

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА  
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ  
(ГСССД)

УДК 537.32.323

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

ТЕЛЛУРИТНЫЕ СТЕКЛА СИСТЕМЫ  $\text{TeO}_2 + \text{R}_2\text{O}$  И ИХ РАСПЛАВЫ.  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 300 ДО 800 К И  
КОНЦЕНТРАЦИЙ ОКИСЛОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ  $\text{R}_2\text{O}$   
В МОЛ. %:  $\text{Li}_2\text{O}$  (20, 25);  $\text{Na}_2\text{O}$  (12, 16, 20, 28);  $\text{K}_2\text{O}$  (13, 16, 19, 22);  
 $\text{Rb}_2\text{O}$  (12, 16, 19);  $\text{Cs}_2\text{O}$  (12)

**ГСССД 327- 2017**

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема [RU.3.010-2018](#))

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «ВНИИМС» (ПНС-2016, тема 3.17.180- 4.016.16)  
с участием специалистов Института физики им. Х.И. Амирханова  
Дагестанского научного центра Российской Академии наук (ИФ ДНЦ РАН)  
(авторы: к.ф.-м.н. Магомедов Я.Б., к.ф.-м.н. Гаджиев Г.Г.)

РЕКОМЕНДОВАНЫ к утверждению Федеральным государственным  
унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт  
метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»)

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе :

канд. техн. наук В.А. Петухова, докт. физ.-мат. наук А.Д. Ивлиева , канд. физ.-  
мат. наук М.А. Покрасина, канд. техн. наук П.В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Федеральным государственным унитарным  
предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт  
метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию  
и метрологии « **31** » октября 2017г. (протокол № 98 - пр)

## ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 537.32.323



Таблицы ГСССД - 2017. Теллуритные стекла системы  $\text{TeO}_2 + \text{R}_2\text{O}$  и их расплавы. Теплопроводность в диапазоне температур ОТ 300 ДО 800 К и концентраций окислов щелочных металлов  $\text{R}_2\text{O}$  в мол. % :  $\text{Li}_2\text{O}$  (20, 25);  $\text{Na}_2\text{O}$  (12, 16, 20, 28);  $\text{K}_2\text{O}$  (13, 16, 19, 22);  $\text{Rb}_2\text{O}$  (12, 16, 19);  $\text{Cs}_2\text{O}$  (12) / Я.Б. Магомедов, Г.Г. Гаджиев ; Всеросс. научно-исслед. институт метрологической службы. М., 2017 – 27 с. Ил. – 1. Библиогр. 11 назв. – Рус. 8 назв.

Деп. в ФГУП «ВНИИМС» 31.10.2017 г., № 906 - 2017 кк.

Приведены экспериментальные данные по температурной зависимости теплопроводности теллуритных стекол системы  $\text{TeO}_2 + \text{R}_2\text{O}$  ( $\text{TeO}_2+20$  и 25 мол. %  $\text{Li}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2+ 12, 16, 20$  и 28 мол. %  $\text{Na}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2+ 13, 16, 19$  и 22 мол. %  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2+ 12, 16$  и 19 мол. %  $\text{Rb}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2+ 12$  мол.%  $\text{Cs}_2\text{O}$ ) в твердом и жидком состоянии с охватом области размягчения в широком диапазоне температуры 300-800 К

Данные о теплопроводности теллуритных стекол и их расплавов получены абсолютным компенсационным методом в стационарном тепловом режиме. Доверительная погрешность этих данных не превышает 6 % при доверительной вероятности 95 %.

Авторы :

 Я.Б. Магомедов  
 Г.Г. Гаджиев

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Вводная часть	5
2. Методическая часть	7
3. Оценка погрешности измерений	13
4. Таблицы экспериментальных данных	19
5. Список литературы	27

## 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Теллуритные стекла являются новым классом неорганических стекол, стеклообразующей компонентой в которых выступает диоксид теллура (парателлурит  $\text{TeO}_2$ ). Эти стекла обладают интересными для техники свойствами [1,2], благодаря которым они могут найти применение при создании различных приборов и устройств. Теллуритные стекла имеют высокие для видимой области спектра показатель преломления, высокий показатель акустооптического взаимодействия в сочетании с низким коэффициентом затухания ультразвука. Высокое значение диэлектрической проницаемости на частоте  $10^6$  гц при низких температурах размягчения позволяет широко их применять в микроэлектронной технике. Многие теллуритные стекла являются диамагнитными материалами с высоким значением постоянной Верде. Стекла этой системы перспективны в градиентной оптике, так как из-за малой теплопроводности из них можно получить наиболее высокоапертурные градиентные стекла. Активированные редкоземельным элементом теллуритные стекла имеют квантовый выход люминесценции и большие значения вероятностного излучения, что позволит применение их в лазерной технике. Из-за высоких для видимой области спектра значений коэффициента отражения теллуритные стекла могут найти применение при создании концентраторов солнечной энергии так как КПД концентратора тем выше, чем больше коэффициент отражения материала.

Физико-механические свойства и структура теллуритных стекол системы  $\text{TeO}_2 + \text{R}_2\text{O}$  исследованы частично, а теплопроводность, данные по которой необходимы и для улучшения технологического режима получения материалов и для расчета рабочего режима приборов и устройств на их основе, плохо исследована. Используемые нами надежные методики измерений и полученные экспериментальные данные представлены в предлагаемых таблицах. В таблицах приведены средние значения теплопроводности для 3-4 образцов каждого состава от 300 до 800 К с

интервалом в 20 градусов. Максимальное отклонение экспериментальных данных от среднего значения (абсолютная погрешность) не превышает 5%.

Для некоторых составов стекол с наименьшим содержанием модификатора составлены уравнения для расчета значений теплопроводности и представлены графики для сравнения расчетных и экспериментальных данных. Для других составов с данным модификатором можно использовать эти уравнения с другими коэффициентами. Экспериментальные данные по теплопроводности для всех стекол и их расплавов согласуются с расчетными из уравнений значениями в пределах 90-96 процентов.

Экспериментальные данные по теплопроводности для области размягчения стекол в области пика температурной зависимости не возможно объяснить составленными уравнениями.

Приведенные в таблицах данные по теплопроводности могут быть использованы при решении ряда задач технологического характера: синтез стекол данной системы и данного состава с заданными свойствами, выращивание стекол определенного состава и размеров, изготовление различных приборов и устройств с использованием теллуритных стекол. Табличные данные найдут применение при расчетах теплового режима работы всех приборов и устройств, изготовленных с использованием исследованных веществ.

В таблицах приведены следующие обозначения:

$\lambda$  - теплопроводность

T - температура (в градусах K)

В таблицах использованы следующие единицы измерения:

Теплопроводность -  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Температура – по шкале Кельвина.

