

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего  
профессионального образования  
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет)» (МАИ)**

**На правах рукописи**

**Побережский Сергей Юрьевич**



**«Теплофизические свойства органических жидкостей»**

**Специальность: 01. 04. 14 – теплофизика и теоретическая  
теплотехника**

**Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических  
наук**

**Научный руководитель**

**к.ф.-м.н.**

**Поярков И.В.**

**МОСКВА2015**

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Методы экспресс – диагностики теплофизических свойств растворов.....	8
1.1. Жидкость. Жидкие растворы.....	8
1.2. Переносные свойства, связь между ними.....	11
1.3. Методы регистрации и измерения теплофизических свойств различных жидких растворов .....	13
1.4. Характерные особенности экспресс – диагностики.....	17
1.5. Вопросы радиационно – кондуктивного теплообмена в жидких средах.....	19
1.6. Оценка влияния излучения на результаты кратковременных измерений теплофизических характеристик полупроницаемых сред.....	20
Глава 2. Приборы и материалы, используемые для исследования.....	23
2.1. Тонкоплёночные датчики сопротивления.....	23
2.2. Нитевидные зонды.....	30
2.3. Компенсационная схема измерения теплофизических свойств жидкостей.....	31
2.4. Генератор измерительных импульсов.....	36
2.5. Порядок проведения исследований.....	42
2.6. Погрешности теплофизических измерений.....	44
2.6.1. Погрешность, вносимая измерительными датчиками.....	44
2.6.2. Методическая погрешность.....	47
2.6.3. Погрешность практических измерений.....	55
Глава 3. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик жидкостей.....	58
3.1 Диэлектрические жидкости.....	58

3.2. Бинарные растворы.....	64
3.2.1. Экспериментальные исследования.....	64
3.2.2. Тепловая активность.....	69
3.2.3. Расчет теплопроводности органических жидкостей.....	71
3.3. Тройные растворы.....	74
3.4. Исследование теплофизических свойств фторуглеродов.....	81
3.5. Прогнозирование теплофизических свойств растворов.....	86
Заключение.....	95
Литература.....	96
Приложения.....	104
Приложение 1 .....	104
Приложение 2 .....	106
Приложение 3 .....	109
Приложение 4 .....	117

## Введение

В современном динамично развивающемся мире актуальным является создание и исследование свойств жидкостей, которые находят широкое применение в различных отраслях науки и техники. В авиационной и космической технике в качестве компонентов ракетного топлива и присадок к нему, в энергетических установках в качестве хладагента в теплообменниках, широко используются в строительстве, как растворители, в фармацевтике и фармакологии, как компоненты медикаментов.

### **Актуальность работы.**

Необходимость создания современных изделий и установок требует постоянного совершенствования экспериментальных и теоретических исследований теплофизических свойств жидкостей. Одной из первоочередных задач техники теплофизических исследований – это повышение их точности при уменьшении затрат. Способы получения достоверной, оперативной информации о теплофизических свойствах различных веществ в первую очередь связаны с использованием нестационарных экспрес-методов измерений температуры на начальном этапе теплообмена. Данный этап, классифицируется как режим иррегулярного теплового режима, даёт возможность существенно сократить время регистрации измерений температуры до предельно малых значений. На практике оно составляет  $\sim 10^{-4} c$ . Использование иррегулярного теплового режима является предпочтительным и перспективным, так как зондирование исследуемого объекта производится одиночными импульсами, оказывающими минимум воздействия на систему.

Одним из условий по реализации кратковременных измерений является то, что измерительный зонд должен обладать малой инерционностью, а также совмещает функции источника и приёмника тепла, а так же позволяющим проводить исследования с небольшим количеством вещества. Так как инерционность зонда в основном определяется его собственной теплоёмкостью,

то в модельных задачах возмущение, вносимое собственной теплоёмкостью, является функцией времени измерения и соответственно характеристик зонда, а именно его активного сопротивления, влияющего на точность исследований. В связи с этим в методах кратковременных измерений огромное значение приобретает использование напылённых резистивных элементов.

Поэтому совершенствование метода экспресс-диагностики, основанного на методе иррегулярного теплового режима с использованием высокоомных датчиков для изучения теплофизических свойств органических жидкостей является актуальным.

### **Цели и задачи работы.**

Является исследование теплопроводности и тепловой активности органических чистых и многокомпонентных диэлектрических жидкостей от температуры и концентрации бинарных и тройных растворов.

Для достижения цели необходимо создание экспериментальной установки и разработки методики измерений на ней.

### **Научная новизна**

1. Впервые исследованы более ста совершенно новых диэлектрических растворов органических жидкостей.
2. Получено математическое соотношение для учёта отклонения от аддитивности при расчёте тепловой активности бинарных растворов.
3. Показана нелинейная зависимости теплофизических свойств многокомпонентных жидкостей от концентрации смеси и свойств смеивающихся компонентов в соответствии с классификацией Эвелла.
4. Разработана методика и создан экспериментальный стенд по определению коэффициента теплопроводности и тепловой активности жидкостей с погрешностью не более 3%.

### **Практическая значимость исследования**

1. Полученные результаты исследований имеют наиболее важное значение в тех отраслях промышленности, в которых принципиальным является обеспечение высокого уровня надёжности и эффективности технических устройств и аппаратов, таких как аэрокосмическая отрасль и энергетика, где органические жидкости используются в качестве компонентов топлива или теплоносителя.

2. Прогнозирование тепловой активности бинарных жидкостей позволяет существенно сократить затраты на проведение исследований по созданию современных летательных аппаратов и устройств.
3. Полученная зависимость теплофизических свойств исследуемых тройных жидкостей от концентрации компонентов характеризует сложную природу теплопереноса в средах.
4. Проведенные в данной работе исследования и разработанное на их основе оборудование, методы и средства позволили проводить измерения коэффициента теплопроводности и тепловой активности органических многокомпонентных жидкостей с точностью чистых веществ.

**Предметом исследования** данной работы являются теплофизические свойства органических жидкостей используемых в различных энергетических установках (авиационные и ракетные двигатели, теплообменники и другое оборудование), а также для расчёта тепловых режимов протекающих в них.

#### **Метод исследования**

Импульсный метод – экспериментальный, относительный нестационарный метод горячей (нагретой) нити в стадии иррегулярного теплового режима.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Данные о теплопроводности и тепловой активности органических жидкостей в зависимости от температуры.
2. Соотношения для расчёта тепловой активности бинарных растворов от вида и объёмной концентрации компонентов.
3. Нелинейная зависимость коэффициента теплопроводности бинарной и трехкомпонентной жидкости от вида и концентрации компонентов.
4. Методика и экспериментальный стенд, разработанный на экспресс-методе иррегулярного теплового режима, для изучения теплофизических свойств диэлектрических растворов многокомпонентных органических жидкостей.

#### **Достоверность результатов**

Достоверность подтверждается использованием экспериментального стенда созданного на основе хорошо изученных методах теплофизических исследований,

хорошим согласием результатов, полученных при многократных измерениях с результатами других авторов, а также полученными в ходе аналитических вычислений.

### **Апробация результатов исследования**

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на: X международной конференции – «Авиация и космонавтика – 2011» (г. Москва 13-15 ноября 2011); XII международной конференции – «Авиация и космонавтика – 2013» (г. Москва 13-15 ноября 2013); «Международная школа семинар – 2014. Физика в системе высшего и среднего образования» (г. Москва 23-25 июня 2014); XIII международной конференции – «Авиация и космонавтика – 2014» (г. Москва 13-15 ноября 2014); IX международной теплофизической школы (Октябрь 2014, Душанбе); International scientific and practical conference – Euroscience (Belgorod-Sheffield 2014).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 15 научных работ в виде статей в научно-технических изданиях, 6 из списка ВАК, и тезисов докладов в сборниках конференций.

**Личный вклад** состоит в формулировке основных подходов в постановке экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности и тепловой активности органических жидкостей, разработке и создание необходимого оборудования и устройств, анализе и обобщении полученных данных. Все основные результаты и выводы получены лично автором.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и приложения. Общий объём диссертации – 122 страницы, работа содержит 6 таблиц, 32 рисунка и список литературы из 81 наименований.

## Глава 1. Методы экспресс – диагностики теплофизических свойств растворов

### 1.1. Жидкость. Жидкие растворы

Важной характеристикой вещества является отношение средней потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия к средней кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул -  $\varepsilon$ . Для твердых тел  $\varepsilon \gg 1$ , это приводит к тому, что силы сцепления между молекулами, несмотря на тепловое движение, удерживают молекулы вблизи равновесных положений – твёрдые тела имеют собственный объём и форму. В газах реализуется другой предельный случай:  $\varepsilon \ll 1$ , силы притяжения недостаточны, чтобы удержать молекулы друг возле друга, вследствие чего положения и скорости молекул распределены хаотически. Поэтому газы полностью заполняют сосуд, в котором они находятся, не имея ни собственного объёма, ни формы. Правда, исследования последних лет показали (рентгеноструктурный анализ), что и в газах (плотных) можно говорить о некоторой упорядоченности в расположении ближайших молекул. Что же касается жидкостей, то в них  $\varepsilon \sim 1$ , это приводит к тому, что жидкости имеют определенный объем, но текучи и принимают форму того сосуда, в которой налиты. В расположении молекул жидкости наблюдается ближний порядок, то есть число ближайших соседей молекулы (координационное число) и их расположение в среднем одинаковы для всех молекул [1].

Твердые тела, газы и жидкости отличаются и характером теплового движения молекул в них. Тепловое движение в газах – броуновское движение, в кристаллах – гармонические колебания относительно положения равновесия и редкие перескоки в новое положение равновесия. Движение молекул в жидкостях бывает двух типов:

- 1) активированные (то есть требующие сообщения молекуле энергии активации) одночастичные перемещения, как в кристаллах;

2) многочастичный коллективный эффект, то есть перемещение молекулы вместе со своими ближайшими соседями за счет текучести.

Первый тип движения молекул в жидкостях был рассмотрен Я.И.Френкелем [1]. Согласно его представлениям, тепловое движение атомов или молекул жидкости вдали от критической точки состоит из нерегулярных колебаний со средней частотой

$$\frac{1}{\tau_0}, \quad (1.1)$$

где  $\tau_0$  - время между соседними взаимодействиями, близкой к частотам колебаний атомов в кристаллах, и амплитудой, определяемой размерами “свободного объёма”, представленного данной частице её соседями. Центр колебаний определяется полем соседних частиц и смещается вместе со смещением этих частиц. Поэтому, в отличие от кристаллов, мы имеем дело только с временными и неустойчивыми положениями равновесия. Существует такое среднее время  $\tau$  (время “оседлой жизни”), причем  $\tau \gg \tau_0$ , в течение которого центр колебаний каждой частицы смещается на величину межатомного расстояния. Это есть характерное время, связанное с самодиффузией. Если обозначить через  $r_1$  среднее межатомное расстояние в жидкости, то для коэффициента самодиффузии  $D$  получим:

$$D \sim \frac{r_1^2}{6\tau}. \quad (1.2)$$

В связи с большой плотностью частиц в жидкости и их сильным взаимодействием следует ожидать, что перемещения частиц на расстояние порядка  $r_1$  за время  $\tau$  будут совершаться в виде активированных скачков с преодолением потенциального барьера, разделяющего две возможные области колебаний одной частицы. Тогда характерное время  $\tau$  есть время “оседлой жизни” атома во временном положении равновесия между двумя активированными скачками. Из общих статистических соображений следует:

$$\tau \sim \tau_0 e^{\frac{W}{kT}}, \quad (1.3)$$

где  $W$  – энергия активации.

Таким образом, тепловое движение молекул или атомов в жидкости выглядит как сравнительно редкие перескоки частиц из одних временных положений равновесия в другие и тепловых колебаний в промежутках между скачками. В случае несферических молекул к этому должны быть добавлены вращения и вращательные качания частиц. Длительность пребывания молекулы во временном положении равновесия сильно зависит от температуры, уменьшаясь с её ростом.

Средний период колебаний молекулы  $\tau_0$  имеет порядок  $10^{-12}$  с. Время  $\tau$  может быть самым различным, но всегда  $\tau \gg \tau_0$ . Для маловязких жидкостей  $\tau \sim 10^{-11}$  с, а для стекол достигает несколько часов или даже суток.

Структура и физические свойства жидкостей в сильнейшей степени зависят от химической индивидуальности образующих ее частиц и от характера и интенсивности сил, действующих между этими частицами. Размеры и форма молекул жидкостей отличаются большим разнообразием, от одноатомных простых жидкостей, состоящих из сферически симметричных бездипольных частиц (сюда относятся сжиженные благородные газы) до белковых молекул, содержащих не одну сотню тысяч атомов. Соответственно этому различными являются и конкретные физические свойства жидкостей. Например, водород в критическом состоянии имеет плотность около  $0,03 \text{ г/см}^3$ , плотность гелия примерно  $0,07 \text{ г/см}^3$ , а при нормальных условиях равны соответственно  $0,09 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$  и  $0,18 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ , что, как видим различие на три порядка. Плотность ртути при нормальных условиях  $13,6 \text{ г/см}^3$ , а плотность расплавленных металлов порядка нескольких  $\text{г/см}^3$ . Характеристика, присущая только жидкостям, – коэффициент поверхностного натяжения – меняется в довольно широких пределах - от  $0,02 \text{ Н/м}$  у спирта до  $0,5 \text{ Н/м}$  у ртути. У расплавленных металлов коэффициент поверхностного натяжения  $1,1 - 1,3 \text{ Н/м}$ . Но более всего жидкости различаются по вязкости. Жидкий водород имеет вязкость  $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , вода — около  $10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , а глицерин при  $0^\circ\text{C}$   $1,2 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При изменении концентрации

вязкость водных растворов глицерина меняется в тысячи раз, в то время как плотность меняется незначительно. Поэтому при проектировании или использовании технических аппаратов и устройств удобнее использовать не отдельные теплофизические характеристики, а их комплексы, например тепловая активность [2], в которой функционально связаны: теплопроводность, теплоёмкость и плотность вещества.

Таким образом, видно, что жидкости очень разнообразны по своим физико-химическим свойствам. Но, если учесть, что большое число явлений в природе (биология, живые организмы) и подавляющее большинство технологических процессов в химической, нефтяной, пищевой и других отраслях промышленности полностью или частично протекает в жидкой фазе, то очевидно, что изучение свойств вещества в жидком состоянии представляет собой важную область физических исследований.

## 1.2. Переносные свойства, связь между ними

Переносные свойства, такие как перенос: массы, импульса, энергии и т. п., очень тесно связаны с понятием термодинамическая сила или вектором удельного потока [2].

Содержательным элементом термодинамики необратимых процессов является утверждение о том, что каждый из удельных потоков является линейной функцией всех термодинамических сил, при этом кинетические коэффициенты иногда называют феноменологическими коэффициентами.

Так для потока массы (закон Фика)

$$\vec{j}_m = -D \cdot \text{grad}(C), \quad (1.4)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, выраженный через длину свободного пробега  $k$  и среднюю скорость теплового движения частиц –  $v$ ,

$$D = \frac{1}{3}kv. \quad (1.5)$$

Закон Фурье определяет тепловой поток  $j_T$ , переданного за счёт теплопроводности через площадку  $S$  за время  $\tau$

$$\vec{j}_T = -\lambda \cdot \text{grad}(T), \quad (1.6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности вещества. Формула (1.6) справедлива для теплопроводности, как в жидких, газообразных, так и в твёрдых телах.

Знак минус в уравнении (1.4), (1.6) обусловлен тем, что перенос количества массы или теплоты всегда осуществляется в сторону уменьшения концентрации или температуры.

Из закона Фурье (1.6) следует, что коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, проходящему через единицу площади поверхности за единицу времени при единичном градиенте температуры. Если у нас в процессе присутствует не одна термодинамическая сила, а например две, то существует связь между коэффициентами переноса, например, закон Соре, который представляет собой отношение термодиффузии к диффузии и записывается, как

$$S_T = \frac{D_{12}^T}{D_{12}}. \quad (1.7)$$

Из литературы известно, что коэффициенты переноса: диффузия, вязкость, теплопроводность связаны между собой [3].

$$\eta = D\rho, \quad (1.8)$$

$$\lambda = \eta \cdot c, \quad (1.9)$$

где  $\rho$  – плотность вещества,  $c$  – удельная теплоёмкость.

Как было сказано выше, жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами, вследствие чего в них сохраняются отдельные черты, как газов, так и твердых тел, то есть жидкость подобна газам и твёрдому телу. Так как коэффициенты переноса связаны между собой, поэтому для определённых переносных свойств можно изучать только одно агрегатное состояние вещества, а другие свойства получить через их связь, которая достаточно хорошо отражена в теории подобия [3].

Диффузионная теплопроводность, описываемая законом Фурье, реально наблюдается в газах. При смешении газов возникает небольшая, но ощутимая

разность температур. Этот процесс существует и в жидкостях, но там он в значительной мере замаскирован теплотой растворения — тепловым эффектом чисто термодинамического (в смысле термостатического) происхождения, появляющимся при смешении.

Необходимо, так же сказать несколько слов о такой характеристике жидкости, как вязкость. Вязкость большинства привычных жидкостей таких, как: вода, спирты, углеводороды при комнатной температуре составляет порядка одного – сантистокса. Следует обратить внимание на то, что размерность кинематической вязкости такая же, как и у коэффициентов диффузии и термодиффузии[3].

$$\vec{P} = -\eta \cdot \text{grad}(v), \quad (1.10)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости связанный с плотностью вещества,

$$\eta = \frac{1}{3} k \nu \rho. \quad (1.11)$$

Изучая различные теплофизические свойства жидкостей и тепловые процессы в жидких средах, необходимо подробнее остановиться, в частности, на жидких растворах. Говоря об исследовании жидких растворов, следует отметить, что это смесь минимум двух жидкостей. Так же важно отметить сложность теплофизических процессов, происходящих в жидких растворах, механизм и динамику течения которых можно наблюдать на примере того, как работают коэффициенты теплопроводности растворов, и на сколькосложна их связь с коэффициентами переноса смеси. Аналогичные трудности возникают, в том числе при переносе массы для смеси газов[4,5].

### **1.3. Методы регистрации и измерения теплофизических свойств различных жидких растворов**

Решение нестационарного уравнения теплопроводности, как известно, содержит информацию о пространственно–временных изменениях температурного поля в исследуемой среде. Нестационарные методы исследования теплофизических характеристик, которые основываются на таких решениях дают

возможность определить не только коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ) и температуропроводность ( $a$ ) среды но также другие величины являющиеся комбинациями названных выше, а именно: объёмную теплоёмкость ( $\rho c = \frac{\lambda}{a}$ ) и тепловую активность ( $\varepsilon = \frac{\lambda}{\sqrt{a}}$ ).

Первостепенным при классификации нестационарных методов является характер изменения температуры от времени. Согласно этой классификации методы подразделяются на методы регулярного и иррегулярного режима [6]. Методы регулярного режима в свою очередь делят на следующие три типа: регулярный режим первого рода, характеризующий нагрев или остывание системы в среде с постоянной температурой, регулярный режим второго рода – нагрев с постоянной скоростью и регулярный режим третьего рода – установившийся периодический процесс.

Отличительной особенностью методов иррегулярного теплового режима является их зависимость от начальных условий, то есть от начального распределения температуры в изучаемой системе. Поэтому в соответствии с граничным условием, определяющим условия теплообмена в исследуемом веществе можно провести классификацию всех возможных методов измерения в стадии иррегулярного теплового режима [7]:

- измерения с граничными условиями первого рода предполагают задание распределения температуры на поверхности исследуемого тела:

$$T_s(t) = f(t). \quad (1.12)$$

- измерения с граничными условиями второго рода требуют задания на поверхности исследуемого тела теплового потока:

$$q_s(t) = \frac{df(t)}{dx}. \quad (1.13)$$

- измерения с граничными условиями третьего рода состоят в задании теплообмена между поверхностью исследуемого тела и окружающей средой по определённому закону, например закону:

$$q_s = \alpha(T_m - T_c), \quad (1.14)$$

где  $T_m$  и  $T_c$  – температуры тела и среды, а  $\alpha$  – коэффициент теплообмена;

- измерения с граничными условиями четвертого рода предполагают равенство температур в плоскости раздела исследуемого тела и среды:

$$T_m(S) = T_c(S). \quad (1.15)$$

и равенства проходящих через эту поверхность тепловых потоков:

$$\lambda_m \frac{dT_m}{dx} = \lambda_c \frac{dT_c}{dx}. \quad (1.16)$$

Наибольшее распространение получили измерения в стадии иррегулярного теплового режима, которые используют граничные условия второго рода. Чаще всего задаётся постоянство теплового потока, воздействующего на поверхность тела, нежели, например, задание контролируемого распределения температуры или теплообмена, который подчиняется определённому закону. Это в первую очередь связано с аппаратным обеспечением эксперимента.

Поскольку в общем виде аналитического решения уравнения теплопроводности не получено, то большую ценность приобретают одномерные задачи с неограниченными или полуограниченными средами. Известно, что для таких модельных задач, использующих граничные условия второго рода, существуют простые аналитические решения [8]. Поэтому такая задача, была положена в основу наших теплофизических измерений, выполненных в стадии иррегулярного теплового режима.

В научной литературе предложены несколько методик теплофизических измерений при иррегулярном тепловом режиме. Наиболее, обстоятельное описание методики дано в статье Хоррокса и Лафлина [9], которая посвящена исследованию жидких полифенолов. В своей статье авторы, дают детальное описание погрешностей эксперимента, влияние стенок измерительной ячейки, влияние конечности длины нити, пренебрежение собственной теплоёмкостью датчика, влияние излучения, и оценивают погрешность измерения в 0.25 %.

Дифференциальный вариант данной методики был предложен И. В. Литвиненко и В. В. Литвиненко [10]. В их разработке наряду с измерительной

ячейкой, имелась так же компенсационная ячейка, которая заполнялась эталонным жидким раствором. В процессе измерения проводился такой подбор параметров мостовой схемы, при которой баланс сохраняется во время всего исследования. Позднее этот метод, получивший название «нуль-метод», использовался для определения теплопроводности тетрахлоридов [11]. При этом питание мостовой схемы осуществлялось посредством включения переменного тока с частотой 400 Гц, а время включения тока при измерениях составляло около 5 с, при диаметре нити нагревателя 30 мкм.

