теплопроводности образца определяется по формуле

$$\lambda = h/P_o,$$

где  $h$  – высота образца, м;  $P_o$  – тепловое сопротивление образца,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Тепловое сопротивление образца определяется по формуле

$$P_o = \frac{\Pi_o \cdot S \cdot (1 + \sigma_c)}{\Pi_t \cdot K_t} - P_k,$$

где  $\Pi_o$  – перепад температуры на образце, число делений;  $\sigma_c$  – поправка на теплоемкость образца;  $\Pi_t$  – перепад температуры на пластине, число делений;  $K_t$  – тепловая проводимость тепломера,  $\text{Вт}/\text{К}$ ;  $P_k$  – поправка, учитывающая тепловое сопротивление участков заделки термопар,  $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ .

Поправка на теплоемкость образца  $\sigma_c$  рассчитывается по формуле

$$\sigma_c = c_o / 2(c_o + c_c),$$

где  $c_o$  – теплоемкость образца,  $\text{Дж}/\text{К}$ ;  $c_c$  – теплоемкость стержня,  $\text{Дж}/\text{К}$ .

Величины  $K_t$ ,  $P_k$  и  $c_c$  являются постоянными измерителя и приведены в табл. 18.

Таблица 18

**Значения постоянных для прибора ИТ-λ-400**

$t, ^\circ\text{C}$	$c_c, \text{Дж}/\text{К}$	$Kt \cdot 10^2, \text{Вт}/\text{К}$	$P_k \cdot 10^4, \text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$
25	15,86	6,15	7,6
50	16,54	7,02	6,1
75	16,54	7,02	6,1
100	16,87	8,26	5,6
125	16,87	8,26	5,6
150	17,08	8,85	5,0
175	17,08	8,85	5,0
200	17,21	9,22	4,9

Теплоемкость образца рассчитывается по формуле

$$c_o = c_o(t) \cdot m_o,$$

где  $c_o(t)$  – удельная теплоемкость образца,  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ;  $m_o$  – масса образца, кг.

Ориентировочное значение удельной теплоемкости стеклянного образца составляет  $850 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

Измерения проводят в следующей последовательности.

Подключают блок питания прибора ИТ-λ-400 и микровольт-наноамперметр Ф-136 к сети. Переключатель «Измерение» устанавливают в положение «Уст. 0», переключатель «Температура» – на 25°C. Прибор прогревают в течение 30 мин.

Подготовленный образец измеряют штангенциркулем (с точностью до ±0,01 мм), взвешивают на электронных весах с точностью до ±0,01 г.

Для улучшения теплового контакта на контактные поверхности образца наносят графитовый порошок.

Верхнюю половину измерительной ячейки поднимают вверх и отводят в сторону по часовой стрелке до упора. Устанавливают образец на контактную пластину, стержень – на иглы термопары. Опускают верхнюю половину измерительной ячейки.

Включают кнопку «Нагрев». На вольтметре устанавливают напряжение 40 А. Переключатель «Измерение» устанавливают в положение  $t_c$ , переключатель «Температура» – на заданную температуру измерения (25, 50, ..., 200°C). Прибор Ф-136 включают на измерение, отжав кнопку «АРР».

Когда температура стержня достигнет заданного значения, световой указатель прибора Ф-136 подойдет к нулевой отметке. При ее достижении переключатель «Измерение» последовательно переводят в положение  $\Pi_t$  и  $\Pi_o$ , измеряя по шкале прибора Ф-136 эти величины в микровольтах (перепады температур на образце и тепломере). Затем переключатель «Измерение» возвращают в положение  $t_c$ , переключатель «Температура» переводят на следующую температуру. Измерение величины  $\Pi_o$  и  $\Pi_t$  проводят при каждой заданной температуре.

Для завершения измерений выключают нагрев, снимают напряжение на вольтметре, арретируют прибор Ф-136 нажатием кнопки «АРР»; отключают приборы от сети.

Результаты измерений и вычислений заносят в табл. 19.

Таблица 19

**Значения постоянных для прибора ИТ-λ-400**

Характеристика образца	$t, ^\circ\text{C}$	$\Pi_o$ , дел.	$\Pi_t$ , дел.	$\sigma_c$	$K_{t_s}$ , Вт/К	$P_k$ , $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$	$\lambda$ , Вт/м · К
$h =$							
$S =$							
$m_o =$							

**Определение коэффициента теплопроводности с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4.** Определение теплопроводности стекол и теплоизоляционных материалов, а также теплового сопротивления проводится с помощью измерителя теплопроводности ИТП-МГ4 по ГОСТ 7076. Диапазон измерения теплопроводности на данном приборе составляет 0,02–1,5 Вт/м · К, теплового сопротивления – 0,03–1,0 м<sup>2</sup> · К/Вт.

Принцип работы прибора основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец перпендикулярно к лицевым граням образца. При этом измеряется температура противоположных лицевых граней образца и плотность теплового потока.

Вычисление теплопроводности  $\lambda$  и теплового сопротивления  $R$  производится вычислительным устройством по формулам

$$\lambda = H \cdot q / (T_H - T_x);$$
$$R_H = (T_H - T_x) / q - 2 \cdot R_K,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м · К;  $R_H$  – тепловое сопротивление измеряемого образца, м<sup>2</sup> · К/Вт;  $H$  – толщина образца, мм;  $q$  – плотность стационарного теплового потока, проходящего через образец, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_H$  – температура горячей грани измеряемого образца, К;  $T_x$  – температура холодной грани измеряемого образца, К;  $R_K$  – тепловое сопротивление между лицевой гранью образца и рабочей поверхностью плиты прибора, м<sup>2</sup> · К/Вт.

Стационарная установка прибора состоит из блока управления нагревателем, холодильника, тепломера, датчиков температуры, устройства преобразования первичных сигналов датчика, источника питания.

Образцы изготавливают в виде прямоугольного параллелепипеда, параллельные лицевые грани которого имеют форму квадрата со стороной 100×100 мм. Длину и ширину образца измеряют линейкой с погрешностью не более 1 мм.

Толщина образца должна составлять от 3 до 28 мм. Она измеряется штангенциркулем в четырех углах на расстоянии 50±5 мм от вершины угла. За толщину принимают среднее арифметическое значение четырех измерений.

Подготовка прибора к измерению заключается в следующем:

– подключить электронный блок к установке, подключить сетевой шнур к установке и к сети переменного тока 220 В;

– открыть установку, для чего ослабить прижимной микрометрический винт, повернуть против часовой стрелки эксцентриковый замок и освободить поводок коромысла; поднять поводок и отвести на  $90^\circ$  подвижную Г-образную стенку установки, поднять коромысло с закрепленной на ней плитой нагревателя, протереть поверхности нагревателя и тепломера;

– установить образец в установку и опустить коромысло, при этом зазор между плитой нагревателя и образцом должен составлять 2–5 мм;

– поднять поводок, закрыть Г-образную стенку, опустить поводок в паз эксцентрикового замка и, повернув его по часовой стрелке, закрепить поводок;

– вращая микрометрический винт по часовой стрелке, зажать образец до срабатывания трещотки динамометрического устройства.

Для проведения измерений необходимо включить питание электронного блока. Нажатием кнопки «ВВОД» активизировать режим «Измерение». На дисплее высвечивается толщина образца  $H = 15,0$  мм, кнопками  $\uparrow$  и  $\downarrow$  установить фактическую толщину образца и зафиксировать кнопкой «ВВОД». Далее кнопками  $\uparrow$  и  $\downarrow$  устанавливается температура холодильника  $T_x$  в соответствии с табл. 20 и фиксируется кнопкой «ВВОД». Устанавливается температура нагревателя  $T_n$  и фиксируется кнопкой «ВВОД».

Таблица 20

**Рекомендуемая разница температур нагревателя и холодильника  $\Delta = T_n - T_x$  в зависимости от теплопроводности и толщины образцов**

$\lambda$ , Вт/м · К	Толщина образца $H$ , мм					
	3–5	6–10	11–15	16–20	21–25	26–30
	$\Delta = T_n - T_x$					
0,02–0,04	5–12	10–25	22–30	25–35	–	–
0,05–0,1	–	8–20	17–25	20–30	–	–
0,11–0,2	–	–	12–20	18–25	20–30	–
0,21–0,3	–	–	8–14	12–20	15–27	–
0,31–0,4	–	–	6–10	8–15	10–20	–
0,41–0,5	–	–	–	7–12	9–16	–
0,51–0,6	–	–	–	6–10	8–13	10–17
0,61–0,7	–	–	–	5–9	7–12	9–14
0,71–0,8	–	–	–	–	6–10	8–13
0,81–0,9	–	–	–	–	5–9	7–11
0,91–1,1	–	–	–	–	4–8	6–10
1,11–1,3	–	–	–	–	–	4–8

В случае неверного ввода значений  $H$ ,  $T_x$  и  $T_H$  необходимо нажать кнопку «РЕЖИМ» и повторить ввод.

Нажатием кнопки «ПУСК» запускается режим измерения, которое проводится в автоматическом режиме. Таймер в нижней строке дисплея отсчитывает время наблюдения, по истечении которого производится автоматическое вычисление значений эффективной теплопроводности  $\lambda$  и теплового сопротивления  $R_H$  измеряемого образца. При окончании измерения издается звуковой сигнал.

Результаты измерений представляют по форме в табл. 21.

