

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технологии стекла и керамики

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

**Программа, методические указания
и контрольные задания для студентов специальности
1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ,
материалов и изделий» специализаций 1-48 01 01 06 «Технология
стекла и ситаллов», 1-48 01 01 10 «Технология эмалей
и защитных покрытий» заочной формы обучения**

Минск 2014

УДК 666.11-91(075.8)

ББК 35.41я73

Т38

Рассмотрены и рекомендованы к изданию редакционно-издательским советом Белорусского государственного технологического университета

Составитель

Ю. Г. Павлюкевич

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры
химической технологии вяжущих материалов БГТУ

А. А. Мечай

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2013 год. Поз. 191.

Для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализаций 1-48 01 01 06 «Технология стекла и ситаллов», 1-48 01 01 10 «Технология эмалей и защитных покрытий» заочной формы обучения.

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2014

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Технологические процессы в производстве технического стекла» занимает важное место в инженерной подготовке студентов, обучающихся по специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализаций 1-48 01 01 06 «Технология стекла и ситаллов» и 1-48 01 01 10 «Технология эмалей и защитных покрытий». Курс базируется на знании ранее усвоенных дисциплин общеинженерного цикла: общей химической технологии, процессов и аппаратов химических производств, физической химии неорганических неметаллических материалов и основ технологии силикатных материалов, а также химической технологии стекла и ситаллов.

Целью курса является формирование у студентов инженерных знаний в области получения изделий из кварцевого, оптического, светотехнического, электротехнического стекла, термически и химически устойчивого стекла, теплозвукоизоляционного стекла; приобретение навыков выполнения химико-технологических расчетов, а также умения разрабатывать и анализировать технологические схемы производства различных типов изделий из технического стекла.

В результате изучения дисциплины студент должен знать современный уровень развития стекольной промышленности в области производства важнейших видов изделий из технического стекла, химические составы и классификацию стекол; эксплуатационные свойства основных видов изделий из технического стекла; способы производства, их преимущества и недостатки; особенности технологических процессов изготовления изделий из технического стекла.

Освоение курса позволит студентам контролировать технологический процесс производства технического стекла; оценивать эффективность принимаемых технических решений в производстве кварцевого, оптического, светотехнического, электротехнического стекла, термически и химически устойчивого – выбирать материалы, технологические процессы и аппараты, безопасные и оптимальные по технико-экономическим, энергетическим, экологическим и иным показателям; рассчитывать и обосновывать технические параметры химических и теплотехнических процессов.

1. ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

Предмет и содержание курса «Технологические процессы в производстве технического стекла», его значение и связь с другими дисциплинами.

Современное состояние и перспективы развития производства технического стекла в Республике Беларусь и в мире: сырьевая база стекольной промышленности, механизация и автоматизация производственных процессов, создание новых прогрессивных типов оборудования и эффективных технологий. Роль науки и основные направления научно-исследовательских работ в технологии технического стекла.

1. Кварцевое стекло

1.1. Виды и свойства стекол

Классификация кварцевых стекол: непрозрачное, прозрачное техническое и оптическое стекло, особо чистое стекло, керамическое стекло. Назначение и область применения. Механические, термические, электрические, акустические и химические свойства кварцевых стекол.

1.2. Технология изготовления прозрачного кварцевого стекла

Основные виды природного сырья для производства прозрачного кварцевого стекла: природный кварц, горный хрусталь, жильный кварц. Технологические процессы приготовления кварцевой крупки для плавления кварцевого стекла. Искусственные кристаллы кварца, синтетический диоксид кремния (СДК). Получение СДК гидролизом различных кремнийсодержащих соединений, гидротермальной переработкой горных пород.

Основные методы получения кварцевого стекла: парофазный, электрохимический, газопламенный. Технологические аспекты плавки кварцевой крупки в газопламенных, стержневых и тигельных электропечах.

Легирование кварцевого стекла. Особенности получения безгидроксильного особо чистого кварцевого стекла.

1.3. Технология изготовления непрозрачного кварцевого стекла

Сырье и его характеристика. Технологические особенности получения заготовок из непрозрачного кварцевого стекла в электрических печах сопротивления с графитовыми нагревателями.

2. Оптическое стекло

2.1. Номенклатура и состав оптических стекол

Классификация оптических стекол. Составы стекол и их общая характеристика. Показатели качества оптического стекла. Оптические постоянные стекол. Оптическая и химическая однородность стекла. Свойства оптических стекол (оптические, термические, термооптические, механические, химические и др.). Контроль качества оптических стекол.

2.2. Технология получения оптических стекол

Сырьевые материалы и их подготовка. Подготовка и хранение боя. Приготовление шихты. Режимы варки оптических стекол, гомогенизация стекломассы. Летучесть расплавов стекол. Химическое поведение осветлителей. Пороки в оптическом стекле и источники их образования. Влияние газов на свойства стекол.

Выработка и разделка стекла. Отливка, прессование, прокат и моллирование стекла.

Тонкий отжиг оптического стекла. Основы тонкого отжига и режимы отжига. Контроль оптической однородности стекла.

Механическая обработка оптических стекол. Абразивные материалы и инструменты. Технология шлифовки и полировки стекла.

2.3. Оптические стекла специального назначения

Лазерные стекла. Химические составы, свойства и технология получения.

Фотохромные стекла. Назначение, составы, технология получения.

Стекловолоконная оптика. Световоды. Передача излучения оптического диапазона. Явление полного внутреннего отражения. Затухание сигнала в волокне, его причины. Составы стекол для оптических волокон. Технология изготовления оптических волокон.

Стекла для градиентной оптики. Составы и свойства. Получение и применение градианов.

Стекла, прозрачные в ИК области спектра. Составы стекол и особенности получения.

3. Светотехническое стекло

3.1. Классификация и свойства светотехнических стекол

Виды стекол. Светотехнические характеристики, назначение и области применения.

Требования к светотехническим стеклам: пропускание, отражение, поглощение проходящего излучения, предельный цветовой тон, чистота цвета. Теория цвета. Законы Ламбера и Бера. Цвет и его количественное выражение. Система цветowych координат (длина волны, чистота и яркость цвета).

3.2. Технология получения светотехнических стекол

Глушеное стекло. Химические составы и свойства глушеных стекол. Стекла, заглушенные фосфатами, фторидами, сульфидом цинка, коллоидными красителями. Особенности режима варки, выработки и формования глушеных стекол.

Производство фарного стекла и бесцветного стекла для линз Френеля. Составы стекол и режимы варки.

Сигнальные стекла. Составы и свойства стекол. Стекла, окрашенные сульфоселенидами кадмия, оксидами меди, хрома, кобальта, титана, церия и никеля. Особенности варки, выработки и формования цветных стекол.

Увиолетовые стекла. Природа поглощения в дальней (ИК) и короткой (УФ) областях спектра. Граница пропускания. Химические составы стекол, прозрачных в ИК и УФ областях спектра. Технические характеристики стекол и особенности технологии производства.

4. Электротехническое стекло

4.1. Составы и свойства стекол

Типы электровакуумных стекол и ассортимент изделий из них. Требования, предъявляемые к электровакуумным стеклам. Свойства электровакуумных стекол (термические, электрические, вакуумные, химические). Марки электровакуумных стекол. Стекла для спаев, их классификация. Припоечные стекла и ситаллоцементы.

4.2. Технология электровакуумных стекол

Много- и малотоннажные производства изделий из электровакуумного стекла. Сырьевые материалы, приготовление шихты, варка стекла, способы формования изделий.

Технология производства колб для галогенных ламп и ламп специального назначения. Технология производства стеклянных трубок для люминесцентных ламп. Технология производства кинескопов. Контроль качества изделий.