## 2. МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Исследованные нами стекла были получены в ГОИ им. Вавилова и представлены нам по договору о научном сотрудничестве для исследования теплопроводности. При получении стекол в ГОИ участвовали наши сотрудники и пользовались методикой синтеза и закалки, разработанной в этом институте. Основными элементами для синтеза были заранее полученные чистые для анализа окислы  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Rb}_2\text{O}$ ,  $\text{Cs}_2\text{O}$ . Эти окислы сами по себе являются кристаллическими и сплавы окислов щелочных металлов с парателлуридом при определенном режиме синтеза и закалки дают стекла. Области стеклообразования в диаграммах состояния этих сплавов изучены в ГОИ [3,] и в пределах этих областей для изучения влияния структуры и состава на теплопроводность были подобраны составы:  $\text{TeO}_2 + 20$  и  $25$  мол.%  $\text{Li}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2 + 12, 16, 20$  и  $28$  мол.%  $\text{Na}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2 + 13, 16, 19$  и  $22$  мол.%  $\text{K}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2 + 12, 16$  и  $19$  мол.%  $\text{Rb}_2\text{O}$ ;  $\text{TeO}_2 + 12$  мол.%  $\text{Cs}_2\text{O}$ .

Для получения стекол определенного состава тщательно взвешенный в соответствии с молярным составом смеси окислов парателлурита и щелочного металла закладывали в кварцевые тигли, предварительно промытые плавиковой кислотой, остатки которой удалялись дистиллированной водой. Для удаления следов органических веществ с поверхности кварца кварцевые тигли промывали спиртом-ректификатом и еще раз дистиллированной водой. Кварцевые тигли со смесью окислов закладывали в муфельные печи сопротивления, нагревали до  $1000-1050\text{K}$  и тщательно непрерывно перемешивали. Для получения образцов определенной формы и размеров расплав смеси отливали в предварительно нагретую до  $650\text{K}$  металлическую форму, тщательно промытую от органических загрязнений. Закалённые таким способом стекла в дальнейшем отжигались при этой температуре в муфельной печи. Результаты химического анализа стекол с максимальным содержанием

окиси щелочного металла (20 мол. %) показали, что отклонение синтетического состава от аналитического незначительно. Это объясняется невысоким значением температуры синтеза этих стекол.

О стеклообразной структуре и о фазовом их составе судили визуально (по зеркальному блеску поверхности, по характерному хрупкому излому) и по микроструктурному анализу. Микроструктурный анализ проводили в основном измерением микротвердости в различных точках поверхности полученного слитка и металлографическим микроскопом МИМ-7. Микрошлифы и данные по микротвердости, полученные в разных точках поверхности слитка, свидетельствовали об однородной и однофазной структуре образцов исследуемых стекол.

Для исследования высокотемпературной теплопроводности теллуритных стекол и химически агрессивных склонных к испарению и разложению их расплавов нами использован абсолютный компенсационный метод плоского слоя в стационарном тепловом режиме [4].

Принципиальная схема устройства для измерения теплопроводности абсолютным компенсационным методом представлена на рисунке 1.

Образец исследуемого вещества (1) в виде таблетки ( $\varnothing 30$  мм и толщиной 5-6 мм) закладывается в кварцевое кольцо (2) соответствующих размеров и зажимается между рабочими поверхностями (3,4) градиентного нагревателя (5) и холодильника (6). Компенсируя боковые и торцевые тепловые утечки компенсационным нагревателем (7), намотанным на цилиндрический каркас (8) из нержавеющей стали, тепловая мощность  $Q$ , выделяемая градиентным нагревателем, направляет через исследуемый образец, создавая в образце линейный тепловой поток и перепад температуры  $\Delta T$ . Поверхности цилиндрического зазора (9) между градиентным и компенсационным нагревателями покрываются медной фольгой (10), изолированной от корпуса нагревателей слюдяной пластинкой.



Медное покрытие у вершины его конического основания имеет разрыв, чем изолируется медная фольга на поверхности рабочего нагревателя от фольги на внутренней поверхности компенсационного нагревателя. Цилиндрический зазор между внешней поверхностью градиентного нагревателя и внутренней поверхностью компенсационного нагревателя заполняется порошком закиси меди (9). Закись меди в зазоре хорошо уплотняется прессом и зажимными болтами (11) для получения хорошего контакта закиси меди с медным покрытием.

Система, состоящая из двух поверхностей медной фольги с закисью меди между ними, образует высокочувствительный поверхностный термоэлемент (термоэдс  $\alpha = 700 \text{ мкВ/град}$ ), выводы от которой подводятся к высокоточному терморегулятору. Терморегулятор, регулируя с помощью интегральной термопары мощность компенсационного нагревателя, поддерживает нулевую разность температур между поверхностью градиентного нагревателя и компенсационным нагревателем, обеспечивает полную компенсацию тепловых потерь с поверхности рабочего нагревателя.

С целью предотвращения тепловых утечек от боковой поверхности образца через кварцевое кольцо его засыпают порошком теплоизоляционного материала (12,13) и с помощью компенсационного нагревателя на кварцевом кольце и слое теплоизоляционного материала перепад температуры поддерживается такой же, как на образце.

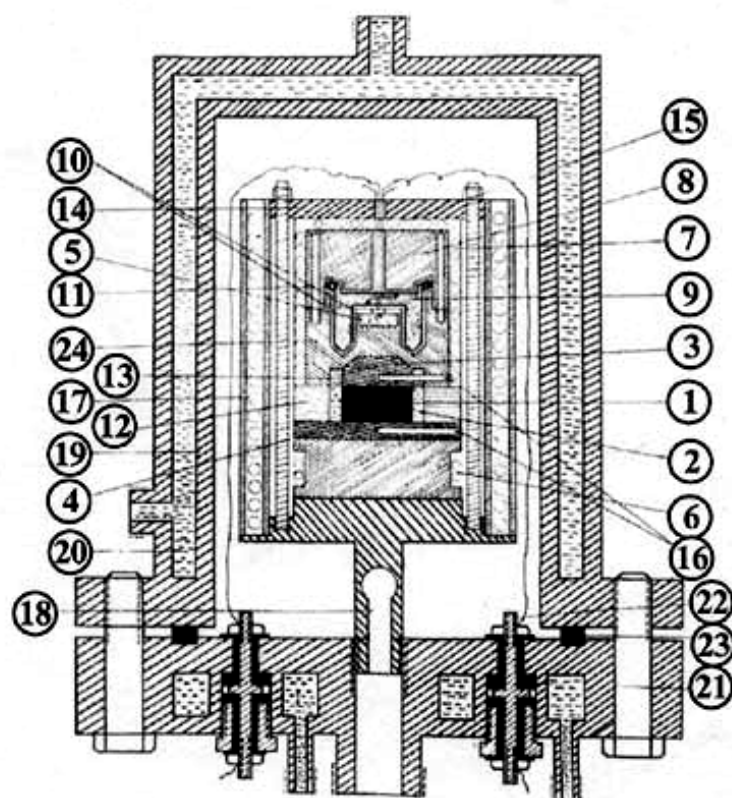


Рис.1. Принципиальная схема установки для измерения теплопроводности полупроводников и их расплавов плоским компенсационным методом: 1 - исследуемый образец, 2 - кварцевая ячейка, 3 и 4 - рабочие поверхности градиентного нагревателя и холодильника, 5 - градиентный нагреватель, 6 - холодильник, 7 -компенсационный нагреватель, 8 - наружная часть прибора из нержавеющей стали, 9 - слой закиси меди, 10 - медная фольга, 11 -зажимной болт, 12 и 13 - теплоизоляционный материал, 14 - груз, 15 -болт, 16 - термопары, 17 - режимный нагреватель, 18 - патрубок, 19- автоклав, 20 - термостатирующая жидкость, 21 - крышка автоклава, 22 -зажим для проводов, 23 - фторопластовая прокладка, 24 - внутренняя часть прибора из нержавеющей стали.

