

УДК 666.1.001.5  
EDN: SRRFKA

PACS: 61.43.Fs, 60.60.+a, 60.70.ph

## Изучение релаксационных процессов в «особых» оксидных стеклах, применимых для прецизионного прессования

А. А. Кирьянов, В. А. Клинков, Т. В. Ларионова, О. В. Толочко, А. В. Семенча,  
Н. А. Семенченко, К. В. Щербаков

*Проведено исследование методами термического анализа релаксационных процессов в оптических стеклах ФК74, ТБФ60, СТК69, СТК53, К58 и ОФ4. «Кажущаяся» энергия активации структурной релаксации определена методом дифференциально-термического анализа на основании зависимости температуры стеклования от скорости охлаждения стекла из расплава. На примере стекла ФК74 проведены dilatометрические исследования релаксационных процессов при изотермических выдержках в интервале стеклования. Построены и проанализированы релаксационные функции. С учетом полученных данных проведен прогноз сохраняемости свойств стекла при длительном хранении и эксплуатации.*

*Ключевые слова:* курцфлинты; лангкроны; стекло; структурная релаксация; температура стеклования; энергия активации; сохраняемость.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-1-55-62

### Введение

Значительное расширение областей практического использования систем оптической визуализации, начиная от систем технического зрения и заканчивая системами дополненной реальности, привело к росту номенклатуры используемых марок оптических материалов. Основным классом оптических материалов, являются неорганические стекла, так как, применение кристаллических материалов

ограничено их высокой стоимостью, зачастую меньшей устойчивостью к атмосферным воздействиям, а также, ограниченностью размеров конечных изделий, связанной с технологией их получения.

Классификация и разработка составов оптических стекол изначально базировалась на силикатных системах, а в качестве основных оптических характеристик использовались показатель преломления ( $n$ ) и коэффициент дисперсии ( $\nu$ ). Ключевой проблемой прелом-

---

**Кирьянов Андрей Александрович**<sup>1</sup>, инженер, аспирант.

E-mail: kiryanov97@mail.ru

**Клишков Виктор Артемович**<sup>1</sup>, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: klinkovvictor@yandex.ru

**Ларионова Татьяна Васильевна**<sup>1</sup>, доцент, к.т.н.

E-mail: larionova\_tv@spbstu.ru

**Толочко Олег Викторович**<sup>1</sup>, профессор, д.т.н.

E-mail: tolochko\_ov@spbstu.ru

**Семенча Александр Вячеславович**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент.

E-mail: asemencha@spbstu.ru

**Семенченко Наталья Александровна**<sup>2</sup>, нач. лаб.**Щербаков Константин Владимирович**<sup>3</sup>, нач. цеха.<sup>1</sup> Санкт-Петербургский Политехнический Университет имени Петра Великого.

Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

<sup>2</sup> АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

<sup>3</sup> АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова».

Россия, 192171, г. Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, 36, кор. 1.

*Статья поступила в редакцию 30.01.2025**После доработки 17.02.2025**Принята к публикации 19.02.2025**Шифр научной специальности: 2.2.6*


---

© Кирьянов А. А., Клишков В. А., Ларионова Т. В., Толочко О. В., Семенча А. В., Семенченко Н. А., Щербаков К. В., 2025

ляющей оптики является остаточный хроматизм положения (вторичный спектр). Диаграмма «относительная частная дисперсия – коэффициент дисперсии» позволяет осуществить выбор пары оптических материалов, для снижения хроматической абберации системы [1]. Для создания объективов-апохроматов необходимо подобрать пары оптических материалов с максимально большой разницей числа Аббе при минимальной разнице относительных частных дисперсий [2].

Таковыми материалами, с особым ходом дисперсии, являются курцфлинты (флинты с уменьшенными относительными частными дисперсиями) и лангкроны (кроны с увеличенными относительными частными дисперсиями). В отечественном каталоге оптических стекол «особые» флинты имеют обозначение ОФ, примерами курцфлинтов являются стекла типов СТК и ТБФ [1–6].