5. Электроизоляционное стекло

5.1. Составы и свойства стекол

Назначение и классификация стеклянных изоляторов. Линейные и аппаратные изоляторы: условия работы и надежность их эксплуатации. Технические требования к стеклянным изоляторам. Составы стекол, используемые в производстве стеклянных изоляторов. Диэлектрические свойства стекол.

5.2. Технология получения электроизоляционных стекол

Сырьевые материалы, их переработка и приготовление шихты. Варка стекла и формование стеклоизделий. Технология производства стеклодеталей изоляторов. Контроль качества стеклянных изоляторов.

6. Химически и термически стойкое стекло

6.1. Химико-лабораторное стекло

Ассортимент изделий и их назначение. Составы и физико-химические свойства стекол (натрий-кальций силикатных; боросиликатных и алюмо-боросиликатных, алюмосиликатных безборных и малоборных, кварцовидных стекол). Химическая устойчивость стекол. Технология изготовления тонкостенных и толстостенных изделий из химико-лабораторного стекла. Методы градуировки изделий.

6.2. Медицинское стекло

Составы и свойства стекол. Ассортимент стеклоизделий и их назначение. Основные требования, предъявляемые к медицинскому стеклу. Технология варки и выработки стекла. Изготовление стеклянной трубки, аптечно-медицинской тары, флаконов и ампул.

6.3. Другие виды стекол

Термометрическое стекло. Классификация, химические составы, основные свойства, области применения. Стекла, устойчивые к термическому удару. Особенности технологии производства изделий. Обработка трубок и капилляров. Отжиг и старение стекла.

Водомерные стекла. Стеклофильтры. Составы стекол, назначение и технология изготовления.

7. Теплозвукоизоляционное стекло

Пеностекло и его классификация. Свойства и применение пеностекла. Химические составы стекол и пенообразователи. Способы формования пеностекла. Процессы, протекающие в пенообразующей смеси и пеностекле при термообработке и формовании. Особенности производства тепло- и звукоизоляционного пеностекла: составы стекол и газообразователей, подготовка шихты, режимы вспенивания и отжига, механическая обработка. Одно- и двухстадийный способы производства пеностекла.

8. Растворимое стекло

Растворимое стекло и его характеристика. Теоретические основы производства и применения растворимого стекла на основе систем $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, $\text{Li}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$. Химические составы промышленных стекол. Процессы формирования силикат-глыбы. Особенности производства растворимых силикатов натрия и калия. Области применения растворимого стекла в строительстве и промышленности.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ И ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Курс «Технологические процессы в производстве технического стекла» включает в себя основные разделы: кварцевое стекло; оптическое стекло; светотехническое стекло; электротехническое стекло; электроизоляционное стекло; химически и термически стойкое стекло; теплозвукоизоляционное стекло; растворимое стекло.

При изучении основных положений дисциплины следует придерживаться следующего общего методологического подхода:

- рассмотреть классификацию стекол, их назначение и область применения;

- изучить требования нормативной документации (СТБ, ГОСТ, ТУ) к основным видам изделий из технического стекла, а также самим стеклам;

- изучить влияние химического состава стекол на их физико-химические свойства, особо уделив внимание рассмотрению свойств, определяющих их назначение;

- рассмотреть главные и вспомогательные сырьевые материалы и их свойства;

- изучить технологические приемы подготовки сырьевых материалов, варки и выработки стекол, их отжига и обработки.

- рассмотреть виды специальной химической, механической и термической обработки стекол, свойственной некоторым техническим стеклам.

Особое внимание следует уделить рассмотрению эксплуатационных свойств основных видов изделий из технического стекла, изучению технологических стадий и способов производства, особенностям варки, выработки и отжига стекол технического назначения; методам повышения качества продукции.

В период сессии студентам читаются лекции и проводятся практические занятия в соответствии с программой курса. В ходе лекции студенты получают разъяснения по основным положениям изучаемого курса, на практических занятиях материал закрепляется.

В период сессии студент обязан выполнить контрольную работу, задание по которой выдает преподаватель.

Контрольная работа включает 2 теоретических вопроса и задачу. Теоретические вопросы касаются общих положений курса, тематика задач позволяет освоить расчетные методы определения свойств технического стекла.

Контрольная работа должна выполняться в тетради или на отдельных листах белой бумаги и обязательно до начала экзаменационной сессии. Для замечаний рецензента в работе оставляются поля.

В конце контрольной работы указывается, каким учебным пособием студент пользовался при изучении дисциплины. Все описываемые положения и вопросы следует оформлять в соответствии с требованиями стандарта СТП БГТУ 002–2007 «Проекты (работы) курсовые. Требования и порядок подготовки, представления к защите и защиты».

Номер варианта выполнения контрольного задания выдается студенту в период установочной лекции, преподавателем, читающим лекционный курс.

Ответы на теоретические вопросы должны быть исчерпывающими и четкими. При изложении ответов их следует иллюстрировать схемами и рисунками. Рисунки рекомендуется выполнять карандашом, графически аккуратно, сопровождая необходимой нумерацией и поясняющими надписями.

В контрольной работе в соответствии с заданием при решении задач студенту требуется определить заданные свойства стекла по его составу методами А. А. Аппена и Л. И. Демкиной. Метод А. А. Аппена позволяет рассчитывать величины восьми свойств самых разнообразных стекол, относящихся к группам механических, оптических, термических и электрических свойств стекол и обеспечивает высокую точность полученных результатов. Применение метода Л. И. Демкиной ограничено 12 оксидами и, главным образом, группой оптических стекол. Преимуществом метода является его точность.

Методика расчета свойств стекол методами А. А. Аппена и Л. И. Демкиной приведена ниже.

Расчет свойств стекла по методу А. А. Аппена. А. А. Аппен предложил метод расчета плотности, показателя преломления, средней дисперсии, температурного коэффициента линейного расширения, модуля упругости и сдвига, диэлектрической проницаемости, поверхностного натяжения. Его особенностью является применение усредненных парциальных величин (аддитивные коэффициенты), которые используют для расчета свойств по аддитивным формулам при выражении состава стекла в молярных единицах – долях или процентах. А. А. Аппен предложил две формы расчетных уравнений: одну – для расчета плотности стекла и другую – для расчета всех остальных свойств.

Для расчета плотности используют следующее уравнение:

$$\rho = \frac{\sum P_i}{\sum n_i \bar{V}_i}, \quad (1)$$

где $\sum P_i$ – сумма содержания в стекле каждого компонента, мас. %; n_i – содержание в стекле каждого компонента, число молей; \bar{V}_i – приближенно-усредненная парциальная величина (аддитивный коэффициент) удельного объема соответствующего компонента, которая принимается на основании данных табл. 1.

Для расчета других свойств по методу А. А. Аппена используют уравнение

$$K = \frac{\sum n_i \bar{k}_i}{\sum n_i}, \quad (2)$$

где K – расчетная величина свойства; \bar{k}_i – приближенно-усредненная величина этого свойства для каждого компонента, принимаемая по данным табл. 1.