Таблица 21

**Результаты определения показателей теплопроводности**

Тип стекла	Вид теплоизоляционного материала	Толщина образца, мм	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м · К	Тепловое сопротивление $R_H$ , м <sup>2</sup> · К/Вт

### **Контрольные вопросы**

1. *Теплофизические характеристики стекол.*
2. *Факторы, влияющие на теплопроводность стекол и материалов на их основе.*
3. *Принцип работы измерителя теплопроводности ИТ- $\lambda$ -400.*
4. *Виды теплоизоляционных материалов.*
5. *Показатели теплопроводности стекол и теплоизоляционных материалов на их основе.*
6. *Принцип работы измерителя теплопроводности ИТП-МГ4.*

### **Лабораторная работа № 9**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ СТЕКОЛ**

### **Общие сведения**

Теплоемкость характеризует способность вещества поглощать тепловую энергию. Мерой теплоемкости является количество теплоты, которое затрачивается на нагревание единицы массы вещества на один градус.

Экспериментально определяют среднюю теплоемкость при постоянном давлении по формуле

$$\bar{c}_p = \Delta Q / \Delta T ,$$

где  $\Delta Q$  – количество теплоты, необходимое для изменения температуры тела на величину  $\Delta T$ .

Среднюю теплоемкость, отнесенную к единице массы, называют удельной теплоемкостью и выражают в Дж/кг · К.

В табл. 22 приведены средние значения удельной теплоемкости для некоторых веществ и материалов.

Теплоемкость веществ в стеклообразном состоянии мало отличается от теплоемкости тех же веществ в кристаллическом состоянии. Теплоемкость стекол растет с увеличением содержания легких элементов. Наиболее низкой удельной теплоемкостью характеризуются стекла с высоким содержанием оксидов ВаО, РbО, например оптические стекла типа ТК (тяжелые кроны).

Таблица 22

**Теплоемкость и температуропроводность различных материалов (25°С)**

Материал	$c$ , кДж/кг · К	$\lambda_c \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	Материал	$c$ , кДж/кг · К
Кварцевое стекло	0,89	6,8	Технические силикаты	0,71–0,17
Листовое стекло	0,85	4,1	Шамот	0,88
			Динас	0,80
Оптическое стекло ТК5	0,51	1,5	Корунд	0,84

В технологических расчетах используют показатели объемной теплоемкости  $c \cdot d$ , где  $d$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг · К.

Объемная теплоемкость является показателем аккумулирующей способности огнеупоров стекловаренных печей. Чем выше объемная теплоемкость, тем больше тепла аккумулируется насадкой регенераторов и, соответственно, более эффективно используется тепло отходящих газов. В технологических расчетах используют коэффициент температуропроводности, который зависит от коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости:

$$\lambda_c = \lambda / c \cdot d , \text{ м}^2/\text{с}.$$

Значения коэффициента  $\lambda_c$  в зависимости от состава стекла составляют от  $1,5 \cdot 10^{-7}$  до  $6,8 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с. Стекла, содержащие оксиды тяжелых металлов (PbO, BaO), характеризуются высокой плотностью и соответственно низким коэффициентом температуропроводности. Поэтому изделия из барий- и свинецсодержащих стекол будут охлаждаться медленнее, чем изделия из стекол, содержащих более легкие компоненты (SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Li<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O).

## Выполнение работы

Измерение теплоемкости осуществляют на приборе ИТ-с-400, подобном по своему устройству прибору для измерения теплопроводности ИТ-λ-400. Он также состоит из двух блоков: измерительного, блока питания и регулирования. Особенность прибора заключается во внутреннем устройстве измерительной ячейки. Исследуемый образец помещают внутри металлической ампулы и закрывают ее крышкой.

В процессе непрерывного нагревания образца с помощью микровольтнаноамперметра и секундомера фиксируется время запаздывания нагрева ампулы до заданной температуры по сравнению с основанием.

Монолитные образцы готовят в виде дисков диаметром  $15 \pm 0,1$  мм и высотой  $10 \pm 0,5$  мм. Перед началом измерений образец взвешивают на аналитических весах с точностью  $\pm 0,001$  г, замеряют размеры штангенциркулем. На контактные поверхности образца наносят графитовый порошок.

Верхнюю половину корпуса измерительной ячейки поднимают вверх и отводят в сторону по часовой стрелке до упора. Образец помещают внутрь металлической ампулы, накрывают колпачком и опускают верхнюю половину корпуса измерительной ячейки.

После включения измерителя теплоемкости и микровольтнаноамперметра Ф-136 в сеть прогревают прибор в течение 30 мин.

Включают нагреватель кнопкой «Нагрев» и, оттянув на себя рукоятку, устанавливают по вольтметру начальное напряжение 40 В. Переключатель «Температура» устанавливают на начальную температуру измерения (25°C), а переключатель «Измерение» – в положение « $t_1$ ». Прибор Ф-136 включают на измерение, отжав кнопку «АРР».

При достижении заданной температуры световой указатель микровольтнаноамперметра подходит к нулевой отметке. В этот момент переключатель «Измерение» переводят в положение « $t_2$ » и одновременно включают секундомер. Когда световой указатель вновь подойдет к нулевой отметке, секундомер выключают. При этом фиксируется время  $\tau_t$  – время запаздывания нагрева ампулы с образцом относительно основания измерительной ячейки.

Переводят переключатель «Температура» на следующую температуру и повторяют определение времени запаздывания. Измерения проводят через  $25^\circ\text{C}$  в заданном интервале. Результаты измерений заносят в табл. 23.

Расчет удельной теплоемкости  $c$ , Дж/кг · К, производят по формулам

$$c = (K_t / m_0) \cdot (\tau_t - \tau_{t^0}),$$

где  $K_t$  – тепловая проводимость тепломера, Вт/К;  $m_0$  – масса образца, кг;  $\tau_t$  – время запаздывания нагрева ампулы с образцом до температуры  $t$  относительно тепломера,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau_{t^0}$  – время запаздывания нагрева пустой ампулы до температуры  $t$  относительно основания,  $^\circ\text{C}$ .

Величины  $\tau_{t^0}$  и  $K_t$  являются постоянными прибора и определяются в процессе его градуировки.

Таблица 23

#### Результаты определения показателей теплоемкости

Характеристика образца	$t$ , $^\circ\text{C}$	$\tau_{t^0}$ , с	$\tau_t$ , с	$K_t$ , Вт/К	$c$ , кДж/кг · К	$c \cdot d$ , кДж/м <sup>3</sup> · К
$m_0$	50	13,2		0,372		
$h$	75	13,0		0,377		
$S$	100	12,8		0,382		
	125	12,6		0,387		
	150	12,3		0,392		
	175	12,0		0,397		
	200	11,8		0,402		

#### Контрольные вопросы

1. Что является мерой теплоемкости?
2. Факторы, определяющие показатели теплоемкости стекол.

3. Факторы, определяющие коэффициент температуропроводности.

4. Порядок измерения показателей удельной теплоемкости.

## Лабораторная работа № 10

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОБЩЕГО ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА

### Общие сведения

Светопропускание является основной эксплуатационной характеристикой листовых стекол, стеклоблоков, безопасных стекол для остекления транспорта.

При падении луча интенсивностью  $I_0$  на полированную стеклянную пластину наблюдаются следующие явления (рис. 8):

– преломление света, т. е. изменение направления его распространения на границе раздела стекло – воздух;

– отражение света от поверхностей раздела стекло – воздух с интенсивностью  $I_1$ ;

– поглощение света в образце интенсивностью  $I_2$ ;

– пропускание света интенсивностью  $I_3$ .

Преломляющая способность стекла характеризуется показателем преломления, который является постоянной величиной для стекла определенного состава. Показатель преломления стекол может изменяться от 1,47 до 2,2. Для листовых стекол он составляет 1,5.

Доля отраженного света выражается показателем  $R = (I_1 / I_0) \times 100$ , выраженным в процентах, или коэффициентом отражения  $\rho = I_1 / I_0$ .

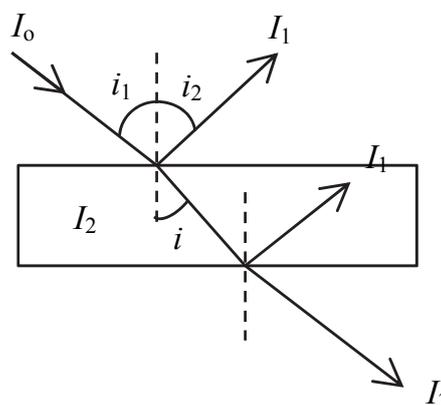


Рис. 8. Путь луча при падении на стеклянную пластину:  $I_0, I_1, I_2, I_3$  – интенсивность падающего, отраженного, поглощенного и прошедшего луча соответственно;  $i_1, i_2, i$  – углы падения, отражения, преломления соответственно

Показатели отражения света зависят от состояния поверхности образца стекла, его показателя преломления и угла падения луча. Для листового полированного стекла отражение от двух поверхностей составляет 8%.

Доля поглощенного света выражается показателем  $A = I_2 / I_0 \times 100$  (%) или коэффициентом отражения  $a = I_2 / I_0$ . Поглощение света зависит от вида и количества присутствующих в стекле красителей. Даже в бесцветном стекле имеются красители – оксиды железа  $Fe_2O_3$  и  $FeO$ , которые вводятся с сырьевыми материалами.

Интенсивность пропущенного света определяется соотношением

$$I_3 = I_0 - I_1 - I_2.$$

Светопропускание выражается показателем  $T = I_3 / I_0 \cdot 100$ , выраженным в процентах, или коэффициентом светопропускания  $\tau = I_3 / I_0$ , выраженным в долях единиц.

Для оценки поглощающей способности стекла используют также показатель оптической плотности стекла, который определяется выражением  $D = \lg(1 / \tau)$ .

Согласно ГОСТ 111 коэффициент направленного пропускания света листового полированного стекла (флоат-стекла) должен соответствовать значениям, указанным в табл. 24.