Расширение номенклатуры марок стекол отмеченных классов имеет высокую практическую значимость для проектирования оптических систем с увеличенным спектральным диапазоном. С учетом совершенствования технологий получения оптических элементов из неорганических стекол важным требованием к разрабатываемым составам стекол является применимость к ним технологии прецизионного прессования (ПП) для получения оптических элементов различной геометрии. Технология ПП была представлена в начале 1980-х годов и с тех пор является ключевой для автомобилестроения, носимой электроники и фототехники, поскольку позволяет получать высококачественные унифицированные изделия с минимальными затратами на производство. Данная технология позволяет реализовать массовое производство как сферических, так и асферических линз [7].

Применение технологии прецизионного прессования для производства объективов требует наличия материалов – оптических стекол, имеющих низкую температуру стеклования и низкую склонность к кристаллизации [8]. За рубежом такие стекла производят ведущие компании: HOYA (Япония), CDGM (КНР), SCHOTT (Германия), NHG (КНР) и др.

В ходе разработки сверхсветосильных объективов спектрального диапазона 0,4–2,0 мкм для матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе коллоидных

квантовых точек (ККТ) [9], выполняемых совместно АО «НПО «Орион» и АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова», было установлено, что наиболее подходящими для создания объективов с различными фокусными расстояниями комбинацией оптических материалов являются  $\text{CaF}_2$ , ОФ4, D-ПК60, D-ZLaF50, D-LaF050, D-ZK50 и D-K9. Для обеспечения массового производства объективов АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова» выполняет работы по импортозамещению следующих марок стекол: D-ПК60 (ФК74), D-ZLaF50 (ТБФ60), D-LaF050 (СТК69), D-ZK50 (СТК53) и D-K9 (К58).

Обязательным требованием, предъявляемым к объективам, является сохранение их свойств при хранении и эксплуатации. В связи с этим неотъемлемым этапом жизненного цикла объективов является проведение испытаний на сохраняемость и безотказность, при которых происходит проверка качества объективов при воздействии условий, имитирующих условия хранения и эксплуатации. Параметры надежности в части сохранения свойств материала могут быть описаны моделью Аррениуса, для использования которой необходимо определить энергию активации структурной релаксации в стекле [10].

Известно, что структурное состояние стекла однозначно характеризуется его температурой стеклования  $T_g$ , которая уменьшается при уменьшении скорости охлаждения  $q$  (К/с) стекла из расплава и, в общем случае, не зависит от скорости нагрева. Это дает возможность определения энергии активации структурной релаксации по изменению температуры стеклования в зависимости от скорости охлаждения из расплава, как показано в работе [11]:

$$d \ln q = -\frac{\Delta h^*}{R} d \left( \frac{1}{T_g} \right), \quad (1)$$

где  $\Delta h^*$  – энтальпия активации для времен релаксации, характеризующих структурную энтальпию или объемную релаксацию.

Таким образом, в целях оценки сохраняемости свойств стекол экспериментальных марок ФК74, ТБФ60, СТК69, СТК53, ОФ4 и К58 в данной работе были определены энергии активации структурной релаксации. На примере стекла ФК-74 проведены дилатометрические

исследования релаксационных процессов при изотермических выдержках в интервале стеклования. С учетом полученных данных проведена оценка сохраняемости свойств стекла на примере относительного удлинения (объема) при длительном хранении и эксплуатации.

## Материалы и методика эксперимента

### Материалы

В качестве объектов исследования использовались экспериментальные марки стекол ФК74, ТБФ60, СТК69, СТК53, ОФ4 и К58 производства АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова». Исследования проведены на образцах, охлажденных из расплава с контролируемыми скоростями. Для проведения термических измерений из заготовок стекол были подготовлены соответствующие образцы.