Метод импульсного разогрева цилиндрического зонда, используемый для определения теплопроводности в основном сыпучих веществ, грунтов, почв, газов нашел свое отражение в целом ряде научных работ, выполненных как отечественными, так и зарубежными исследователями. Так, например импульсное измерение коэффициента тепловой активности, основанное на измерении температуры плоского нагревателя, совмещающего функции источника и приемника тепла было описано в литературе [12] и заняло важное место в практике проведения теплофизического эксперимента.

В целях повышения точности измерений в работе [13] была осуществлена автоматическая запись показаний температуры нагревателя на графический регистратор. Скорость движения диаграммной ленты регистратора была пропорциональна временной зависимости изменения температуры нагревателя. Графическая зависимость на диаграммной ленте представляла собой отрезок прямой, угол наклона которой несет информацию о тепловой активности. Отклонение графика от линейности говорит о том, что граничные условия не выполняются, что позволяет контролировать эксперимент.

В дальнейшем развитие метода, нашло своё отражение и во многих других работах, а именно в плане автоматизации проведения экспериментов [14,15,16]. Как, правило, различие методов регистрации, определяется конструктивными особенностями измерительных датчиков – резистивных элементов и различными типами компенсационных схем. Измерительные датчики бывают, следующих типов: тонкоплёночные – напылённые в виде дорожек или меандра, на подложке,

выполненной из ситала или стеклотексталита. Как правило, датчики такого типа являются высокоомными, что позволяет существенно повысить скорость проводимых измерений и в разы увеличить производительность лабораторной установки. Необходимо отметить, что конструктивно датчики такого типа имеют малые габариты и вес. Они совмещают в себе одновременно функции передатчика(разогревающего импульса) и приёмника сигнала, несущего полезную информацию, об исследуемом образце. Так же обладают высокой точностью измерений, малыми погрешностями, что в итоге существенно повышает достоверность и качество получаемых результатов. Ввиду малого размера позволяют проводить экспериментальные исследования с очень малыми объёмами исследуемых веществ. К недостаткам данного типа измерительных средств можно отнести сложности расчета, в виду очень близкого расположения напыляемых резистивных элементов (дорожек), так как в моменты рассеивания тепла (диссипации) не должно происходить взаимного перекрытия тепловых полей.

Еще одним типом датчиков являются нитевидные зонды [14]. Эти датчики менее производительны, поскольку имеют достаточно не высокое сопротивление, что заметно увеличивает время съёма информации, при этом возрастает вероятность получения менее достоверных результатов, по сравнению с другими типами датчиков. Так же при использовании нитевидных зондов требуется несколько большее количество исследуемого материала.

Можно так же отметить такой тип датчиков, как плёночные, использование, которых не столь удобно, по сравнению с резистивными элементами, перечисленными выше, так как измерительные датчики такого типа обладают такими существенными недостатками, как микро-трещины и даже разрывы плёночного материала (покрытия).

#### **1.4. Характерные особенности экспресс – диагностики**

При проведении исследования теплофизических свойств жидкостей существенными являются затраты на проведение измерений. Для их уменьшения

широко используются экспресс – методы, которые помимо уменьшения времени проведения исследования, так же проводят измерения с небольшим количеством исследуемого вещества и не разрушают его структуру[17].

Методы экспресс – диагностики предполагают:

- существенное уменьшение пространственных областей, в которых проводились измерения;
- значительное сокращение длительности измерения;
- изготовление измерительного элемента в виде малогабаритного зонда;
- повышение частоты съёма информации.

Так же следует отметить ещё одно требование, которое предъявляют к измерениям, относящимся к средствам экспресс – диагностики это: отсутствие специальной измерительной ячейки и поэтому нет необходимости в специальной подготовки раствора жидкости для проведения измерения.

Первостепенным параметром экспресс – диагностики является длительность измерения, которое содержит информацию о теплофизических свойствах исследуемой среды. Уменьшение этого времени до величины порядка  $10^{-4} \div 10^{-2} \text{ с}$ , приводит к уменьшению характеристического размера области, в которой создаётся температурное поле до величин  $10^{-4} \div 10^{-3} \text{ м}$  [18]. Такие параметры можно достичь, используя методы, в основе которых лежит иррегулярный тепловой режим. В ходе проведения таких измерений кратковременный импульс зондирует исследуемую среду, оказывая на неё минимальное воздействие. В виду малого времени действия импульса, зондирование можно осуществлять с достаточно большой частотой, которая выбирается исходя из условия, чтобы в паузе, возникающей между соседними импульсами, подводимое тепло рассеялось полностью. Данная особенность измерений позволяет, обеспечивать их многократную воспроизводимость в течение достаточно небольшого промежутка времени, что имеет огромное значение с точки зрения обеспечения их метрологических показателей (достоверность, воспроизводимость и малая погрешность [18]), а так же дают возможность исследовать свойства жидких веществ и их жидких растворов в

малых объёмах и тонких слоях. Применительно к проблеме изучения молекулярных характеристик переноса сред слабо поглощающих тепловое излучение последнее обстоятельство имеет весьма принципиальное значение [19].

Все эти факторы определяют высокий уровень производительности экспериментальной установки, но так же обладает, и рядом существенных недостатков, которые выражаются: различными конструктивными недоработками комплексов измерительной аппаратуры (как, например, большие габариты и вес), а так же высоким уровнем погрешностей измерения [18], что в целом составляет достаточно большой массив отрицательных характеристик.

### **1.5. Вопросы радиационно – кондуктивного теплообмена в жидких средах**

Говоря о радиационно – кондуктивном теплообмене необходимо отметить, что теплообмен подобного рода, присутствует всегда, так как тепловое излучение исходит практически от любых нагретых тел и предметов. Так же оно имеет место в момент генерирования измерительным датчиком зондирующего и измерительного импульса, однако стоит отметить, что поскольку измерительные импульсы очень не продолжительны по своей длительности, то следовательно тепловое поле, во-первых локализуется в очень ограниченной области, а именно в тонких слоях прилегающих к измерительному элементу, а во вторых, при условии окружающих температур близких к комнатным, можно считать пренебрежимо малым, поэтому радиационно – кондуктивный теплообмен может являться определяющим фактором, вносящим существенные искажения в получаемые результаты исследований, а так же вносить дополнительный вклад в погрешности проводимых измерений [20].

В общем случае результирующий тепловой поток  $\vec{q}$  в среде будет складываться из потока, вызванного кондуктивной то есть молекулярной теплопроводностью  $\vec{q}_m = -\lambda_m \cdot grad(T)$ , где  $\lambda_m$  – молекулярная теплопроводность и лучистого (радиационного) потока  $\vec{q}_r$ :

$$\vec{q} = -\lambda_m \cdot \text{grad}(T) + \vec{q}_r. \quad (1.17)$$

С одной стороны радиационный перенос тепла существенно усложняет процедуру нахождения температурных полей, которые в частности, реализуются в процессе измерения теплопроводности, а с другой стороны, пренебрежение им или неточности при его учёте может являться источником погрешности в определении молекулярной теплопроводности. На практике, в экспериментах определяется некоторое эффективное значение теплопроводности, в меньшей или большей степени отличное от истинной молекулярной теплопроводности, которая обусловлена внутренней молекулярной структурой вещества или раствора. Первыми, кто обратил внимание на это обстоятельство, были Ф. Кейс и Д.Санделл [21], которые связали имеющийся разброс данных по теплопроводности с влиянием излучения. В дальнейшем теоретическое изучение этого вопроса применительно к обратным задачам теплопроводности нашло отражение в работах Ю. А. Сурикова [22], Б. Келлета [23], Л. Генселя [24]. Стационарный перенос тепла в плоском слое «серой» среды, которая характеризуется независимостью коэффициента поглощения от частоты, был рассмотрен Г. Польшцем в его научном труде [25] и В. Н. Андриановым [26]. Л. П. Филиппов, исследовавший задачу с плоским слоем, рассмотрел предельные случаи сильного и слабого поглощения [27]. Радиационно – кондуктивный теплообмен был подробно рассмотрен в труде [28] применительно к нестационарному методу нагретой нити.

### **1.6. Оценка влияния излучения на результаты кратковременных измерений теплофизических характеристик полупроницаемых сред**

Корректный расчёт теплообмена в тепловых устройствах и изделиях авиационно-космической техники требуют знания истинных характеристик переноса тепла не искажённых излучением. В месте с тем база данных по теплофизическим характеристикам, базирующаяся на экспериментальных исследованиях зачастую недостаточно достоверна. В области повышенных

температур данные по теплопроводности полупрозрачных сред, полученные различными методами могут отличаться на 50% и более.

Если ставить задачу определения в теплофизическом эксперименте истинных, не искаженных влиянием излучения характеристик переноса то в ее решении возможны три подхода. Первый расчётный, предполагающий количественную оценку радиационной составляющей и ее последующее вычитание из эффективной характеристики переноса. Второй подход предполагает измерение характеристик в условиях оптически толстого слоя, когда возможно градиентное представление радиационного теплового потока [29]. Наконец, третий путь, это проведение измерений в оптически тонких слоях, когда влияние излучения, сведено к контролируемому минимуму [19].

Первый подход не накладывает никаких ограничений на процесс измерения характеристик переноса, но требует точного знания оптических характеристик среды в широком температурном и частотном диапазоне, а также оптические свойства, ограничивающих ее поверхностей. К тому же, стремление к точности численного расчёта существенно увеличивает трудоемкость процедуры вычисления, а использование приближенных методов анализа, в частности «серого» приближения, может привести к погрешностям неприемлемым с точки зрения метрологии.

Второй и третий подходы требуют достаточно специфичных условий: необходимо, чтобы эксперимент удовлетворял асимптотическим приближениям оптически толстого или тонкого слоя, соответственно.

Определение радиационной теплопроводности с помощью формулы Росселанда [27] и ее последующее вычитание из эффективного значения теплопроводности, полученного в условиях оптически толстого слоя также сопряжено со значительными трудностями. В частности, расчет радиационной теплопроводности требует знания коэффициентов поглощения. Радиационная теплопроводность определяется лишь в «сером» приближении и ее рассчитанное значение может существенно отличаться от истинного. Непосредственное измерение радиационной составляющей, базирующееся на визуализации

температурных полей в среде, требует использования специальной оптической аппаратуры и достаточно трудоёмко.

Более предпочтительным представляется третий подход - прямой эксперимент по определению молекулярных характеристик переноса. Его организация требует выполнения единственного, принципиально важного условия: температурное поле, созданное в исследуемой среде должно быть локализовано в пределах оптически тонкого слоя, который был реализован в данной работе.

## Глава 2. Приборы и материалы используемые для исследования

### 2.1. Тонкоплёночные датчики сопротивления

В основе измерения теплопроводности лежит известная модельная задача [14,30], датчик, например нить неограниченной длины и предельно малого радиуса  $r$ , погружен в исследуемую среду. С единицы длины цилиндрической поверхности, параллельно его оси и проходящей через точку среды с координатами  $(x'; y')$ , выделяется в единицу времени постоянный тепловой поток  $q_l$ . Температурное поле вокруг источника тепла с изотермическими поверхностями будет двумерным. Но, в силу симметрии этого поля, достаточно рассмотреть изменение температуры вдоль одной координаты, вдоль радиуса нити. Тогда уравнение в цилиндрических координатах запишется в виде [31]:

$$\frac{dT}{dt} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (2.1)$$

где  $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ ,  $a$  - температуропроводность,  $t$  - время,  $T$  - температура.

Если тепло начинает выделяться в момент подачи импульса напряжения в  $t = 0$ , когда линейный источник тепла и среда имеют нулевую температуру, с учётом граничных и начальных условий  $T(r, t = 0) = 0$ ,  $T(r \rightarrow \infty, t) = 0$  можно записать:

$$T(r, t = 0) = 0$$

$$q_l(r \rightarrow \infty) = 2\pi r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}, \quad T(r \rightarrow \infty, t) = 0$$

$q_l = const$  - постоянная линейная плотность теплового потока с нити,  $\lambda$  - теплопроводность среды.

Решение этой задачи известно [14]:

$$T(r, t) = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{\exp(-u)}{u} du = \frac{q_l}{4\pi\lambda} E\left(-\frac{r^2}{4at}\right), \quad (2.2)$$

где  $E\left(-\frac{r^2}{4at}\right)$  - экспоненциальный интеграл. Разложив данный интеграл в ряд для малых значений параметра  $\frac{r^2}{4at}$ , или, соответственно для больших значений времени, получим[32]:

$$T(r,t) = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \frac{4at}{r^2 e^C}, \quad (2.3)$$

где  $C = 0,577$  – постоянная Эйлера.

Используя выражение (2.3), запишем изменение приращения температуры источника между моментами времени  $t$  и  $t_0$ :

$$\Delta T = \Delta T_t - \Delta T_0 = \frac{q_l}{2\pi(\lambda_1 + \lambda_2)} \ln \left( \frac{t}{t_0} \right). \quad (2.4)$$

Зная приращение температуры, в различные моменты времени, используя соотношение 2.4, мы можем найти разность теплопроводностей.

Если одну из теплопроводностей, например  $\lambda_2$ , принять как неизменную величину (теплопроводность эталонной жидкости), то изменение температуры, вызванное тепловым потоком, позволит определить теплопроводность исследуемого вещества  $\lambda_1$ .

Постоянство теплового потока и изменение температур создаётся с помощью датчиков.

Датчики, используемые в исследованиях, должны удовлетворять большому спектру требований, таких как: механическая прочность, однородность напыления, неизменность сопротивления контактов между металлической плёнкой и токосъёмником, линейностью зависимости сопротивления датчика от температуры, достаточной величиной температурного коэффициента сопротивления,  $\alpha > 10^{-3} \text{град}^{-1}$ , соответствующим омическим сопротивлением резистивной дорожки.

Не соблюдение требований, приводит к появлению погрешностей. Так неравномерность толщины покрытия (отверстия и трещины) приводит к

искажениям температурного поля, которое в теоретической модели сложно учесть заранее. Важной величиной является – величина нестационарного нагрева датчика ( $\Delta T$ ). Совсем нетрудно получить соотношение, которое связывает величину перегрева датчика с его параметрами, а также параметрами электрической схемы. Для случая тепловой активности, [33]

$$\Delta T = \frac{2u^2 ht^{1/2}}{\rho L^2 \sqrt{\pi} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}, \quad (2.5)$$

здесь:  $u$  – напряжение на датчике,  $h$ ,  $L$  – его толщина и длина,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – тепловые активности эталонной и исследуемой жидкости.

Наиболее эффективно при использовании датчиков выбирать максимально возможное напряжение, создаваемое экспериментальной установкой, так как в этом случае реализуется максимальная чувствительность схемы. Именно поэтому при разработке датчика исходят из того, чтобы  $u$  была фиксированная величина, которая определяется характеристиками экспериментальных исследований.

Процесс разработки датчика состоит из следующих операций:

а) Задаётся величина поверхностного сопротивления  $\gamma = \frac{\rho}{h}$ .

Это делают, как правило, для того, чтобы уменьшить погрешность за счёт собственной теплоёмкости плёнки;

б) Выбирается ширина датчика.

При этом на ширину датчика существуют ограничения: снизу она ограничена наличием погрешности за счёт отклонения от одномерности, а сверху – конечной мощностью установки. При меньших значениях толщины сопротивление плёнки в момент разогрева становится нестабильным, и это нарушает линейность сопротивления датчика от температуры;

в) Выбирают необходимый темп нагрева ( $\Delta T$ ) и время разогрева ( $t$ ), исходя из условий физической задачи;

г) Рассчитывают длину датчика, используя при этом выражение: [34]

$$L = \left[ \frac{2ut^{1/2}}{\gamma \Delta T \sqrt{\pi} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right]^{1/2}. \quad (2.6)$$

Датчики, которые мы использовали, были изготовлены в виде металлической плёнки небольшой толщины, нанесённой на диэлектрическую подложку, рисунок 1 (а). Толщина плёнки составляет  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  мкм. Выбор металла определялся, в соответствии со значениями удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления, а также – подверженностью коррозии и механической прочностью. Технологический процесс нанесения на диэлектрические подложки металлических покрытий в большей степени был разработан и описан в работе [35].

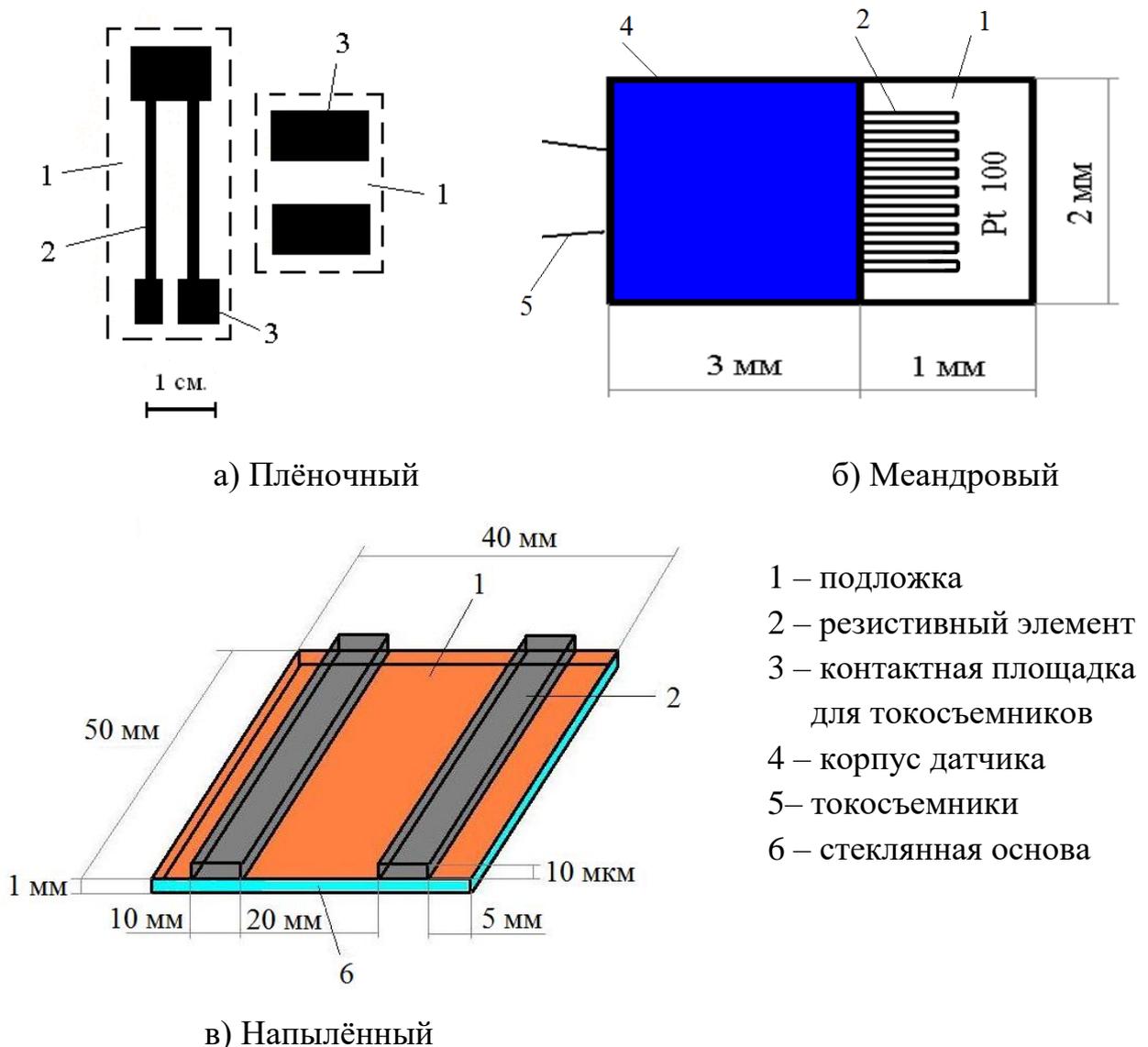


Рисунок 1. Внешний вид датчиков

При проведении отдельных экспериментов в работе также использовались датчики, в которых металлическая плёнка наносилась напылением, что существенно упрощало процедуру изготовления датчика, рисунок 1(в). Конфигурация и геометрический вид резистивной дорожки задавались маской для напыления. Параметры одиночных резистивных дорожек (ширина и длина) были следующими:  $1 \times 10$ ,  $1 \times 20$ ,  $2 \times 10$ ,  $2 \times 20$ ,  $0,01 \times 20$ ,  $0,005 \times 10$  мм. Поверхностное сопротивление напылений составляло  $\gamma = 5 \div 50 \text{ Ом}$ . На концах резистивных дорожек напылялись контактные площадки (медь, серебро), к которым припаивались токосъёмники. На подложке, как правило, располагалось несколько дорожек, рисунок 1(б). По использованию пар металлизация-подложка датчики подразделялись на: никель–ситалл, никель–стекло, алюминий–стекло, алюминий–ситалл. Конструктивно представленные датчики различаются: материалом из которого выполнена подложка, а так же конфигурацией (рисунком) и толщиной напыления, измерительных (рабочих) поверхностей, от которой напрямую зависят такие важнейшие характеристики теплофизического эксперимента, как сопротивление и мощность измерительного датчика. Известно, что чем тоньше напыление дорожек, тем больше сопротивление датчика, за счёт чего возрастает мощность резистивных элементов, вследствие чего повышается температура разогревающего импульса, быстрее происходит прогрев тонких слоёв и зондирование исследуемой жидкости. Всё это ведёт к существенному сокращению времени проведения эксперимента и увеличивает скорость обработки полученных данных. Так как проводя всего одно измерение можно сразу получить целый комплекс искомых теплофизических величин.