Для улучшения теплового контакта торцевые поверхности образца, холодильника и градиентного нагревателя тщательно шлифуются, проверяют их на плоскопараллельность, намазывают специальной замазкой,

изготовленной на основе мелкодисперсного порошка графита марки МПГ7 и растворителя стоматологического фосфат-цемента, и уплотняются грузом (14) с помощью болтов (15).

Рабочие части холодильника и градиентного нагревателя(3,4), непосредственно соприкасающиеся с исследуемым веществом, изготовлены из спектрально чистого графита марки МПГ7, не реагирующего с химически агрессивным расплавом и обладающего хорошей теплопроводностью. Герметизация кварцевого контейнера с рабочими поверхностями холодильника и градиентного нагревателя осуществляется специальной замазкой на основе графитового порошка.

Перепад температуры на образце измеряется хромель- алюмелевыми термопарами (16), которые вставляются в двухканальные алундовые соломки и укладываются в сверления в рабочих участках нагревателя и холодильника на расстоянии не более 0.5мм от поверхности образца. Корольки термопар покрываются тонким слоем графитовой замазки для электрического и теплового контакта с расплавом.

Для изготовления термопар брали хромелевые и алюмелевые термопарные провода диаметром 0.3 мм, предварительно отожженные при 1100К в однородном температурном поле в течении одного часа для устранения механических деформаций и напряжений, возникающих при их холодной обработке. Из этих проводов изготавливали 7-8 термопар, показания которых сопоставляли между собой и с показаниями платина-платинородиевой термопары заводского изготовления с индивидуальной градуировкой. Для измерения отбирались термопары, показания которых расходятся не более чем на 0.2 К между собой и на 1-2 К от показаний платина- платинородиевой термопары.

Используя предлагаемое устройство, нами исследована теплопроводность большой группы полупроводниковых соединений и их расплавов. Результаты

этих исследований были представлены в ВНИЦ МВ Госстандарта и аттестованы в категории таблиц рекомендуемых справочных данных (РСД) №ГСССД Р 134-85, Р 226-87, Р 403-91 и депонированы во ВНИИКИ.

Измерения теплопроводности при данной температуре производится при разных перепадах температуры на образце, которые подбирают регулируя мощности рабочего нагревателя и нагревателя на холодильнике (6).

Температурный режим измерения регулируется режимным нагревателем (17), работа которого также контролируется терморегулятором.

С целью предотвращения окисления деталей устройства, окисления, испарения и разложения исследуемых веществ при высоких температурах измерения проводятся после вакуумирования до  $1.33 \cdot 10^{-2}$  Па через патрубок (18) в атмосфере специально очищенного инертного газа в автоклаве (19), охлаждаемом термостатирующей жидкостью (20). Вакуумные уплотнения автоклава с крышкой (21) и с зажимами (22) для вывода токоподводящих и термопарных проводов из автоклава осуществляются фторопластовыми прокладками (23). Для предотвращения испарения или разложения расплава исследуемого вещества после плавления давление инертного газа в автоклаве подбирается с учетом упругости паров насыщения элементов, входящих в состав исследуемого соединения.

Тепловой поток  $Q$ , создаваемый градиентным нагревателем, компенсируя боковые и торцевые тепловые утечки компенсационным нагревателем, направляется через исследуемый образец, перепад в температуры  $\Delta T$  на котором измеряется термопарами.

Теплопроводность  $\lambda$  материала вычисляется по формуле

$$\lambda = \frac{IU}{\Delta T} \frac{L}{S},$$

где  $I$  – ток, проходящий через нагреватель,  $U$  – напряжение на зажимах градиентного нагревателя,  $S$  и  $L$  - площадь поперечного сечения и толщина исследуемого образца.

### 3. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

Относительная систематическая погрешность измерения теплопроводности, обусловленная погрешностями измерения тока, напряжения, температуры и геометрических размеров образца, не превышает 6 % при 1000 К. При вычислении инструментальной погрешности были учтены погрешности, связанные с возможными тепловыми потерями через токоподводящие и термопарные провода, через слой закиси меди, кварцевое кольцо и теплоизоляционный материал, которые не превышают 2 % от теплового потока, проходящего через образец. При определении погрешности измерения температуры и перепада температуры на образце учитывались погрешности градуировки таблиц и погрешности, обусловленные отклонением показаний индивидуальных термопар от данных градировочной таблицы.

Наряду с указанными систематическими инструментальными погрешностями на погрешность любого эксперимента влияют погрешности, которые могут меняться от опыта к опыту и приводить к разбросу экспериментальных данных при повторении эксперимента при неизменных условиях. Эти погрешности являются погрешностями разброса и носят случайный характер.

Для оценки погрешности разброса на установке провели серию из десяти измерений теплопроводности трителлурида мышьяка ( $\text{As}_2\text{Te}_3$ ) при фиксированной температуре (400 и 640 К) для разных значений перепада температуры. По результатам этих измерений были вычислены средние арифметические значения теплопроводности ( $\lambda_{\text{cp}}$ ), средние арифметические ( $r$ ) и средние квадратичные ( $s$ ) погрешности измерений, приведенные в таблице А и составлены гистограммы распределения отклонения результатов отдельных измерений от средних значений ( $\lambda_{\text{cp}}$ ) по числу измерений при 400 и 600 К (Рис. А).

Математическая обработка результатов этих измерений показала, что доверительная погрешность единичного измерения теплопроводности стекол и их расплавов, использованных нами, с учетом инструментальных и случайных погрешностей не превышает 6 % при доверительной вероятности более 95%.

Таблица А.

№ п/п	$\lambda_i$	$\lambda_i$
1	0.93	1.13
2	0.85	1.14
3	0.92	1.10
4	0.89	1.15
5	0.9	1.08
6	0.88	1.13
7	0.96	1.2
8	0.95	1.18
9	0.91	1.09
10	0.86	1.17
Ср.зн-я	0,9	1.14
r	0.026	0.027
s	0.034	0.036

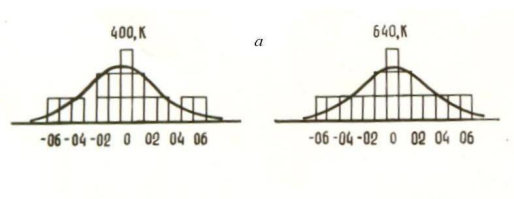


Рис.А.