Таблица 1

Приближенно-усредненные парциальные величины свойств компонентов силикатных стекол

Компонент	Молекулярная масса	Молекулярный объем $\bar{V}_i, \text{см}^3/\text{моль}$	Показатель преломления \bar{n}_i	Средняя дисперсия $\bar{\delta}_i \cdot 10^5$	ТКЛР, $\bar{\alpha} \cdot 10^7$ при 20–400°C	Модуль, кгс/мм ²		Диэлектрическая проницаемость при частоте $4,5 \cdot 10^5 \text{Гц}$	Поверхностное натяжение $\sigma_i, \text{дин/см}$ при 1300°C
						упругости $\bar{E}_i \cdot 10^{-3}$	сдвига $\bar{G}_i \cdot 10^{-3}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SiO ₂	60,06	27,25–26,10	1,458–1,475	675	5–38	7,15–6,5	3,0–2,7	3,8	290
TiO ₂	79,9	20,5	2,08–2,23	5000–6200	От –15 до +30	17,1	6,95	25,5	250
ZrO ₂	123,2	–	2,17	–	–60	–	–	–	350
SnO ₂	150,7	–	–	–	–45	–	–	–	350
B ₂ O ₃	69,6	18,5–38,0	1,460–1,710	640–900	От –50 до 0	1,0–18,0	0–7,5	3–8	Пов. актив.
Al ₂ O ₃	101,9	40,4 (30,0)	1,520 (1,70)	850	–30	11,4	4,95	9,2	580
Sb ₂ O ₃	291,5	–	2,55	7700	75	–	–	–	То же
BeO	25,0	–	1,595	890	45	10,9	4,6	13,8	390

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MgO	40,3	12,5 (13,5)	1,610 (1,57)	1110	60	9,2	3,8	15,4	520
CaO	56,1	7,8	1,730	1480	130	11,15	4,95	17,4	510
SrO	103,6	18,0	1,770	1630	160	9,65	4,5	18,0	490
BaO	153,4	22,0	1,880	1890	200	6,25	1,75	20,5	470
ZnO	81,4	14,5	1,710	1650	50	6,0	2,90	14,4	450
CdO	128,4	17,0– 18,2	1,805– 1,925	2270– 2930	115	5,7	2,75	17,2	430
PbO	223,2	21,0– 23,5	2,150–2,350	5280– 7440	130– 190	4,3	1,45	22,0	Пов. актив.
MnO	70,9	–	–	–	105	6,1	2,6	13,8	390
FeO	71,8	–	–	–	55	5,2	1,9	16,0	490
CoO	74,9	–	–	–	50	8,5	3,65	15,2	430
NiO	74,7	–	–	–	50	12,9	5,0	13,4	400
CuO	79,6	–	–	–	30	–	–	–	–
Li ₂ O	29,9	11,0 (11,9)	1,695 (1,655)	1380 (1300)	270 (270)	8,0 (10,5)	3,0 (4,0)	14,0 (15,0)	450
Na ₂ O	62,0	20,2 (20,6)	1,590 (1,575)	1420 (1400)	395 (410)	5,95 (4,7)	1,75 (1,5)	17,6 (17,6)	295
K ₂ O	94,2	34,1* (33,5)	1,575* (1,595)	1300* (1320)	465* (500)	4,1 (–1,0)	1,1 (–0,5)	16,0 (20,3)	Пов. актив.
Cs ₂ O	281,8	–	1,700 (1,74–1,8)	–	–	–	–	–	–
CaF ₂	78,1	–	–	–	180	–	–	–	420
Na ₃ SiF ₆	188,1	–	–	–	340	–	–	–	Пов. актив.
Na ₃ AlF ₆	210,0	–	–	–	480	–	–	–	Пов. актив.

Примечания:

1. Значения приближенно-усредненных парциальных величин для Al₂O₃, указанные в скобках, применимы лишь к стеклам, не содержащим оксиды щелочных и щелочноземельных металлов.

2. Значения приближенно-усредненных парциальных величин для оксидов щелочных металлов, указанные в скобках, действительны только для стекол бинарных систем типа Me₂O – SiO₂ при содержании Me₂O от 0 до 30 %.

3. Значения приближенно-усредненных парциальных величин для K₂O, отмеченные звездочкой, соответствуют стеклам, содержащим также Na₂O. Для стекол, содержащих K₂O, но не содержащих Na₂O, эти величины имеют иные значения. Для стекол составов, обычно применяемых в практике, можно принять: $\bar{V}_{K_2O} = 34,5$; $\bar{n}_{K_2O} = 1,560$; $\bar{\delta}_{K_2O} \cdot 10^5 = 1250$; $\bar{\alpha}_{K_2O} \cdot 10^7 = 425$.

Для приближенно-усредненных величин, не являющихся постоянными, А. А. Аппеном выведены уравнения, которые применяют для

получения коэффициентов, пригодных для расчета свойств стекол в достаточно широком интервале составов.

Приближенно-усредненные парциальные величины для SiO_2 являются постоянными и могут быть определены при помощи следующих простых уравнений:

$$1) \text{ молекулярный объем } \bar{V}_{\text{SiO}_2} = 26,1 + 0,035(N_{\text{SiO}_2} - 67); \quad (3)$$

$$2) \text{ показатель преломления } \bar{n}_{D_{\text{SiO}_2}} = 1,475 - 0,0005(N_{\text{SiO}_2} - 67); \quad (4)$$

$$3) \text{ линейный коэффициент термического расширения } \bar{\alpha}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^7 = 38,0 + 1,0(N_{\text{SiO}_2} - 67); \quad (5)$$

$$4) \text{ модуль упругости } \bar{E}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^{-3} = 6,5 + 0,02(N_{\text{SiO}_2} - 67); \quad (6)$$

$$5) \text{ модуль сдвига } \bar{G}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^{-3} = 2,7 + 0,01(N_{\text{SiO}_2} - 67). \quad (7)$$

В этих уравнениях N_{SiO_2} выражают в молярных процентах. При $N_{\text{SiO}_2} < 67$ значения соответствующих величин принимают постоянными: $\bar{V}_{\text{SiO}_2} = 26,1$; $\bar{n}_{D_{\text{SiO}_2}} = 1,475$; $\bar{\alpha}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^7 = 38,0$; $\bar{E}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^{-3} = 6,5$; $\bar{G}_{\text{SiO}_2} \cdot 10^{-3} = 2,7$. Для других свойств SiO_2 (см. табл. 1) приближенно-усредненные величины принимают постоянными.

Приближенно-усредненные парциальные величины для B_2O_3 изменяются при переходе от одной группы стекол к другой очень сильно. Эти величины зависят, прежде всего, от соотношения молярного содержания окислов металлов и оксида бора, обозначаемого ψ и определяемого по уравнению:

$$\psi = \frac{N_{\text{Me}_2\text{O}} + N_{\text{MeO}} - N_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{N_{\text{B}_2\text{O}_3}}, \quad (8)$$

где Me_2O – оксиды Li_2O , Na_2O , K_2O ; MeO – оксиды CaO , SrO , BaO , CdO .

Если стекло не содержит Al_2O_3 , то наличие в стекле окислов BeO , MgO , PbO , ZnO при расчете ψ не учитывают при условии, что суммарное содержание этих оксидов превышает содержание B_2O_3 (выраженное в мол. %) не более чем в 1,5–2 раза. В противном случае эти оксиды могут быть учтены.

Если стекло содержит Al_2O_3 , то величина $N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ соответствует всему содержанию Al_2O_3 только в том случае, если стекло не содержит ZnO и PbO . При наличии в стекле этих оксидов в количестве, превышающем содержание Al_2O_3 , $N_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ при вычислении ψ не учитывают (так же как и содержание PbO и ZnO). Если же суммарное

молярное содержание ZnO и PbO в стекле меньше, чем молярное содержание Al₂O₃, то в формуле для определения ψ учитывают только избыток содержания Al₂O₃ по отношению к этим двум окислам.

После вычисления ψ приближенно-усредненные величины для B₂O₃ определяют по формулам, приведенным в табл. 2.