### Термический анализ материалов

Дифференциально термический анализ (ДТА) проводился на приборе Термоскан-2 при нагревании со скоростью 10 °С/мин. Съемка проводилась в температурном интервале от 100 °С до температур приблизительно на 50 °С выше интервала стеклования. Усреднение данных проводилось по 5 экспериментальным кривым. Результаты нормировались в виде производной структурной (фиктивной) температуры по температуре ( $dT_f/dT$ ): ниже и выше интервала стеклования экстраполировались прямыми линиями и приравнялась к 0 ( $T_f = T_g = \text{const}$ ) и к единице ( $T_f = T$ ), соответственно. Далее проводилось интегрирование полученной зависимости по температуре, и температура стеклования определялась в точке пересечения равновесной зависимости  $T_f = T$  с осью абсцисс. Температура стеклования определялась после охлаждения с различными скоростями от 1,5 до 50 °С/мин. Ско-

рость охлаждения во всех случаях контролировалась термопарой. Энтальпия активации релаксационного процесса определялась по выражению (1) [12].

### Дилатометрические исследования

Дилатометрическое исследование проводилось на дилатометре Linseis серии L75. Исследования проводились на образцах квадратного сечения размером 4×4 мм и длиной 10 мм. При измерении образцы находились под нагрузкой 300 мН (3 г). В качестве эталонного образца использовался  $Al_2O_3$ . Измерения образцов проводились при нагревании со скоростью 10 °С/мин до температуры размягчения, и при изотермических выдержках при температурах 490, 500, 510, 520 °С в течение 120 мин. В программе «Evaluation» по полученным значениям изменения длины были рассчитаны значения относительного удлинения и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). После чего данные обрабатывались и приводились к общему виду.

## Результаты эксперимента

### Определение энергии активации

На рис. 1 представлены графики зависимости логарифма скорости охлаждения от обратной температуры стеклования для серии исследуемых стекол. Полученные значения энергий активации и температур стеклования (в стабилизированном состоянии) приведены в таблице 1.

Полученные значения энергий активации находятся в диапазоне энергий активаций структурной релаксации, характерных для оксидных стекол, и в пределах погрешности эксперимента совпадают с энергией активации вязкого течения в соответствующих системах [13].

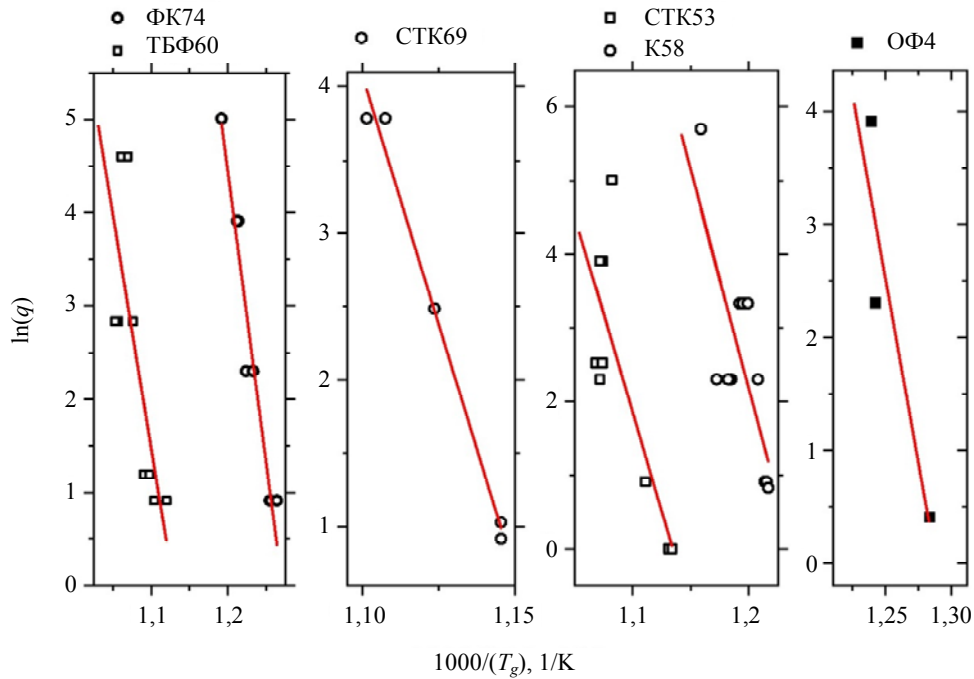


Рис. 1. Зависимости логарифма скорости охлаждения от обратной температуры стеклования