Экспериментальные данные по температурной зависимости теплопроводности теллуридных стекол частично опубликованы нами ранее [5,6,7].

Полученные экспериментальные данные представлены в таблицах.

Для объяснения экспериментальных данных и выяснения вклада различных механизмов теплопроводности в процесс теплопереноса мы измеряли электропроводность некоторых составов стекол этой системы

компенсационным четырехзондовым методом [8]. Величина электропроводности  $\sigma$  как в твердом, так и в жидком состоянии не превышает  $10^{-13} - 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ , что дает основание пренебречь вкладом носителей заряда  $\lambda_{\sigma} = L\sigma T$  в теплопроводность теллуритных стекол. Слабая температурная зависимость и хорошая корреляция величины теплопроводности при комнатной температуре с другими физическими свойствами (плотность, микротвердость), которые в основном определяются структурой кристаллической решетки и типом химической связи между структурными единицами, дает основание приписать измеренной теплопроводности при этих температурах фононную природу. Теплопроводность всех исследованных теллуритных стекол слабо зависит от температуры.

Если исходить из концепции, что фононную теплопроводность можно определить формулой Дебая  $\lambda_{\phi} = \frac{1}{3} \sum c(\omega_{\phi}, p) v_a(\omega_{\phi}, p) l_a(\omega_{\phi}, p)$ , то малую величину и слабую температурную зависимость при температурах, близких к комнатным, можно объяснить независимой от температуры малой величиной длины свободного пробега фононов  $l$  в стеклах, равной в среднем расстоянию между структурными единицами (а) стекловидной сетки. При добавлении модификатора и изменении состава стекла теплопроводность уменьшается. При добавлении модификатора и изменении состава стекла меняется в основном плотность и тип связей между структурными единицами, меняются упругие параметры решетки, теплоемкость и скорость распространения тепловых волн.

Уменьшение теплопроводности данного состава при добавлении модификатора можно объяснить уменьшением теплоемкости и скорости распространения фононов в результате разрыва ковалентных мостиковых связей и замены их менее жесткими объемными ионными связями. Усиление концентрационной зависимости теплопроводности стекол в зависимости от типа и содержания модификатора также объясняется более сильным влиянием на тип химической связи ионного радиуса щелочного металла модификатора:

при одинаковом содержании модификатора чем больше ионный радиус модификатора (молярный объём стекла данного состава) тем большему разрыву подвергается ковалентные связи  $\text{Te-O}$ , которые заменяются ионными цепями  $\text{Te - O - R}^+ - (\text{RO})^- - \text{Te}^+$  и т. д., тем больше будет тепловое сопротивление стекловидной сетки.

В области размягчения стекол наблюдаются аномальные пики в температурном ходе теплопроводности. Величина пика и температурная протяженность зависят также от состава стекла. Для стекол данной системы величина пика в температурном ходе теплопроводности и его температурная протяженность уменьшается с увеличением содержания модификатора. Такое же изменение происходит и при увеличении среднего атомного веса для стекол с определенным содержанием модификатора.

Резкое увеличение теплопроводности в области температуры размягчения стекла наблюдали ранее и для халькогенидных стекол [9,10]. Такие аномальные пики в температурной зависимости теплопроводности согласуются с температурной зависимостью теплоемкости этих стекол при этих температурах. Скачки теплоемкости и теплопроводности начинаются при температурах, близких к температуре стеклования ( $T_g$ ), когда появляется возможность переключения (трансформации) валентных связей. В стеклах с разнородным структурно-химическим составом при температурах, близких к температуре размягчения, происходит в разных точках объема хаотическая перегруппировка атомов, которая предшествует переключению мостиковых связей с одного комплекса атомов на другой [11]. На эту перегруппировку и переключения связей расходуется определенная внутренняя энергия вещества, что сопровождается увеличением теплоемкости и фононной теплопроводности. С увеличением температуры вероятность трансформации связей увеличивается до насыщения, уменьшается количество энергии, необходимой для переключения связей и перегруппировки атомов и температурная кривая теплоемкости и теплопроводности проходит через максимум. При дальнейшем



нагревании на переключение связей требуется мало энергии и трансформация связей происходит часто и перегруппировка атомов на теплоемкость и теплопроводность не влияет.

Рост теплопроводности в расплаве можно объяснить увеличением теплоемкости за счет роста числа степеней свободы тепловых колебаний атомов в результате дальнейшего разрыва жёстких ковалентных мостиковых связей. Чем больше ионный радиус (молярный объем) модификатора, тем слабее связи между атомами в стеклах и больше вероятности их разрыва, что и наблюдается; температурный коэффициент роста теплопроводности расплавов увеличивается при увеличении молярного объема модификатора и при увеличении содержания модификатора в стеклах данной системы. Этим же и объясняется зависимость величины и температурной протяженности аномального пика в температурной зависимости теплопроводности в области размягчения стекол.

Для некоторых составов стекол с наименьшим содержанием модификатора составлены уравнения для расчета значений теплопроводности и представлены графики для сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Для некоторых составов стекол с наименьшим содержанием модификатора составлены уравнения для расчета значений теплопроводности:  $\text{TeO}_2 + 20$  молярных процентов  $\text{Li}_2\text{O}$  ( $\lambda = 2 \times 10^{-5} T^2 - 0,018T + 4,363$  - стекло и  $\lambda = 0,32 + 1,5 \times 10^{-3} T$  - расплав),  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{K}_2\text{O}$ , ( $\lambda = 0,002T - 0,231$  - стекло и  $\lambda = 0,6 + 0,001T$  - расплав),  $\text{TeO}_2 + 13$  молярных процентов  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $\lambda = 0,005T - 1,12$  - стекло и  $\lambda = 0,34 + 1,02 \times 10^{-3} T$  - расплав),  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{Rb}_2\text{O}$  ( $\lambda = -10^{-8} T^4 + 2 \times 10^{-5} T^3 - 0,01 T^2 + 3,1T - 327,4$  - стекло и  $\lambda = 0,32 + 0,001T$  - расплав),  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{Cs}_2\text{O}$

$(\lambda = 10^{-5}T^2 - 0,008T + 1,908 - \text{стекло и } \lambda = 0,3 + 9,87 \times 10^{-4}T - \text{расплав})$  и представлены графики для сравнения расчетных (сплошная) и экспериментальных данных (точки).

Для других составов с данным модификатором можно использовать эти уравнения с другими коэффициентами. Экспериментальные данные по теплопроводности для всех стекол и их расплавов согласуются с расчетными из уравнений значениями в пределах 90-96 процентов.

Экспериментальные данные о теплопроводности для области размягчения стекол в области пика температурной зависимости не возможно объяснить составленными уравнениями.

#### 4. ТАБЛИЦЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Теплопроводность стекол  
системы  $\text{TeO}_2 + \text{Li}_2\text{O}$ .