Таблица 2

Формулы для расчета приближенно усредненных парциальных величин для B₂O₃

Содержание SiO ₂ в стекле в мол. %	ψ	Формулы для вычисления $\bar{V}_{B_2O_3}$, $\bar{n}_{D_{B_2O_3}}$, $\bar{\delta}_{B_2O_3}$, $\bar{\alpha}_{B_2O_3}$, $\bar{E}_{B_2O_3}$, $\bar{G}_{B_2O_3}$	
44–64	$\psi > 4$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 18,5$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,710$
	$4 > \psi > 1$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 18,5 + 3,1(4 - \psi)$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,710 - 0,048(4 - \psi)$
	$1 > \psi > 1/3$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 34,0 + 3,1(3 - 1/\psi)$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,710 + 0,048(3 - 1/\psi)$
	$\psi < 1/3$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 36,0$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,470$
71–80	$\psi > 1,6$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 18,5$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,710$
	$1,6 > \psi > 1$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 18,5 + 7,8(1,6 - \psi)$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,710 - 0,120(1,6 - \psi)$
	$1 > \psi > 1/2$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 31,0 - 7,8\left(2 - \frac{1}{\psi}\right)$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,520 + 0,120\left(2 - \frac{1}{\psi}\right)$
	$1/2 > \psi > 1/3$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 34,0 - 3,1\left(3 - \frac{1}{\psi}\right)$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,470 + 0,048\left(3 - \frac{1}{\psi}\right)$
	$\psi < 1/3$	$\bar{V}_{B_2O_3} = 36,0$	$\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,470$
44–80	$\psi > 4$	$\bar{\delta}_{B_2O_3} \cdot 10^5 = 900$	$\bar{\alpha}_{B_2O_3} \cdot 10^7 = -50$
	$\psi < 4$	$\bar{\delta}_{B_2O_3} \cdot 10^5 = 900 - 659(4 - \psi)$	$\bar{\alpha}_{B_2O_3} \cdot 10^7 = 12,5(4 - \psi) - 50$
44–80	$\psi > 2$	$\bar{E}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 18$	$\bar{G}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 7,5$
	$2 > \psi > 1$	$\bar{E}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 18 - 3(2 - \psi)$	$\bar{G}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 7,5 - 1,5(2 - \psi)$
	$1 > \psi > 0$	$\bar{E}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 1 + 14\psi$	$\bar{G}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 6,0\psi$

При содержании SiO₂ в интервале 65–70 мол. % значения $\bar{V}_{B_2O_3}$ и $\bar{n}_{D_{B_2O_3}}$ принимаются равными средним арифметическим соответствующих величин, рассчитанных для стекол, более богатых и более бедных оксидом кремния.

Для расчета приближенно-усредненных парциальных величин для PbO применяют следующие формулы:

$$\bar{V}_{\text{PbO}} = 21,0 + 0,08 \left(\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} - 50 \right); \quad (9)$$

$$\bar{n}_{D_{\text{PbO}}} = 2,350 - 0,0067 \left(\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} - 50 \right); \quad (10)$$

$$\bar{\delta}_{\text{PbO}} \cdot 10^5 = 7440 - 72 \left(\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} - 50 \right), \quad (11)$$

где $\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n}$ – суммарное содержание SiO_2 , B_2O_3 и Al_2O_3 , мол. %.

Эти формулы применяют в интервале составов $80 \text{ мол. \%} > \sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} > 50 \text{ мол. \%}$. Приближенно для составов с $\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} > 80 \text{ мол. \%}$ можно принимать величины, соответствующие составам $\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} = 80 \text{ мол. \%}$.

В связи со сложностью изменения свойств в свинцовых стеклах приведенные выше формулы могут давать точные результаты только в том случае, если состав стекла удовлетворяет еще некоторым условиям: содержание SiO_2 в стекле должно быть не менее 45 мол. %, содержание B_2O_3 и Al_2O_3 не должно превышать 15 мол. % для каждого из этих оксидов; при значительном содержании PbO в стекле суммарное содержание щелочных оксидов не должно превышать 15 мол. %, а K_2O – 10 мол. %. Этим требованиям удовлетворяет большинство практических составов стекол.

На величину α_{PbO} содержание щелочных окислов оказывает особенно сильное влияние. В соответствии с этим стекла могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся бесщелочные стекла, стекла типа $\text{Me}_2\text{O} - \text{PbO} - \text{SiO}_2$ при содержании $\text{Me}_2\text{O} < 3 \text{ мол. \%}$ и сложные составы типа $\text{Me}_2\text{O} - \text{MeO} (\text{Me}_m\text{O}_n) - \text{PbO} - \text{SiO}_2$, при условии, что

$$\frac{N_{\text{MeO}} + N_{\text{Me}_2\text{O}_3}}{N_{\text{Me}_2\text{O}}} > \frac{1}{3}. \quad (12)$$

Для стекол этой группы величина $\bar{\alpha}_{\text{PbO}}$ может быть принята равной $130 \cdot 10^{-7}$.

Для стекол второй группы $\bar{\alpha}_{\text{PbO}}$ следует рассчитывать по формуле:

$$\alpha_{\text{PbO}} \cdot 10^7 = 130 + 5 \left(N_{\text{Me}_2\text{O}} - 3 \right). \quad (13)$$

Величины $\bar{\epsilon}_{\text{PbO}}$, \bar{E}_{PbO} , \bar{G}_{PbO} также зависят от состава стекла, однако в расчете их принято принимать постоянными.

При расчете приближенно-усредненных парциальных величин для CdO следует использовать следующие формулы:

$$\bar{V}_{\text{CdO}} = 17,0 + 0,04 \left(\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} - 50 \right); \quad (14)$$

$$\bar{n}_{D_{\text{CdO}}} = 1,25 - 0,004 \left(\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} - 50 \right); \quad (15)$$

$$\bar{\delta}_{\text{CdO}} \cdot 10^5 = 2930 - 22 \left(\sum N_{\text{Me}_m\text{O}_n} - 50 \right). \quad (16)$$

Значения приближенно-усредненных величин для других свойств CdO принимают постоянными.

Расчет приближенно-усредненных парциальных величин для TiO₂ и, следовательно, свойств титановосиликатных стекол не может быть осуществлен с высокой степенью точности при помощи единых уравнений для широкого интервала составов. Для расчета величин, которые следует рассматривать как ориентировочные, можно использовать следующие уравнения, применимые только к составам с содержанием щелочных окислов, не превышающим 10–15 мол. %:

$$\bar{n}_{D_{\text{TiO}_2}} = 2,23 - 0,005 \left(N_{\text{SiO}_2} - 50 \right); \quad (17)$$

$$\bar{\delta}_{\text{TiO}_2} \cdot 10^5 = 6200 - 40 \left(N_{\text{SiO}_2} - 50 \right); \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{TiO}_2} \cdot 10^7 = 30,0 - 1,5 \left(N_{\text{SiO}_2} - 50 \right). \quad (19)$$

Для применения этих уравнений необходимо также, чтобы 80 мол. % > N_{SiO₂} > 50 мол. %. Значения других величин для TiO₂ принимают постоянными.

Примеры применения метода А. А. Аппена для расчета свойств свинцового и боросиликатного стекла приведены в табл. 3–4.

Расчет свойств стекла по методу Л. И. Демкиной. Л. И. Демкина предложила для расчета таких свойств стекла, как плотность, показатель преломления, средняя дисперсия, коэффициент дисперсии и линейный коэффициент термического расширения, следующую аддитивную формулу:

$$K = \frac{\sum \frac{P_i}{S_i} \cdot k_i}{\sum \frac{P_i}{S_i}}, \quad (20)$$

где K – значение плотности, показателя преломления и других свойств, рассчитываемых по методу Л. И. Демкиной; P_i – массовое содержание окислов в стекле, мас. %; S_i – коэффициенты для перехода от массовых единиц к особым объемным долям, при которых линейные уравнения типа уравнения (20) остаются справедливыми в широких пределах изменения состава стекла; k_i – определенные на основании экспериментальных данных коэффициенты, характеризующие плотность, показатель преломления и другие свойства окислов в стекле.