Таблица 1

Значения энергий активации и температур стеклования исследуемых стекол

Марка стекла	ФК74	СТК53	СТК69	К58	ТБФ60	ОФ4
$E_a$ , кДж/моль	$500 \pm 35$	$450 \pm 80$	$560 \pm 35$	$490 \pm 85$	$415 \pm 96$	$540 \pm 90$
$T_g^*$ , °C	$524 \pm 5$	$610 \pm 5$	$600 \pm 7$	$550 \pm 5$	$620 \pm 5$	$506 \pm 5$

\* – температуры стеклования приведены для стекол в стабилизированном состоянии.

**Дилатометрические исследования**

На рис. 2 приведена дилатометрическая кривая, полученная при нагревании стекла ФК74 со скоростью 10 °C/мин. Особенностью дилатометрических исследований по сравнению с ДТА, является то, что образец находится под определенной осевой нагрузкой, что приводит к сильному влиянию вязкой деформации на высокотемпературном участке кривой, т. е. раньше, чем температура образца достигнет верхней границы гистерезисной петли, характеризующей интервал стеклования. На рис. 2 это наблюдается как уменьшение относительного удлинения и отрицательный ТКЛР образца на участке выше 570 °C. Можно отметить, что в случае многокомпонентных оксидных стекол разница между температурами стеклования, определяемыми дилатометрически ( $T_g^+$ ) и по измерению теплоемкости ( $T_g$ ) составляет 10–20 °C [14–16],

что и наблюдается в настоящем исследовании:  $T_g$  и  $T_g^+$  стекла ФК74 составляют  $524 \pm 5$  °C и  $535 \pm 6$  °C, соответственно.

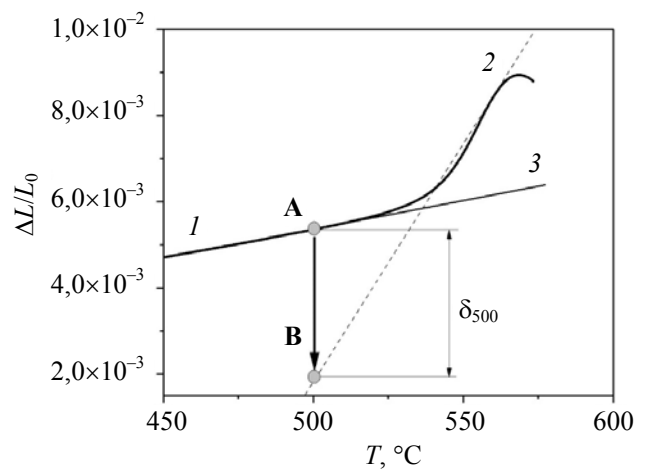


Рис. 2. Изменение относительного удлинения образца стекла ФК74 при нагревании с постоянной скоростью 10 °C/мин

Дилатометрическое исследование релаксации проводилось в ходе изотермических выдержек при температурах 490, 500, 510 и 520 °С. Нагрев до требуемой температуры проводился со скоростью 10 °С/мин. Изменения длины образцов стекла ФК74 вследствие структурной релаксации в зависимости от времени показаны на рис. 3.

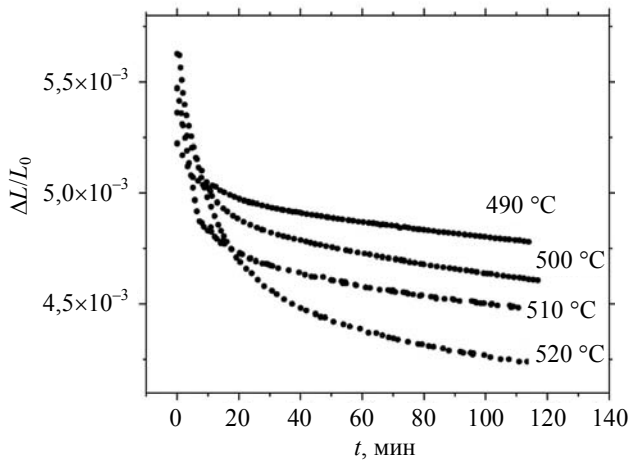


Рис. 3. Относительное удлинение образцов стекла ФК74 в результате структурной релаксации при изотермических выдержках в зависимости от времени