Таблица 1

Т.К	Теплопроводность, ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )	
300	0,53	0,52
320	0,55	0,53
340	0,57	0,54
360	0,59	0,55
380	0,61	0,56
400	0,62	0,57
420	0,63	0,58
440	0,64	0,61
460	0,72	0,65
480	0,75	0,69
500	0,84	0,74
520	0,96	0,90
540	1,06	0,98
560	1,22	1,08
580	1,38	1,18
600	1,51	1,29
620	1,58	1,38
640	1,61	1,43
660	1,60	1,40
680	1,49	1,35
700	1,41	1,29
720	1,42	1,30
740	1,43	1,32
760	1,46	1,36
780	1,49	1,39
800	1,52	1,41
Мол.% $\text{Li}_2\text{O}$	20	25

Теплопроводность стекол  
системы  $\text{TeO}_2 + \text{K}_2\text{O}$

Таблица 2

Т,(К)	Теплопроводность, ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )			
300	0,52	0,44	0,37	0,30
320	0,53	0,45	0,38	0,31
340	0,55	0,46	0,40	0,32
360	0,56	0,48	0,42	0,33
380	0,58	0,51	0,44	0,34
400	0,60	0,52	0,45	0,36
420	0,66	0,57	0,46	0,38
440	0,72	0,63	0,48	0,42
460	0,76	0,67	0,53	0,45
480	0,80	0,71	0,59	0,49
500	0,84	0,75	0,63	0,52
520	0,93	0,79	0,67	0,58
540	1,05	0,87	0,73	0,63
560	1,16	0,96	0,79	0,70
580	1,22	1,07	0,88	0,80
600	1,28	1,05	0,95	0,85
620	1,19	1,01	0,92	0,84
640	1,05	0,97	0,90	0,82
660	1,04	0,95	0,89	0,81
680	1,03	0,96	0,90	0,80
700	1,04	0,97	0,91	0,80
720	1,05	0,98	0,92	0,80
740	1,07	0,99	0,92	0,81
760	1,10	1,01	0,93	0,82
780	1,13	1,03	0,94	0,83
800	1,16	1,06	0,95	0,84
Мол.% $\text{K}_2\text{O}$	12	16	19	22

Теплопроводность стекол  
системы  $\text{TeO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$

Таблица 3

T К	Теплопроводность, ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )			
300	0,51	0,46	0,43	0,41
320	0,53	0,48	0,45	0,42
340	0,56	0,51	0,47	0,44
360	0,60	0,54	0,52	0,46
380	0,64	0,58	0,56	0,47
400	0,72	0,62	0,60	0,48
420	0,80	0,69	0,64	0,51
440	0,92	0,81	0,69	0,65
460	1,06	0,91	0,80	0,72
480	1,24	1,05	0,91	0,81
500	1,40	1,21	1,04	0,90
520	1,48	1,35	1,16	1,01
540	1,51	1,41	1,21	1,06
560	1,52	1,41	1,20	1,04
580	1,52	1,37	1,16	1,03
600	1,48	1,33	1,15	1,04
620	1,44	1,28	1,16	1,05
640	1,38	1,27	1,17	1,06
660	1,34	1,25	1,18	1,08
680	1,31	1,25	1,19	1,09
700	1,31	1,26	1,21	1,11
720	1,32	1,28	1,22	1,13
740	1,34	1,29	1,23	1,15
760	1,36	1,31	1,24	1,16
780	1,38	1,32	1,25	1,18
800	1,40	1,34	1,26	1,20
Мол.% $\text{Na}_2\text{O}$	13	16	20	28

Теплопроводность стекол  
системы  $\text{TeO}_2 + \text{Rb}_2\text{O}$

Таблица 4

T, (K)	Теплопроводность, ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ )		
300	0,42	0,36	0,31
320	0,44	0,38	0,33
340	0,46	0,41	0,34
360	0,48	0,43	0,36
380	0,50	0,45	0,39
400	0,53	0,48	0,41
420	0,57	0,51	0,43
440	0,61	0,54	0,46
460	0,74	0,59	0,50
480	1,02	0,75	0,56
500	1,11	0,94	0,66
520	1,14	1,01	0,86
540	1,13	1,00	0,85
560	1,12	0,97	0,83
580	1,08	0,95	0,84
600	1,03	0,94	0,85
620	1,00	0,93	0,86
640	0,98	0,94	0,87
660	0,98	0,95	0,88
680	1,00	0,96	0,89
700	1,01	0,98	0,90
720	1,03	0,99	0,91
740	1,05	1,01	0,92
760	1,07	1,02	0,93
780	1,10	1,03	0,94
800	1,11	1,04	0,95
Мол.% $\text{Rb}_2\text{O}$	12	16	19

Теплопроводность стекла системы  $\text{TeO}_2 + \text{Cs}_2\text{O}$

Таблица 5

Т, (К)	Теплопроводность, (Вт.м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup> )
300	0,38
320	0,39
340	0,40
360	0,42
380	0,43
400	0,45
420	0,47
440	0,50
460	0,53
480	0,57
500	0,63
520	0,76
540	0,93
560	1,02
580	0,95
600	0,85
620	0,86
640	0,88
660	0,90
680	0,93
700	0,96
720	0,99
740	1,02
760	1,05
780	1,08
800	1,10
Мол.% Cz <sub>2</sub> O	12

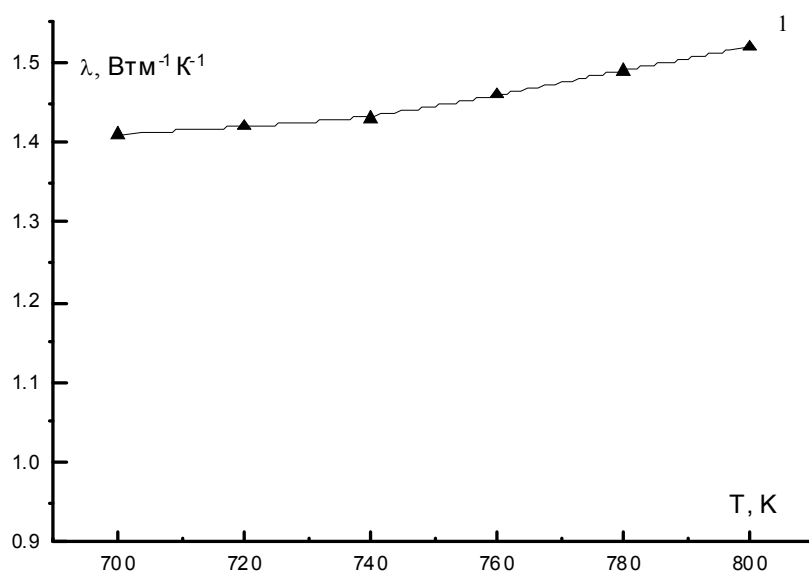


Рис.1. Температурная зависимость теплопроводности стекла  $\text{TeO}_2 + 20$  молярных процентов  $\text{Li}_2\text{O}$ .  $\lambda = 2 \times 10^{-5} T^2 - 0,018 T + 4,363$