В ходе предварительных экспериментов и проверки адекватности методики эксперимента, были выбраны следующие типы датчиков:

- для измерения теплопроводности, датчик с параметрами резистивной дорожки  $20 \times 5 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-5}$  мм;
- для измерения тепловой активности датчик с параметрами резистивной дорожки  $20 \times 2 \times 2 \cdot 10^{-5}$  мм.

При исследовании теплопроводности жидких растворов очень эффективно использование напылённых резистивных элементов достаточно малой ширины, а именно менее  $10^{-5}$  м. Так уже при длительности стационарного нагрева приблизительно  $\sim 1$  мс в жидком растворе формируется температурное поле, которое обладает цилиндрической симметрией. Фактически, это температурное поле, созданное линейным источником, которого содержит информацию о теплопроводности жидкого раствора.

Перед использованием датчиков изучалась зависимость его сопротивления и свойства подложки от температуры. При этом датчик помещался в эталонную жидкость. В качестве, которой мы использовали хорошо изученное вещество толуол.

На рисунке 2 приведён график зависимости сопротивления датчика от температуры, где изображена торирующая кривая, в соответствии со значениями которой осуществлялась юстировка градуировочной шкалы измерительного датчика.

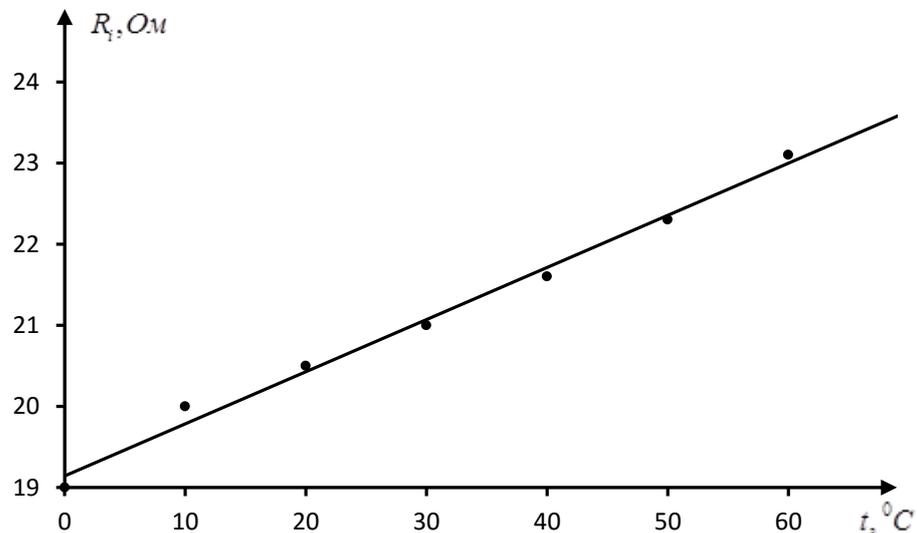


Рисунок 2. Градуировочный график платинового нитевидного датчика

Далее этот датчик использовали в экспериментах по изучению теплофизических свойств различных веществ.

На рисунке 3 приведён график зависимости теплопроводности от температуры парафина. Этот эксперимент заслуживает внимания, поскольку очень интересен в научном плане. Так как он осуществляется в достаточно широком диапазоне температур и проводится на границах плавления и кристаллизации. Подобные фундаментальные исследования позволяют лучше понять механизмы поведения и те глубинные физические процессы, происходящие на молекулярном уровне в различных веществах при их переходе из одной фазы в другую. Например, при переходе из стадии жидкого состояния вещества в твёрдое состояние и обратно [35,36].

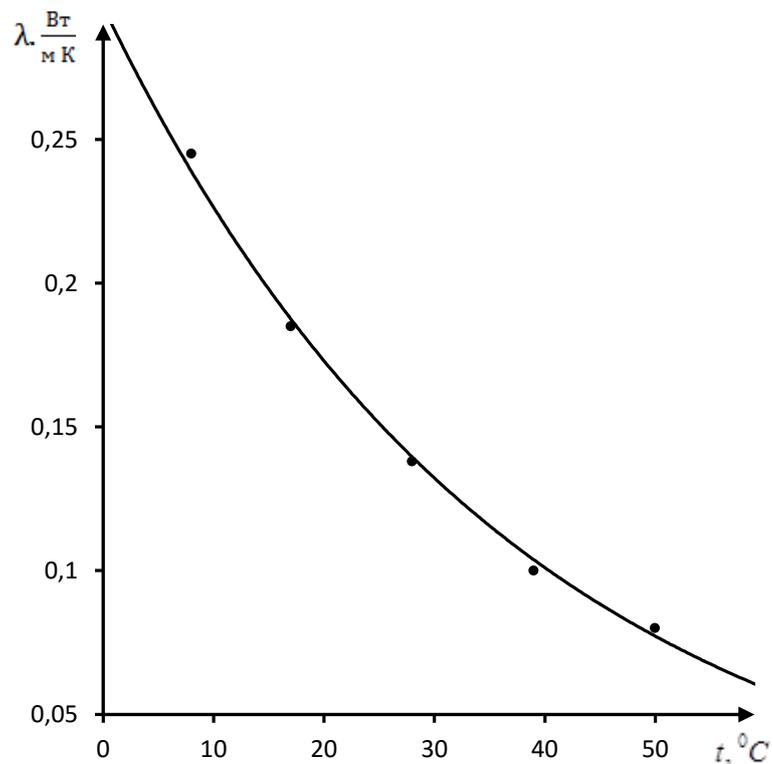


Рисунок 3. График зависимости теплопроводности от температуры плавления и кристаллизации парафина

Для напылённых или плёночных датчиков применяемых нами также проводились торировочные исследования.

Результат исследования тепловой активности подложки из ситалла, показан на рисунке 4.

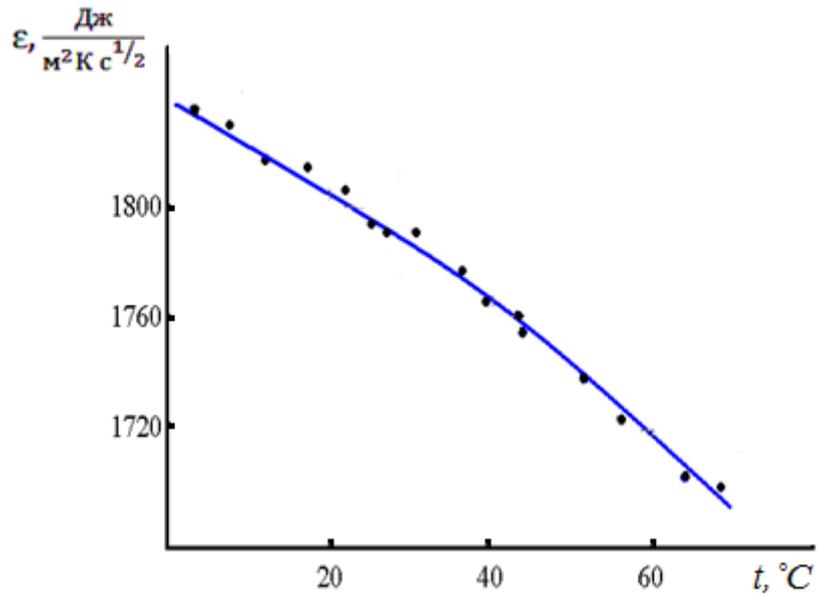
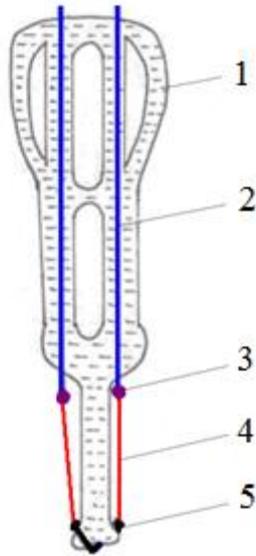


Рисунок 4. Тепловая активность подложки из ситалла

Как можно видеть при увеличении температуры тепловая активность уменьшается.

## 2.2. Нитевидные зонды

При кратковременных измерениях тепловых характеристик ряда жидкостей нами использовались нитевидные зонды, чувствительным элементом в которых служила платиновая нить малого радиуса – 1,2 мкм.[37] Такие нити выпускаются завальцованными и имеют медную оболочку порядка ( $\approx 25$  мкм). Зонды мы изготавливали следующим образом, вначале завальцованная нить размещалась на специальной стеклянной основе и к ее концам подпаивались токоподводы, места подпайки и контакта нити со стеклянной основой покрывались парафином, после чего система на несколько минут погружалась в азотную кислоту, для стравливания меди с открытых участков. После промывания в ацетоне, зонд помещался в толуол для растворения парафина. Общая длина активных участков нити составляла приблизительно  $\approx 15$  см. Не стравленные участки вследствие упругости на изгиб обеспечивали натяжение активных участков (рисунок 5).



- 1 – стеклянная основа,
- 2 – токопроводящий провод,
- 3 – место подпайки,
- 4 – платиновая нить,
- 5 – не стравленный участок

Рисунок 5. Нитевидный зонд.

Также в экспериментах по исследованию жидких растворов использовались зонды и с более толстыми, соответственно, механически более прочными нитями, изготовленными из вольфрама (5 и 8 мкм) и из платины (5 мкм).

### 2.3. Компенсационная схема измерения теплофизических свойств жидкостей

Очень важным, и безусловно полезным приёмом, который существенным образом облегчает процедуру относительных измерений, и в значительной степени повышающим их чувствительность и точность, является использование компенсационной схемы. Данная схема при измерениях в стадии иррегулярного теплового режима была рассмотрена в работах [11,38], для измерений теплопроводности и тепловой активности.

Если рассмотреть компенсационную схему, представленную на рисунке б, то видно, что в мост включены два зонда – измерительный, с начальным сопротивлением  $-R_{i0}$  и компенсационный  $-R_{R0}$ .

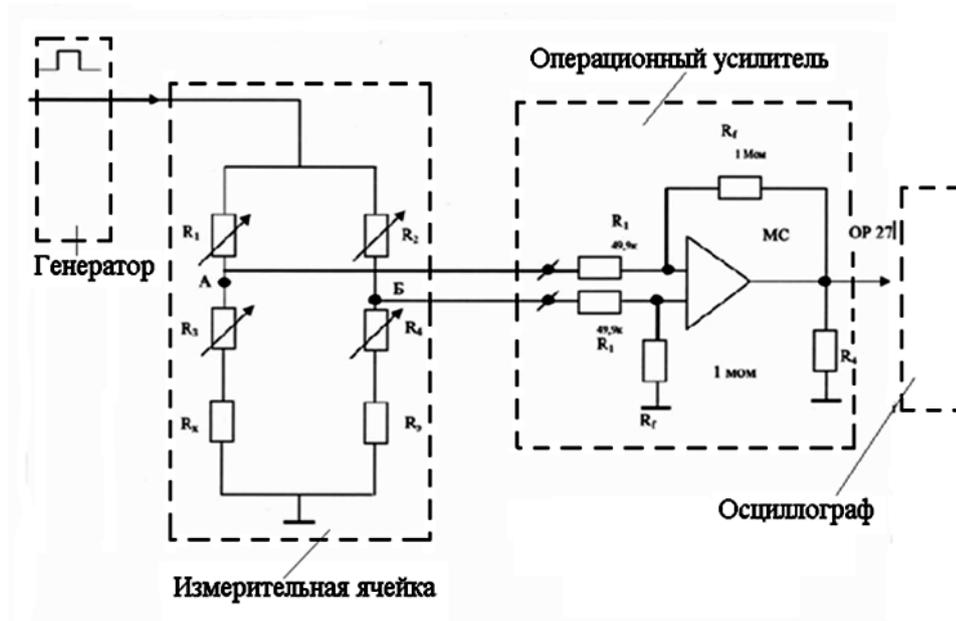


Рисунок 6. Мостовая схема

Когда на мост в исходный момент времени подается напряжение  $u_0$ , зонды нагреваются и их сопротивления изменяются, электрический сигнал с измерительных точек моста А и Б будет равен:

$$U = U_0 \left( \frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_{i0}} - \frac{R_2}{R_2 + R_4 + R_{k0}} - \frac{R_1 \delta R_i}{(R_1 + R_3 + R_{i0})^2} + \right. \\ \left. + \frac{R_2 \delta R_k}{(R_2 + R_4 + R_{k0})^2} + \frac{R_1 \delta R_i^2}{(R_1 + R_3 + R_{i0})^3} - \frac{R_2 \delta R_k^2}{(R_2 + R_4 + R_{k0})^3} + \dots \right), \quad (2.7)$$

где  $R_1, R_2, R_3$  – сопротивления плеч моста, а  $\delta R_i$  – отклонение.

Если мост предварительно будет сбалансирован на начальные сопротивления, что соответствует условию,

$$\frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_{i0}} = \frac{R_2}{R_2 + R_4 + R_{k0}}. \quad (2.8)$$

выражение (2.7) можно преобразовать к следующему виду [39]:

$$U(t) = \frac{U_0 R_1^2}{(R_1 + R_3 + R_{i0})^2} \left\{ \left[ -\frac{\delta R_i(t)}{R_1} + \frac{\delta R_k(t)}{R_2} + \frac{R_1}{R_1 + R_3 + R_{i0}} \left[ \left( \frac{\delta R_i(t)}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{\delta R_k(t)}{R_2} \right)^2 \right] + \dots + \frac{R_1}{(n-1)!(R_1 + R_3 + R_{i0})^{n-1}} \left[ \left( \frac{\delta R_i(t)}{R_1} \right)^n - \left( \frac{\delta R_k(t)}{R_2} \right)^n \right] \right\}. \quad (2.9)$$

Тогда, при:

$$\frac{\delta R_i(t)}{R_1} = \frac{\delta R_k(t)}{R_2} \quad (2.10)$$

переменный сигнал будет скомпенсирован во времени. Условие (2.10) называется компенсацией переменной составляющей сигнала или просто – компенсацией, а выражение (2.8) балансом на начальные сопротивления или – балансом.[33]

При этом необходимо отметить, что компенсация осуществляется не только для первых членов разложения (2.9), но и для всех последующих. Предполагая, что функциональная зависимость нарастания температуры зондов должна быть одинаковой, то есть  $\delta R(t) = \left( \frac{dR}{dt} \right) T(t)$ , видно, что компенсация может быть осуществима, только лишь для случая:

$$T_i(t) = k T_k(t), \quad (2.11)$$

где  $k$  – постоянный коэффициент.

Используя (2.8) и (2.10) можно получить выражение для тепловой активности и теплопроводности исследуемого вещества:

$$\varepsilon = \left[ \varepsilon_{(эм)} + \varepsilon_0 \right] \left[ \frac{R_{I(эм)}}{R_1} \right]^3 - \varepsilon_0, \quad (2.12)$$

$$\lambda = \left[ \lambda_{(эм)} + \lambda_0 \right] \left[ \frac{R_{I(эм)}}{R_1} \right]^3 - \lambda_0, \quad (2.13)$$

где  $\varepsilon_0, \lambda_0$  – тепловая активность и теплопроводность подложки, или, в общем случае, той среды, которая граничит с исследуемым жидким раствором.

Соотношения, которые приведены выше, определяют тепловую активность и теплопроводность исследуемой жидкости при условии, что её температура совпадает с температурой эталонного жидкого раствора, что легко реализуется в компенсационной схеме.

Отмечая следующий шаг применения компенсационной схемы, можно сказать, что он состоит в её использовании для проведения температурных измерений. Измерительный зонд, контактирующий с жидкостью, в этом случае находится в термостате, температура которого в ходе измерений изменяется, а условия в цепи компенсационного зонда и его ячейке по-прежнему остаются неизменными. При этом измерение предполагает периодическое осуществление компенсации мостовой схемы в процессе нагрева. В работе [34] было показано, что расчётное соотношение, которое определяет искомую теплопроводность жидкого раствора при температуре –  $T$  будет иметь вид:

$$\lambda(T) = \lambda(T_0) \left[ \frac{R_I(T_0)}{R(T)} \right]^3 \frac{R_{i0}(T) \left[ 1 + \frac{2\beta(T - T_0)}{\alpha} \right]}{R_{i0}(T_0)}, \quad (2.14)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  коэффициенты при линейном и квадратичном членах зависимости сопротивления от температуры зонда.

Необходимо сказать, что наиболее удобно тепловые характеристики исследуемого жидкого раствора сопоставлять с опорным значением эталонной жидкости. При этом нетрудно увидеть, что соотношение для расчёта теплопроводности и тепловой активности в этом случае приобретает следующий вид:

$$\lambda(T) = (\lambda(T_0)_{эм} + \lambda_0(T_0)) \left[ \frac{R_I(T_0)_{эм}}{R_I(T)} \right]^3 \frac{R_{i0}(T) \left[ 1 + \frac{2\beta(T - T_0)}{\alpha} \right]}{R_{i0}(T_0)} - \lambda_0(T), \quad (2.15)$$

$$\varepsilon(T) = (\varepsilon(T_0)_{эм} + \varepsilon_0(T_0)) \left[ \frac{R_I(T_0)_{эм}}{R_I(T)} \right]^3 \frac{R_{i0}(T) \left[ 1 + \frac{2\beta(T - T_0)}{\alpha} \right]}{R_{i0}(T_0)} - \varepsilon_0(T), \quad (2.16)$$

где  $\lambda_{(T_0)эм}$  и  $\varepsilon_{(T_0)эм}$  – теплопроводность и тепловая активность эталонной жидкости.

Следует отметить, что компенсационная методика температурных измерений очень удобна и высокопроизводительна. Даже самая трудоёмкая её часть, такая как – осуществление компенсации, на практике требуется совсем немного времени. При этом регистрация  $R_I$  и  $R_{i(T)}$  в момент баланса на начальные сопротивления и компенсации переменных сигналов определяет, как измеряемую теплофизическую характеристику, так и температуру жидкого раствора в окрестности резистивного элемента [40,41].

Большой интерес представляет вопрос о разрешающей способности компенсационной схемы. Дифференцируя (2.12) и (2.13) по единственному измеряемому параметру  $-R_I$  при использовании компенсационной схемы, и переходя к относительным величинам, мы получим:

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = \varepsilon \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon}{\varepsilon} \frac{\delta R_I}{R_I}. \quad (2.17)$$

$$\frac{\delta \lambda}{\lambda} = \varepsilon \frac{\lambda_0 + \lambda}{\lambda} \frac{\delta R_I}{R_I}. \quad (2.18)$$

где  $\delta R_I$  – это неопределённость компенсации в выбранном временном интервале.

Учитывая, что измерение сопротивления является одним из наиболее точных электрических измерениях, то неопределённость в компенсации, определяющая разрешение по  $\varepsilon$  и  $\lambda$ , является, по существу, следствием недостоверности выполнения граничных условий и нелинейности уравнения теплопроводности в реальной физической модели, по сравнению с идеализированной. В то время, как если бы эти модели были полностью справедливы, то разрешение по  $\varepsilon$  и  $\lambda$  определялось бы лишь порогом чувствительности при измерении сопротивления  $R_I$  [13].

Нетрудно заметить, что при заданной величине нагрева резистивного элемента  $-\delta T$ , сопротивление зонда будет зависеть от длины его активной части

для плоского зонда:

$$L = \frac{e}{\delta T^{3/2}} \frac{2\sqrt{ht}^{1/2}}{\alpha\sqrt{\rho\epsilon\pi}^{1/2}}, \quad (2.19)$$

для линейного зонда:

$$L = \frac{e}{\delta T^{3/2}} \frac{r_0\sqrt{\frac{4at}{r_0^2 e^c}}}{\alpha\sqrt{\rho\lambda}}. \quad (2.20)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление его материала,  $ah$  и  $r_0$ , это соответственно толщина и радиуса резистивного элемента.

Важно отметить, что длина  $L$  измерительного зонда зависит от характеристического размера. Как показывают расчёты, при использовании, например, нитяного зонда с радиусом 50 мкм при уровне полезного сигнала в  $10^{-2}$  В, для проведения измерений с максимальным импульсным перегревом в 0,1К нам потребуется применение измерительного зонда длиной более 10 м. Понятно, что изготовление таких зондов, конечно же невозможно. Однако использование малоинерционных резистивных элементов даёт существенный выигрыш в их длине. Особенно заметен он становится при применении напылённых элементов, которые обладают очень малой толщиной  $\sim 100 \text{ \AA}$ .

#### 2.4. Генератор измерительных импульсов

Выше мы затронули вопрос о времени подачи необходимого напряжения для нагрева датчика и снятия с его помощью электрических параметров, это осуществлялось генератором измерительных импульсов.

В своих исследованиях мы использовали генерирующее устройство, которое обеспечивает создание прямоугольного импульса напряжений на измерительном зонде ( $R_i$ ) мостовой измерительной схемы, предназначенной для регистрации его температуры. Разработка схемы, а также проектирование и создание действующей модели генератора, являлась одним из ключевых направлений данной работы, структурная схема которого приведена, на рисунке 7 [42].

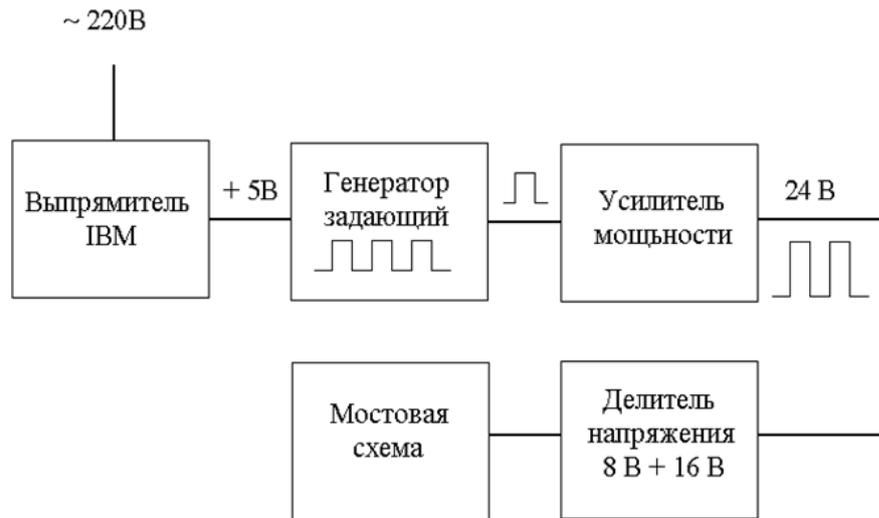


Рисунок 7. Структурная схема генератора измерительных импульсов.