Таблица 24

**Показатели коэффициента общего пропускания света листового флоат-стекла**

Толщина стекла, мм	Коэффициент направленного пропускания, не менее	Толщина стекла, мм	Коэффициент направленного пропускания, не менее
1,0; 1,5	0,90	10,0	0,81
2,0; 2,5; 3,0	0,89	12,0	0,79
3,5; 4,0; 5,0	0,88	15,0	0,76
6,0	0,87	19,0	0,72
7,0	0,85	25,0	0,67
8,0	0,83	–	–

Снижение светопропускания с увеличением толщины стекла связано с ростом интенсивности поглощенного света.

Коэффициент светопропускания многослойных листовых стекол определяется произведением коэффициентов пропускания отдельных листов стекла.

В соответствии с ГОСТ 5533, коэффициент общего светопропускания листового узорчатого бесцветного стекла, имеющего узор на одной стороне листа, должен составлять не менее 0,75; стекла, имеющего узор на обеих сторонах листа, – не менее 0,70.

Для листового армированного стекла коэффициент общего пропускания составляет 0,60–0,75 и зависит от характеристики поверхности листов стекла (гладкая или узорчатая), а также от вида и размеров ячеек сетки.

Показатели коэффициента направленного пропускания стеклоблоков по ГОСТ 9272 представлены в табл. 25.

Таблица 25

**Показатели коэффициента направленного пропускания света стеклоблоков**

Условное обозначение блоков	Характеристика внутренней поверхности лицевых стенок блоков	Коэффициент светопропускания блоков, не менее
БК 194/98	Гладкая	0,50
	Рифленая	0,30
БК 244/98 БК 244/75	Гладкая	0,55
	Рифленая	0,35
БП 294/194/98	Гладкая	0,53
	Рифленая	0,33

**Выполнение работы**

Коэффициент общего пропускания света в видимом диапазоне излучения определяют по ГОСТ 26302.

Для определения общего светопропускания используют образцы листового полированного стекла различной толщины, листового узорчатого и армированного стекла, триплекса.

Измерение общего светопропускания проводят на фотометре ПОС-1 (рис. 9), который позволяет определить коэффициенты направленного пропускания и отражения света. Допускается использовать другие приборы, обеспечивающие получение результатов измерения общего пропускания света с погрешностью не более 1%.

Прибор включает блок коллиматора, укрепленный на основании. Источником света является лампа накаливания, расположенная в коллиматоре.

Коэффициент общего пропускания света определяется следующим образом.

После включения прибора в сеть по показанию микроамперметра определяют интенсивность светового потока  $I_0$  луча, выходящего из отверстия коллиматора. Затем устанавливается испытуемый образец и по показанию микроамперметра определяют прошедший через образец световой поток  $I_3$ . Световому потоку  $I_0$  соответствует показание микроамперметра  $E_0$ , а световому потоку  $I_3$  – показание микроамперметра  $E_3$ .

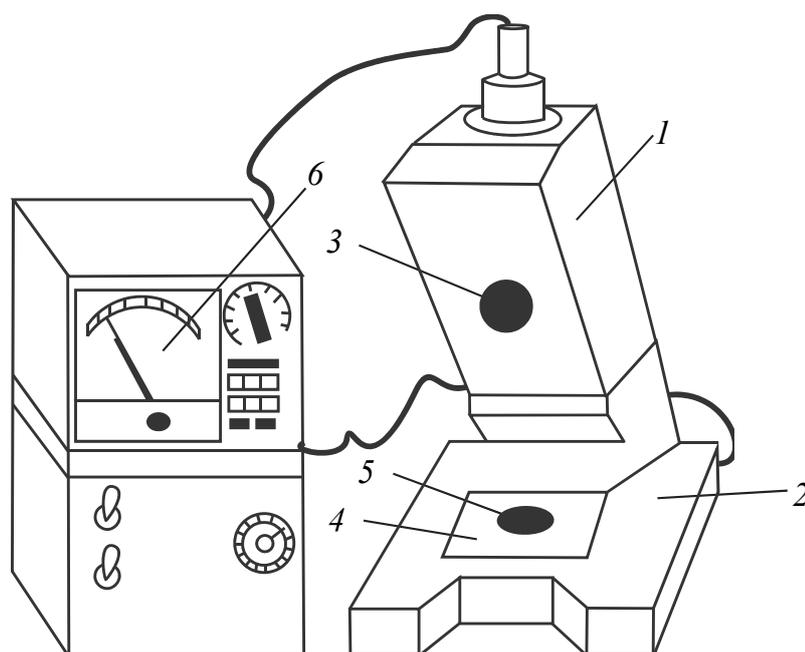


Рис. 9. Прибор для определения общего светопропускания:  
1 – коллиматор; 2 – основание; 3 – отверстие в коллиматоре;  
4 – образец стекла; 5 – фотоэлемент; 6 – микроамперметр

Коэффициент общего светопропускания определяется из соотношения

$$\tau = I_3 / I_0 = E_3 / E_0.$$

Измерение общего светопропускания проводят не менее пяти раз на каждом образце и затем находят среднее значение. Результаты измерений заносят в табл. 26.

По результатам измерений делается заключение о соответствии показателей общего светопропускания установленным стандартом на данный вид стекла значениям. Показатели общего светопропускания листовых стекол представлены в табл. 24.

**Определение общего светопропускания стекол**

Вид стекла	№ образца	Толщина образца, мм	Светопропускание, τ	Среднее значение светопропускания, τ

**Контрольные вопросы**

1. Оптические характеристики стекол.
2. Показатели светопропускания стекол.
3. Нормативные показатели светопропускания стекол строительного назначения.
4. Методика определения общего светопропускания стекол.

**Лабораторная работа № 11****СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКОЛ****Общие сведения**

Оптические свойства стекла являются результатом его взаимодействия с электромагнитным излучением. Условия прозрачности однородных и однофазных стеклообразных материалов выражают соотношением

$$\frac{hc}{\lambda} \leq \Delta E,$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения;  $\Delta E$  – энергия, необходимая для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости (ширина запрещенной зоны).

Соотношение  $hc / \lambda_{\text{гр}} = \Delta E$  выражает граничное условие прозрачности. При длине волны электромагнитного излучения  $\lambda > \lambda_{\text{гр}}$  стекло прозрачно, так как энергия кванта  $hc / \lambda$  меньше ширины запрещенной зоны.

Высоким пропусканием обладают стеклообразные  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Стекла из этих оксидов имеют область пропускания от 150 до 2000–4000 нм. Для кварцевого стекла  $\lambda_{\text{гр}} = 152$  нм, т. е. оно

прозрачно в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Оксиды CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO снижают пропускание в ультрафиолетовой части спектра, оксиды Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, BaO, ZnO снижают пропускание в УФ- и ИК-областях.

*Светопропускание* стекол выражается в долях единицы ( $\tau$ ) или в процентах ( $T$ ) и определяется из соотношения

$$\tau = I / I_0, \text{ или } T = (I / I_0) \cdot 100\%,$$

где  $I$  – интенсивность светового потока, прошедшего через стекло;  $I_0$  – интенсивность светового потока, падающего на поверхность стекла.

Светопропускание вещества связано с коэффициентом поглощения материала  $K$  и толщиной поглощающего слоя  $d$  соотношением (по закону Ламберта – Бера)

$$\tau = e^{-K_\lambda C d},$$

где  $e$  – основание натурального логарифма;  $K_\lambda$  – коэффициент поглощения, характерный для данного материала;  $C$  – концентрация красителя;  $d$  – толщина образца.

Для оценки поглощающей способности стекла используют показатели оптической плотности стекла

$$D = \lg(1 / \tau) = K_\lambda C d.$$

Окраска любого прозрачного тела обусловлена различной степенью поглощения проходящих через него световых лучей с различной длиной волны. Поэтому количественная характеристика окраски стекол определяется показателями пропускания или поглощения света стеклами для ряда длин волн видимой части спектра.

*Красители* стекла подразделяются на ионные, молекулярные и коллоидные. Ионные красители – это катионы переходных и редкоземельных элементов, имеющие неспаренные электроны или незаполненные орбитали (Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Co<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cr<sup>3+</sup>, Cr<sup>6+</sup>, Mn<sup>3+</sup>, Ce<sup>4+</sup>, Nd<sup>3+</sup> и др.). Цвет, который придают ионы стеклу, зависит от их валентного и координационного состояния. Как правило, в стекле присутствуют ионы в двух степенях окисления, равновесие между которыми зависит от условий варки. Например, при наличии оксидов железа в составе стекла ион Fe<sup>2+</sup> вызывает сильное поглощение при 1100 нм, которое оказывает влияние и на поглощение в видимой области спектра, а ион Fe<sup>3+</sup> – более слабое поглощение при 380 нм.

Коллоидные красители – металлы Au, Ag, Cu, которые восстанавливаются в стекле до атомарного состояния и образуют коллоидные частицы размером до 100 нм.

Молекулярные красители – сульфиды и селениды металлов (FeS, CdS, CdSe), выделяющиеся в стекле в виде микрокристаллов размером до 50 нм.

В табл. 27 приведены наиболее распространенные красители стекол.

Таблица 27

**Красители стекол**

Краситель	Хромофорный центр	Цвет	Условия синтеза стекол
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup>	Желтовато-зеленый, синий или сине-зеленый	Окислительные, восстановительные
CoO	Co <sup>2+</sup>	Сине-фиолетовый	Не влияют
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sup>3+</sup>	Зеленый	Восстановительные
NiO	Ni <sup>2+</sup>	Коричневый, красно-фиолетовый	Натрийсодержащие стекла, калийсодержащие стекла
CuO	Cu <sup>2+</sup>	Сине-зеленый	Окислительные
MnO	Mn <sup>3+</sup>	Фиолетовый	Окислительные
CeO <sub>2</sub>	Ce <sup>4+</sup>	Желтый	Окислительные
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sup>3+</sup>	Сине-фиолетовый, красно-фиолетовый	Не влияют
CdSe, CdS	CdS · CdSe	Желтый, красный, оранжевый	Восстановительные
AuCl <sub>3</sub>	Au <sup>0</sup>	Розовый	Окислительные
AgNO <sub>3</sub>	Ag <sup>0</sup>	Оранжево-желтый	Восстановительные
Cu <sub>2</sub> O	Cu <sup>0</sup>	Красный	Восстановительные

Определенные цветовые характеристики должны иметь стекла следующего назначения: теплозащитные листовые стекла, поглощающие до 50% инфракрасного солнечного излучения; стекла для светофильтров; тарные стекла для хранения светочувствительных веществ, например лекарственных препаратов.