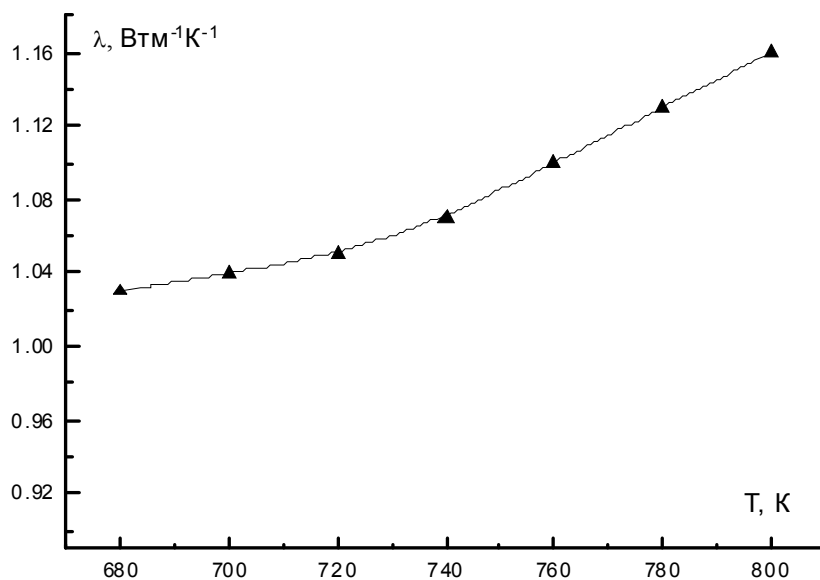


Рис.2. Температурная зависимость теплопроводности стекла  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{K}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,002 T - 0,231$

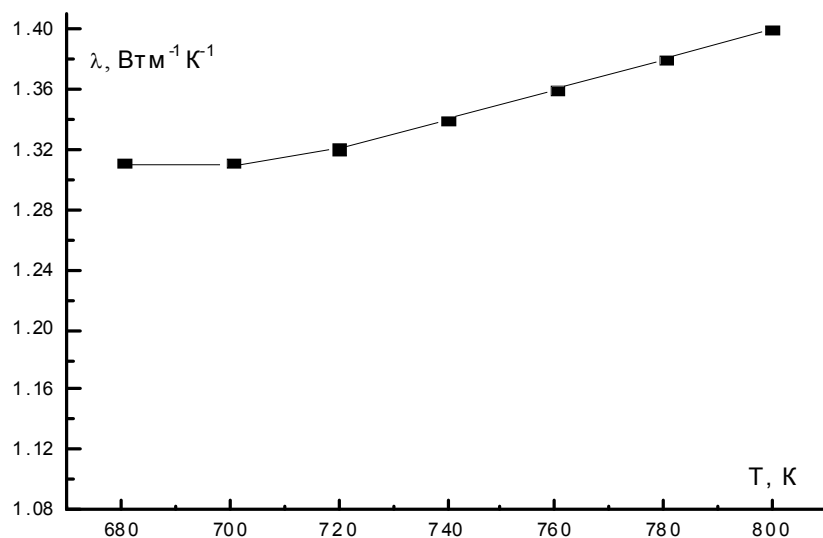


Рис.3. Температурная зависимость теплопроводности стекла  $\text{TeO}_2 + 13$  молярных процентов  $\text{Na}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,005T - 1,12$

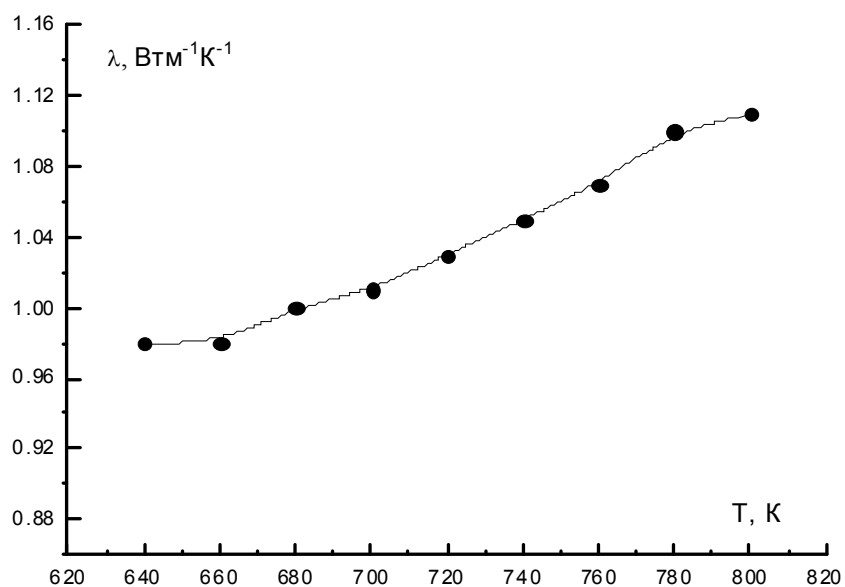


Рис.4. Температурная зависимость теплопроводности стекла  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{Rb}_2\text{O}$ .  $\lambda = -10^{-8}T^4 + 2 \times 10^{-5}T^3 - 0,01T^2 + 3,1T - 327,4$

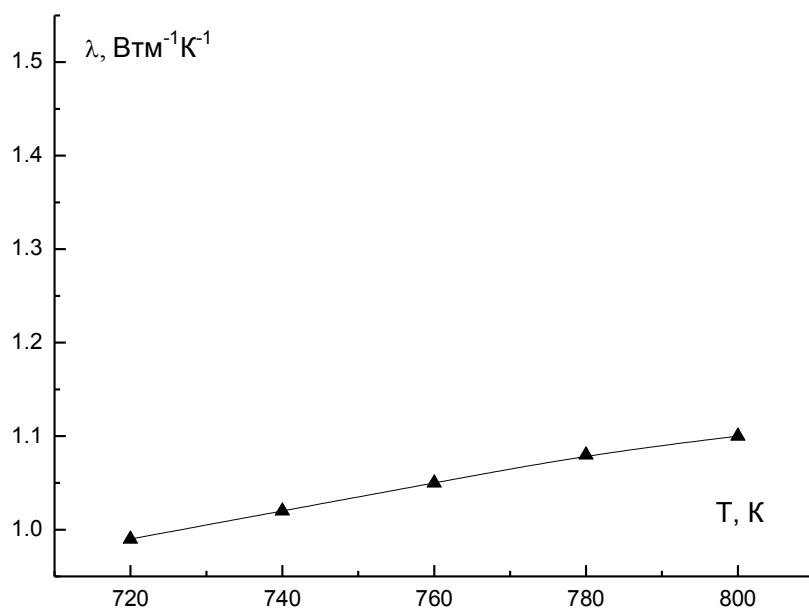


Рис.5. Температурная зависимость теплопроводности стекла  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{Cz}_2\text{O}$ .  $\lambda = 10^{-5}T^2 - 0,008T + 1,908$