С точки зрения используемой методики, генерирующее устройство должно удовлетворять следующим требованиям:

- регулируемой длительностью импульса;
- достаточно высоким регулируемым напряжением;
- малым внутренним сопротивлением, по сравнению с источником внешней нагрузки;
- «развязкой» от земли, т. е. не должен быть заземлён.

Последнее обстоятельство, связано с заземлением одной из точек мостовой схемы. Структурная схема, генератора измерительных импульсов показана на рисунке 7. Генератор измерительных импульсов состоит из выпрямителя, предназначенного для создания постоянного напряжения, необходимого для питания всех элементов схемы. Задающего генератора – являющегося одним из основных, так как именно он создаёт импульсы определённой длительности и скважности. Усилителя мощности предназначенного для усиления и визуализации сигнала, поступающего с мостовой схемы. Делителя напряжения и самой измерительной ячейки, работающей в режиме мостовой схемы.

Стоит отметить, что посредством работы данного генерирующего устройства осуществлялся нагрев нити (при измерении теплопроводности) или меандра (при измерении тепловой активности) измерительного датчика, а также

создавались условия для измерения необходимых теплофизических характеристик исследуемого вещества. Принципиальная схема генератора измерительных импульсов приведена на рисунке 8.

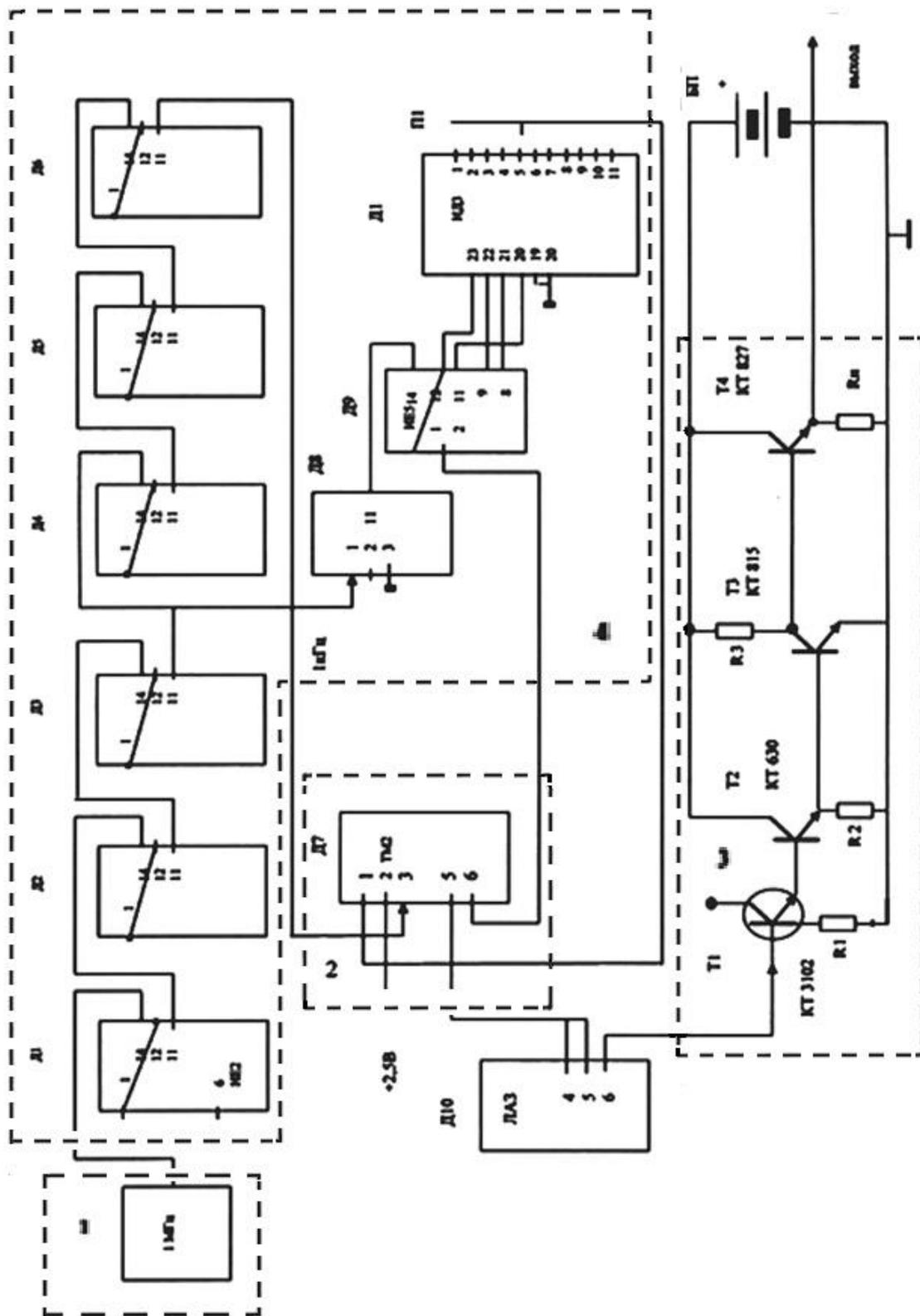


Рисунок 8. Принципиальная схема генератора измерительных импульсов.

В схеме различают следующие основные блоки, это: задающий генератор – 1, формирователь импульсов – 2, и усилитель мощности – 3 и делителя частоты – 4. В первых двух блоках применены цифровые микросхемы МС 155 серии, что позволяет формировать импульсы в большом диапазоне длительностей и скважности, без применения  $RC$ -цепей.[43,44]

Задающий генератор работает на частоте  $1 \text{ МГц}$ , выбор именно такого уровня сигнала обусловлен конструктивными особенностями самого задающего генератора, в состав которого входит кварцевый резонатор, обеспечивающий стабильность генерируемого импульса. Импульсы с задающего генератора поступают на делители частоты  $D1 \dots D6$ . Каждый делитель уменьшает частоту в 10 раз, это делается для того, чтобы получить стабильный низкочастотный сигнал с длительностью импульса, порядка мили секунд, что крайне важно для визуализации сигнала, то есть его корректного представления на осциллографе. В нашем случае для формирования измерительных импульсов используются импульсы с частотой  $1 \text{ Гц}$  и  $1 \text{ кГц}$ .

При поступлении положительного импульса на вход 3 МСД7 делителя частоты на выходе 6 появляется низкий уровень сигнала, поступающий на МСД9, разрешающий счёт импульсов. Эти импульсы (рисунок 8) приходят с МСД3 или с МСД8, когда есть необходимость дополнительного уменьшения частоты. В этот же момент на выходе 5 триггера ( $D7$ ) появляется высокий уровень сигнала, поступающий на инвертор (МСД10), с которого сигнал направляется на усилитель мощности. Для плавного изменения длительности импульсов применяется схема с дешифратором. Со счётчика  $D9$  (ИЕ5) импульсы дешифруются в МСД11 (ИЕ3) и на выходах 1, 2, 3... появляются низкие уровни сигналов, которые соответствуют числу импульсов, поступающих на дешифратор. С помощью переключателя П1 можно управлять триггером  $D7$ . Низкий уровень сигнала, поступающего на вход 1 МСД7, приводит к появлению низкого уровня сигнала на выходе 5. Через 1с процесс повторяется, время повторения задаётся управляющим триггером  $D7$ . Питание цифровой части генератора осуществляется от выпрямителя напряжением  $+5 \text{ В}$ .

Таким образом на выходе 5 МС7 формируется измерительный импульс, который усиливается по мощности в блоке 3, рисунок 8 состоящем из транзисторов  $T1$ ,  $T2$ ,  $T3$ ,  $T4$ . Выходной транзистор  $T4$  работает в режиме эмитерного повторителя. Мощность можно регулировать изменяя сопротивление нагрузки транзистора  $T4$ . Одним из свойств данной схемы является относительная независимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки. Выходное сопротивление эмитерного повторителя:

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{1}{S}, \quad (2.21)$$

где  $S$  – крутизна характеристики транзистора.

В нашем случае с выходного каскада генератора импульсы напряжения подаются на мостовую схему, рисунок 9, где  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  – переменные сопротивления, состоящие из декад сопротивлений с номиналами 0,01 Ом; 0,1 Ом; 1,0 Ом; 10,0 Ом, а также сопротивлений измерительного и компенсационного датчиков.

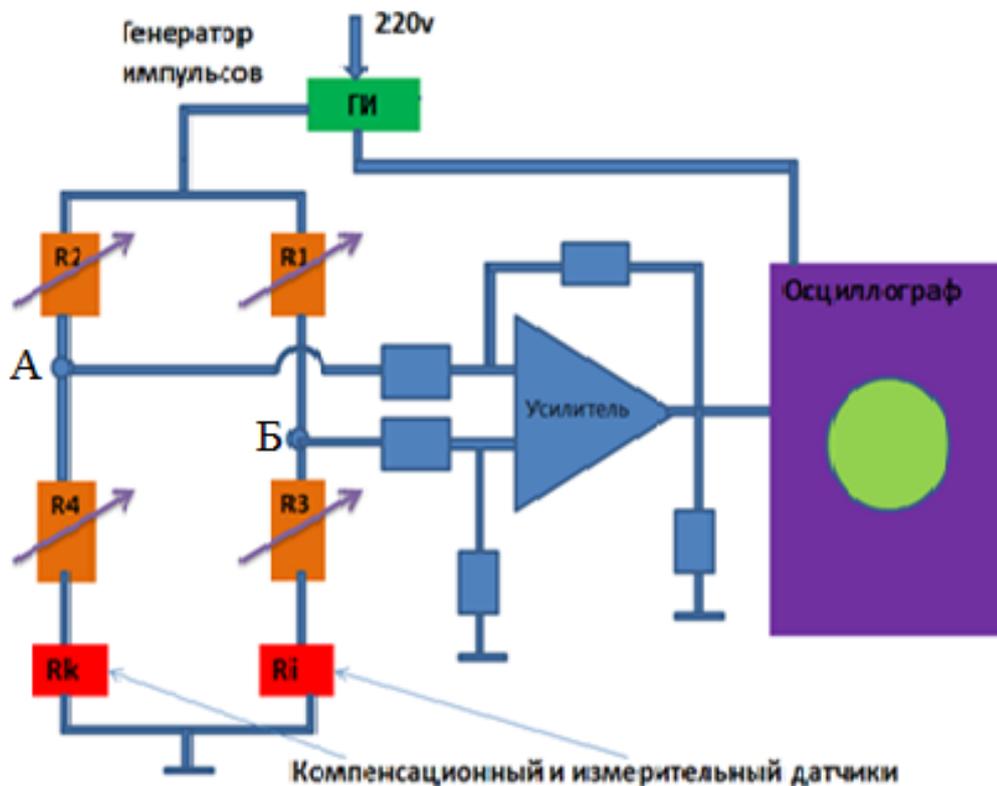


Рисунок 9. Мостовая схема

С точек, А и Б диагоналей моста импульсы подаются на входы операционного усилителя, включённого по схеме дифференциального усилителя. Операционный усилитель относится к малошумящим прецизионным приборам, с напряжением смещения в пределах 100 мВ. Сигнал  $U_o$  на нагрузке  $R_n$  операционного усилителя равен:

$$U_o = (U_2 - U_1) \frac{R_F}{R_1}. \quad (2.22)$$

Манипуляции с сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3, R_4$  позволяют добиться баланса моста.

Сигнал на выходе операционного усилителя равен нулю, при этом измерения показывают, что величина разбалансировки имеет значение равное примерно  $\sim 2$  мВ. Учитывая, что коэффициент усиления операционного усилителя равен в нашем случае 20, следовательно, имеем величину разбалансировки равную приблизительно  $\sim 0,2$  мВ. Эту величину можно отнести к систематической погрешности экспериментальных измерений [18,42].

Необходимо отметить, что при проведении экспериментов представляется целесообразным периодическое тестирование схемы измерения. При тестировании на оба входа операционного усилителя, подаются одинаковые сигналы [45].

В некоторых задачах необходимо использовать большие мощности импульсов – до 200 Вт, что предъявляет дополнительные требования к элементам моста, такие как:

- малая величина минимального шага переменного сопротивления;
- большой диапазон варьирования ( $5 \div 1000$  Ом);
- малая величина температурных изменений их резистивных элементов и, соответственно, их малый температурный коэффициент сопротивления;
- стабильность сопротивлений контактов.

Данные требования трудно достижимы при использовании стандартных потенциометров, поэтому нами были разработаны магазины сопротивлений, работающие совместно с вышеописанным генератором измерительных

импульсов. При этом каждое индивидуальное сопротивление набиралось из пяти декад (100, 10, 1,  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  Ом), где первые три декады выполнялись из сопротивлений МТ, а декады с малым шагом были изготовлены из проволоки специального сплава.

Одной из важнейших составных частей генератора является источник питания, обеспечивающий стабильность напряжения и являющийся малошумящим.

Отметим, что для регистрации сигналов с термодатчиков использовался электронно – цифровой осциллограф DPO 3014 американской фирмы «Tektronix». Необходимо сказать, что запуск осциллографа, который работает в режиме ждущей развертки, синхронизировался с моментом подачи импульса, и опережал его на 0,15 мкс. Регистрация сигналов осуществлялась визуально, при периодической подаче импульсов, на цветном жидкокристаллическом дисплее осциллографа.

## 2.5. Порядок проведения исследований

Экспериментальная методика измерений реализовывалась в варианте «нуль-метода». Суть методики заключается в использовании мостовой схемы, в плечи которой включали два датчика с близкими характеристиками. Один датчик (компенсационный) находился в толуоле, второй – в исследуемой жидкости. При периодической подаче на мост одиночных прямоугольных импульсов напряжения резистивный элемент ( $PЭ$ ) кратковременно нагревался. При этом, с помощью балансных сопротивлений подбирался такой режим токов в ветвях моста, при котором, несмотря на нагрев  $PЭ$ , напряжение (сигнал) на диагонали моста равнялся нулю [39,46].

Преимущество такой методики заключается в том, что используемый для регистрации сигнала осциллограф, используются в качестве индикатора сигнала, а измеряемыми параметрами при относительных измерениях являются сопротивления.

Перед началом исследований измерительный и компенсационный зонды вводятся в контакт с эталонной жидкостью, на них подается периодическая последовательность измерительных прямоугольных импульсов, частота которых выбирается из условий наибольшего удобства визуального наблюдения сигнала на экране осциллографа *DPO 3014*. В паузе между импульсами, когда происходит практически полное исчезновение возникшего температурного поля, осуществляется компенсация переменного сигнала и баланс мостовой схемы. В этот момент регистрируется значение сопротивления, которое мы обозначим, как  $R_{I(эт)}$ .

После этого измерительный зонд приводится в соприкосновение с исследуемым жидким раствором, подаётся сигнал определённой частоты, при этом регистрируется сопротивление  $R_I$ . Далее изменяются условия в сосуде, где находится измерительный зонд. Для изучения влияния температуры на теплофизические характеристики, изменяется температура. При исследовании многокомпонентных систем зонд помещается в соответствующую жидкость, температура которой была постоянна и равна 20 °С.

Отметим, что условия в плече компенсационного зонда и сосуде, в который он был помещён, оставались неизменными, в течение всего времени проведения эксперимента. Так, сосуд был термостатирован при 0 °С, а зонд при этом находился в трансформаторном масле или толуоле.

Необходимо сказать, что длительность измерительных импульсов, составляла порядка 40 мс, а частота их следования 1 Гц. Подобный выбор был обусловлен тем, чтобы в паузе между импульсами происходила полная диссипация выделившегося на измерительном элементе тепла.

Необходимо отметить, что для получения требуемого диапазона температур, в эксперименте были использованы два разных подхода, а именно: при получении низких температур применялся лёд с солью, из расчёта тридцать килограмм соли на сто килограмм льда, а так же смесь снега с солью, из расчёта двадцать три процента соли по отношению к общей массе смеси. В представленной работе для получения высоких температур был использован

термостат мощностью 1,3 кВт производства Германии, фирмы Medingen/Dresden, с абсолютной погрешностью 0,1 °С.

## **2.6. Погрешности теплофизических измерений**

Погрешность проводимых нами экспериментальных исследований можно условно разделить на погрешности, связанные с методикой проведения исследований – методическая погрешность, погрешностью приборов, используемых для регистрации измеряемых величин – приборная погрешность, а так же измерительных зондов – инструментальная погрешность.

Отметим, что основным элементом, нашего исследования, является электрическая компенсационная схема, которая используется в комбинации с различными датчиками.

### **2.6.1. Погрешности, вносимые измерительными датчиками**

В погрешность измерений теплофизических характеристик веществ, влияют погрешности связанные с характеристиками датчика. Условно мы выделим некоторые на наш взгляд погрешности:

- влияние собственной теплоёмкости;
- учёт мерности применяемой теории;
- влияние нелинейности измерительной схемы;
- непостоянство теплового потока;
- нелинейная зависимость омического сопротивления датчика от температуры.

Рассмотрение начнём с влияния тепловых характеристик измерительного элемента.

#### **1) Влияние собственной теплоёмкости:**

– влияние собственной теплоёмкости проявляется в наличии двух составляющих температуры: переменной и постоянной. Так влияние переменной составляющей на регистрируемый электрический сигнал может быть оценено с помощью следующего соотношения:

$$\frac{\delta u}{u} \approx \left[ \frac{\left( \mu_i^2 - \frac{2}{3} \right) l_i^2}{a_i t} - \frac{\left( \mu_R^2 - \frac{2}{3} \right) l_k^2}{a_k t} \right], \quad (2.23)$$

где индексами «i» и «k» обозначены, соответственно, измерительный и компенсационный датчики.

Тогда, как влияние постоянной составляющей – на практике она составляет десятые доли градуса, при использовании компенсационной составляющей фактически несущественно.

## 2) Учёт мерности применяемой теории:

– относительную погрешность в компенсации можно оценить при помощи следующего соотношения:

$$\frac{\delta u}{u} \approx \frac{\left( F_0^{1/2} \right)_i - \left( F_0^{1/2} \right)_k}{\sqrt{\pi}}, \quad (2.24)$$

где  $F_0$  – это специальная функция, определяющая вклад излучения в теплофизические параметры [47].

## 3) Влияние нелинейности измерительной схемы:

– из (2.8) видно, что условие компенсации линейных членов разложения (2.9) с условием компенсации всех последующих совпадает. Отсюда следует, что нелинейность мостовой измерительной схемы погрешности в компенсации не даёт.

## 4) Непостоянство теплового потока:

необходимо отметить, что при  $\left( \begin{matrix} R_{0i} = R_1 \\ R_3 = 0 \end{matrix} \right), \left( \frac{\delta q_0}{q_0} \right)_i = 0$  – это, для случая

компенсационного датчика, а в общем случае,  $\frac{\delta q_0}{q_0} \neq 0$ .

Действительно:  $\left( \frac{\delta q_0}{q_0} \right)_R = \frac{R_2 + R_4 - R_{0k}}{R_2 + R_4 + R_{0k}} \frac{\Delta R_{0k}}{R_{0k}}$

Поскольку имеем  $R_{0k} + R_2 = R_4$ , тогда соответственно:

$$\left( \frac{\delta q_0}{q_0} \right)_k = \frac{2R_2}{R_{0k} + R_4 + R_2} \frac{\Delta R_k}{R_{0k}}. \quad (2.25)$$

Следовательно, на резистивную дорожку измерительного датчика в процессе измерения воздействует постоянный тепловой поток, в то же время для компенсационного датчика переменный тепловой поток, имеет следующий вид:

$$q = q_0 + k_1 \Delta R_k(t). \quad (2.26)$$

Поэтому в нашем случае  $q$  можно представить в виде:

$$q = q_0 + kt^{1/2}, \quad (2.27)$$

где температура компенсационного датчика изменяется по закону:

$$T = \frac{2q_0 t^{1/2}}{\sqrt{\pi}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \left( 1 + \frac{\pi kt^{1/2}}{4 q_0} \right). \quad (2.28)$$

Относительная величина «раскомпенсации» обусловленная непостоянством теплового потока на компенсационном датчике, соответственно, равна:

$$\frac{\delta u}{u} = \frac{\pi kt^{1/2}}{4 q_0} = \frac{\pi \delta q_0}{4 q_0}. \quad (2.29)$$

Используя (2.25) запишем (2.29) в виде:

$$\frac{\delta u}{u} = \frac{\pi}{4} \frac{2R_2}{R_{0k} + R_2 + R_4} \frac{\Delta R_k}{R_{0k}} = \frac{\pi}{2} \frac{R_2}{R_{0k} + R_2 + R_4} \alpha_k(T)_k. \quad (2.30)$$

Отсюда видно, что величина погрешности зависит от степени перегрева датчика  $(T)_k$ .

5) Влияние нелинейности зависимости омического сопротивления датчика от температуры:

если предположить, что зависимость приращения датчика от температуры имеет вид (2.30), то в этом случае условие компенсации приобретает следующий вид:

$$\frac{\alpha_i R_{0i}(T_0)_i + \beta_i R_{0i}(T_0)_i^2}{R_1} = \frac{\alpha_k R_{0k}(T_0)_k + \beta_k R_{0k}(T_0)_k^2}{R_2}. \quad (2.31)$$

А для случая  $(T_0)_i = k(T_0)_k$  (2.31) можно будет записать:

$$\frac{k\alpha_i R_{0i}}{R_1} + \frac{k^2 \beta_i R_{0i} (T_0)_i}{R_2} = \frac{k\alpha_k R_{0k}}{R_1} + \frac{\beta_k R_{0k} (T_0)_k}{R_2}. \quad (2.32)$$

Тогда для осуществления компенсации к записанным выше условиям (2.8), (2.10) необходимо добавить также:

$$\frac{k\beta_i R_{0i}}{R_1} = \frac{\beta_k R_{0k}}{R_2}. \quad (2.33)$$

Отсюда можно легко заметить, что условия (2.10) и (2.33) не могут удовлетворяться одновременно, а последнее возможно лишь для тривиального случая:  $k=1$ ,  $\alpha_i = \alpha_k$ ,  $\beta_i = \beta_k$ , то есть, в случае, когда имеется полная идентичность датчиков – измерительного и компенсационного. Поэтому в общем случае отклонение от линейности зависимости  $R(T_0)$  сильно затрудняет осуществление компенсации.