Таблица 3

Пример расчета свойств свинцового стекла

Состав стекла			Плотность		Показатель преломления		ТКЛР		Модуль упругости	
Оксид	p_i	n_i	\bar{V}_i	$n_i \bar{V}_i$	\bar{n}_{D_i}	$n_i \bar{n}_{D_i}$	$\bar{\alpha}_i$	$n_i \bar{\alpha}_i$	$\bar{E}_i \cdot 10^{-3}$	$n_i \bar{E}_i$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	38,4	0,6394	26,10	16,69	1,475	0,9431	38	24,30	6,50	4156
PbO	47,6	0,2133	21,80	4,65	2,283	0,4870	130	27,73	4,30	917
CaO	9,0	0,1605	14,40	2,31	1,730	0,2777	130	20,87	11,50	1790
K ₂ O	5,0	0,0531	34,50	1,83	1,560	0,0828	425	22,57	4,10	218
Σ	100,0	1,0663		25,48		1,7906		95,47		7081
$N_{\text{Si}_2\text{O}} = \frac{0,6394 \cdot 100}{1,0663} = 60,0$			$\rho = \frac{100}{25,48} = 3,925$ $\bar{V}_{\text{PbO}} = 21,0 + 0,08(60-50) = 21,8$		$n_D = \frac{1,7906}{1,0663} = 1,6793$ $\bar{n}_{D_{\text{PbO}}} = 2,350 - 0,0067(60-50) = 2,283$		$\alpha \cdot 10^7 = \frac{95,47}{1,063} = 89,5$ $\bar{\alpha}_{\text{PbO}} \cdot 10^7 = 130$ <p>так как</p> $\frac{N_{\text{CaO}}}{N_{\text{K}_2\text{O}}} > \frac{1}{3}$		$E = \frac{7081}{1,0663} = 6640$	

Таблица 4

Пример расчета свойств боросиликатного стекла

Состав стекла			Плотность		Показатель преломления		ТКЛР		Модуль упругости	
Оксид	p_i	n_i	\bar{V}_i	$n_i \bar{V}_i$	\bar{n}_{D_i}	$n_i \bar{n}_{D_i}$	$\bar{\alpha}_i$	$n_i \bar{\alpha}_i$	$\bar{E}_i \cdot 10^{-3}$	$n_i \bar{E}_i$
SiO ₂	80,75	1,3445	26,68	35,87	1,4667	1,9720	21,5	28,90	6,83	9 183
B ₂ O ₃	12,00	0,1723	36,00	6,20	1,4700	0,2553	- 4	- 0,69	5,20	896
Al ₂ O ₃	2,20	0,0216	40,40	0,87	1,5200	0,0328	- 30	- 0,65	11,40	246
CaO	0,30	0,0054	14,40	0,08	1,7300	0,0094	130	0,70	11,15	60
Na ₂ O	4,10	0,0561	20,20	1,33	1,5900	0,1051	395	26,11	5,95	393
K ₂ O	0,10	0,0011	34,10	0,04	1,5750	0,0017	465	0,51	4,10	5
Σ	99,45	1,6110		44,39		2,3743		54,58		10 783
$N_{Si_2O} = \frac{1,3445 \cdot 100}{1,6110} = 83,5$ $\psi = \frac{0,0726 - 0,0216}{0,1723} = 0,3 < \frac{1}{3}$			$\rho = \frac{99,45}{44,39} = 2,240$ $\bar{V}_{SiO_2} = 26,1 + 0,035 \times (83,5 - 67) = 26,68$ $\bar{V}_{B_2O_3} = 36,0$		$n_D = \frac{2,3743}{1,6110} = 1,4738$ $\bar{n}_{D_{SiO_2}} = 1,475 - 0,0005 \times (83,5 - 67) = 1,4667$ $\bar{n}_{D_{B_2O_3}} = 1,470$		$\alpha \cdot 10^7 = \frac{54,58}{1,6110} = 34,1$ $\bar{\alpha}_{SiO_2} \cdot 10^7 = 38 - 1,0 \times (83,5 - 67) = 21,5$ $\bar{\alpha}_{B_2O_3} \cdot 10^7 = 12,5 \times (4 - 0,3) - 50 = -4$		$E = \frac{10783}{1,6110} = 6693$ $\bar{E}_{SiO_2} \cdot 10^{-3} = 6,5 + 0,02(83,5 - 67) = 6,83$ $\bar{E}_{B_2O_3} \cdot 10^{-3} = 1 + 14 \cdot 0,3 = 5,20$	

Значения свойств оксидов в стекле: плотности, показателя преломления, средней дисперсии и коэффициенты дисперсии приведены в табл. 5.

Таблица 5

Данные для расчета свойств стекла по методу Л. И. Демкиной

Оксид и его формы	Свойства оксидов в стекле (коэффициенты k_i)				Структурный коэффициент S_i	S_i соответствует молекулярной массе
	ρ_i	n_D	$\delta_i=(n_F - n_C) \cdot 10^5$	ν_i		
SiO ₂ -I	2,27	1,475	695	68	60	SiO ₂
SiO ₂ -II	2,20	1,458	678	68	60	SiO ₂
B ₂ O ₃ -I [BO ₄]	2,95	1,61	750	81	43	B ₂ O ₃
B ₂ O ₃ -II [BO ₃]	1,85	1,464	670	69	70	B ₂ O ₃
Al ₂ O ₃	2,50	1,49	850	58	59	Al ₂ O ₃
As ₂ O ₃	3,30	1,57	1 600	36	107	As ₂ O ₃
Sb ₂ O ₃	5,60	1,98	3 800	26	154	(SbO ₂)
MgO	2,90	1,64	1 300	49	140	2MgO SiO ₂
CaO	3,70	1,83	1 750	47	86	–
BaO	8,10	2,03	2 280	45	213	BaO·SiO ₂
ZnO	6,80	1,96	2 850	34	223	2ZnO SiO ₂
PbO-I	11,70	2,46	7 700	19	343	PbO 2SiO ₂
PbO-II	10,20	2,46	7 700	19	223	PbO
PbO-III	10,20	2,50	11 600	13	223	PbO
Na ₂ O	3,05	1,59	1 400	42	62	Na ₂ O
K ₂ O	2,95	1,58	1 200	48	94	K ₂ O

В табл. 5 приведены также структурные единицы, молекулярному весу которых соответствует величина коэффициента S_i для перевода массовых единиц в объемные в уравнении (20). Согласно Л. И. Демкиной, структурные единицы для оксидов Me₂O₃ соответствуют Me₂O₃, если координационное число соответствующих катионов равно 3, и MeO₂, если это число равно 4. Структурные коэффициенты основных оксидов, не принимающих активного участия в образовании каркаса стекла, равны молекулярному весу оксида, если эти оксиды не образуют в стекле устойчивых соединений (силикатов). Если же такие

силикаты образуются, то коэффициент S_i равен молекулярному весу соответствующего силиката.

Некоторым оксидам, а именно, SiO_2 , V_2O_3 , PbO , соответствуют несколько структурных коэффициентов и значений свойств оксида в стекле. Для определения, какая именно величина должна быть взята из табл. 5 для расчета соответствующего свойства в зависимости от состава стекла, Л. И. Демкина предложила правила, которые приводятся ниже.

Наиболее простое правило относится к определению разновидности SiO_2 . Подавляющее большинство практических составов стекол содержит стекло в форме SiO_2 -I. Величины для формы SiO_2 -II используют только в том случае, если состав стекол на фазовой диаграмме лежит в поле тридимита. Можно принять, что форму SiO_2 -II применяют в том случае, если содержание SiO_2 превышает 80 мас. %.