Для получения стекол различных цветовых оттенков используют комбинации красителей. Например, совместное введение оксидов кобальта и меди обеспечивает получение синего цвета.

При введении оксидов кобальта и марганца получают стекла пурпурного, фиолетового и черного цветов.

На рис. 10 представлены спектральные кривые светопропускания, т. е. зависимость светопропускания  $T$  от длины волны  $\lambda$ .

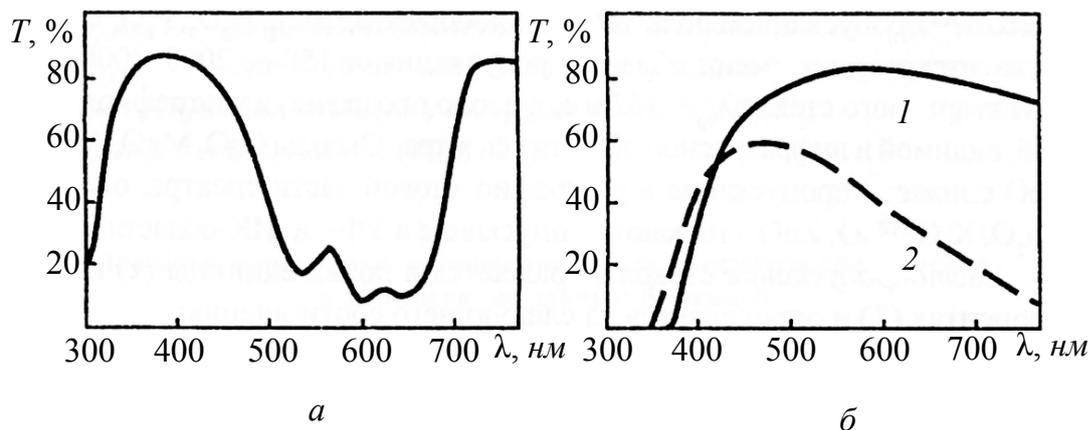


Рис. 10. Спектральное пропускание окрашенных стекол. Красители:  $a$  – 0,1% CoO;  $b$  – 2% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1); 2% FeO (2)

## Выполнение работы

Для измерения коэффициента пропускания и оптической плотности используют фотометры. Принцип действия фотометра основан на сравнении светового потока  $\Phi_0$ , прошедшего через образец сравнения, и светового потока  $\Phi$ , прошедшего через исследуемый образец. На рис. 11 представлен фотометр КФК-3.

Монохроматор 1 служит для получения излучения с заданной длиной волны. Ручка 2 предназначена для установки требуемой длины волны в нанометрах.

При установке рукоятки 3 до упора влево в световой пучок вводится образец сравнения, при установке рукоятки до упора вправо в световой пучок вводится исследуемый образец. Кюветное отделение закрывается съемной крышкой 4.

Выполнение работы производится в следующей последовательности. Фотометр подсоединяют к сети 220 В и включают тумблер «Сеть». При подготовке к работе выдерживают фотометр во включенном состоянии 30 мин. Затем при открытой крышке кюветного отделения производят измерение и учет нулевого отсчета

нажатием клавиши «Нуль». На цифровом табло справа от мигающей запятой высвечивается значение  $n_o$ , слева – символ «0». Значение  $n_o$  должно быть не менее 0,005 и не более 0,200.

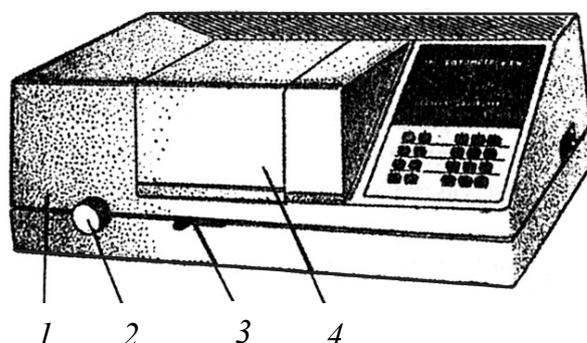


Рис. 11. Общий вид фотометра КФК-3:

1 – монохроматор; 2 – ручка для регулирования длины волны;  
3 – рукоятка; 4 – съемная крышка

Устанавливают в ближнее гнездо кюветного отделения образец стекла в виде пластины размером 20×30 мм. Для стекла измерение производят относительно воздуха, поэтому дальнее гнездо кюветодержателя должно быть свободным.

Устанавливают ручкой 2 длину волны, на которой проводится измерение. Длина волны высветится на цифровом табло. При закрытой крышке кюветного отделения нажимают клавишу «Г» (градуировка фотометра). Затем нажимают клавишу «П» (измерение коэффициента пропускания) или «Е» (измерение оптической плотности). Слева от мигающей запятой высвечивается соответственно символ «П» или «Е», а справа от мигающей запятой – соответственно значения  $100,0 \pm 0,2$  или  $0,000 \pm 0,002$ .

Рукоятку 3 устанавливают вправо до упора, при этом в световой пучок вводится исследуемый образец. Отсчет на световом табло справа от мигающей запятой соответствует коэффициенту пропускания или оптической плотности. Данные заносят в таблицу.

Измерение показателей оптической плотности и светопропускания проводят в спектральном диапазоне 400–900 нм через 10 нм. После каждого изменения длины волны проводят градуировку фотометра.

Результаты определения светопропускания и оптической плотности записываем в табл. 28.

**Результаты определения светопропускания и оптической плотности**

№ п/п	Цвет образца	Толщина образца $d$ , мм	Длина волны $\lambda$ , нм	Светопропускание $T$ , %	Оптическая плотность $D$

По результатам измерений строят спектральную кривую светопропускания и оптической плотности исследуемого образца, откладывая по горизонтальной оси длины волн в нанометрах, а по вертикальной – светопропускание или оптическую плотность. По виду спектральной кривой делают вывод о влиянии красителя на показатели пропускания света в различных диапазонах видимой области спектра (380–760 нм).

**Контрольные вопросы**

- 1. Условие прозрачности стекол.*
- 2. Показатели светопропускания и поглощения стекол, закон Ламберта-Бера.*
- 3. Окрашивание стекол ионными, молекулярными и коллоидными красителями.*
- 4. Методика определения пропускания и оптической плотности стекол.*

**Лабораторная работа № 12****ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СТЕКОЛ****Общие сведения**

Прочность характеризует способность материалов сопротивляться разрушению при воздействии внешних нагрузок. Мерой прочности служит предельное напряжение, вызывающее разрушение образца под действием нагрузки. В зависимости от вида нагрузки различают прочность при сжатии, растяжении, изгибе, ударе и т. д.

*Теоретическую прочность* материалов рассчитывают исходя из энергии химических связей в веществе. Согласно расчетам,  $\sigma_{\text{теор}}$  при растяжении стекла составляет от 5000 до 18 000 МПа.

Прочность реальных изделий называют *технической прочностью*. Предел прочности стекла при сжатии составляет от 500 до 2500 МПа. Предел прочности стекол при растяжении в 10–15 раз ниже и составляет от 25 до 120 МПа. Чаще всего на изделия из листового стекла действует изгибающая нагрузка. При этом на верхней поверхности листа стекла возникают напряжения сжатия, а на нижней – растягивающие усилия, поэтому прочность стекла при изгибе составляет 25–120 МПа.

Сравнение технической прочности с теоретической показывает, что теоретическая прочность существенно превышает техническую. Согласно теории Гриффитса, причиной резкого снижения технической прочности по сравнению с теоретической является наличие в поверхностном слое микротрещин.

Факторы, оказывающие влияние на показатели предела прочности:

- степень дефектности поверхностного слоя, которая возрастает при длительном хранении стеклоизделий;

- масштабный фактор: зависимость прочности от размеров образцов (прочность стекловолокна на порядок выше прочности стеклянного стержня);

- состав стекол: прочность стекла увеличивают оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ , а снижают оксиды  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ ;

- длительность нагружения – под длительным воздействием нагрузки прочность стекла снижается в три раза и может произойти усталостное разрушение;

- состав окружающей среды (влажная атмосфера) облегчает образование и развитие микротрещин;

- наличие в стекле инородных включений (камней, свилей, пузырей);

- качество отжига.

Повышение степени дефектности поверхностного слоя стекла, наличие инородных включений, низкое качество отжига снижают предел прочности стеклоизделий.

Известные способы упрочнения стекла можно разделить на две группы:

- 1) устранение дефектов и повышение качества поверхности (травление);

- 2) создание напряжений сжатия в поверхностных слоях (закалка, ионный обмен).

Способы упрочнения стекла рассмотрены в лабораторной работе № 5, а достигаемый при этом уровень показателей прочности представлен в табл. 11.

## Выполнение работы

**Определение предела прочности при сжатии.** Пределом прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  называют напряжение, при достижении которого материал разрушается под действием сжимающих усилий.

При определении прочности используют не менее трех образцов в виде стеклянных кубиков с ребром 4–5 мм или цилиндров, диаметр и высота которых равны 5 мм. Поверхности образцов должны быть плоскопараллельными. Перед испытаниями необходимо измерить размеры образцов.