Погрешности, которые были рассмотрены нами выше, относятся к нагреву измерительного датчика – зонда,

Для уменьшения погрешности в своих экспериментах мы применяли усовершенствованную компенсационную схему, которая позволяла осуществлять регистрацию разностного сигнала с двух датчиков – компенсационного  $R_k$  и измерительного  $R_i$ . Данный метод, существенным образом, уменьшал результирующую погрешность проводимых измерений.

### 2.6.2. Методическая погрешность

Методическую погрешность можно разбить на две группы:

- к первой группе относятся погрешности, которые обусловлены отклонением реальной физической модели от идеализированной;
- ко второй группе можно отнести аппаратные погрешности.

Температуру датчика можно записать в виде:

$$T = T_0 + T_1 + T_2 + O\left(\frac{1}{F_0}\right). \quad (2.34)$$

Отсюда видим, что  $T_0 = \frac{2q_0 t^{1/2}}{\varepsilon_1 \sqrt{\pi}}$  – это решение идеализированной задачи, а

$T_1 = \frac{q_0 (3\mu^2 - 1)l}{3\mu\varepsilon_1 \sqrt{\alpha_2}}$  – постоянная составляющая «возмущения», которая будет обусловлена, собственной теплоёмкостью резистивного элемента,

$T_2 = \frac{q_0 \left( \mu^2 - \frac{2}{3} \right) l^2}{\sqrt{\pi} \varepsilon_1 \alpha_2 t^{1/2}}$  – переменная составляющая «возмущения», а  $O\left(\frac{1}{F_0}\right)$  – это

пренебрежимо малый член.

Вследствие зависимости теплофизических характеристик сред от температуры, причиной погрешности является то, что мы не учитываем нелинейность уравнений теплопроводности, или проще говоря, пренебрегаем ею. Поэтому при оценке этой погрешности мы воспользуемся уравнением:

$$\frac{\delta T}{T} = T \left[ \frac{a}{6} - \beta \left( \frac{\pi}{4} - \frac{1}{3} \right) \right]. \quad (2.35)$$

Отсюда видно, что заданная погрешность  $\frac{\delta T}{T}$  накладывает ограничения на величину перегрева датчика при измерении:

$$T < \frac{\delta T}{T} \left[ \frac{1}{\frac{a}{6} - \beta \left( \frac{\pi}{4} - \frac{1}{3} \right)} \right]. \quad (2.36)$$

Для  $\frac{\delta T}{T} = 0,1 \%$ , при  $|\alpha| = |\beta| = 10^{-3} \text{град}^{-1}$  например,  $T$  составляет  $\sim 3^\circ\text{C}$ .

Далее необходимо отметить то, как влияет на температуру измерительного датчика ограниченность слоя среды, с которой он контактирует. Так задача, решение которой мы используем, предполагает, что теплообмен будет происходить в полуограниченных средах. Также необходимо помнить, что исследуемая среда имеет конечные размеры – толщину, а подложка может рассматриваться как полуограниченная среда, если [14]:

$$\frac{2\sqrt{\pi}\varepsilon_2(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{ierfc} \frac{n}{\sqrt{F_0}} \ll 1. \quad (2.37)$$

индексом «2» здесь обозначены параметры подложки, 1 исследуемая среда, 3 измерительные датчики.

Следует помнить, что  $F_0 = \frac{a_2 t}{L^2}$ , где  $a_2$  – температуропроводность исследуемой среды, а  $L$  – толщина жидкого раствора. Тогда соответствующая относительная погрешность будет равна:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{2\sqrt{\pi}(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)} \operatorname{ierfc} \frac{1}{F_0}. \quad (2.38)$$

Точно также можно оценить погрешность, которая обусловлена ограниченностью толщины подложки или среды, имеющей контакт с исследуемым образцом. Если принять, что  $\varepsilon_1 = 0$  и  $\varepsilon_3 = 0$ , то получим:

$$\frac{\delta T}{T} = \frac{2\sqrt{\pi}}{\varepsilon_2} \operatorname{ierfc} \frac{1}{F_0}. \quad (2.39)$$

Как показывают расчёты, при толщине подложки около 1 мм и слое жидкости более 0,1 мм, данные показатели характерны для экспериментов с жидкими растворами, для длительностей измерений  $\sim 10^{-7}$  с рассмотренные выше погрешности составляют величину не более 0,01%.

Далее переходя к анализу аппаратурных погрешностей, рассмотрим вначале случай мостовой схемы –упрощённой конструкции, которая не предусматривает компенсации переменного сигнала. Отсюда имеем  $R_{0k} = 0$ ,  $R_3 = 0$ . Предполагается, что регистрируемый сигнал при проведении измерений пропорционален температуре датчика  $T$ . Заметим, что членами второго и выше порядков малости в разложении (2.9) можно пренебречь, а это действие служит дополнительным источником погрешности. Тогда для оценки относительной величины названной погрешности будет справедливо следующее выражение:

$$\frac{\delta u}{u} = \frac{\Delta R_i}{R_4 + R_{0i}}, \quad (2.40)$$

а для  $R_4 = R_{0i}$  – данное условие выполнялось в экспериментах, учитывая, что  $\Delta R_i = \alpha R_{0i} T_0$  мы имеем  $\frac{\delta u}{u} = \frac{\alpha T_0}{2}$  и тогда, соответственно, для степени перегрева, при заданной величине погрешности; получаем:

$$T_0 \leq \frac{\delta u}{u} \frac{2}{\alpha}. \quad (2.41)$$

Так, например, для  $\frac{\delta u}{u} = 0,1 \%$  и  $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ ,  $T_0 \leq 1^\circ \text{C}$ .

Погрешность, которую вносит отклонение теплового потока  $q_0$  от своего начального значения, при изменении сопротивления измерительного датчика в процессе его импульсного разогрева оценивается – аналогично. Величина теплового потока при воздействии импульса напряжения выражается, как функция сопротивления измерительного датчика, в виде:

$$q_0 = \frac{u_0 R_i}{(R_4 + R_{0i})^2 S}. \quad (2.42)$$

Если разложить выражение (2.42) в окрестности  $R_{0i}$  и, ограничиваться в разложении линейным членом, для рассматриваемой относительной погрешности, получим следующее выражение:

$$\frac{\delta q_0}{q_0} = \frac{R_4 - R_{0i}}{R_4 + R_{0i}} \frac{\Delta R_i}{R_{0i}}. \quad (2.43)$$

при  $R_4 = R_{0i}$ ,  $\frac{\delta q_0}{q_0} = 0$ , то есть в нашем приближении тепловой поток на измерительном датчике будет постоянным,  $q_0 = \text{const}$ .

Для оценки влияния излучения на результаты измерения молекулярных характеристик переноса используем соотношения [47].

В частности, для относительной погрешности за счёт пренебрежения радиацией при измерении тепловой активности имеем [48]

$$\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{8n^2 \sigma T_0^3 \sqrt{\pi}}{\lambda_c} \frac{f(K_n)}{\varphi} = \frac{8n^2 \sigma T_0^3 \sqrt{\pi}}{\lambda_c} F(\varphi), \quad (2.44)$$

а при измерении теплопроводности:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{2n^2\sigma T_0^3 r_0^2 \pi^2}{\lambda} F(\varphi, F_0). \quad (2.45)$$

Здесь  $\varepsilon$  - тепловая активность,  $n$  - показатель преломления,  $\sigma$  - постоянная Стефана — Больцмана,  $T_0$  - температура датчика,  $\lambda_c$  - молекулярная теплопроводность,  $\varphi$  - коэффициент поглощения,  $f(K_n)$ ,  $F(\varphi)$ ,  $F(\varphi, F_0)$  - специальные функции,  $r_0$  - радиус нити,  $F_0$  - число Фурье.

На рисунке 10 показана функция  $F(\varphi, F_0)$  определяющая в (2.45) вклад излучения в измерения тепловой активности.

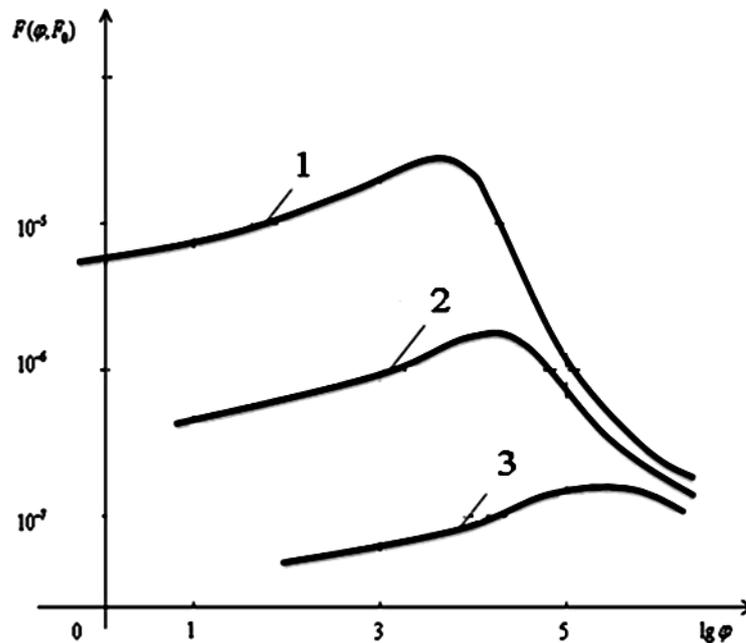


Рисунок 10. Функция  $F(\varphi, F_0)$ , вклад излучения в изменение тепловой активности.

Значения функции приведены при трёх значениях параметра  $\sqrt{at}$  ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ,  $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ) ( $a$  - температуропроводность,  $t$  - время импульса), имеющего смысл длины диффузии температурного поля в среде. Для функции  $F(\varphi)$ , являющейся произведением двух монотонных функций, одна из которых растёт, а другая убывает, характерен максимум. Это обстоятельство позволяет производить оценку по максимальному радиационному вкладу без знания оптических

характеристик исследуемой среды. Например, при  $\sqrt{at} = 10^{-4} м$ , максимальное влияние излучения проявляется при  $\varphi = 10^{-4} м^{-1}$ . Этому значению коэффициента поглощения соответствует максимум функции  $F(\varphi)_{MAX} = 4 \cdot 10^{-4} м$ .

Последняя величина определяет максимальную величину погрешности измерения тепловой активности. В частности для вещества с  $n = 1,2$ ;  $\lambda_c \approx 1 Вт/(м \cdot К)$  при температуре  $1000 К$ , эта погрешность составляет  $\left(\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)_{MAX} = 0,5\%$ .

На рисунке 11 показаны зависимости  $\left(\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)_{MAX}$  от температуры при различных величинах эффективной глубины проникновения температурного поля в исследуемую среду ( $\sqrt{at}$ ).

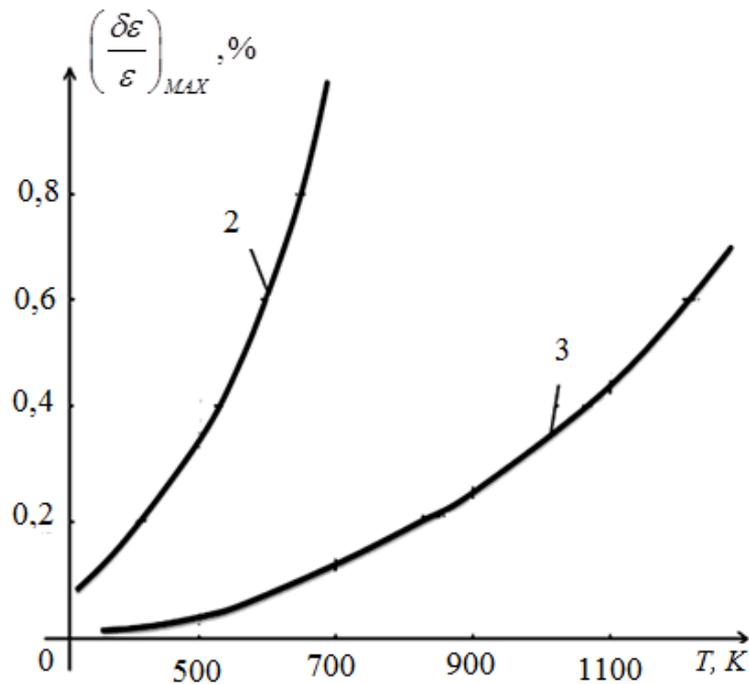


Рисунок 11. Функция  $\left(\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)_{MAX}$ , зависимость максимальной погрешности от температуры.

Анализ графических зависимостей показывает, что если температурное поле в процессе измерения локализовано в малой пространственной области ( $\sqrt{at}$

$=10^{-5} м$ ), то практически для всех диэлектрических веществ ( $\lambda_c > 0,1 \frac{Вт}{(м \cdot К)}$ ) в температурном диапазоне до  $1300К$ , максимальная погрешность измерения тепловой активности веществ за счёт пренебрежения излучением не превышает 1 %. Предполагая, что диапазон изменения коэффициента теплопроводности диэлектрических веществ  $a = 10^{-8} \div 10^{-6} м^2/с$ , для диапазона длительности измерений, соответствующих сформулированным условиям, имеем  $t = 10^{-4} - 10^{-6} с$ .

С увеличением длительности измерений, в частности при  $t \approx 1с$  оценки по максимуму нуждаются в корректировке с привлечением информации по оптическим характеристикам исследуемой среды.

Рассмотрим результаты расчёта применительно к такому объекту как кварцевое стекло ( $a = 0,75 \cdot 10^{-6} м^2/с$ ,  $t = 1с$ ,  $\rho_s = 0,94$ ). Используем следующие исходные данные:

Таблица 1. Оптические характеристики исследуемой среды

$T_0, К$	$\varphi, \frac{1}{м}$	$K_n$	$\lambda_R f(K_n)$	$\lambda_c, \frac{Вт}{(м \cdot К)}$
700	100	0,17	$3 \cdot 10^{-3}$	1,76
1100	125	0,22	$4 \cdot 10^{-3}$	1,98

Сравнение последних двух колонок таблицы 1 показывает, что при оптически тонком полупрозрачном слое расчёт влияния излучения можно проводить в соответствии с формулой (2.44). Однако авторы [38] отмечают, что с учётом полосы непрозрачности в спектре кварцевого стекла (марки КВ), значения, приведённые в таблице 1, могут измениться в несколько раз. Тем не менее, эта неопределённость не изменит существа рассматриваемого вопроса, и предыдущий вывод останется в силе.

Используя (2.44) имеем:

$$\frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} = \begin{cases} 0,79 & \text{при } T_0 = 700K \\ 2,9 & \text{при } T_0 = 1100K \end{cases}$$

Таким образом, результаты измерения в пределах приведенных погрешностей можно классифицировать, как измерения молекулярной тепловой активности. Расчёт погрешности измерений теплопроводности в соответствии с (2.45) корректен при условии  $K_n = \varphi\sqrt{at} \ll 1$ .

Полагая для определённости

$$\varphi^* \sqrt{at} = 0,1. \quad (2.46)$$

можно найти граничное значение коэффициента поглощения ( $\varphi^*$ ), соответствующее условию оптически тонкого слоя [18,19].

Рассмотрим возможности метода кратковременных измерений [7] применительно к классу полупрозрачных материалов. Реально диапазон значений теплопроводности таких материалов составляет  $\lambda = 0,1 \div 10 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а диапазон изменения коэффициентов температуропроводности, при средней объёмной теплоёмкости  $\rho_c = 2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  составляет соответственно  $a = 0,5(10^{-5} \div 10^{-7}) \text{ м}^2/\text{с}$ .

Исходя из типичных условий эксперимента, при которых радиус платиновой проволоки  $r_0 = 10^{-5} \text{ м}$ ,  $t = 1 \text{ с}$ , используя соотношения (2.45) и (2.46), а также графическую зависимость  $F(\varphi)$ , при фиксированных значениях числа Фурье можно определить ту область параметров, в которой кратковременные измерения наиболее эффективны. В частности, на рисунке 12, на диаграмме  $\lg a - \lg \varphi$  заштрихована область для которой погрешность, за счёт влияния излучения при использовании метода, не превышает 1 %. Этой области соответствуют среды с коэффициентом поглощения  $\sim 10 \div 500 \text{ л}/\text{м}$ . Следует отметить, что именно в таких средах, при использовании других методов радиационный перенос может быть выражен в значительной степени; в частности в оптически толстых слоях радиационная теплопроводность может быть соизмерима с молекулярной [14].

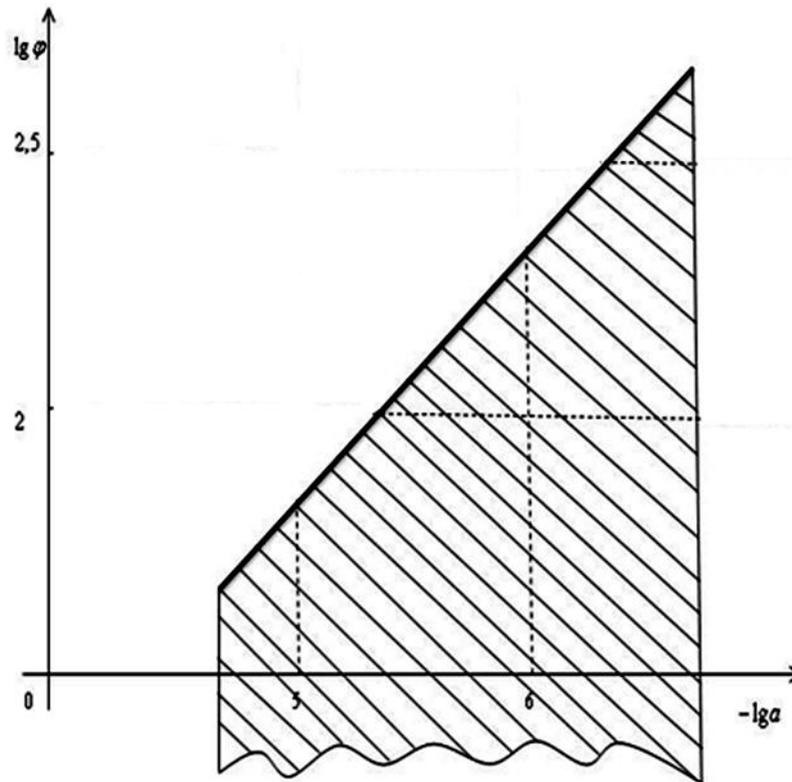


Рисунок 12. Диаграмма  $\lg a - \lg \varphi$ .

Полагая, что время измерения  $t = 5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$  (это время характерно при исследовании жидкостей), а коэффициент температуропроводности  $a \sim 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ , имеем оценочное значение  $\varphi^* = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ .

Для жидкостей с  $0 < \varphi < \varphi^*$  расчёт с помощью (2.45) корректен. Фактически указанный диапазон определяет весь класс слабо поглощающих жидкостей, то есть сред, где радиационный перенос выражен заметным образом.

Используя граничное значение  $\varphi^*$  с помощью (2.45) можно получить следующий важный результат: при кратковременных измерениях ( $t \leq 2 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ ) погрешность в измерении молекулярной теплопроводности (для температур меньше  $500 \text{ K}$ ) за счёт пренебрежения радиацией не превышает  $0,1 \%$ .

### 2.6.3. Погрешность практических измерений

Применение напылённых датчиков даёт целый ряд существенных преимуществ по сравнению с использованием свободных металлических нитей в

нитяных измерительных датчиках. Наиболее важными, из которых являются следующие:

– высокая чувствительность измерительной схемы, которая обусловлена использованием высокого опорного напряжения порядка:  $\sim 100\text{В}$ . При этом следует отметить, что высокая чувствительность измерительной схемы, в сочетании с возможностью хорошей компенсации, позволяет устранить негативное воздействие подложки, удельный вклад которой в общий теплообмен достаточно значительный.

– возможность измерения с малым количеством исследуемого вещества порядка ( $\sim 10^{-2}\text{см}^3$ ), когда жидкий раствор заполняет зазор между покровным стеклом и подложкой датчика.

Если рассматривать применение узких резистивных элементов, которые размещаются на подложках с метрологической точки зрения, то, как и в предыдущем случае, общая погрешность измерений будет иметь две причины, а именно: – аппаратные искажения и несовершенство используемой в расчетах математической модели – идеализации.

Поэтому с точки зрения методики проведения измерений наиболее важное значение имеет выбор оптимальной длительности измерения. Так, например, в рассматриваемом случае этот выбор определяется, в основном, следующими факторами: конечной – не бесконечно малой, шириной источника, ограниченностью его длины, а также его собственной теплоёмкостью.

Анализ (2.17) показывает, что выбор длительности измерения, соответствующей переходу к цилиндрической симметрии температурного поля определяется следующим выражением:

$$\frac{1}{24\sqrt{F_0}} = \eta \ln 4 F_0, \quad (2.47)$$

где  $F_0 = at/l^2$ ,  $l$  – это ширина источника,  $a$  – коэффициент температуроводности материала подложки,  $\eta$  – относительная погрешность измерения, которая обусловлена конечностью ширины источника.

Так при использовании резистивной дорожки шириной  $l = 5 \cdot 10^{-6}$  м, которая размещена на стеклянной подложке, и длительности измерения  $t = 5 \cdot 10^{-2}$  с, рассматриваемая погрешность составляет менее 0,1%.

В итоге можно показать, что погрешность за счёт пренебрежения ограниченностью длины источника составляет менее 0,4%, при длительности измерения  $5 \cdot 10^{-2}$  с, для датчика, который имеет резистивную дорожку длиной 2 см, а шириной 5 мкм.

Погрешность за счёт пренебрежения собственной теплоёмкостью источника составляет не более 0,1% – это можно показать, для рассматриваемого выше датчика, у которого материал напыления – никель.