Следующее правило относится к многокомпонентным стеклам, лежащим в поле кварца. Это поле со стороны силикатов ограничено составами, удовлетворяющими условию

$$\Delta\text{SiO}_2 = n_{\text{SiO}_2} - \left| \begin{array}{l} 0,5(n_{\text{ZnO}} + n_{\text{MgO}}) + (n_{\text{BaO}} + n_{\text{CaO}}) + \\ + 2(n_{\text{B}_2\text{O}_3} + n_{\text{PbO}} + n_{\text{Na}_2\text{O}}) + 4n_{\text{K}_2\text{O}} \end{array} \right| \geq 0. \quad (21)$$

Со стороны составов, богатых кремнеземом, поле кварца ограничено составами, удовлетворяющими уравнению

$$\Delta\text{SiO}_2 = 0,30 \frac{n_{\text{Na}_2\text{O}}}{n_{\text{Na}_2\text{O}} + n_{\text{K}_2\text{O}}} + 0,09 \frac{n_{\text{K}_2\text{O}}}{n_{\text{Na}_2\text{O}} + n_{\text{K}_2\text{O}}}. \quad (22)$$

Таким образом, если состав стекла на фазовой диаграмме находится между поверхностями, соответствующими уравнениям (20) и (21), то это стекло лежит в поле кварца, и для расчета его свойств используют формулу (20), в которой каждый оксид представлен только одним коэффициентом: SiO_2 -I, V_2O_3 -I, PbO -I.

Для определения содержания в стекле V_2O_3 , находящегося в виде тетраэдров $[\text{VO}_4]$ (форма V_2O_3 -I) и треугольников $[\text{VO}_4]$ (форма V_2O_3 -II), Л. И. Демкина предложила следующие правила. Сначала определяют так называемое кислородное число O по формуле:

$$O = \frac{n_{\text{PbO}} + n_{\text{BaO}} + n_{\text{CaO}} + n_{\text{K}_2\text{O}} + n_{\text{Na}_2\text{O}} - n_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{n_{\text{B}_2\text{O}_3}}. \quad (23)$$

Если O – кислородное число стекла – больше или равно 1,2, а ΔSiO_2 по уравнению (21) больше нуля, то весь V_2O_3 находится в стекле в виде тетраэдров $[\text{VO}_4]$.

Если кислородное число O меньше 1,2, то относительное содержание $\text{VO}_4/\text{V}_2\text{O}_3 = b_4$ можно определить по уравнению:

$$b_4 = O - 0,20. \quad (24)$$

Если кислородное число O больше 1,2, а ΔSiO_2 меньше нуля, то доля $[\text{VO}_4] = 2/3$, а доля $[\text{VO}_3] = 1/3$.

Для определения свойств стекла, содержащего окись свинца PbO , использовать коэффициенты, соответствующие форме PbO-I или дисиликату свинца $\text{PbO} \cdot 2\text{SiO}_2$, допустимо только при содержании PbO до 45–46 мас. %. При повышении содержания оксида свинца сверх этой величины (при переходе к группе оптических стекол, так называемых тяжелых флинтгов) рассчитанные по коэффициентам PbO-I свойства оказываются заниженными. Для того чтобы рассчитанные величины свойств соответствовали экспериментальным, необходимо при расчетах использовать коэффициенты для всех трех форм: PbO-I , PbO-II и PbO-III .

Для стекол, принадлежащих к системе $\text{PbO} - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, Л. И. Демкина разработала правила, позволяющие определить относительное содержание оксида свинца в каждой из трех ее форм.

Обозначим $\beta = \frac{4n_{\text{K}_2\text{O}}}{n_{\text{SiO}_2} - 2n_{\text{PbO-I}}}$. По изменению долей оксида свинца,

находящегося в формах PbO-I , PbO-II и PbO-III , все стекла системы $\text{PbO} - \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$, могут быть разделены на группы A и B в зависимости от молярного содержания оксида свинца, отнесенного к молярному содержанию кремнезема и оксида свинца. Это отношение обозначено:

$$\xi = \frac{n_{\text{PbO}}}{n_{\text{PbO}} + n_{\text{SiO}_2}}.$$

Если обозначить доли PbO-I , PbO-II и PbO-III в общем содержании PbO соответственно через ξ_I , ξ_{II} и ξ_{III} ($\xi_I + \xi_{II} + \xi_{III} = 1$) то можно рассчитать доли PbO-I , PbO-II и PbO-III по формулам, содержащимся в табл. 6.

Таблица 6

Формула для расчета величин ξ_I , ξ_{II} и ξ_{III}

Группа стекло	$\xi = \frac{n_{\text{PbO}}}{n_{\text{PbO}} + n_{\text{SiO}_2}}$	Формула для расчета		
		ξ_I	ξ_{II}	ξ_{III}
<i>A</i>	0–0,21	ξ	0	0
<i>B</i>	0,21–0,40	$0,11 + 0,475 \xi$	$\xi - (\xi_{II} + \xi_{III})$	$0,0165 \cdot (\beta - 0,85)$

После определения ξ_I , ξ_{II} и ξ_{III} можно найти величины n_{PbO-I} , n_{PbO-II} и $n_{PbO-III}$ по уравнениям:

$$\begin{aligned}n_{PbO-I} &= (n_{SiO_2} + n_{PbO}) \cdot \xi_I; \\n_{PbO-II} &= (n_{SiO_2} + n_{PbO}) \cdot \xi_{II}; \\n_{PbO-III} &= (n_{SiO_2} + n_{PbO}) \cdot \xi_{III}.\end{aligned}$$

Примеры расчета свойств стекол методом Л. И. Демкиной приведены ниже.

Пример 1

Определить плотность стекла следующего химического состава, мас. %: SiO_2 73,5; CaO 10,0; Na_2O 16,5.

$$\begin{aligned}\rho_{cm} &= \frac{\frac{73,5}{60} \cdot 2,27 + \frac{10,0}{86} \cdot 3,7 + \frac{16,5}{62} \cdot 3,05}{\frac{73,5}{60} + \frac{10,0}{86} + \frac{16,5}{62}} = \\&= \frac{2,781 + 0,429 + 0,811}{1,225 + 0,116 + 0,266} = \frac{4,021}{1,607} = 2,502.\end{aligned}$$

Ответ: Плотность стекла составляет 2,502 г/см³.

Пример 2

Определить плотность стекла следующего химического состава, мас. %: SiO_2 40,9 (0,6943); PbO 50,8 (0,2320); K_2O 6,8 (0,0737); Na_2O 0,05; As_2O_3 1,0 (в скобках указаны величины мольных долей).

По формулам, приведенным в табл. 6, определим, к какой группе относится стекло.

$$\begin{aligned}n_{PbO} &= \frac{50,8}{223,22} = 0,2320; \\n_{SiO_2} &= \frac{40,9}{60,06} = 0,6943; \\\xi &= \frac{n_{PbO}}{n_{PbO} + n_{SiO_2}} = \frac{0,2320}{0,6943 + 0,2320} = 0,25047.\end{aligned}$$

Согласно табл. 6 ξ данного стекла лежит в пределах 0–0,21, т. е. это стекло относится к группе В, а следовательно, PbO в этом стекле находится в разных формах.

$$\xi_I = 0,1100 + 0,475 \cdot 0,25047 = 0,22982;$$

$$n_{\text{PbO-I}} = (n_{\text{SiO}_2} + n_{\text{PbO}}) \cdot \xi_I = (0,6943 + 0,2320) \cdot 0,22982 = 0,2105;$$

$$\beta = \frac{4n_{\text{K}_2\text{O}}}{n_{\text{SiO}_2} - 2n_{\text{PbO-I}}} = \frac{4 \cdot 0,0737}{0,6943 - 2 \cdot 0,2105} = 1,09074;$$

$$\xi_{\text{III}} = 0,0165 \cdot (\beta - 0,85) = 0,0165 \cdot (1,09074 - 0,85) = 0,003972;$$

$$n_{\text{PbO-III}} = \xi_{\text{III}} \cdot (n_{\text{SiO}_2} + n_{\text{PbO}}) = 0,003972 \cdot (0,6943 + 0,2320) = 0,003679;$$

$$n_{\text{PbO-II}} = n_{\text{PbO}} - (n_{\text{PbO-I}} + n_{\text{PbO-III}}) =$$

$$= 0,2320 - (0,2105 + 0,003679) = 0,017821.$$

Пересчитываем молярные доли различных форм PbO на мас. %.
Результаты расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7