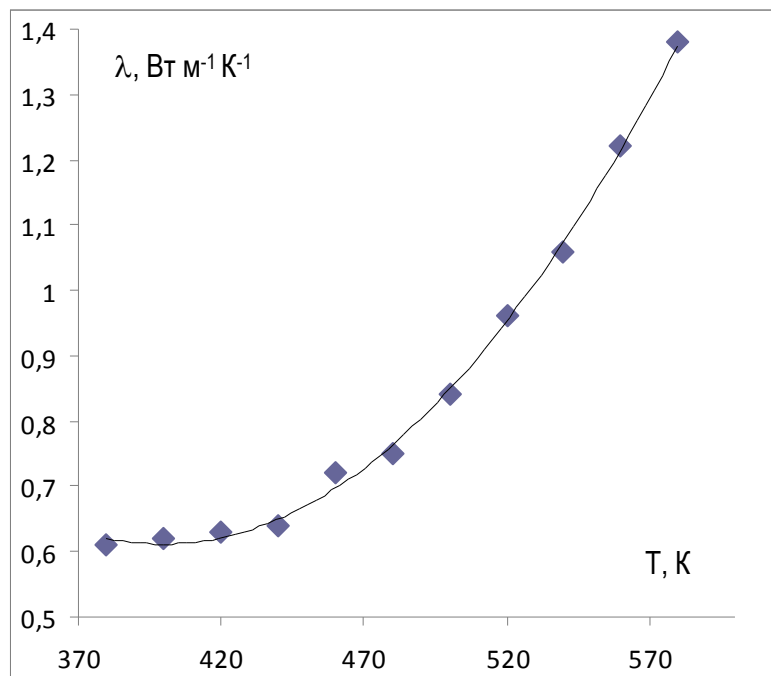


Рис.6. Температурная зависимость теплопроводности расплава стекла  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{Li}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,32 + 1,5 \times 10^{-3}T$ .



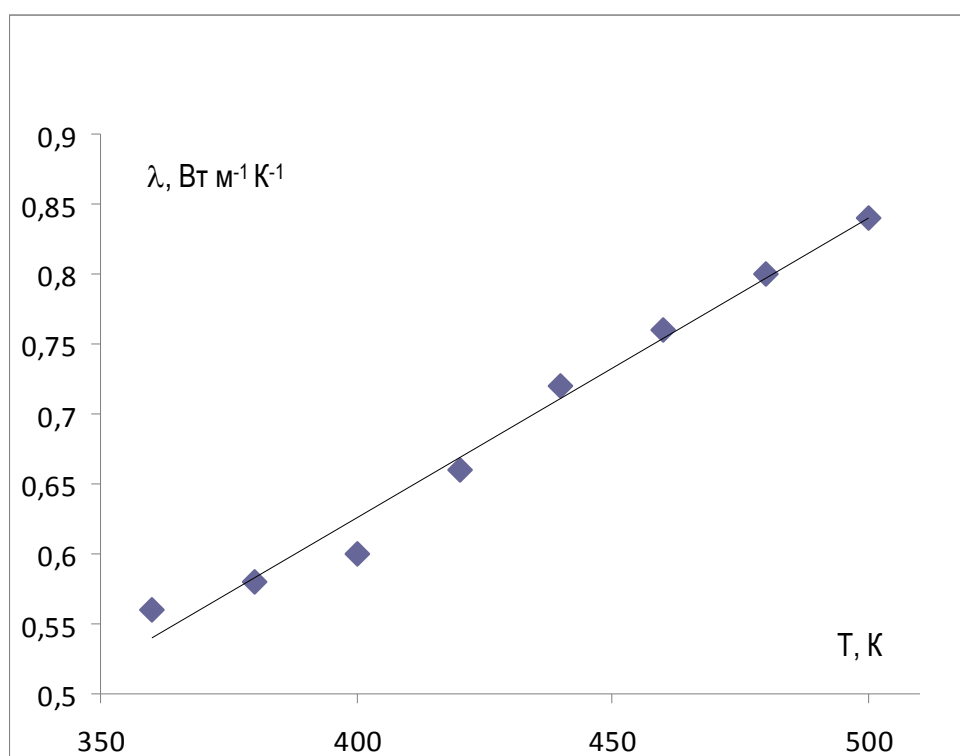


Рис.7. Температурная зависимость теплопроводности расплава стекла  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{K}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,34 + 1,02 \times 10^{-3}T$

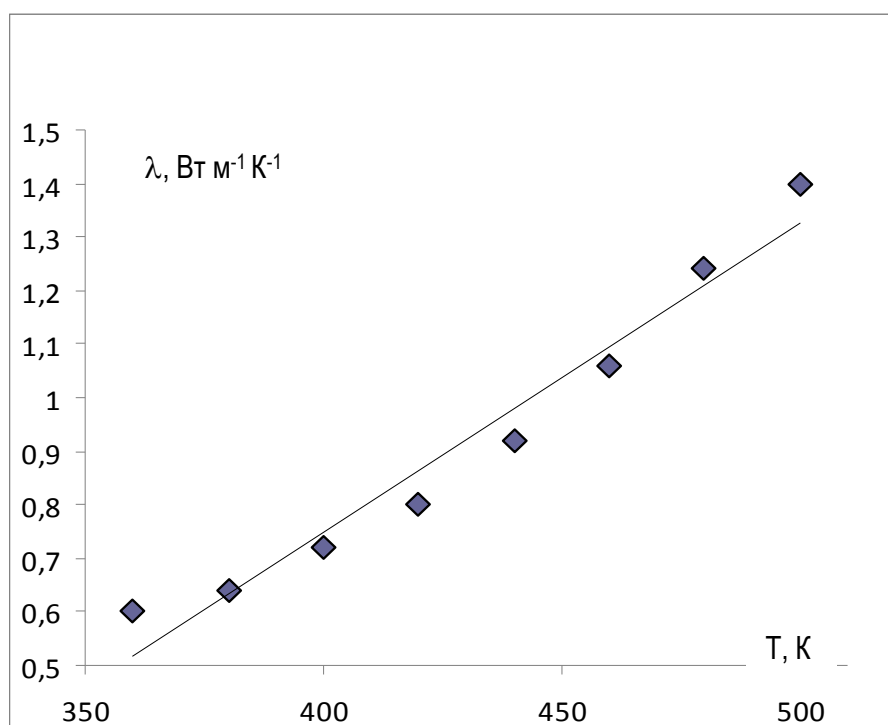


Рис.8. Температурная зависимость теплопроводности расплава стекла  $\text{TeO}_2 + 12$  молярных процентов  $\text{Na}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,6 + 0,001T$