Рассмотрим релаксационный процесс при изотермической выдержке при  $T = 500$  °С на рис. 2. Изменение длины образца должно происходить в интервале А–В, точка А лежит на кривой 1 ниже интервала стеклования, точка В лежит на линии, описывающей состояние метастабильной жидкости, которое рассматривается как равновесное состояние при данной температуре релаксации [14–16],  $\delta_{500}$  – полное изменения относительной длины в ходе релаксации при 500 °С, стрелкой показано направление процесса. Отметим, что разница в значениях свойства стекла в стеклообразном состоянии ( $\delta_g$ ) и в состоянии метастабильной жидкости ( $\delta_L$ ) является также движущей силой релаксационного процесса. Таким образом, для всех релаксационных кривых (рис. 3) исходная точка при  $t = 0$  мин соответствует значению относительного изменения длины стекла ниже интервала стеклования, а полное изменение длины образца в ходе релаксационного процесса при заданной температуре ( $\delta_T$ ) должно соответствовать разнице в значениях свойства в исходном состоянии и в состоянии метастабильной жидкости.

Экспериментально полученное изменение относительного удлинения в зависимости от температуры стекла ниже и выше интервала стеклования было описано математически, подбор коэффициентов функций проводился методом наименьших квадратов. В предположении близкой к линейной зависимости ТКЛР стекла ниже интервала стеклования в температурном интервале 300–500 °С температурная зависимость относительного удлинения была описано параболой вида:  $\delta_g = aT^2 + bT + c$ , где  $a = 3,2 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ ;  $b = (7,70 \pm 0,01) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $c = -0,00254$ , погрешность описания экспериментальных данных составляла не более 1 %.

Относительное удлинение выше интервала стеклования (550–560 °С) описано прямой вида:  $\delta_e = 1,335 \times 10^{-4} T - 0,103$ , а общее изменение относительного удлинения ниже интервала стеклования в ходе релаксации  $\delta_n - \delta_L = 3,2 \times 10^{-9} \times T^2 - 1,26 \times 10^{-4} \times T + 0,105$ .

В общем виде релаксационная функция свойства ( $\Phi_P$ ) имеет следующее выражение:

$$\Phi_P = \frac{y(t) - y(\infty)}{y(0) - y(\infty)} = \frac{\delta(t) - \delta_e}{\delta_g - \delta_e} \quad (2)$$

где  $y$  – релаксирующее свойство, т. е. в нашем случае относительное изменение длины образца  $\delta$  от времени  $t$ ,  $y(0)$ ,  $y(t)$  и  $y(\infty)$  – величины свойства  $y$  в начальный момент времени ( $t = 0$ ), произвольный момент времени  $t$  и в условиях равновесия при  $t \rightarrow \infty$ , т. е., в нашем случае в состоянии метастабильной жидкости.

Известно (13), что релаксационная функция свойства ( $\Phi_P$ ) может быть описана суммой экспоненциальных функций:

$$\Phi_P = \sum_{k=1}^{k=n} A_k \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right), \quad (3)$$

где  $\tau_k$  имеет размерность времени и может быть определено как время релаксации системы,  $A_k$  – весовой коэффициент отдельных членов суммы в общий релаксационный процесс, учитывая, что  $0 < \Phi_P < 1$ ,  $\sum_{k=1}^{k=n} A_k = 1$ .

В изобарических условиях

$$\tau_k = \tau_{0k} \exp\left(\Delta h_k^* / RT\right), \quad (4)$$

где  $\tau_{0k} = \text{const}$ , а  $\Delta h_k^*$  – свободная энергия активации релаксационного процесса или энер-

гия активации релаксации. Считается [13, 14] что, подбирая эти параметры, функцией такого вида можно описать любой релаксационный процесс. На большом экспериментальном материале установлено [14–16], что энергии активации в уравнении (4) для каждого процесса не зависят от температуры и форма релаксационной кривой в координатах  $\Phi_p = f(\lg(t))$ , а различия между временами релаксации ( $\tau_k$ ) определяются только различиями предэкспоненциальных множителей ( $\tau_{0k}$ ), что позволяет прогнозировать величину энергии активации при различных температурах.