Пересчет молярных долей PbO на мас. %

Форма PbO	n_{PbO}	P_{PbO}
PbO-I	0,2120	46,42
PbO-II	0,0163	3,57
PbO-III	0,0037	0,81
PbO	0,2320	50,8

Подставляя данные из табл. 7 и коэффициенты из табл. 5 в уравнение (20), получим:

$$\rho_{\text{ст}} = \frac{\frac{40,90}{60} \cdot 2,27 + \frac{46,42}{343,00} \cdot 11,70 + \frac{3,57 + 0,81}{223} \cdot 10,20 +}{\frac{40,90}{60,0} + \frac{46,42}{343,0} + \frac{3,57 + 0,81}{223,0} +}$$

$$\rightarrow \frac{+ \frac{6,80}{94} \cdot 2,95 + \frac{0,50}{62} \cdot 3,05 + \frac{1,00}{107} \cdot 3,30}{+ \frac{6,80}{94,0} + \frac{0,50}{62,0} + \frac{1,0}{107,0}} = \frac{3,59969}{0,92637} = 3,8859.$$

Ответ: Плотность стекла составляет 3,8859 г/см³.

3. ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

Вариант № 1

1. Классификация оптических стекол. Составы стекол и их общая характеристика. Диаграмма Аббе.

2. Технология изготовления непрозрачного кварцевого стекла. Сырье и его характеристика. Технологические особенности получения заготовок из непрозрачного кварцевого стекла в электрических печах сопротивления с графитовыми нагревателями.

3. Задача.

Вариант № 2

1. Электроизоляционное стекло. Составы и свойства стекол, используемых в производстве стеклянных изоляторов. Электрические свойства стекол.

2. Сырьевые материалы в производстве кварцевого стекла: природный кварц, горный хрусталь, жильный кварц, искусственные кристаллы кварца, синтетический диоксид кремния (СДК). Технологические процессы приготовления кварцевой крупки для плавления кварцевого стекла. Получение СДК.

3. Задача.

Вариант № 3

1. Классификация кварцевых стекол. Назначение и область применения.

2. Технология получения светотехнических стекол. Особенности режима варки, выработки и формования светотехнических стекол.

3. Задача.

Вариант № 4

1. Пеностекло и его классификация. Свойства и применение пеностекла. Способы формования пеностекла. Процессы, протекающие в пенообразующей смеси и пеностекле при термообработке и формовании.

2. Технология получения электрических изоляторов.

3. Задача.

Вариант № 5

1. Составы и свойства медицинских стекол. Ассортимент стеклоизделий и их назначение. Основные требования, предъявляемые к медицинскому стеклу.

2. Технология изготовления прозрачного кварцевого стекла термомеханическим, плазмохимическим и парофазным методами.

3. Задача.

Вариант № 6

1. Показатели качества оптического стекла. Оптические постоянные стекол. Оптическая и химическая однородность стекла.

2. Одно- и двухстадийный способы производства пеностекла. Особенности производства тепло- и звукоизоляционного пеностекла: составы стекол и газообразователей, подготовка шихты, режимы вспенивания и отжига, механическая обработка.

3. Задача.

Вариант № 7

1. Стекловолоконная оптика. Световоды. Передача излучения оптического диапазона. Явление полного внутреннего отражения. Затухание сигнала в волокне, его причины.

2. Технология производства ламп накаливания общего назначения или люминесцентных ламп.

3. Задача.

Вариант № 8

1. Механические, термические, электрические, химические и оптические свойства кварцевых стекол.

2. Технология производства медицинского стекла. Методы изготовления стеклянной трубки и их сравнительная характеристика.

3. Задача.

Вариант № 9

1. Электровакуумные стекла. Требования, предъявляемые к электровакуумным стеклам и их свойства (термические, электрические, вакуумные. Марки электровакуумных стекол. Стекла для спаев, их классификация.

2. Технология изготовления прозрачного кварцевого стекла электрохимическим и газопламенным методами. Технологические аспекты плавки кварцевой крупки в газопламенных, стержневых и тигельных электропечах.

3. Задача.

Вариант № 10

1. Глушеное стекло. Химические составы и свойства глушеных стекол. Стекла, заглушенные фосфатами, фторидами, сульфидом цинка.

2. Технология получения оптических стекол: приготовление шихты, варка, выработка и разделка стекла.

3. Задача.

Задача и ее варианты

Методами Л. И. Демкиной и А. А. Аппена выполнить расчет плотности, показателя преломления, средней дисперсии, температурного коэффициента линейного расширения для стекла, состав которого приведен в табл. 8.

Таблица 8

Химический состав стекол

№ варианта	Тип стекла	Оксиды и их содержание, мас. %											
		SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	As ₂ O ₃	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	F
1	Легкий крон	53,3	16,2	8,8	0,2	–	–	–	–	–	16,2	–	5,3
2	Крон	72,0	8,1	–	0,2	–	–	–	1,5	0,5	10,5	7,2	–
3	Баритовый крон	49,5	4,8	–	0,2	2,6	21,6	12,5	–	–	7,6	1,2	–
4	Тяжелый крон	32,7	13,2	3,1	1,6	–	45,9	3,5	–	–	–	–	–
5	Кронфлинт	63,0	1,8	–	0,2	16,0	–	–	2,0	–	11,0	6,0	–
6	Баритовый флинт	41,8	–	–	0,2	33,2	11,4	5,2	–	–	8,2	–	–
7	Легкий флинт	61,0	–	–	0,2	26,3	–	–	–	–	8,0	4,5	–
8	Флинт	47,0	–	–	0,2	46,4	–	–	–	–	6,4	–	–
9	Тяжелый флинт	31,6	–	–	0,2	65,4	–	–	–	–	2,8	–	–
10	Электровакуумное С-94	59,8	–	3,6	–	10,5	2,3	–	5,5	2,5	9,8	5,5	–

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Классификация кварцевых стекол. Назначение и область применения.
2. Механические, термические, электрические, химические и др. свойства кварцевых стекол.
3. Сырьевые материалы в производстве кварцевого стекла: природный кварц, горный хрусталь, жильный кварц, искусственные кристаллы кварца, синтетический диоксид кремния (СДК). Технологические процессы приготовления кварцевой крупки для плавления кварцевого стекла. Получение СДК.
4. Технология изготовления прозрачного кварцевого стекла плазмохимическим и парофазный методами.
5. Технология изготовления прозрачного кварцевого стекла электрохимическим и газопламенный методами. Технологические аспекты плавки кварцевой крупки в газопламенных, стержневых и тигельных электропечах.
6. Технология изготовления непрозрачного кварцевого стекла. Сырье и его характеристика. Технологические особенности получения заготовок из непрозрачного кварцевого стекла в электрических печах сопротивления с графитовыми нагревателями.
7. Классификация оптических стекол. Составы стекол и их общая характеристика. Диаграмма Аббе.
8. Показатели качества оптического стекла. Оптические постоянные стекол. Оптическая и химическая однородность стекла.
- 9 Сырьевые материалы в производстве оптического стекла и их подготовка. Подготовка и хранение боя.
10. Технология получения оптических стекол: приготовление шихты, варка, выработка и разделка стекла.
12. Режимы варки оптических стекол, гомогенизация стекломассы. Летучесть расплавов стекол. Химическое поведение осветлителей.
13. Выработка и разделка стекла. Отливка, прессование, прокат и моллирование стекла.
14. Тонкий отжиг оптического стекла. Основы и режимы тонкого отжига. Контроль оптической однородности стекла.
15. Фотохромные стекла. Назначение, составы, технология получения.