## Глава 3. Экспериментальные исследования теплофизических характеристик жидкостей

### 3.1. Диэлектрические жидкости

В работе исследовались диэлектрические жидкости, так как они являются не токопроводящими, в результате чего не происходило шунтирование мостовой компенсационной схемы и не допускалось закорачивание измерительного резистивного элемента – датчика. В ходе измерения теплофизических характеристик, один измерительный датчик погружался в различные исследуемые среды: жидкую – раствор, пластичную – парафин. А второй, компенсационный датчик, помещался в сосуд с толуолом или машинным маслом и термостатировался при нуле градусов Цельсия. Важно отметить, что перед проведением очередного комплекса измерений, осуществлялась торировка и юстировка измерительного датчика, по хорошо известной и изученной эталонной жидкости - толуол.

Особое место в ходе проведения научных исследований занимали эксперименты по изучению тепловых свойств и теплофизических характеристик таких веществ, как: бензин, керосин и гептан, которые находят своё применение в качестве топлива двигательных установок различных авиационно-технических и ракетно-космических систем.

Измерения проводились посредством периодической подачи импульсных сигналов с частотой  $0,5 \div 1$  Гц при динамическом нагреве датчика. Температурный диапазон исследования  $20 \div 100$  °С, время проведения исследования одного параметра в указанном температурном диапазоне составляло приблизительно 15 минут. Это время, за которое формировался массив экспериментальных точек в количестве 6–8 штук.

В таблице 2 приведены полученные данные по тепловой активности исследованных нами органических жидкостей, при температуре  $t = 20$  °С, и их отклонение от литературных.

Таблица 2. Тепловая активность органических жидкостей  
(при  $t = 20^\circ \text{C}$ )

№ п / п	Название жидкости, химическая формула [49,50]	Тепловая активность - $\varepsilon$ , Дж/м <sup>2</sup> Кс <sup>1/2</sup>		
		Экспериментальные данные	Литературные данные [51]	Расхождение, %
1	Бензин $C_{2-80}$	420	425	1.19
2	Бензол $C_6H_6$	466,34	461	1,15
3	Гептан $C_7H_{16}$	444,89	438	1,28
4	Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$	488	498,25	2
5	Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$	460	448	2,6
6	Диметилформаид $(CH_3)_2NC(O)H$	439,30	445	1,36
7	1,4-диоксан $C_4H_8O_2$	524,85	535,5	2,09
8	Керосин ТУ 10227-86	437,32	450,2	2,9
9	н-Бутанол $C_4H_9OH$	557,40	542	2,7
10	н-Гексан $C_6H_{14}$	443,85	451	1,8
11	о-Ксилол $C_8H_{10}$ (1,2-диметилбензол)	374,53	382	2,1
12	Циклогексан $C_6H_{12}$	408,41	419,2	2,6
13	Циклогексанон $C_6H_{12}$	476,56	488,7	2,8
14	Толуол $C_7H_8$	454,21	446,7	1,79

Небольшие расхождения между экспериментальными и литературными данными, определяют не высокий процент погрешности измерений, что позволяет с высокой долей вероятности говорить о достаточно высокой точности и качестве

результатов, получаемых в ходе экспериментов, а также сделать заключение о вполне адекватной работе лабораторной установки и достоверности получаемых на ней данных.

В таблице 3 приведён подробный перечень теплофизических характеристик различных органических жидкостей (при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), [51] в соответствии с классификацией по группам Эвелла, которая приводится ниже см. (таблицу 4.).

Таблица 3. Теплофизические характеристики органических жидкостей  
(при  $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Название вещества, химическая формула [49,50]	группа	Тепло-проводность $\lambda$ , Вт/(м*К)	Тепловая активность $\varepsilon$ , Дж/м <sup>2</sup> Кс <sup>1/2</sup> (2.16)
1	2	3	4
Бензол $C_6H_6$	2	0,147	461
Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$	2	0,148	448
н-Бутанол $C_4H_9OH$	2	0,158	542
Изопропиловый спирт (пропанол-2) $CH_3CH(OH)CH_3$	2	0,144	541
Метиловый спирт $CH_3OH$	2	0,204	757,7
Пропиловый спирт (1-пропанол) $C_3H_7OH$	2	0,1585	613
Этанол $C_2H_5OH$	2	0,168	435

1	2	3	4
Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$	3	0,139	498,25
Диметилформаид ( $CH_3$ ) <sub>2</sub> NC(O)H	3	0,193	445
о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$	3	0,134	382
Циклогексанон $C_6H_{12}$	3	0,142	488,7
Дихлорметан $CH_2Cl_2$	4	0,142	337,3
1,1-Дихлорэтэн $C_2H_2Cl_2$	4		
1,2-Дихлорэтэн $C_2H_4Cl_2$	4	0,135	458,7
Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$	4	0,108	347
Хлороформ $CHCl_3$	4	0,118	413,6
Бензин $C_2-80$	5	0,117	425
Гептан $C_7H_{16}$	5	0,129	438
1,4-Диоксан $C_4H_8O_2$ (диэтилен-диоксид)	5	0,161	535,5
Керосин ТУ 10227-86	5	0,118	450,2
н-Гексан $C_6H_{14}$	5	0,125	451
Толуол $C_7H_8$	5	0,139	446,7
Циклогексан $C_6H_{12}$	5	0,124	419,2

Таблица 4. Классификация жидких растворов по Эвеллу

Класс	Характеристика соединений	Пример
1	молекулы связаны водородной связью	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ Дистиллированная вода $H_2O$
2	молекулы содержат активный водород и донор электронов (кислород, азот, фтор)	Бензол $C_6H_6$ Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$ н-Бутанол $C_4H_9OH$
3	молекулы имеют донор электронов, но в них отсутствует активный водород	Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$ Диметилформамид $(CH_3)_2NC(O)H$ о-Ксилол $C_8H_{10}$ (1,2-диметилбензол) Циклогексанон $C_6H_{12}$
4	молекулы содержат активный водород и не содержат донора электронов	Тетрахлорметан $CCl_4$ (четырёххлористый углерод)
5	молекулы без водородных связей	Бензин $C_{2-80}$ Гептан $C_7H_{16}$ 1,4-диоксан $C_4H_8O_2$ Керосин ТУ 10227-86 н-Гексан $C_6H_{14}$ Толуол $C_7H_8$ Циклогексан $C_6H_{12}$

На рисунке 13 представлены графики зависимости теплопроводности ряда органических жидкостей от изменения температуры. Полные исследования отражены в приложении 1. Отметим также, что представленные графические зависимости, объединены и сгруппированы в соответствии с классификацией

жидкостей по Эвеллу (см. таблицу 4). На основании этой таблицы жидкие растворы делятся на пять классов.

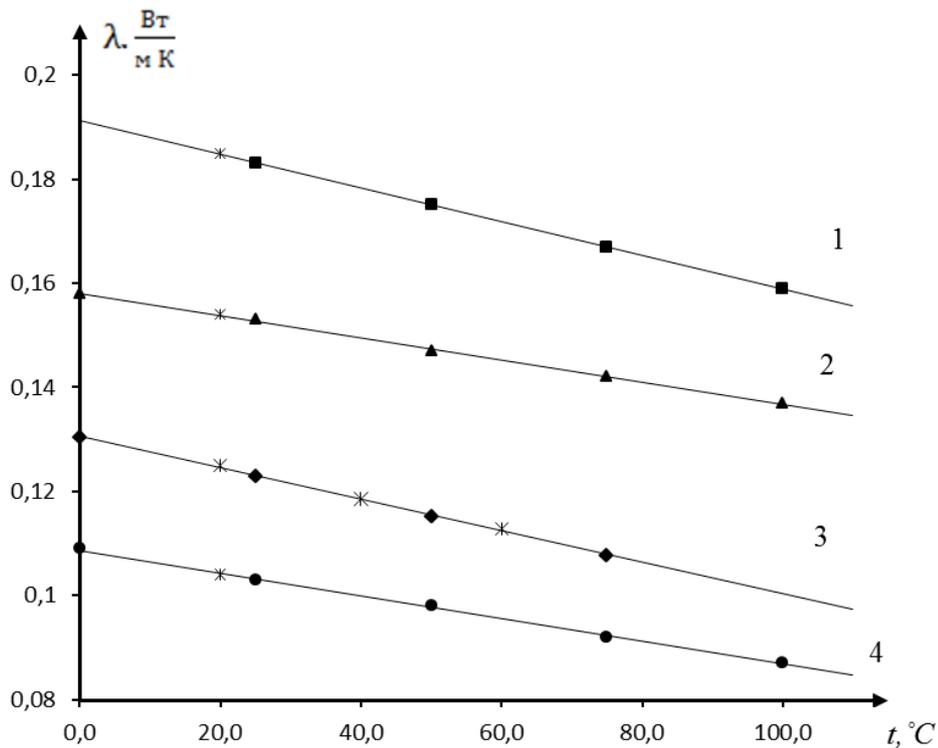


Рисунок 13. Зависимость теплопроводности жидкости от температуры

Так на рисунке 13 представлена зависимость н-Бутанала, линия 2, у жидкостей этого класса молекулы содержат активный водород и донор электрон, в свою очередь Диметилформаид, линия 1, жидкость относящаяся к третьей группе, у которых молекулы имеют донор электрон, но в них отсутствует активный водород. В Тетрахлолметане, линия 4, в молекулах присутствует активный водород и нет донорного электрона. И на конец, зависимостью Гептана от температуры, линия 3, представлен последний класс данной классификации жидкостей, у которых молекулы без водородных связей.

Экспериментальные данные отмечены точками, линия — это аппроксимационная зависимость, полученная методом наименьших квадратов. Точки, обозначенные \*, взяты из справочной литературы [51].

Как мы видим, коэффициент теплопроводности линейно уменьшается с увеличением температуры, что полностью соответствует общепринятым

представлением о переносе тепла теплопроводностью. Характер зависимости связан с влиянием физических свойств исследуемых жидкостей. Для разных классов угол наклона различен. Следует отметить, что погрешность составляет не более 2%. Так же мы видим, что наши экспериментальные данные хорошо согласуются с литературными значениями. Все это позволяет сделать заключение о достоверности результатов исследований по теплофизическим свойствам органических жидкостей, проводимых по разработанным нами методикам и созданном экспериментальном стенде.

Необходимо также отметить, что высокий технологический уровень экспериментальной установки, грамотные конструкторские и технические решения, (ещё на этапе проектной разработки), правильный выбор современной элементной базы, надёжность изготовления, как отдельных схем и узлов, так и качественная сборка установки в целом, всё это даёт возможности с высокой точностью при минимальных затратах времени регистрировать и воспроизводить результаты проводимых измерений.

### **3.2. Бинарные растворы**

При исследовании бинарных растворов, требуемый раствор составлялся из перечня имеющихся в наличии чистых растворов, теплофизические свойства которых рассмотрены в предыдущем параграфе. Отметим, что смешивание растворов осуществлялось в соответствии с классификацией Эвелла. Для того, чтобы отразить всю полноту и научную значимость представленного исследования, в ходе эксперимента смешивались жидкости как из одной группы, так и жидкости из совершенно разных групп. [52]

#### **3.2.1 Экспериментальные исследования.**

Методика экспериментальных исследования была аналогична исследованию чистых жидкостей. Результаты отдельных опытов приведены на рисунках 14-18. Полный перечень изученных смесей приведен в приложении 2.

На рисунке 14 приведён график изменения теплопроводности бинарного раствора органических жидкостей Этиленгликоль ÷ н-Гексан, в зависимости от различной объёмной концентрации смеси [53,54]. Из графика видно, что полученная экспериментальным путём зависимость имеет линейный вид. График зависимости монотонно изменяется, отклонение от линейности не наблюдается.

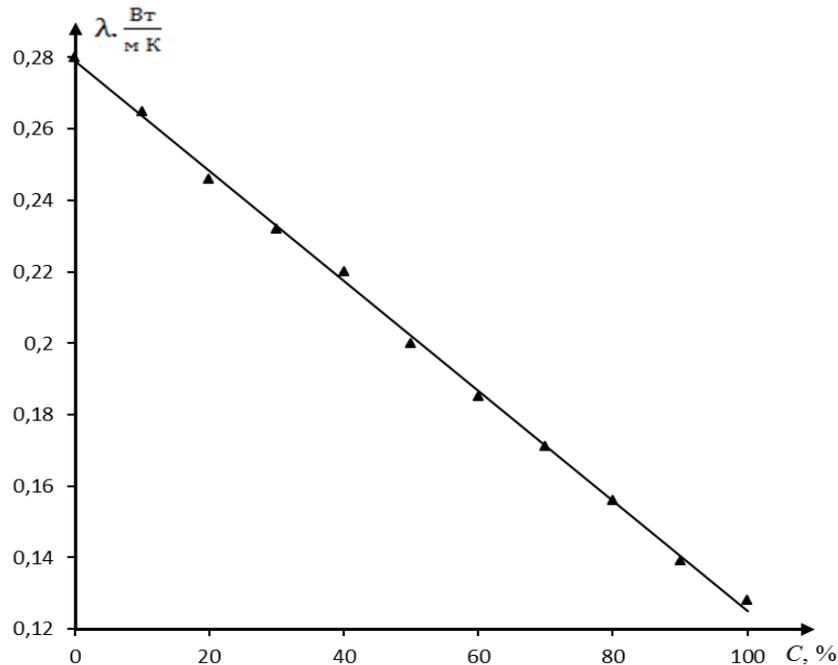


Рисунок 14. График зависимости теплопроводности от концентрации смеси Этиленгликоль ÷ н-Гексан.

На рисунке 15. показан график зависимости теплопроводности от концентрации смеси Тoluол ÷ Четыреххлористый углерод. В результате этого эксперимента установлено, что изменение теплопроводности данного раствора органических жидкостей при различной объёмной концентрации смеси носит не линейный характер. Объясняется такое поведение функциональной зависимости тем, что компоненты полученного раствора имеют достаточно различные исходные значения теплопроводности.

Для эксперимента жидкие растворы были взяты в следующих пропорциях: толуола, имеющего большую теплопроводность, 92 – 94% и четыреххлористого углерода 6 – 8%, у которого теплопроводность меньше. В толуол, который являлся основой смеси, четыреххлористый углерод добавлялся постепенно. При

этом теплопроводность смеси на начальном этапе росла, а затем резко начинала падать.

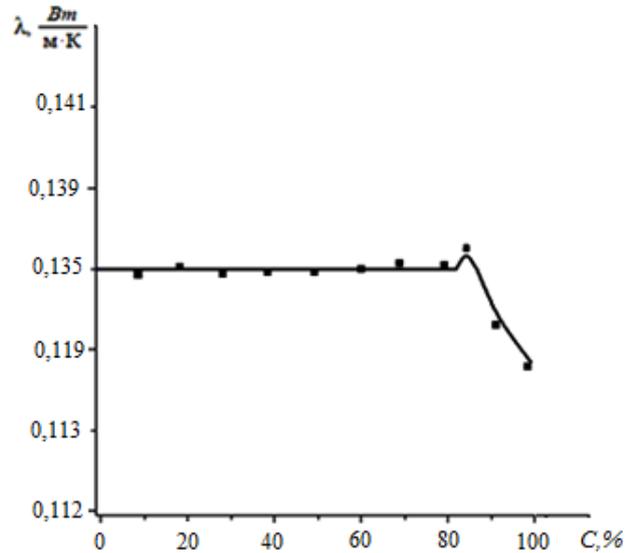
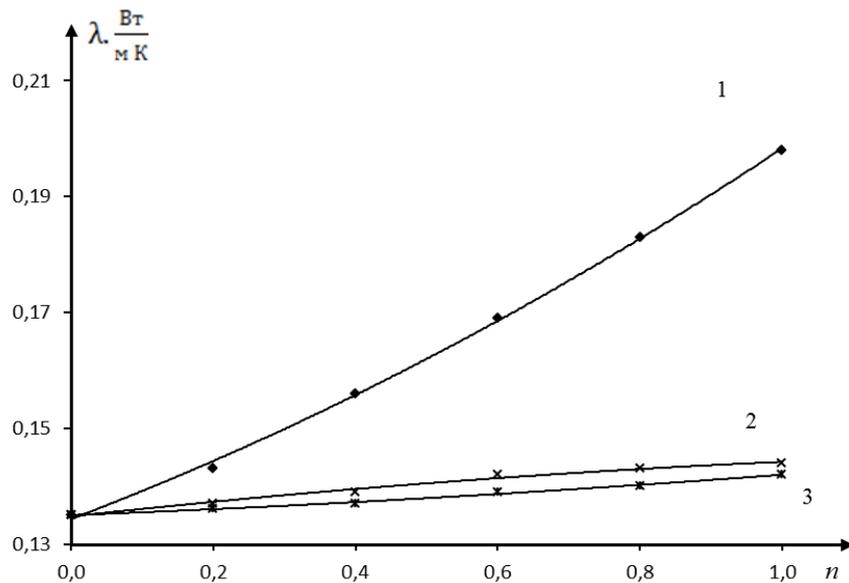


Рисунок 15. Теплопроводности смеси Тoluол ÷ Четыреххлористый углерод.

На рисунке 16. представлен график зависимости теплопроводности от концентрации смеси Тoluола, относящегося к пятой классификационной группе с Этиленгликолем из 1 группы и Дибутилфталатом или Циклогексаном взятых из третьей группы.



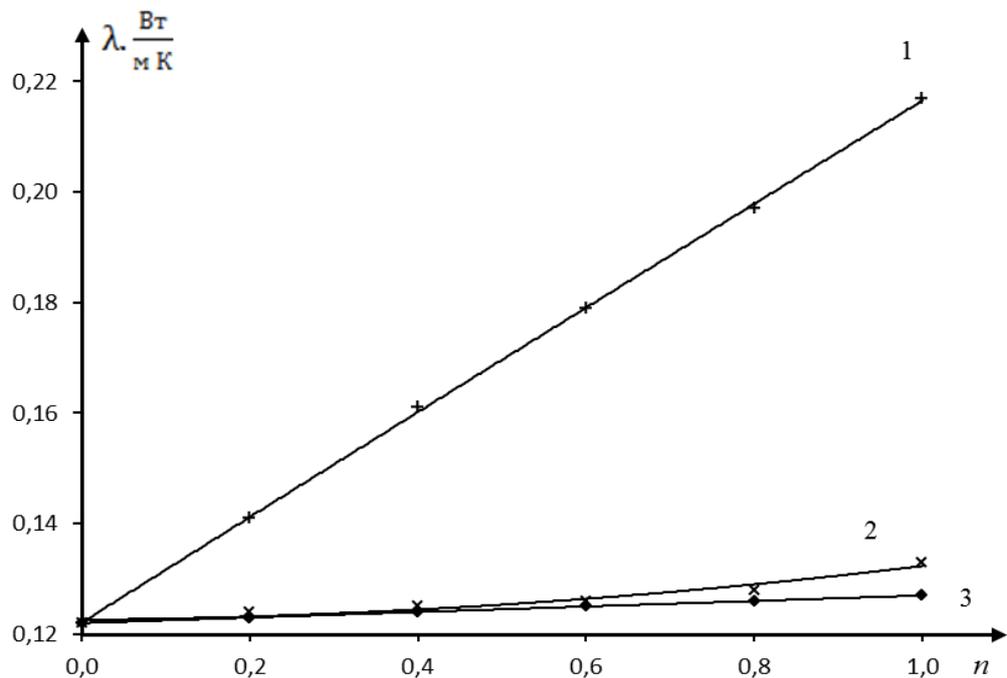
1 - Тoluол ÷ Этиленгликоль, 2 - Тoluол ÷ Дибутилфталат

3 - Тoluол ÷ Циклогексанон

Рисунок 16. График зависимости теплопроводности от концентрации смеси

График носит нелинейный, монотонно возрастающий характер. Для смесей составленных из одного класса, линия 2 и 3, наблюдаются незначительные нелинейные отклонения противоположной направленности. При смене Дибутылфтолата на этиленгликоль характер концентрационной зависимости изменяется, нелинейность более выражена.

Для выяснения роли чистого компонента на теплопроводность смеси мы заменили Толуол на, н-Гексан жидкость относящуюся к этому же классу, рисунок 17.

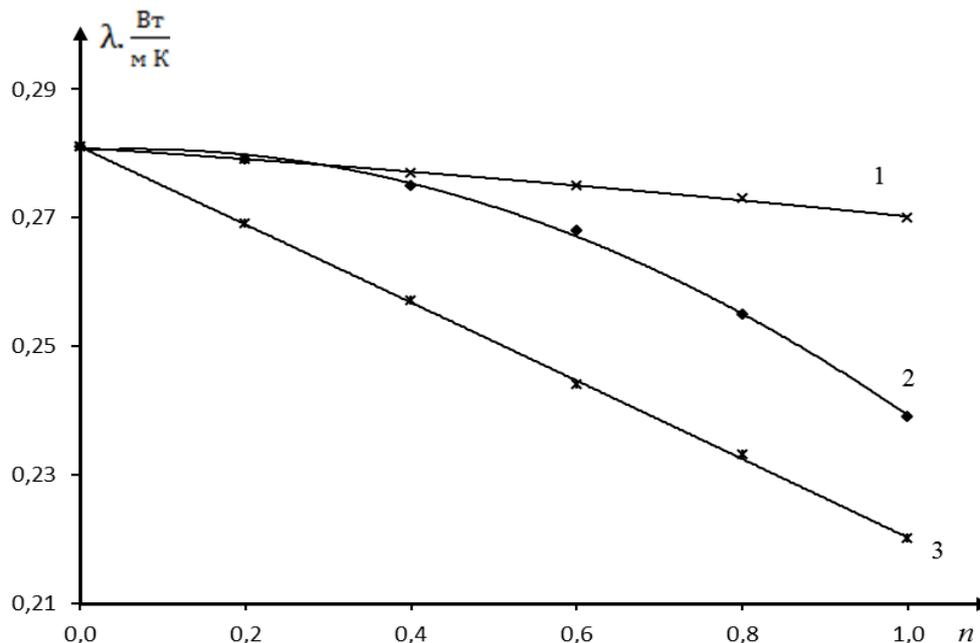


1 - н-Гексан ÷ Этиленгликоль, 2- н-Гексан ÷ Циклогексанон,  
3 - н-Гексан ÷ о-Ксилол

Рисунок 17. Теплопроводности смеси н-Гексана с жидкостями из 1 и третьей классификационной групп.