При существующей точности измерений для описания релаксационного процесса изменения длины образцов (рис. 3) достаточно 3-х членов суммы. Результаты описания релаксационных функций представлены на рис. 4.

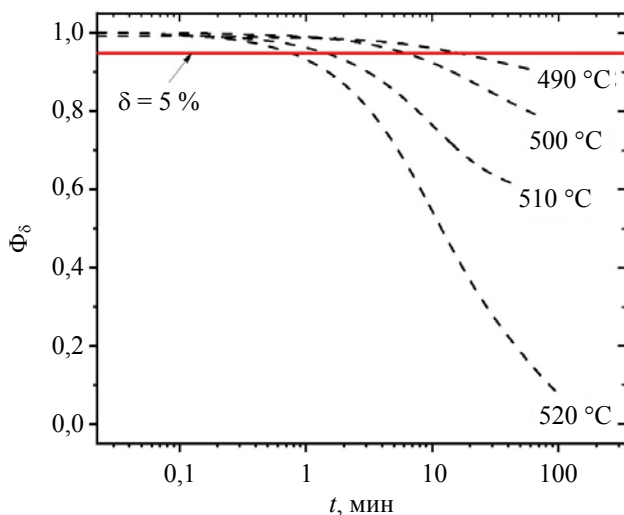


Рис. 4. Релаксационные функции при температурах 490–520 °С, рассчитанные по уравнениям (3) при  $k = 3$

### Оценка сохраняемости свойств

За критерий сохраняемости свойств стекла принимаем 5 % изменение релаксационной

функции. «Кажущаяся» энергия активации процесса может быть определена из зависимости  $\ln(t_{0,05}) = f(1/T_{\text{релаксации}})$  (рис. 5), где  $t_{0,05}$  – время изменения свойства на 5 % при температуре  $T_{\text{релаксации}}$ . Полученное значение «кажущейся» энергии активации равно  $471 \pm 72$  кДж/моль, что в пределах погрешности определения совпадает со значением энергии активации, полученным по анализу релаксационных кривых теплоемкости ( $500 \pm \pm 35$  кДж/моль), представленных на рис. 1 и в таблице 1.

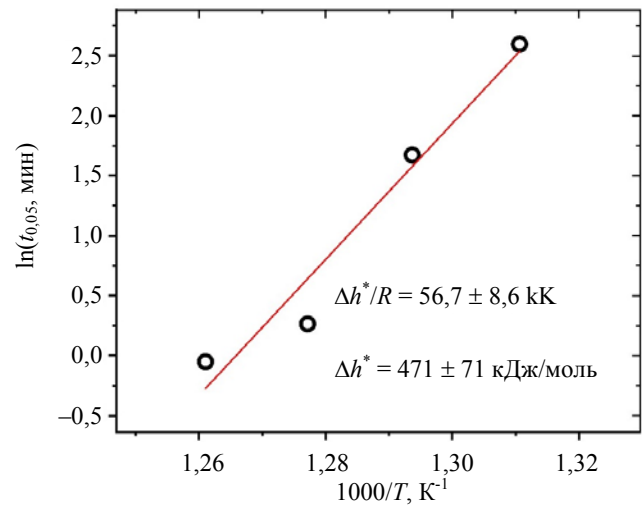


Рис. 5. Зависимость логарифма времени 5 % изменения релаксационной функции от обратной температуры изотермической выдержки

Эта позволяет рассчитать время 5 % изменения релаксационной функции при произвольной температуре выдержки, например, при 400 °С (673 К) это время составит 0,51 года. Фактически при проведении испытаний на сохраняемость используется температурный диапазон 80–100 °С, и полученные энергии активации с помощью соответствующих методик [16, 17] можно пересчитать от температурного диапазона ~ 400 °С к температурному диапазону 80–100 °С. Результаты пересчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения энергий активации в температурном диапазоне 80–100 °С