Установка для определения прочности включает гидравлический пресс и измерительную систему. Перед началом испытаний необходимо включить измерительную систему и прогреть ее в течение 30 мин.

Образец помещают в центре плиты прессы и закрывают рабочую зону защитной крышкой. Устанавливают уровень защиты (20 кН). Нажимают кнопку «Пуск» и устанавливают скорость нагружения (от 0,25 до 50 кН/с).

Включают гидравлический насос кнопкой «Насос», ручкой «Режим работы» подают нагрузку на образец. Скорость подачи нагрузки на испытуемый образец регулируют ручкой «Скорость».

При разрушении образца на табло измерительной системы высвечивается максимальное значение нагрузки  $P$ , кН. Ручкой «Режим работы» сбрасывают нагрузку и устанавливают ручку на «Ноль». Сбрасывают отсчет нажатием кнопки «Пуск».

Предел прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  вычисляют по формуле

$$\sigma_{сж} = P / S ,$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;  $S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Предел прочности при сжатии материала определяется как среднее арифметическое результатов определения  $\sigma_{сж}$  всех образцов.

Результаты измерений и расчетов заносят в табл. 29.

**Результаты определения предела прочности при сжатии**

№ образца	Размер образца, м	Площадь поперечного сечения, м <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка $P$ , Н	$\sigma_{сж}$ , МПа

**Определение предела прочности при изгибе.** Пределом прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  называют максимальное напряжение, при котором материал разрушается под действием изгибающих усилий.

При определении прочности при изгибе определяют значение разрушающего изгибающего момента  $M$ , Н · м, которое относят к моменту сопротивления образца  $W$ , м<sup>3</sup>:

$$\sigma_{изг} = M / W, \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}.$$

Образцы готовят в виде балочек прямоугольного или квадратного сечения либо стержней круглого сечения. Длина образцов должна превышать расстояние между опорами, составляющее 30 мм.

При испытаниях на изгиб используется метод нагружения образца сосредоточенной силой (трехточечный изгиб). Образец устанавливают на опоры, выполненные в виде трехгранных призм с закругленным верхним ребром (рис. 12), и нагружают до разрушения. Определение предела прочности при изгибе выполняется с помощью гидравлического пресса и измерительной системы. Последовательность измерения такая же, как и при измерении прочности при сжатии.

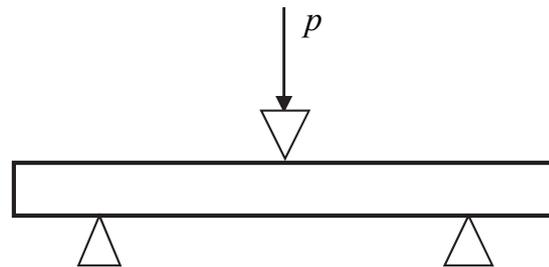


Рис. 12. Схема нагружения при трехточечном изгибе

При испытаниях на изгиб используется метод нагружения образца сосредоточенной силой (трехточечный изгиб). Образец устанавливают на опоры, выполненные в виде трехгранных призм с закругленным верхним ребром (рис. 12), и нагружают до разрушения. Определение предела прочности при изгибе выполняется с помощью гидравлического пресса и измерительной системы. Последовательность измерения такая же, как и при измерении прочности при сжатии.

Прочность на изгиб рассчитывают по следующим формулам:

– для образцов круглого сечения:

$$\sigma_{изг} = M / W = 8Pl / \pi d^3;$$

– для образцов прямоугольного сечения:

$$\sigma_{изг} = M / W = 3Pl / 2bh^2,$$

где  $M$  – изгибающий момент, Н · м;  $W$  – момент сопротивления, м<sup>3</sup>;  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;  $l$  – расстояние между опорами, м;

$b$  – ширина образца, м;  $h$  – толщина образца, м;  $d$  – диаметр образца круглого сечения, м.

Для получения среднего значения проводят не менее трех испытаний. Результаты, которые существенно отклоняются от среднего значения, в расчет не принимаются.

Результаты испытаний и расчетов заносят в табл. 30.

Таблица 30

**Результаты определения прочности при изгибе**

№ образца, характеристика	Расстояние между опорами $l$ , м	Размеры образца		Разрушающая нагрузка $P$ , Н	Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ , Па	Среднее значение предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ , Па
		ширина $b$ , м	толщина $h$ , м			

**Определение прочности при ударе.** Прочность стекла при ударе характеризуется работой, вызывающей разрушение  $1 \text{ см}^3$  стекла. Эту величину называют также показателем хрупкости. Прочность стекла при ударе зависит от химического состава стекла, степени отжига, состояния поверхности, толщины образца. Введение в состав стекла оксида бора до 12 мас. % повышает прочность стекла при ударе почти в два раза. Оксиды  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  уменьшают хрупкость почти на 5–20%. Остальные оксиды мало влияют на этот показатель.

Механическая прочность стекла на удар оценивается по их стойкости к удару стальным шаром.

Установка (рис. 13) для определения прочности включает штатив 4 с подставкой для крепления образца 3 и магнитный держатель 1.

Стекло укладывают в металлическое кольцо с прокладкой из резины средней твердости по ГОСТ 7338 толщиной 1,0 мм. Используется резиновая прокладка с наружным размером, превышающим размер стекла на 3–4 мм. Стекло устанавливают так, чтобы при испытании не было его смещения.

Стальной шар 2 (рис. 13) помещают над центром стекла на заданной высоте, считая от поверхности стекла до нижней точки шара.

Шар удерживают на высоте при помощи магнитного держателя и освобождают для свободного падения со скоростью, равной

нулю. Испытание проводят, сбрасывая стальной шар массой 50, 100 или 225 г (по заданию преподавателя) с заданной высоты. На установке магнитный держатель можно установить на высоте 0,5...1,2 м, закрепив на штативе с помощью болтов 5. Испытание начинают с высоты 0,5 м. После каждого испытания высоту падения шара увеличивают на 0,1 м. Испытания считаются законченными, если стекло при ударе шара разрушилось.

За окончательный результат принимают наименьшее из значений, выбранное по пяти параллельным испытаниям.

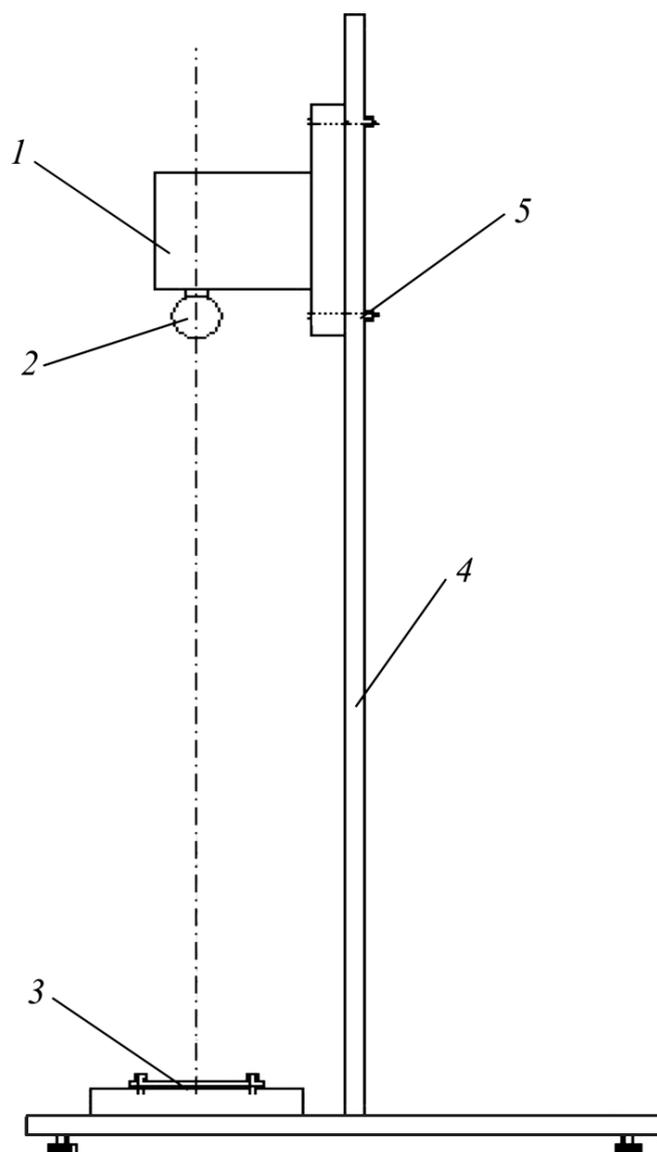


Рис. 13. Схема установок для определения прочности стекла при ударе:

1 – магнитный держатель; 2 – стальной шар; 3 – подставка для крепления образца; 4 – штатив; 5 – болты

Результаты измерений заносят в табл. 31.

Таблица 31

**Результаты определения прочности на удар**

№ образца	Характеристика образца	Прочность при ударе, оцененная по высоте падения стального шара (без разрушения стекла), м

**Контрольные вопросы**

- 1. Показатели теоретической и технической прочности.*
- 2. Факторы, влияющие на показатели прочности.*
- 3. Способы упрочнения стеклоизделий.*
- 4. Способ определения прочности при сжатии, изгибе, на удар.*

**Лабораторная работа № 13**

---

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ СТЕКЛА**

**Общие сведения**

Твердость – способность поверхностного слоя материала сопротивляться деформации или разрушению, т. е. твердость характеризует прочность поверхностного слоя материала. Твердость стекол определяет технологические параметры механической обработки: скорость и режимы шлифования, полирования, сверления, резания. При эксплуатации стеклоизделий твердость определяет сопротивление царапанию, т. е. качество поверхности при воздействии абразивных материалов.