16. Стекла, прозрачные в ИК области спектра. Составы стекол и особенности получения.

17. Лазерные стекла. Химические составы, свойства и технология получения.

18. Стекловолоконная оптика. Световоды. Передача излучения оптического диапазона. Явление полного внутреннего отражения. Затухание сигнала в волокне, его причины.

19. Составы стекол для оптических волокон. Технология изготовления оптических волокон.

20. Классификация и свойства светотехнических стекол. Виды стекол, назначение и области применения (также призматические).

21. Требования к светотехническим стеклам: пропускание, отражение, поглощение проходящего излучения, предельный цветовой тон, чистота цвета. Система цветowych координат (длина волны, чистота и яркость цвета).

22. Глушеное стекло. Химические составы и свойства глушеных стекол. Стекла, заглушенные фосфатами, фторидами, сульфидом цинка.

23. Сигнальные стекла. Составы и свойства стекол. Стекла, окрашенные сульфоселенидами кадмия, оксидами меди, хрома, кобальта. Особенности варки, выработки и формования цветных стекол.

24. Технология получения глушенных светотехнических стекол. Особенности режима варки, выработки и формования глушенных стекол.

25. Электроизоляционное стекло. Составы и свойства стекол, используемых в производстве стеклянных изоляторов. Электрические свойства стекол.

26. Технология получения электроизоляционных стекол.

27. Электровакуумные стекла. Требования, предъявляемые к электровакуумным стеклам и их свойства (термические, электрические, вакуумные). Марки электровакуумных стекол. Стекла для спаев, их классификация.

28. Технология производства ламп накаливания общего назначения, галогенных ламп и ламп специального назначения.

29. Технология производства люминесцентных ламп.

30. Растворимое стекло и его характеристика. Химические составы промышленных стекол. Процессы формирования силикат-глыбы. Особенности производства растворимых силикатов натрия и калия. Области применения растворимого стекла в строительстве и промышленности.

31. Составы и свойства медицинских стекол. Ассортимент стеклоизделий и их назначение. Основные требования, предъявляемые к медицинскому стеклу.

32. Технология варки и выработки стекол медицинского назначения. Летучесть расплавов стекол. Изготовление стеклянной трубки.

33. Технология производства медицинского стекла. Изготовление флаконов и ампул, технические требования.

33. Пеностекло и его классификация. Свойства и применение пено-стекла. Способы формования пеностекла. Процессы, протекающие в пенообразующей смеси и пеностекле при термообработке и формовании.

34. Одно- и двухстадийный способы производства пеностекла. Особенности производства тепло- и звукоизоляционного пеностекла: составы стекол и газообразователей, подготовка шихты, режимы вспенивания и отжига, механическая обработка.

35. Химико-лабораторное стекло. Ассортимент изделий и их назначение. Составы и физико-химические свойства стекол. Влияние состава стекол на их химическую устойчивость.

36. Технология изготовления тонкостенных и толстостенных изделий из химико-лабораторного стекла (метод прессования, выдувание, в том числе из стеклянной трубки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Химическая технология стекла и ситаллов: учеб. для вузов / М. В. Артамонова [и др.]; под общ. ред. Н.М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1983. – 432 с.
2. Технология строительного и технического стекла и шлако-ситаллов / В.В. Поляк [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. – 432 с.
3. Хоркевич, Л. П. Кварцевое стекло в производстве электровакуумных изделий / Л. П. Хоркевич, В. К. Леко. – М.: Энергоиздат, 1981. – 88 с.
4. Хапилев, В. Д. Основы технологии производства кварцевого стекла: учеб. пособие / В. Д. Хапилев, Г. И. Прохорова. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1983. – 66 с.
5. Бужинский, И. Н. Физико-химические основы производства оптического стекла / И. Н. Бужинский, И. Демкина, К. С. Евстропьев. – Л.: Химия, 1976. – 456 с.
6. Хапилев, В. Д. Основы технологии оптического стекла: учеб. пособие / В. Д. Хапилев. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1989. – 100 с.
7. Артамонова, М. В. Новые технические стекла: учеб. пособие / М. В. Артамонова. – М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1973. – 62 с.
8. Стекло: справочник / под ред. Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 487 с.
9. Демидович, Б. К. Пеностекло / Б. К. Демидович. – М.: Наука и техника, 1975. – 248 с.
10. Павлушкин, Н. М. Легкоплавкие стекла / Н. М. Павлушкин, А. К. Журавлев. – М.: Энергия, 1970. – 145 с.
11. Матвеев, М. А. Расчеты по химии и технологии стекла / М. А. Матвеев, Г. М. Матвеев, Б. Н. Френкель. – М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.
12. Цимберов, А. И. Стекланные изоляторы / А. И. Цимберов, А. В. Штерн. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.
13. Корнеев, В. И. Производство и применение растворимого стекла. Жидкое стекло / В. И. Корнеев, В. В. Данилов. – Л.: Стройиздат, 1991. – 175 с.
14. Бобкова, Н. М. Химическая технология стекла и ситаллов / Н. М. Бобкова, Л. Ф. Папко. – Минск: БГТУ, 2005. – 196 с.
15. Аппен, А. А. Химия стекла / А. А. Аппен. – М.: Химия, 1974. – 352 с.

16. Роус, Б. Стекло в электронике / Б. Роус – М.: Советское радио, 1969. – 355 с.
17. Дуброво, С. К. Стекло для лабораторных изделий и химической аппаратуры / С. К. Дуброво. – М.: Наука, 1965. – 107 с.
18. Панкова, Н. А. Стекольная шихта и практика ее приготовления: учеб. пособие / Н. А. Панкова, Н. Ю. Михайленко.– М.: Издат. центр РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1997. – 80 с.
19. Гулоян, Ю. А. Выработочные свойства стекол и условия механизированного формования стеклоизделий / Ю. А. Гулоян. – М.: ВНИИЭСМ, 1975. – 80 с.
20. Коцик, И. Окрашивание стекла / И. Коцик [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. –211 с.
21. Папкина, Н. Д. Теория и практика промышленного стекловарения: учеб. пособие. / Н. Д. Папкина, Н. Ю. Михайленко. – М.: Издат. центр РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2000. – 103 с
22. Ходкевич, Л. П. Кварцевое стекло в производстве электровакуумных изделий / Л. П. Ходкевич, В. К. Лeko. – М.: Энергоиздат, 1981. – 89 с.
23. Демидович, Б. К. Производство и применение пеностекла / Б. К. Демидович. – М.: Наука и техника, 1972. – 304 с.
24. Шеффер, Н. А. Технология стекла / Н. А. Шеффер. – Кишинев, 1998. – 270 с.
25. Проекты (работы) курсовые. Требования и порядок подготовки, представления к защите и защиты: СТП БГТУ 002–2007. – Введен 01.06.2007. – Минск: БГТУ. – 36 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Программа дисциплины	4
2. Методические указания по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы	8
3. Варианты контрольных заданий	23
4. Контрольные вопросы к экзамену	26
Литература	29

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Программа, методические указания и контрольные задания

Составитель **Павлюкевич** Юрий Геннадьевич

Редактор *Ю. Д. Нежикова*
Компьютерная верстка *Ю. Д. Нежикова*
Корректор *Ю. Д. Нежикова*

Издатель:

УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.