Марка стекла	ФК74	СТК53	СТК69	К58	ТБФ60	ОФ4
$E_a$ , кДж/моль	$80,6 \pm 5,6$	$72,5 \pm 12,9$	$90,3 \pm 5,6$	$79,0 \pm 13,7$	$66,9 \pm 15,4$	$87,1 \pm 14,5$
$E_a$ , эВ	$0,84 \pm 0,06$	$0,76 \pm 0,13$	$0,94 \pm 0,06$	$0,81 \pm 0,14$	$0,69 \pm 0,16$	$0,90 \pm 0,15$

### Заключение

Исследование процесса структурной релаксации ряда оксидных стекол методами дифференциального термического анализа и дилатометрии позволило определить температуры стеклования в зависимости от скорости предварительного охлаждения стекла и «кажущуюся» энергию активации релаксационного процесса. Полученные значения энергий активации релаксации для исследуемых стекол:

– при температурах около 400 °С равны:  $500 \pm 35$  кДж/моль (5,2 эВ) для ФК74;  $450 \pm 80$  кДж/моль (4,7 эВ) для СТК53;  $560 \pm 35$  кДж/моль (5,8 эВ) для СТК69;  $490 \pm 85$  кДж/моль (5,0 эВ) для К58;  $415 \pm 96$  кДж/моль (4,3 эВ) для ТБФ60 и  $540 \pm 90$  кДж/моль (5,6 эВ) для ОФ4;

– при температурах 80–100 °С равны:  $80,6 \pm 5,6$  кДж/моль (0,84 эВ) для ФК74;  $72,5 \pm 12,9$  кДж/моль (0,76 эВ) для СТК53;  $90,3 \pm 5,6$  кДж/моль (0,94 эВ) для СТК69;  $79,0 \pm 13,7$  кДж/моль (0,81 эВ) для К58;  $66,9 \pm 15,4$  кДж/моль (0,69 эВ) для ТБФ60 и  $0,9 \pm 0,15$  кДж/моль (0,9 эВ) для ОФ4.

Для стекла с низкой температурой стеклования (ФК74) была исследована изотермическая релаксация по изменению относительному длине образца стекла в ходе изотермической выдержки при температурах 490, 500, 510, 520 °С. Показано, что энергия активации релаксации, определенная по изменению удлинения образца в зависимости от температуры ( $471 \pm 72$  кДж/моль) в пределах погрешности измерения совпадает со значением энергии активации, полученным по анализу релаксационных кривых теплоемкости ( $500 \pm 30$  кДж/моль), т. е. энергия активации, определенная методом ДТА может быть ис-

пользована для анализа стабильности размеров образца в ходе структурной релаксации ниже интервала стеклования после определенного режима предварительной термической обработки стекла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов А. М. Оптические свойства материалов и механизмы их формирования. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
2. Дмитерко Р. А., Страхов А. А. / StudNet. 2020. Т. 3. № 11. С. 613–622.
3. Страхов А. А. / E-Scio. 2021. № 1 (52). С. 572–582.
4. Дмитерко Р. А., Страхов А. А. / Аллея науки. 2020. Т. 1. № 9. С. 121–127.
5. Hartmann P. / Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI. SPIE. 2015. Vol. 9626. P. 163–173.
6. Fotheringham U. et al. / Optical Materials Express. 2022. Vol. 12. № 8. P. 3171–3186.
7. Грейсх Г. И. и др. / Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 4. С. 529–535.
8. Полесский А. В., Семенченко Н. А., Семенча А. В. и др. / Сборник тезисов 10-й Научной конференции «ЭКБ и микроэлектронные модули» Российского форума «Микроэлектроника 2024». Сочи, Сириус. 2024. С. 766–767.
9. Попов В. С. и др. / Доклады российской академии наук. Физика, технические науки. 2023. Т. 511. № 1. С. 78–82.
10. Буданов В. В. Химическая кинетика: учеб. пособие. – Иваново: ИГХТУ, 2011.
11. Moynihan C. T. et al. / The journal of physical chemistry. 1974. Vol. 78. № 26. P. 2673–2677.
12. Кирьянов А. А. и др. / Успехи прикладной физики. 2024. Т. 12. № 6. С. 531–541.
13. Moynihan C. T. et al. / Thermochimica Acta. 1996. Vol. 280/281. P. 153–162.
14. Мазурин О. В. Стеклование. – Л.: Наука, 1986.
15. Немилев С. В. Оптическое материаловедение: Физическая химия стекла. – СПб: ИТМО, 2009.
16. Narayanaswamy O. S. / Journal of the American Ceramic Society. 1978. Vol. 61. № 3. С. 146–152.
17. Webb S. / Reviews of Geophysics. 1997. Vol. 35. № 2. P. 191–218.