Твердость может определяться различными методами в зависимости от способа воздействия на поверхность материала – вдавливания в образец индентора (статическая твердость), деформации при динамической нагрузке (динамическая твердость), царапания или истирания абразивом. Наибольшее распространение получили методы определения статической твердости.

В методе Бринелля в качестве вдавливаемого индентора используют стальной шарик диаметром 1,0 мм. Величина создаваемой

при вдавливании нагрузки достигает 300 Н. Твердость определяется отношением нагрузки к площади отпечатка.

В приборе Роквелла индентором является стальной шарик (для мягких материалов) или алмазный конус с полусферической вершиной (для твердых материалов). Твердость определяют по разности глубины отпечатков при различных значениях нагрузки.

При определении твердости стекол и ситаллов наиболее часто используют метод Виккерса – вдавливание алмазной пирамиды с углом у вершины  $136^\circ$  при определенной нагрузке. По размерам диагоналей отпечатков алмазной пирамиды, которые составляют десятки и сотни микрометров, определяют показатели так называемой микротвердости.

Твердость стекол зависит от прочности химических связей в их структуре, состояния поверхности. Максимальные показатели твердости имеет кварцевое стекло.

Твердость силикатных стекол снижается при введении в их состав оксидов  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{BaO}$  и повышается при введении  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{ZnO}$ . Наиболее высокие показатели микротвердости имеет кварцевое стекло – 9000–10 000 МПа. Микротвердость листового стекла составляет 5400–5800 МПа, а стекло с высоким содержанием оксида свинца – 3000–4000 МПа.

## Выполнение работы

Для измерения микротвердости по методу Виккерса применяют микротвердомер ПМТ-3М (рис. 14), который состоит из основания, колонки, предметного столика, винтового окулярного микрометра, нагружающего механизма, осветителя, системы объективов. Предметный столик может крестообразно перемещаться на 10 мм во взаимноперпендикулярных направлениях при помощи микрометрических винтов. При помощи рукоятки предметный столик может быть повернут на  $180^\circ$ .

Для измерения микротвердости используют образцы стекла в виде пластин размером  $20 \times 20$  мм, одна сторона которых отполирована.

Образец закрепляют с помощью пластилина и ручного прессы на съемной подставке. Подставку устанавливают на предметный столик и закрепляют зажимами.

Помещают груз на верхнюю площадку штока, в нижний конец которого вставлена оправка с алмазной пирамидкой. Обычно масса груза составляет 0,1 кг, хотя в зависимости от твердости используют также грузы массой 0,05 и 0,2 кг.

Включают осветлитель микроскопа, находят поверхность образца. При вращении микроскопических винтов предметного столика выбирают место без механических повреждений для укола.

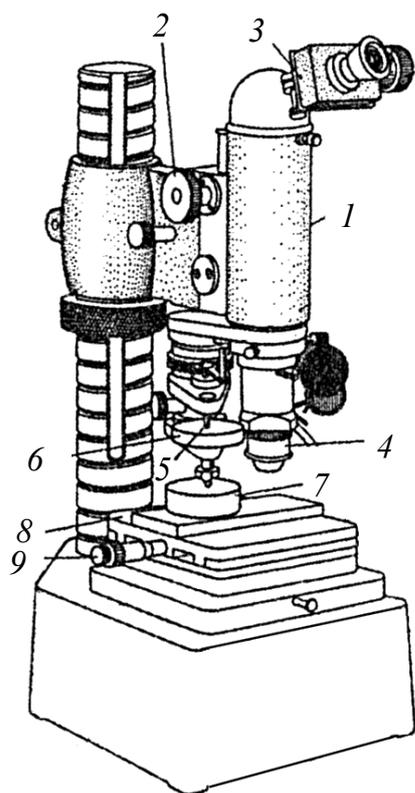


Рис. 14. Микротвердомер:  
 1 – тубус микроскопа; 2 – винт перемещения тубуса;  
 3 – окуляр-микрометр;  
 4 – объектив; 5 – шток; 6 – груз;  
 7 – образец; 8 – предметный столик; 9 – винт предметного столика

Поворачивают предметный столик против часовой стрелки до упора. Медленно (в течение 10–15 с) поворачивают рукоятку штока против часовой стрелки. При этом шток опускается, и под действием нагрузки алмазная пирамидка вдавливается в выбранный участок поверхности. После выдержки в течение 5 с алмазную пирамидку поднимают, повернув рукоятку по часовой стрелке в исходное положение. Образец перемещают вращением микрометрических винтов предметного столика на 2–3 деления и последовательно делают не менее трех уколов.

Предметный столик плавно возвращают в исходное положение. Устанавливают резкое изображение отпечатка пирамидки. Измеряют диагональ отпечатка, подводя отпечаток с помощью микрометрических винтов предметного столика к штриховой оси.

При этом ось должна быть перпендикулярна измеряемой диагонали отпечатка (рис. 15).

Выбор режимов измерения и обработка данных проводится с помощью микро-ЭВМ. Последовательность введения данных и измерения следующая:

– включить микро-ЭВМ, ввести «05 → Enter → 32 → Enter»;

– ввести массу нагрузки в ньютонах (100 г – «0,98»; 200 г – «1,96» и т. д.) и подтвердить нажатием кнопки «Enter», ввести «10 → Enter»;

– включить режим измерения нажатием кнопки «Beg» и, вращая микрометрический винт, провести измерение размеров первой диагонали. Подтвердить окончание измерения нажатием кнопок «End» и «Enter»;

– подвести штриховую ось ко второй диагонали того же отпечатка и провести измерение ее размера в последовательности «Beg...End → Enter → Enter → Enter». На экране появится результат определения микротвердости  $H$ , кГс/мм<sup>2</sup>.

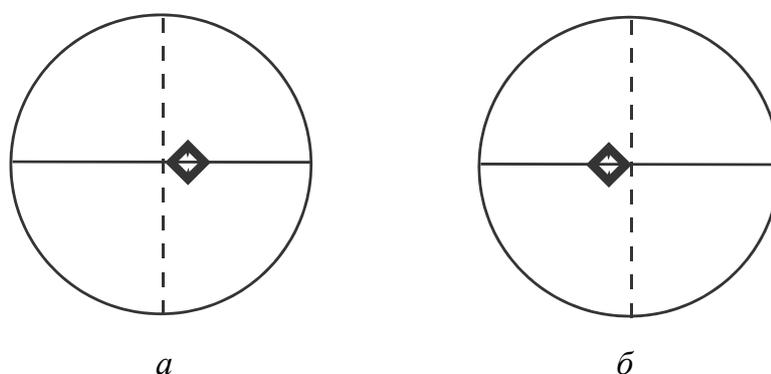


Рис. 15. Измерение диагонали отпечатка алмазной пирамидки

В такой же последовательности провести определение показателей микротвердости по размерам остальных отпечатков. Результаты определений заносят в табл. 32, при этом микротвердость определяют как среднее из трех измерений.

Таблица 32

**Результаты определения микротвердости по Виккерсу**

Тип стекла	Номер отпечатка	Нагрузка на индентор, кг	Микротвердость, кГс/мм <sup>2</sup>	Микротвердость, МПа

**Контрольные вопросы**

1. Дать определение твердости и микротвердости.
2. Методы определение твердости.
3. Влияние состава стекла на микротвердость.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕКОЛ

### Общие сведения

Химической устойчивостью называют способность стекол противостоять разрушающему действию воды, газов атмосферы, растворов солей и различных химических реагентов.

Химическая устойчивость стекол зависит от их химического состава и природы действующего реагента.

По механизму действия на стекло химические реагенты можно разделить на две группы. К первой группе относятся реагенты с  $\text{pH} \leq 7$ : вода, растворы кислот (кроме плавиковой  $\text{HF}$  и ортофосфорной  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), влажная атмосфера. Ко второй группе относятся реагенты с  $\text{pH}$  среды выше 7, т. е. растворы щелочей, карбонатов и т. п. К этой же группе относятся фосфорная и плавиковая кислоты.

Реагенты первой группы взаимодействуют со щелочными компонентами поверхностных слоев стекла, образуя растворимые гидроксиды щелочных металлов (например  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ). Ионы щелочно-земельных элементов связаны с силикатным каркасом прочнее, поэтому медленнее взаимодействуют с водой и кислотами.

В результате процесса «выщелачивания» на поверхности стекла остается гидратированная кремнеземистая пленка, при толщине которой более 50 нм процесс разрушения стекла водой практически прекращается. Это обеспечивает длительную службу листового стекла в условиях постоянного воздействия влаги атмосферы. Однако при неправильном хранении листового стекла возможно его химическое разрушение, при этом появляются протравленные пятна. Это происходит при конденсации влаги между прилегающими друг к другу листами стекла. В процессе выщелачивания образуется  $\text{NaOH}$ , который является реагентом второй группы.

Реагенты второй группы взаимодействуют с оксидом кремния и разрушают непосредственно кремнекислородный каркас стекла. В результате полностью разрушаются и удаляются поверхностные слои. Скорость разрушения практически остается постоянной, а глубина разрушения пропорциональна времени действия реагента.

Активное химическое воздействие плавиковой кислоты на стекло используется в процессах травления и полирования стекла. При воздействии водного раствора HF образуется  $\text{SiF}_4$  и  $\text{H}_2\text{SiF}_6$ , а также фториды и кремнефториды щелочных и щелочноземельных металлов. Это приводит к быстрому снятию поверхностного слоя стекла.