Концентрационная зависимость н-Гексана от Этиленгликоля монотонно возрастает, отклонения от линейности не наблюдается. Для смеси н-Гексана с Циклогексаноном и о-Ксилолом характер остался прежним, нелинейность слабо выражена.

При замене одного из компонентов раствора, например толуола или н-Гексана, на компонент из другой группы классификации Эвелла – Этиленгликоль, относящегося к первой группе, характер кривых меняется на диаметрально противоположный, становится монотонно убывающим, рисунок 18.



1- Этиленгликоль ÷ Диметилформамид, 2 - Этиленгликоль ÷ Бензол,  
3 - Этиленгликоль ÷ Тетрахлорметан

Рисунок 18. График зависимости теплопроводности от концентрации смеси:

Смесь, состоящая из Этиленгликоля и Диметилформамида (линия 1), относящегося к третьей классификационной группе, или Тетрахлорметана (линия 3), принадлежащего четвертой группе, линейно уменьшается с уменьшением концентрации Этиленгликоля, являющегося жидкостью из первой классификационной группы. Бензол, жидкость из четвертой группы, и Этиленгликоля, то наблюдается существенное отклонение от линейности (линия 2).

Из графиков представленных на рисунках 14 – 18 видно, что данные зависимости имеют сложный характер. Такая зависимость теплопроводности смеси от концентрации по нашему предположению связана с изменением показателей отвечающих за теплоперенос, конкретной бинарной системы.

### 3.2.2. Тепловая активность

В основе измерения тепловой активности лежит модельная задача, в которой металлическая плёнка пренебрежимо малой толщины контактирует с полуограниченными средами. Не смотря на то, что при формулировке краевой нестационарной задачи теплопроводности тепловая активность не фигурирует, ( $\varepsilon = \frac{\lambda}{c}$ ,  $\lambda$  – теплопроводность, Дж/(м·К·с);  $\rho$  – плотность кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоёмкость Дж/(кг·К)) она является важной характеристикой, определяющей теплоперенос на поверхности взаимодействующих тел, между которыми происходит нестационарный теплообмен. [55].

Метод кратковременных измерений тепловой активности в стадии иррегулярного теплового режима [7,11,56] позволяет уверенно различать тепловые активности жидкостей на уровне 0,1%. Данный метод был использован для исследования тепловой активности бинарных растворов. Литературные данные по концентрационной зависимости тепловой активности отсутствуют. Для малых значений времени нагрева ( $10^{-3}$  с) можно пренебречь конечностью ширины и длины плёнки и рассмотреть задачу как одномерную.

Используемые при измерениях датчики имели следующие характеристики: толщина слоя никеля 0,1-0,12 мкм, ширина резистивной полоски – 1,5 мм, её длина 50 мм, длина импульсов составляла 0,5 мс, частота их подачи 1 Гц. В паузе между импульсами происходила почти полная диссипация энергии, выделившееся за время импульса.

На рисунке 19. представлена одна из экспериментальных зависимостей тепловой активности бинарной системы, состоящей из н-Бутанола и н-Гексана: точки – эксперимент, прямая – аддитивная схема расчёта, кривая – соотношение, предложенное в данной работе. [57]

Аддитивная схема расчёта тепловой активности представляет соотношение:

$$\varepsilon = \varepsilon_1(n_1) + \varepsilon_2(n_2) \quad (3.1)$$

Реально, тепловая активность раствора соответствует соотношению:

$$\varepsilon = \varepsilon_1(n_1) + \varepsilon_2(n_2) - \delta\varepsilon(n_1), \quad (3.2)$$

где  $\delta\varepsilon(n_1)$ - слагаемое, определяющее отклонение от линейности. Величина  $\delta\varepsilon(n_1)$  определяется из эксперимента и достигает своего максимума при  $n_1 = 0,5$ , достигает 4% при погрешности в 0,61%. Аналитически предлагается искать величину  $\delta\varepsilon(n_1)$  в виде:

$$\delta\varepsilon(n_1) = k(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)n_1n_2. \quad (3.3)$$

Параметр  $k$  определялся в эксперименте

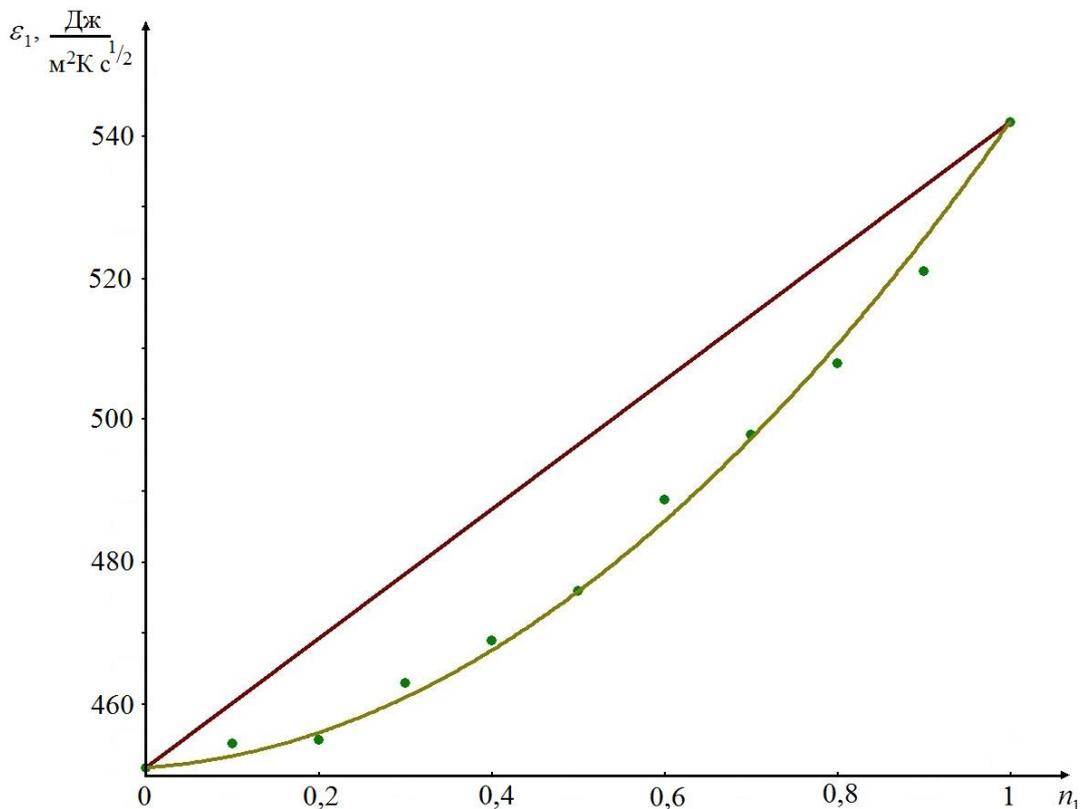


Рисунок 19. Тепловая активности бинарной системы н-Бутанола и н-Гексана от концентрации

В экспериментах исследовались растворы, составленных из жидкостей соответствующих разным группам по классификации Эвелла.

По результатам исследований рекомендовано следующее соотношение для расчёта тепловой активности бинарных растворов органических жидкостей: [58]

$$\varepsilon = \varepsilon_1(n_1) + \varepsilon_2(n_2) - k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)n_1n_2. \quad (3.5)$$

Данные оценки показывают, что полученное соотношение (3.5) достаточно точно передаёт концентрационную зависимость тепловой активности бинарных растворов органических жидкостей.

### 3.2.3. Расчет теплопроводности органических жидкостей

В практике теплофизического эксперимента существуют два основных подхода к изучению теплопроводности бинарных органических растворов: аналитический и экспериментальный. В данной работе рассматривается комплексный (комбинированный) подход для прогнозирования теплофизических свойств (ТФС) различных растворов. Наиболее известные методы расчёта коэффициента теплопроводности были описаны в работе Рида Р. и Шервуд Т. [59].

В настоящей работе представлен классический метод расчёта коэффициента теплопроводности для бинарных жидких растворов органических жидкостей. По результатам экспериментальных исследований предложена эмпирическая формула для каждой из групп по классификации Эвелла [60,61].

Реализация модельной задачи (2.1) выполнялась с помощью платиновой нити, которая имеет предельно малый радиус, чтобы можно было пренебречь его теплоёмкостью. Соответствующие количественные оценки были представлены в [34]. Используя выражение (2.3), запишем изменение приращения температуры источника между моментами времени  $t$  и  $t_0$ :

$$\Delta T_t - \Delta T_0 = \frac{q_l}{2\pi(\lambda_1 + \lambda_2)} \ln\left(\frac{t}{t_0}\right). \quad (3.6)$$

Соотношение (3.6) позволяет определить теплопроводность исследуемого вещества  $\lambda_1$  по известной теплопроводности  $\lambda_2$  эталонного вещества и приращениям температуры в различные моменты времени.

Непосредственная процедура измерения была аналогичной, что и для чистых жидкостей. Начинается она с компенсации на эталонном веществе (толуол). Измерительный зонд при комнатной температуре  $T_0$  вводят в контакт с толуолом, теплопроводность которого  $\lambda_{ЭТ}(T_0)$  известна. При периодической подаче на схему прямоугольных импульсов напряжения, изменением сопротивлений  $R_1 - R_4$  добиваются как баланса на начальные сопротивления, так и компенсации переменных сигналов. Частота подачи импульсов выбирается из условия, чтобы в паузе между ними происходила практически полная диссипация подводимой энергии. Когда  $U(t)=0$ , баланс проведен, при этом регистрируются значения  $R_{1эм}(T_0)$  и  $R_{iэм}(T_0)$ .

Затем измерительный зонд вводится в контакт с исследуемым веществом. При температуре  $T$  повторяется процедура полного баланса мостовой схемы и регистрируются значения  $R_1(T)$  и  $R_i(T)$ .

Соотношение для расчёта теплопроводности исследуемого вещества имеет вид:

$$\lambda = \frac{\alpha U_0^2}{16\pi l} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi}, \operatorname{tg}\varphi = \frac{R_i(t) - R_i(t_1)}{\ln \frac{t}{t_1}}. \quad (3.7)$$

Здесь  $\lambda$  – теплопроводность исследуемого раствора,  $Вт/(м·К)$ ;  $\alpha$  – коэффициент температурного сопротивления материала резистивного элемента датчика (использовалась платина ГОСТ 13498-2010,  $\alpha=0,00385 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  как в термометрах сопротивления по ГОСТ 8.625-2006),  $^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $U_0$  – подаваемое на мост напряжение с генератора импульсов, В;  $l$  – длина нити датчика, м;  $R_i(t)$  – сопротивление измерительного датчика в момент времени  $t$ , Ом;  $R_i(t_0)$  – сопротивление измерительного датчика в момент времени  $t_1$ , Ом. Величина  $\operatorname{tg}\varphi$  определялась для нескольких моментов времени:  $t=20 \text{ мс}$ ,  $t_1=25, 30, 35, 40, 50 \text{ мс}$ . Максимальный нагрев  $PЭ$  в конце импульса не превышал  $1^\circ\text{C}$ . Основными источникам

погрешностей являются: аппаратные ошибки, связанные с измерением  $tg\varphi$  и методические погрешности, описанные в [34].

Используемые при измерениях датчики имели следующие характеристики: радиус нити 5 мкм, длина 50 мм, частота их подачи 1 Гц. В паузе между импульсами происходила почти полная диссипация энергии, выделившееся за время импульса.

Аддитивная схема расчёта теплопроводности представляет соотношение:

$$\lambda = \lambda_1(n_1) + \lambda_2(n_2). \quad (3.8)$$

Предлагается, по аналогии с работами [62-64], оценивать теплопроводность раствора соотношением:

$$\lambda = \lambda_1(n_1) + \lambda_2(n_2) - \delta\lambda(n_1), \quad (3.9)$$

где  $\delta\lambda(n_1)$  - слагаемое, определяющее отклонение от линейности,  $n_1$  - концентрация первой компоненты.

Величина  $\delta\lambda(n_1)$  определяется из эксперимента и достигает своего максимума при  $n_1 = 0,5$ . Аналитически предлагается искать величину  $\delta\lambda(n_1)$  в виде:[65]

$$\delta\lambda(n_1) = k(\lambda_2 - \lambda_1)n_1n_2. \quad (3.10)$$

Параметр  $k$  определялся в эксперименте.

$$k = \delta\lambda(n_1)/((\lambda_2 - \lambda_1)n_1n_2), \quad (3.11)$$

Погрешность в экспериментальном определении величины  $\delta\lambda(n_1)$  не превышал 3%, разброс значений параметра  $k$  – не более 5%.

Экспериментально изучены жидкие растворы в каждой группе по классификации Эвелла (Таблица 4.). В Таблице 5. приведены экспериментально обобщённые константы  $k$  жидкой смеси для каждой группы.

Таблица 5. Значения константы  $k$  для различных бинарных органических смесей внутри каждой группы.

Класс	Характеристика соединений	Константа $k$
2	Молекулы содержат активный водород и донор электронов (кислород, азот, фтор)	0,52
3	Молекулы имеют донор электронов, но в их отсутствует активный водород	0,48
4	Молекулы содержат активный водород и не содержат донора электронов	0,63
5	Молекулы без водородных связей	0,38

Полученные экспериментальные константы для расчёта теплопроводности бинарных органических жидкостей в зависимости от концентрации компонент достаточно точно описывает экспериментальные данные, полученные с помощью импульсного иррегулярного теплового режима. А благодаря корректно подобранным коэффициентам можно более точно прогнозировать теплофизические свойства бинарных жидких растворов по классификации Эвелла, в рамках конкретной группы.

### 3.3. Тройные растворы

При исследовании тройных растворов, требуемый раствор составлялся из перечня имеющихся в наличии чистых растворов. Отметим, что смешивание чистых растворов осуществлялось в соответствии с классификацией Эвелла, (по группам). Методика исследования была аналогична исследованию чистых жидкостей. Полные исследования отражены в приложении 3. [66]

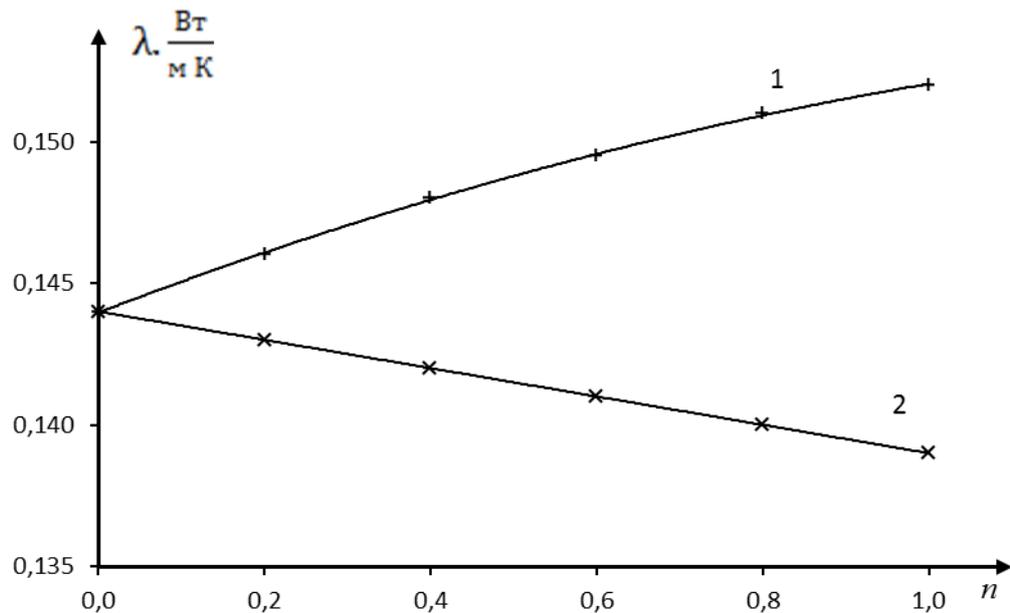
При исследовании теплофизических свойств тройных жидких растворов, следует обратить внимание на вопросы, которые заслуживают более пристального

внимания и требуют подробного и глубокого изучения, анализа и систематизации полученных результатов, так например, представляет большой интерес рассмотрение различных вариантов обобщения формул вида (3.12), на трёхкомпонентные системы [67,68]. Поскольку обобщённая формула должна быть симметричной относительно трёх компонентов, то данный вопрос совсем не является тривиальным:

$$\lambda = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 - \alpha |\lambda_1 - \lambda_2| n_1 n_2, \quad (3.12)$$

где  $n_2$  - концентрация равновесной смеси двух компонентов.

На рисунках: 20 – 27 представлены графики зависимости теплопроводности от изменения (объёмной) концентрации смеси различных видов и комбинаций тройных растворов органических жидкостей [69].



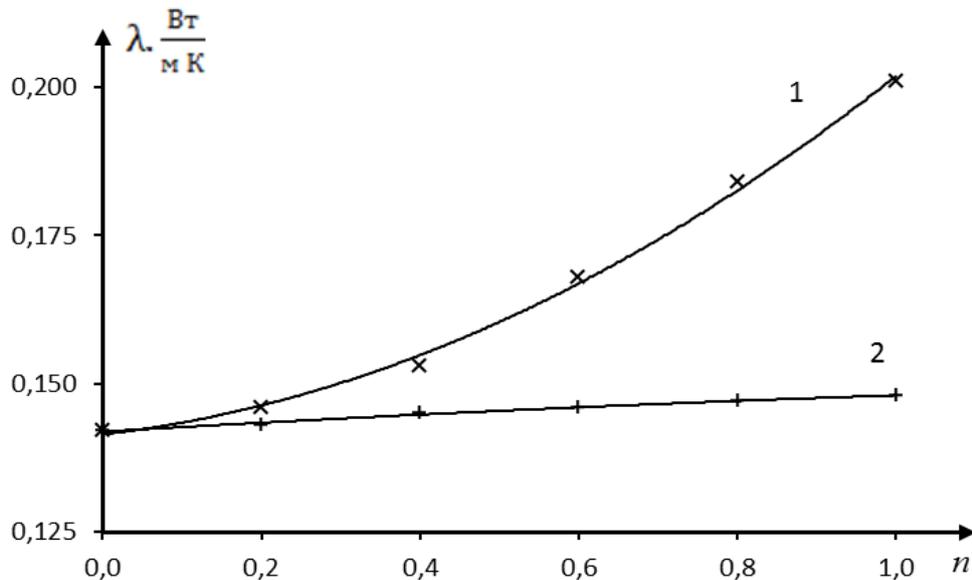
1 - Толуол (5) – Дибутилфталат (3) + н-Бутанол (2)

2 - Толуол (5) – Дибутилфталат (3) + Керосин (5)

Рисунок 20. График зависимости теплопроводности от концентрации смеси:

Как видно из рисунка 20 зависимость трехкомпонентной органической жидкости от ее концентрации нелинейная. Смена одного из компонентов меняет характер зависимости на противоположный. В смеси Толуола с Дибутилфтолатом и н-Бутанолом при увеличении содержания первого

теплопроводность увеличивается, заменив н-Бутанол на Керосин, теплопроводность уменьшается. Возможно это связано с проявлением реальных свойств смешивающихся жидкостей. Для выяснения этого мы провели исследования в которых бинарную смесь составили из жидкостей принадлежащих тому же классу, что и Дибутилфтолат, его компонентами стали этиленгликоль и н-Бутанол, принадлежащие, соответственно первому и второму классификационному признаку. Результаты исследования приведены на рисунке 21.



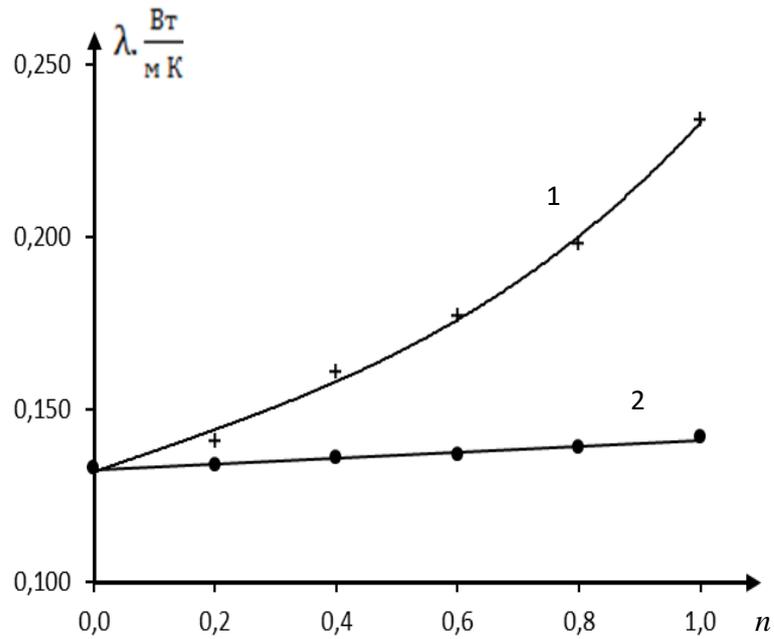
1 - Толуол (5) – Циклогексанон (3) + Этиленгликоль (1)

2 - Толуол (5) – Циклогексанон (3) + н-Бутанол (2)

Рисунок 21. Теплопроводности смеси с Толуолом от концентрации

Как видно из рисунка 21 при увеличении концентрации Толуол в смеси теплопроводность жидкости увеличивается. Если система состоит из Циклогексанона + Этиленгликоля характер зависимости нелинейный. Для смеси, состоящей из Циклогексанона и н-Бутанола наблюдается линейное изменение.