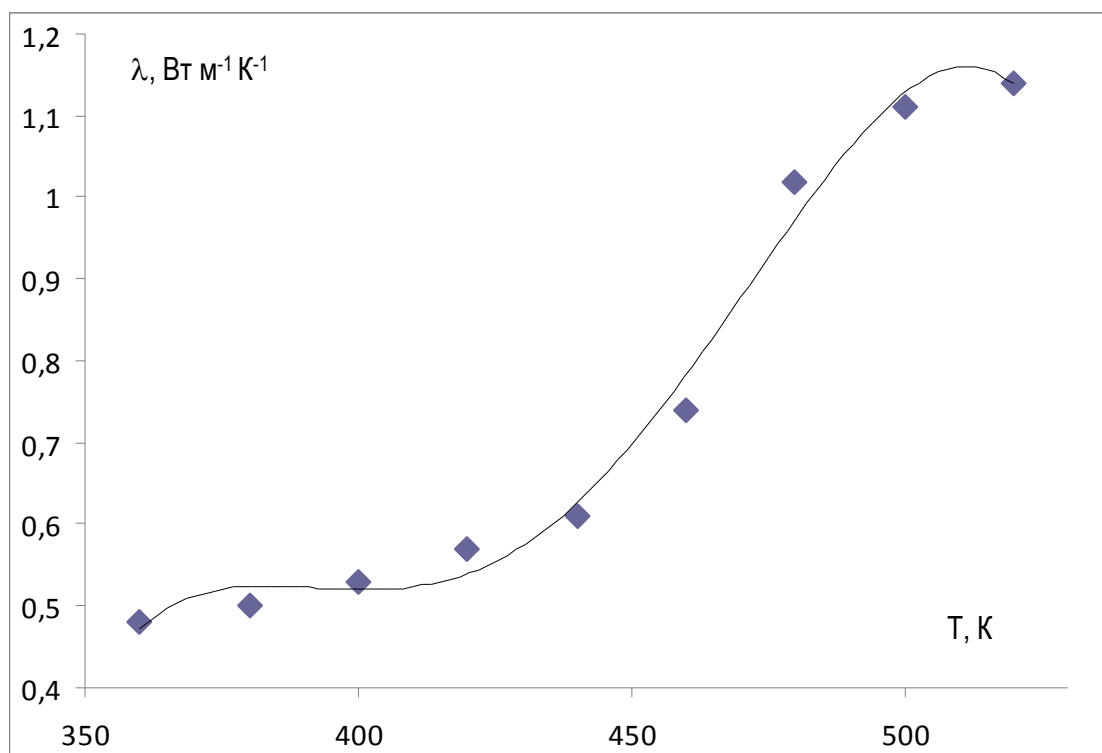


Рис.9. Температурная зависимость теплопроводности расплава стекла  $\text{TeO}_2$  + 12 молярных процентов  $\text{Rb}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,32 + 0,001T$

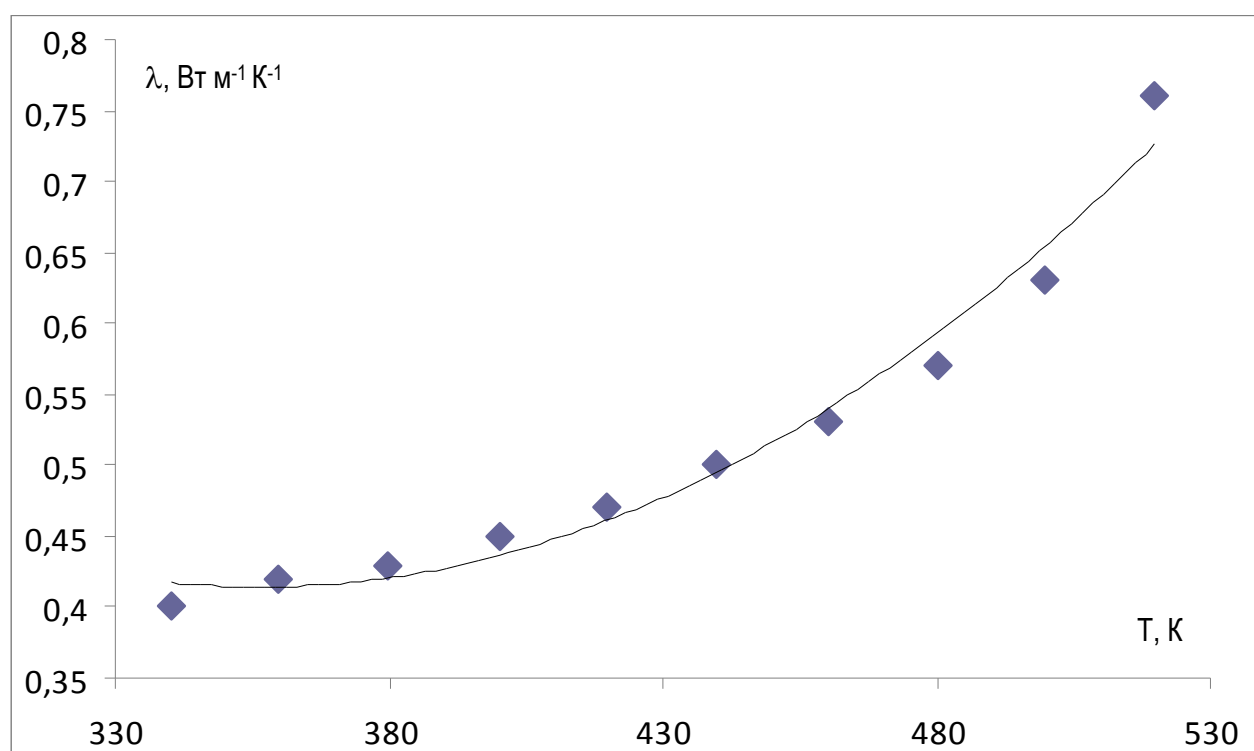


Рис.10. Температурная зависимость теплопроводности расплава  $\text{TeO}_2$  + 12 молярных процентов  $\text{Cz}_2\text{O}$ .  $\lambda = 0,3 + 9,87 \times 10^{-4}T$ .

## 5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lindqvist O. Acta. Chem.Scand.,1968, V. 22, P.977.
2. Лесайживич Д. Кристю., 1961, Т.16, С.345.
3. Земан Д. Крист.1968, Т.24, С.319.
4. Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г. *TBT*, 28, в.1, (1990), С.185.
5. Magomedov Ja.B., Bilalov A.R., Alieva Kh. O. Proceedings of the 5-th Asian thermophysical properties conference. 1998, Seoul, Korea, P.155.
6. Магомедов Я Б., Гаджиев Г.Г., Билалов А.Р. В сб. « Микро – и нанотехнологии в электронике» по материалам VI Международной научно-технической конференции. 2014, Нальчик, С. 21.
7. Магомедов Я.Б., Гаджиев Г.Г., Билалов А.Р. «Температурная зависимость теплопроводности стекол системы  $\text{TeO}_2+\text{Li}_2\text{O}$  и их расплавов». В сб. “Материалы 14-ой Российской крнференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ”, 2014, Казань, С. 346.
8. Магомедов Я.Б., Алиев С.Н, Лугуева Н.В., Айдамиров М.А. *ИТЭ*, в.6, (2003), С. 117.
9. Urban E. Schans, Ann Marshall and Cornelius T. Moynihan, J. of the Amer. Cer. Society, 55, (1972), P. 180.
- 10.Муромцев В. А., Балмаков М.Д., Орлова Г.М. *ФХС*, 7, (1981), С.228.
- 11.Немилов С. В. *ФХС*, 4, (1978), С. 662.