Стекланные изделия в основном подвергаются воздействию реагентов первой группы. Химическая устойчивость к данным реагентам определяется главным образом содержанием в составе стекол оксида кремния и оксидов щелочных металлов. Повышение содержания  $\text{SiO}_2$  в составе стекол повышает их устойчивость к воде и растворам кислот. Наиболее стойким является кварцевое стекло. С ростом содержания оксидов щелочных металлов химическая устойчивость падает. Стекла с низким содержанием  $\text{SiO}_2$ , многощелочные и многоборные стекла могут разрушаться под воздействием влаги атмосферы, что проявляется в образовании белого налета.

В отношении химической устойчивости к реагентам первой группы проявляется полищелочной эффект: при одновременном введении, например, оксидов натрия и калия показатели стойкости выше, чем при эквивалентном введении одного из этих оксидов. Повышает химическую устойчивость также введение оксидов алюминия и бора.

Устойчивость стекол к реагентам второй группы в меньшей степени зависит от состава. Повышают устойчивость к растворам щелочей  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ .

При определении химической устойчивости в зависимости от воздействующих реагентов различают водо-, кислото- и щелочестойкость. Испытания стекол проводят в соответствии с ГОСТ 10134. Для некоторых видов стеклоизделий предусмотрены специальные методы испытаний, например для медицинского и химико-лабораторного стекла.

Используют два основных метода определения химической стойкости стекла.

1. Метод испытания высокоразвитых поверхностей свежего излома, полученных дроблением стекла в порошок до зерен определенного размера (зерновой метод). Применяется в тех случаях, когда устойчивость стекол к реагенту высокая, например для определения водостойкости.

2. Метод испытания поверхностей, при котором действием реагентов подвергаются поверхности готовых изделий или пластин. Данный метод применяется для определения кислото- и щелочестойкости, поскольку потери массы стекол при обработке кислотами и щелочами существенно больше, чем при воздействии воды.

Для определения кислото- и щелочестойкости используются образцы в виде полированных пластин либо другой геометрической формы общей площадью 2–4 дм<sup>2</sup>.

Сущность метода определения кислотостойкости состоит в воздействии на стекло кипящего водного раствора 6 н. соляной кислоты в течение 3 ч. Показатели щелочестойкости оценивают по отношению потери массы образца стекла после испытания к площади поверхности.

По данному показателю выделяют три класса кислотостойкости:

- 1-й класс – с уровнем потерь до 0,7 мг/дм<sup>2</sup> включительно;
- 2-й класс – с уровнем потерь 0,7–1,5 мг/дм<sup>2</sup>;
- 3-й класс – с уровнем потерь свыше 1,5 мг/дм<sup>2</sup>.

Для определения щелочестойкости обработку образцов ведут 1 н. кипящими растворами NaOH и Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, взятых в равном соотношении, в течение 3 ч. Показатели щелочестойкости оценивают по отношению потери массы образца после испытания к площади поверхности.

Различают три класса щелочестойкости стекол:

- 1-й класс – с уровнем потерь 0–75 мг/дм<sup>2</sup>;
- 2-й класс – с уровнем потерь 75–175 мг/дм<sup>2</sup>;
- 3-й класс – с уровнем потерь свыше 175 мг/дм<sup>2</sup>.

Для получения сравнительных характеристик стекол различных составов может быть использован зерновой метод по отношению к кислым и щелочным растворам при условии, что при обработке данными реагентами не происходит полного растворения стекла.

## Выполнение работы

**Определение водостойкости.** Стандарт устанавливает два метода определения водостойкости стекла и стеклокристаллических материалов при 98°C:

- А – для стекла, содержащего оксиды щелочных металлов;
- Б – для бесщелочного стекла.

Сущность метода А заключается в воздействии дистиллированной воды при 98°C на измельченное стекло и определении расхода 0,01 н. раствора соляной кислоты при титровании.

Сущность метода Б заключается в воздействии дистиллированной воды при 98°C на измельченное стекло и определении отношения потери массы стекла после испытания к его массе до испытания.

Для приготовления пробы отоженное стекло разбивают на куски и измельчают в металлической ступке до получения зерен определенного гранулометрического состава. Для этого измельченное стекло просеивают через сита № 05 и № 0315, т. е. получают зерна фракции 0,50–0,315 мм, отсеивая более крупные и более мелкие зерна. Удаляют магнитом частицы металла из пробы и помещают в стаканчик для взвешивания. Для проведения параллельных испытаний необходимо около 6 г стекла.

Подготовленную пробу промывают дистиллированной водой или спиртом для удаления пылевидных частиц и высушивают в сушильном шкафу при температуре 140°C.

**Метод А.** Из приготовленной пробы отбирают и взвешивают на аналитических весах с точностью  $\pm 0,0001$  г три навески массой около 2 г каждая. Каждую навеску помещают в мерную колбу вместимостью 50 мл, доливают до метки дистиллированной водой и распределяют измельченное стекло по поверхности основания колб. Одновременно проводят два контрольных испытания без пробы, т. е. в мерные колбы наливают 50 мл дистиллированной воды.

Все колбы погружают до половины горловины в водяную баню с температурой 98°C. Нагревают колбы при температуре  $(98 \pm 0,5)$ °C в течение 60 мин от момента погружения в баню.

Затем колбы вынимают, открывают и после охлаждения до температуры  $(20 \pm 2)$ °C доливают дистиллированной водой до метки.

Из каждой колбы пипеткой отбирают по 25 мл раствора в конические колбы вместимостью 100 мл, прибавляют 0,1 мл раствора метилового красного и титруют раствором соляной кислоты до перехода окраски индикатора от желтой к красно-оранжевой. Все три раствора и растворы контрольных испытаний титруют одинаковым способом.

Водостойкость стекла при 98°C вычисляют по формуле

$$X_A = \frac{V - \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right)}{m},$$

где  $V$  – объем раствора соляной кислоты концентрации 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, израсходованный на титрование 25 мл анализируемого раствора, мл;  $V_1$  и  $V_2$  – объемы растворов соляной кислоты концентрации 0,01 моль/дм<sup>3</sup>, израсходованные на титрование 25 мл раствора контрольных опытов (воды), мл;  $m$  – масса навески измельченного стекла, г.

За окончательный результат испытания принимают среднее арифметическое результатов трех параллельных определений.

Для оценки химической стойкости используется гидролитическая классификация, согласно которой стекла делятся на пять классов (табл. 33). Класс водостойкости стекла при 98°C устанавливают в соответствии с указанным в табл. 33.

Таблица 33

**Гидролитическая классификация стекол**

Гидролитический класс	Количество 0,01н НСl, израсходованной на титрование, мл/г
1/98	До 0,10 включительно
2/98	0,10–0,20
3/98	0,20–0,85
4/98	0,85–2,0
5/98	2–3,5

Результаты испытаний заносят в табл. 34.

Таблица 34

**Результаты определения водостойкости по методу А**

Тип стекла	Номер пробы	Масса навески, г	Количество 0,01 н. НСl, израсходованной на титрование, мл/г			Гидролитический класс
			$V$	$V_1$	$V_2$	

**Метод Б.** Данный метод используется при испытаниях бесщелочных стекол, например стекол для непрерывного волокна. Отличительной особенностью метода является обработка проб стек-

ла дистиллированной водой на водяной бане в течение 5 ч. Обработанную пробу отфильтровывают и высушивают. Взвешивание исходной и обработанной пробы проводят на аналитических весах с точностью до четвертого знака после запятой.

Водостойкость стекла при 98°C согласно данному методу определяют по потерям массы и вычисляют по формуле

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100,$$

где  $m$  – масса навески до испытания, г;  $m_1$  – масса навески после испытания, г.

Результаты испытаний заносят в табл. 35

Таблица 35

**Результаты определения водостойкости бесщелочных стекол**

Тип стекла	Номер пробы	Масса навески до испытания, г	Масса навески после испытания, г	Потери массы, %

### **Контрольные вопросы**

- 1. Влияние реagens на химическую стойкость стекол.*
- 2. Влияние состава стекол на показатели их водо-, кислото- и щелочестойкости.*
- 3. Методика определения водостойкости стекол.*
- 4. Показатели химической устойчивости стекол. Гидролитическая классификация стекол.*
- 5. Методика определения кислото- и щелочестойкости.*

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## ХАРАКТЕРИСТИКА СТЕКОЛ И СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ

Таблица П. 1.1

### Химический состав стекол

Тип стекла	Оксиды и их содержание, мас. %											
	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Листовое стекло:												
– флоат-способ	72,36	–	1,39	0,13	–	–	–	9,3	3,53	–	13,29	–
– прокатное	72,78	–	1,0	0,13	–	–	–	8,5	3,6	–	13,89	–
– тянутое	71,75	–	1,3	0,09	–	–	–	8,56	3,86	0,28	14,16	–
Стеклоблоки	74,5	–	0,82	–	–	–	–	5,92	3,34	–	15,42	–
Стекловолокно непрерывное из стекла типа Е	54,0	10,0	14,5	–	–	–	–	16,8	4,0	–	0,7	–
Сортовое	75,65	–	0,53	–	–	–	–	6,92	–	7,92	8,98	–
Хрустальное	62,0	–	–	–	18,45	1,0	1,2	1,3	–	10,05	6,0	–
Оптическое:												
– кроны	72,0	8,1	–	–	–	–	–	1,5	0,5	10,5	7,2	0,2
– флинты	42,0	–	–	–	46,4	–	–	–	–	6,4	–	0,2
Кварцевое	99,95	–	0,01	–	–	–	–	0,03	0,01	–	–	–
Медицинское	73,0	4,0	4,5	–	–	–	–	7,0	1,0	2,0	8,5	–
Химико-лабораторное	79,61	12,12	1,93	–	–	–	–	0,43	0,17	1,74	3,68	–
Электровакуумное	54,8– 74,6	0–9,6	2,6– 5,5	–	0– 10,5	2,3– 3,7	–	1,0– 5,5	0– 3,5	0– 8,5	5,4– 12,5	–