PACS: 61.43.Fs, 60.60.+a, 60.70.ph

### Study of relaxation processes in «special» oxide glasses used for precision pressing

A. A. Kiryanov<sup>1</sup>, V. A. Klinkov<sup>1</sup>, T. V. Larionova<sup>1</sup>, O. V. Tolochko<sup>1</sup>, A. V. Semencha<sup>1</sup>,  
N. A. Semenchenko<sup>2</sup> and K. V. Shcherbakov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russia

<sup>2</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

<sup>3</sup> JSC NPO GOI im. S. I. Vavilova  
Bd. 1, 36 st. Babushkina, St. Petersburg, 192171, Russia

Received 30.01.2025; revised 17.02.2025; accepted 19.02.2025

***The paper uses thermal analysis methods to study relaxation processes in optical glasses FC74, TBF60, STK69, STK53, K58, and OF4. The «apparent» activation energy of structural relaxation is determined by differential thermal analysis based on the dependence of the glass transition temperature on the cooling rate of the glass from the melt. Dilatometric studies of relaxation processes at isothermal exposures in the glass transition interval were carried out using the example of FC74 glass. Relaxation functions are constructed and analyzed. Taking into account the data obtained, a forecast of the persistence of glass properties during long-term storage and exploitation was carried out.***

***Keywords:*** kurzflints; langkrons; glass; structural relaxation; glass transition temperature; activation energy; durability.

#### REFERENCES

1. Efimov A. M., Optical properties of materials and mechanisms of their formation. SPbGU ITMO, 2008.
2. Dmyterko R. A. and Strakhov A. A., StudNet **3** (11), 613–622 (2020).
3. Strakhov A. A., E-Scio, № 1 (52), 572–582 (2021).
4. Dmyterko R. A. and Strakhov A. A., Alley of Science **1** (9), 121–127 (2020).
5. Hartmann P., Optical Design and Engineering VI, SPIE **9626**, 163–173 (2015).
6. Fotheringham U. et al., Optical Materials Express **12** (8), 3171–3186 (2022).
7. Greisukh G. I. et al, Computational Optics **39** (4), 529–535 (2015).
8. Polesskiy A. V., Semenchenko N. A., Semenchina A. V. et al., Collection of abstracts of the 10th Scientific Conference "Electronic components and microelectronic modules" of the Russian forum "Microelectronics 2024", Sirius, 2024, pp. 766–767.
9. Popov V. S. et al., Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics, Technical Sciences **511** (1), 78–82 (2023).
10. Budanov V. V., Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Feder, Ivan. gos. chem.-technol. un- Ivanovo., IGKHTU., 2011.
11. Moynihan C. T. et al., The journal of physical chemistry **78** (26), 2673–2677 (1974).
12. Kiryanov A. A. et al., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **12** (6), 531–541 (2024) [in Russian].
13. Moynihan C. T. et al., Thermochimica Acta **280/281**, 153–162 (1996).
14. Mazurin O. V., Glass Formation. L., Science, 1986.
15. Nemilov S. V., Optical Materials Science. Physical Chemistry of Glass. St. Petersburg, ITMO University, 2009.
16. Narayanaswamy O. S., Journal of the American Ceramic Society **61** (3), 146–152 (1978).
17. Webb S., Reviews of Geophysics **35** (2), 191–218 (1997).