Таблица П. 1.2

## Свойства стекла и стеклоизделий

Тип стекла	Свойства стекла и стеклоизделий											
	Светопропускание, %	Показатель преломления	Коэффициент линейного термического расширения, $\alpha \cdot 10^{-7} \text{K}^{-1}$	Термическая устойчивость, °С	Микротвердость, ГПа	Теплопроводность, Вт/(м · К)	Химическая устойчивость	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/(кг · К)	Температура начала размягчения, °С	Прочность на изгиб, МПа	Прочность на сжатие, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Листовое стекло	65–90	1,5	90	–	–	1,0	4/98 <sup>1</sup>	2500	720	600	15	700–900
Стеклоблоки	30–65	–	80–90	40	–	0,42	4/98 <sup>1</sup>	2500	–	–	–	2,0–2,5
Стекловолокно: – непрерывное из стекла типа Е	–	1,546–1,563	50–60	–	–	–	Водостойкость – <0,12 мг Na <sup>2</sup> O на 1 г стекла	2500–2600	–	830–860	Прочность на разрыв 3100–3500 МПа	–
– минеральная вата	–	–	–	–	–	0,045–0,116	–	80–100	–	–	–	–
Сортовое	86–90	1,512–1,513	90–99	90–100	4,8–5,6	–	4/98 <sup>1</sup>	2450–2520	845–854	550–580	–	–
Хрустальное	92–94	1,528–1,534	94–105	80–100	4,6–5,2	–	4/98 <sup>1</sup>	2900–3100	845–854	530–560	–	–

Окончание табл. П. 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Оптическое: – крон К-8 – флинт Ф-2	– –	1,5163 1,6164	76 76	– –	– –	– –	$A^2$ $A^2$	2520 3600	– –	– –	– –	– –
Кварцевое	>94	1,4584	5,2	>1000	9,3– 11,2	1,32	$0 \text{ г/м}^2$ <sup>3</sup>	2206	693	>1060	110	600
Медицинское НС-1	–	–	68–72	>150	–	–	<0,060 мг $\text{Na}_2\text{O}$ на 1 г стекла <sup>4</sup> ; <85мг/дм <sup>2</sup> <sup>5</sup>	2440– 2460	–	–	–	–
Химико-лабораторное ТС	–	–	33	>250	–	–	0–0,1 мкг $\text{Na}_2\text{O}$ на 1 г стекла; <1,5 мг/см <sup>2</sup> <sup>5</sup>	–	–	–	–	–
Пеностекло	–	–	–	–	–	0,083– 0,11	–	≤ 190	–	–	–	0,7

*Примечание:* 1 – гидролитический класс; 2 – химическая устойчивость к влажной атмосфере; 3 – потери массы при кипячении в течение 24 ч в воде; 4 – водостойкость; 5 – щелочестойкость

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### Химический состав сырьевых материалов

Наименование материалов	Основное вещество	Содержание компонентов, мас. %								
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Me <sub>m</sub> O <sub>n</sub>	п. п. п.
Барий углекислый	BaCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	–	–	BaO (77,2)	22,8
Борная кислота	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	–	–	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (55,0)	45,0
Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46	97,9	–	0,35	–	–	–	–	1,29
Доломит «Руба»	MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	1,4	0,9	0,18	32,1	20,5	–	–	–	44,92
Магнезия жженая	MgO	–	–	–	1,2	97,4	–	–	–	1,4
Магний углекислый	MgCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	47,4	–	–	–	52,6
Мел Волковысского месторождения	CaCO <sub>3</sub>	1,2	0,6	0,1	54,3	0,6	–	–	–	43,2
Песок кварцевый Гомельского ГОКа	SiO <sub>2</sub>	99,4	0,22	0,03	–	–	–	–	–	0,35
Песок кварцевый Новоселовского ГОКа	SiO <sub>2</sub>	99,6	0,3	0,015	–	–	–	–	–	0,085
Полевой шпат	(K,Na)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	60,8	22,6	0,18	–	–	8,9	6,5	–	1,02
Поташ	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	1,2	66,0	–	32,8
Селитра калиевая	KNO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	–	46,3	–	53,7
Селитра натриевая	NaNO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	36,2	–	–	63,8
Сода кальцинированная	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	58,0	–	–	42,0
Свинцовый сурик	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	–	–	Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (99,8)	0,2
Стронций углекислый	SrCO <sub>3</sub>	–	–	–	–	–	–	–	SrO (66,6)	33,4
Сульфат натрия	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	–	–	–	–	43,4	–	–	56,6
Титана оксид	TiO <sub>2</sub>	–	–	–	–	–	–	–	TiO <sub>2</sub> (98,8)	1,2
Цинковые белила	ZnO	–	–	–	–	–	–	–	ZnO (98,7)	1,3

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Химическая технология стекла и ситаллов / под ред. Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1983. – 431 с.
2. Бобкова, Н. М. Теоретические основы стеклообразования. Строение и свойства стекол / Н. М. Бобкова. – Минск: БГТУ, 2003. – 135 с.
3. Бобкова, Н. М. Химическая технология стекла и ситаллов: практикум / Н. М. Бобкова, Л. Ф. Папко. – Минск: БГТУ, 2005. – 196 с.
4. Гуляян, Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гуляян. – Владимир: Транзит-Икс, 2003. – 480 с.
5. Гуляян, Ю. А. Физико-химические основы технологии стекла / Ю. А. Гуляян. – Владимир: Транзит-ИКС, 2008. – 736 с.
6. Панкова, Н. А. Стекольная шихта и практика ее приготовления / Н. А. Панкова, Н. Ю. Михайленко. – М.: РХТУ, 1997. – 80 с.
7. Аппен, А. А. Химия стекла / А. А. Аппен. – Л.: Химия, 1974. – 350 с.
8. Терещенко, И. М. Технология листового стекла / И. М. Терещенко. – Минск: БГТУ, 2010. – 360 с.
9. Технология строительного и технического стекла и шлакоситаллов / В. В. Полляк [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. – 432 с.
10. Виды брака в производстве стекла / под ред. Г. Иебсена-Мерведея, Р. Брюкнера. – М.: Стройиздат, 1986. – 647 с.
11. Маневич, В. Е. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В. Е. Маневич, К. Ю. Субботин, В. В. Ефременков. – М.: РИФ «Стройматериалы», 2008. – 244 с.
12. Коцик, И. Окрашивание стекла / И. Коцик, И. Небрженский, И. Фандерлик. – М.: Стройиздат, 1983. – 211 с.
13. Стекло: справочник / под ред. Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 488 с.
14. Минько, Н. И. Контроль производства и качества продукции / Н. И. Минько, В. И. Онищук, Н. Ф. Жерновая. – Белгород: БелГТАСМ, 1998. – 109 с.
15. Песок кварцевый, молотый песчаник, кварцит и жильный кварц для стекольной промышленности. Технические условия:

ГОСТ 22551–77. – Введен 01.01.1979. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 11 с.

16. Стекло листовое. Технические условия: ГОСТ 111-2001. – Введен 01.01.2003. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 34 с.

17. Стекло листовое узорчатое. Технические условия: ГОСТ 5533-86. – Введен 01.01.1987. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 1986. – 8 с.

18. Изделия теплоизоляционные из стеклянного штапельного волокна. Технические условия: ГОСТ 104990-95. – Введен 01.07.1996. – М.: ИПК «Издательство стандартов». – 8 с.

19. Стекло закаленное строительное. Технические условия. ГОСТ 30698-2000. – Введен 01.07.2001. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001. – 20 с.

20. Блоки теплоизоляционные из пеностекла. Технические условия: СТБ 1322-2002. Введен 01.01.2003. – Минск: Минстройархитектуры, 2002. – 6 с.

21. Блоки стеклянные пустотелые. Технические условия: ГОСТ 9272-81. – Введен 01.01.1983. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 9 с.

22. Стекло многослойное строительного назначения. Технические условия: ГОСТ 30826-2001. – Введен 01.01.2003. – М.: ГУП ЦПП, 2002. – 34 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	4
Глава 1. КЛАССИФИКАЦИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СТЕКОЛ И СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ .....	6
Лабораторная работа № 1. Классификация стекол и стеклоизделий .....	7
Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ .....	14
Лабораторная работа № 2. Приготовление шихты и варка стекла .....	14
Лабораторная работа № 3. Кристаллизационная способность стекол .....	26
Лабораторная работа № 4. Отжиг стекла и контроль качества отжига .....	29
Лабораторная работа № 5. Упрочнение стекла ионным обменом .....	36
Лабораторная работа № 6. Ламинирование многослойного стекла .....	41
Глава 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКОЛ И СТЕКЛОИЗДЕЛИЙ .....	45
Лабораторная работа № 7. Определение температурного коэффициента линейного расширения .....	48
Лабораторная работа № 8. Определение теплопроводности стекол и теплоизоляционных материалов .....	54
Лабораторная работа № 9. Определение теплоемкости стекол .....	61
Лабораторная работа № 10. Определение коэффициента общего пропускания стекол .....	65

Лабораторная работа № 11. Спектральные характеристики стекол.....	69
Лабораторная работа № 12. Определение прочности стекол.....	74
Лабораторная работа № 13. Определение микротвердости стекол.....	80
Лабораторная работа № 14. Определение химической устойчивости стекол.....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	90
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	93
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	94

Учебное издание

**Павлюкевич Юрий Геннадьевич**  
**Папко Людмила Федоровна**

**ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛЯННЫХ ИЗДЕЛИЙ**  
**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Редактор *А. С. Аристова*  
Компьютерная верстка *В. В. Терахович*  
Корректор *А. С. Аристова*

Подписано в печать 17.07.2015. Формат 60×108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 5,6. Уч. изд. л. 5,8.  
Тираж 80 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя и распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.