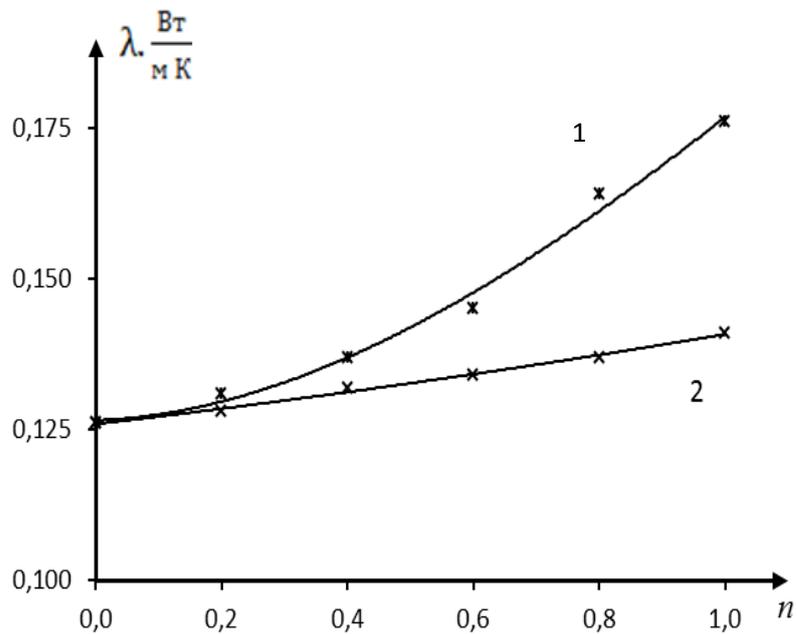
Далее мы заменили хорошо известную жидкость Толуол на новое вещество, применяемое в авиакосмической промышленности, н-Гексан. Результаты исследования приведены на рисунке 22.



1 - н-Гексана (5) – Циклогексанон (3) + Этиленгликоль (1)

2 - н-Гексана (5) – Циклогексанон (3) + н-Бутанол (2)

Рисунок 22. График зависимость теплопроводности трехкомпонентной смеси от концентрации



1 - н-Гексана (5) – о-Ксилол (3) + Этиленгликоль (1)

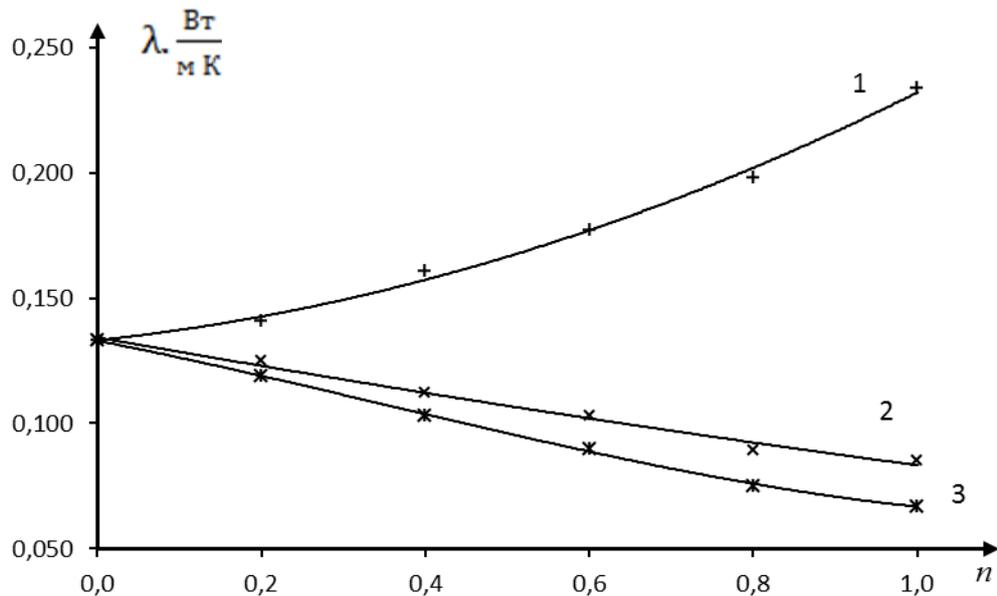
2 - н-Гексана (5) – о-Ксилол (3) + н-Бутанол (2)

Рисунок 23. График зависимость теплопроводности трехкомпонентной смеси от концентрации

Как видно из рисунка 22 характер зависимости не изменился, поменялись лишь пределы по теплопроводности. В дальнейшем мы Циклогексанон заменили на о-Ксилол, состоящие в одной классификационной группе, рисунок 23.

Как можно видеть характер зависимости практически не изменился. Поменялись предельные значения. Такую зависимость теплопроводности трехкомпонентной смеси от концентрации возможно можно объяснить тем, что в процессе передачи тепловой энергии помимо теплопроводности свой вклад вносит массоперенос.

Следующие исследования мы проводили с жидкостями, компоненты которых принадлежали к разным классификационным группам, рисунок 24.



1 - н-Гексана (5) –Этиленгликоль (1) + Керосин (5)

2 - н-Гексана (5) – Этиленгликоль (1) + Дибутилфталат (3)

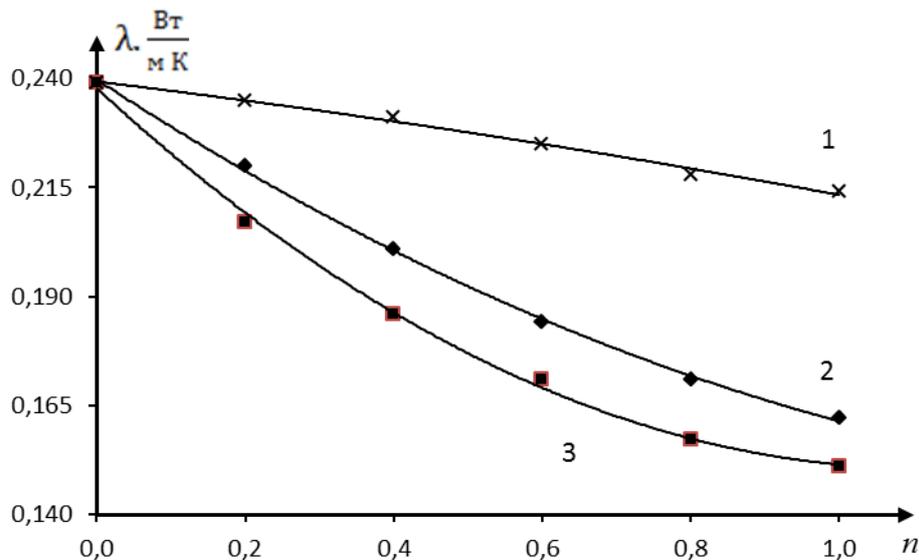
3 - н-Гексана (5) –Этиленгликоль (1) + Циклогексанол (3)

Рисунок 24. Теплопроводности трехкомпонентной смеси с н-Гексаном от концентрации

На рисунке 24 можно заметить, что если бинарная смесь состоит из жидкостей, принадлежащих одной и той же классификационной группе, то зависимость от концентрации примерно одинаковая, линия 2 и 3. Для жидкостей,

в которых смесь состоит из компонента принадлежащего той же классификационной группе, что и чистый компонент, характер зависимости резко изменяется, линия 1. Она становится существенно, нелинейная, возрастает с увеличением содержания чистого компонента.

На рисунке 25 представлены результаты исследования, в котором чистым компонентом являлся жидкость их первой классификационной группы – Этиленгликоль



1 - Этиленгликоль (1) – о-Ксилол (3) + Бензин (5)

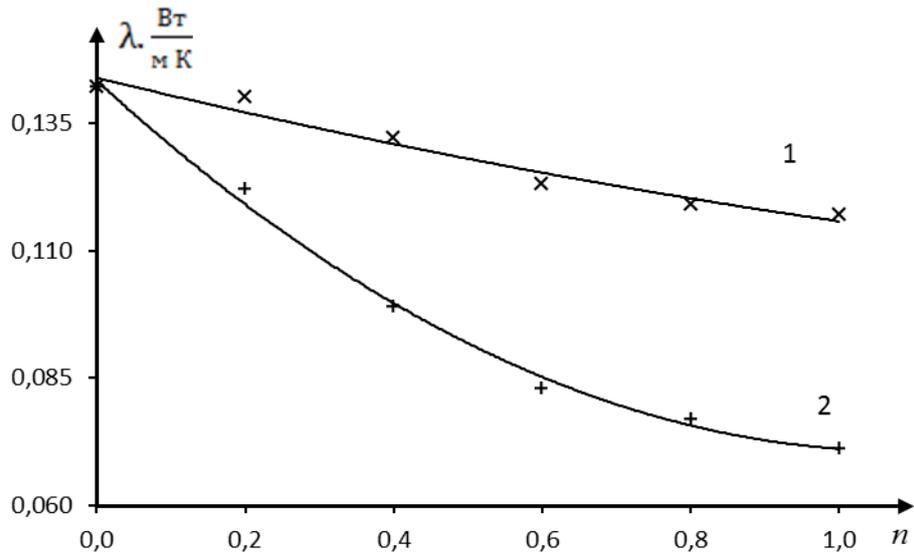
2 - Этиленгликоль (1) – Бензол (2) + Бензин (5)

3 - Этиленгликоль (1) – Бензол (2) + Керосин (5)

Рисунок 25. Теплопроводности трехкомпонентной смеси с Этиленгликолем

При смене чистого компонента н-Гексана на Этиленгликоль существенно изменилась зависимость теплопроводности смеси от концентрации последнего. Как можно наблюдать теплопроводность уменьшается нелинейно. Наиболее сильно она изменяется в системе из Этиленгликоля+Бензола+Керосина. Незначительно изменяется в системе Этиленгликоль+о-Ксилол+Бензин.

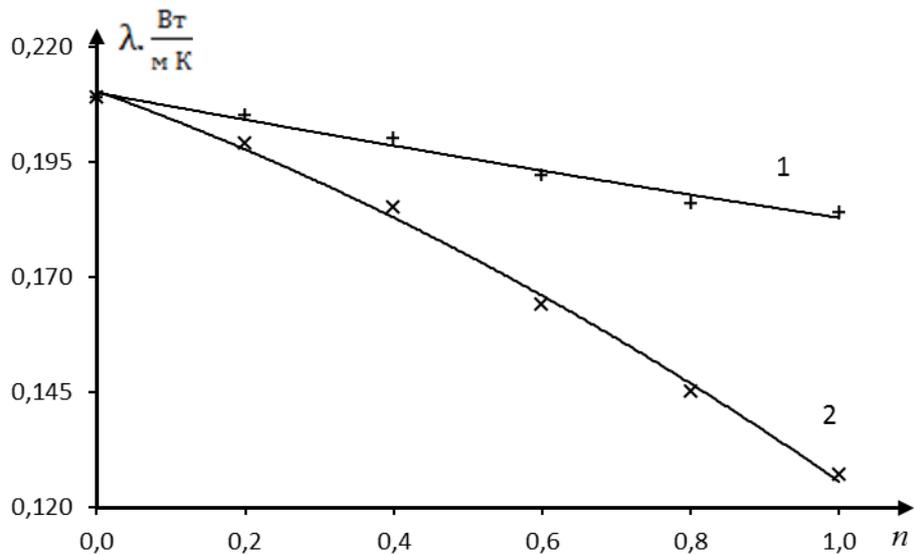
На рисунках 26 и 27 мы привели данные, показывающие существенно нелинейную зависимость теплопроводности жидкой смеси от концентрации, хотя компоненты взяты из одной и той же классификационной группы.



1 - Тoluол (5) – Этиленгликоль (1) + Керосин (5)

2 - Тoluол (5)– Этиленгликоль (1) + Бензин (5)

Рисунок 26. Смесь с Толуолом



1 - Этиленгликоль (1) – о-Ксилол (3) + Керосин (5)

2 - Этиленгликоль (1) – о-Ксилол (3) + Бензин (5)

Рисунок 27. Смесь с Этиленгликолем

Из рисунков 26 и 27 видно, что для одних систем теплопроводность незначительно монотонно уменьшается, линия 1. Для других наблюдается резкое уменьшение при увеличении концентрации чистого компонента, линия 2. Так же

можно заметить, что если в жидкости присутствует компонент из одной классификационной группы, то наибольшее изменение наблюдается при малых значениях концентрации, линия 2 рисунок 26. Если компоненты жидкости относятся разным группам, то влияние концентрации равновесное, то есть наибольшее отклонение наблюдается при  $n = 0,5$ .

В заключении можно сказать, что зависимость теплопроводности трехкомпонентной жидкости от концентрации компонентов зависит от ее вида и состава. Для одних смесей с увеличением содержания одного компонента теплопроводность изменяется линейно, для других существенно нелинейно. Мы думаем, что это связано с проявлением реальных свойств смешивающихся компонентов и влиянием на теплоперенос [70] еще каких либо эффектов, связанных с градиентом концентрации.

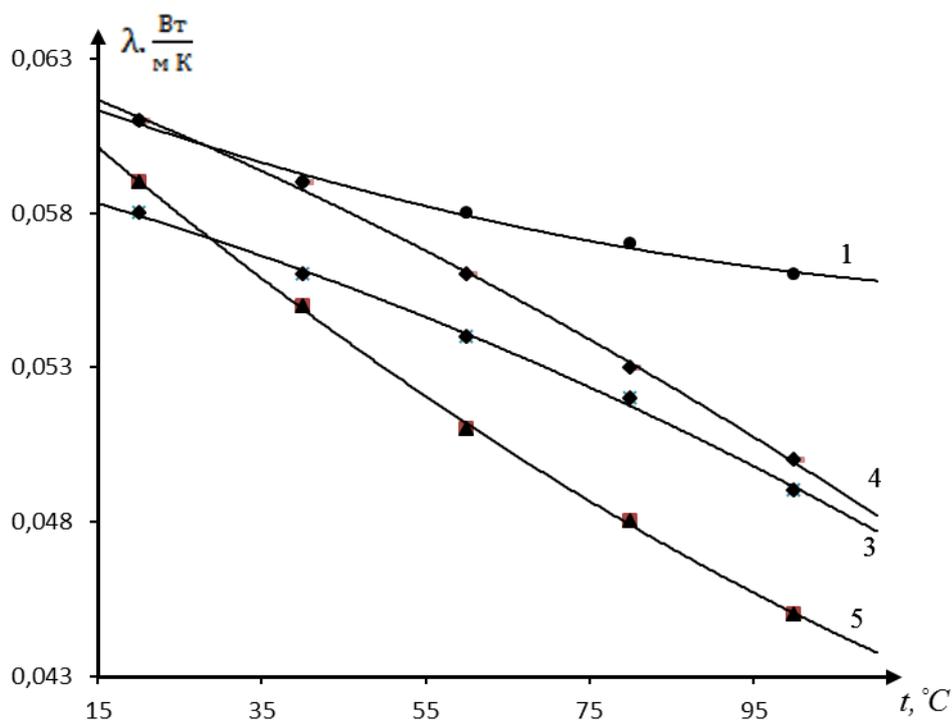
### **3.4. Исследование теплофизических свойств фторуглеродов**

Жидкие фторуглероды широко применяются в промышленности. Обычно их используют как низкотемпературные хладагенты в промышленных холодильных установках. Кроме этого, они нашли своё применение как гидравлические жидкости и смазочные масла, благодаря своим теплофизическим и диэлектрическим свойствам. Так же фторуглероды представляют собой альтернативную замену фреонам и могут быть использованы в перспективе в различных областях науки и техники.

Необходимо заметить, что изучение и систематизирование – фторуглеродов, было представлено в научном труде [71], а так же в [72]. Стоит сказать, что в приведённых работах был использован вариант, нестационарного метода нагретой нити для – измерения теплопроводности. Можно отметить, что этот метод основан на применении уравнения теплопроводности и позволяет определить такие теплофизические характеристики, как: теплопроводность, температуропроводность, тепловую активность, а так же объёмную теплоёмкость. При сравнении результатов работы [71] и результатов в представленной работе наблюдается их высокая согласованность.

Свои исследования мы проводили на экспериментальном стенде, где изучались органические жидкости, описанные в предыдущих разделах. Методика осталась прежней, но точность исследования выше, чем в работах, так как вместо нагретой нити, обладающей малым сопротивлением, мы использовали высокоомные напыленные и меандровые датчики.

Свои исследования мы начали с чистых веществ, результаты некоторых из них представлены на рисунках 28, точками отображены экспериментальные данные, линия – это аппроксимационная зависимость, полученная методом наименьших квадратов. Полный спектр исследований отражен в приложении 4.



1 - Перфтор-3-изопропил-2-метилпентан

3 - Перфтор-1,3-диметил-циклогексан

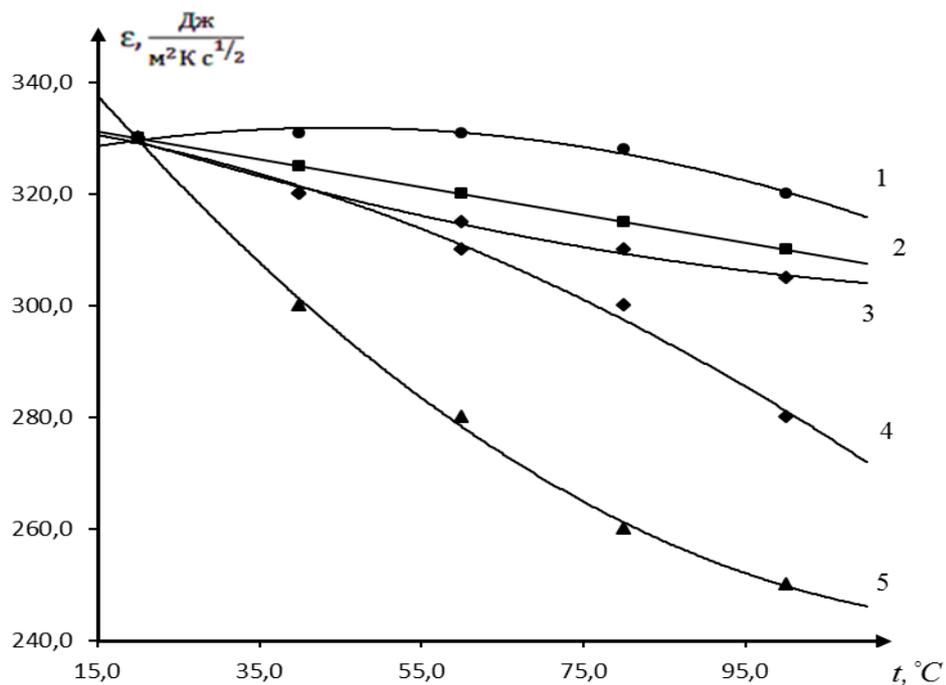
4 - Перфторметилциклогелсан

5 - Перфторгексан

Рисунок 28. Теплопроводность фторуглеродов

Как можно видеть с увеличением температуры коэффициент теплопроводности всех исследуемых жидкостей уменьшается, что полностью

согласуется с теорией передачи тепловой энергии за счет теплопроводности. Так же можно видеть, что коэффициент теплопроводности как функция температуры изменяется с небольшим отклонением от линейности, что можно было-бы списать на экспериментальную и методическую погрешность. Для ответа на этот вопрос мы провели исследования, целью которых было изучение тепловой активности как функции температуры. Тепловая активность отражает не только перенос тепловой энергии за счет градиента температуры, но и зависит от плотности и теплоемкости вещества, в которых он реализуется. Результаты исследования приведены на рисунке 29.



1 - Перфтор-3-изопропил-2-метилпентан

2 - Перфтордекалин

3 - Перфтор-1,3-диметил-циклогексан

4 - Перфторметилциклогелсан

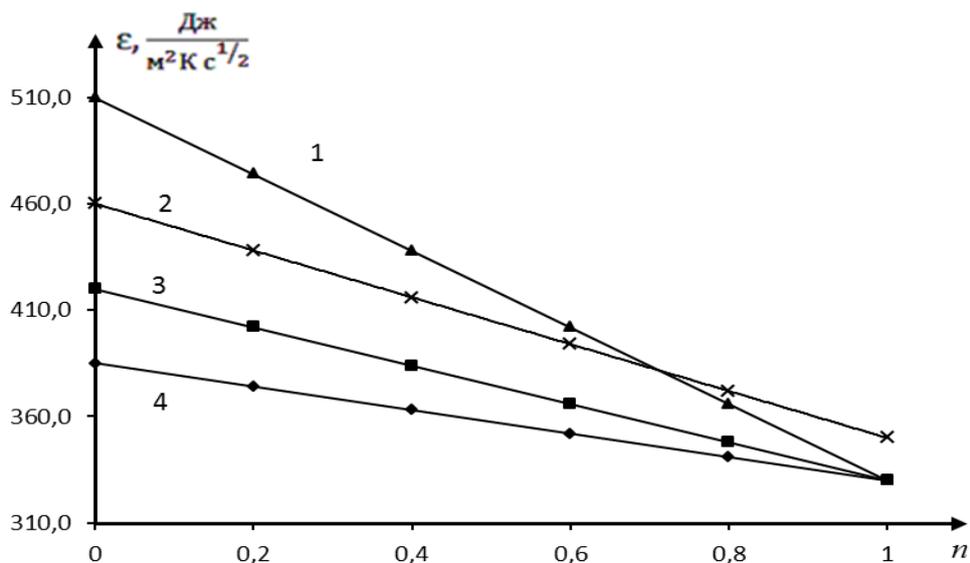
5 - Перфторгексан

Рисунок 29. Тепловая активность фторуглеродов

Как можно заметить, рисунок 29, для Перфтор-1,3-диметил-циклогексан, линия 3, отклонения от линейности тепловой активности аналогичные что и для

теплопроводности с точки зрения численных значений. Характер нелинейности изменился, кривая на рисунке 28 из вогнутой стала выпуклой, рисунок 29. Еще большие изменения наблюдаются с Перфторгексаном. Тепловая активность является нелинейной функцией температуры. Аналогичные изменения в характере зависимости теплофизических характеристик от температуры наблюдаются и у других фторуглеродных жидкостях. Возможно, ответ на вопрос почему коэффициенты теплопереноса являются нелинейной функцией температуры можно получить изучая смеси этих жидкостей.

На рисунках 30 и 31 приведены результаты по изучению теплофизических свойств растворов фторуглеродов при различной объемной концентрации смеси при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

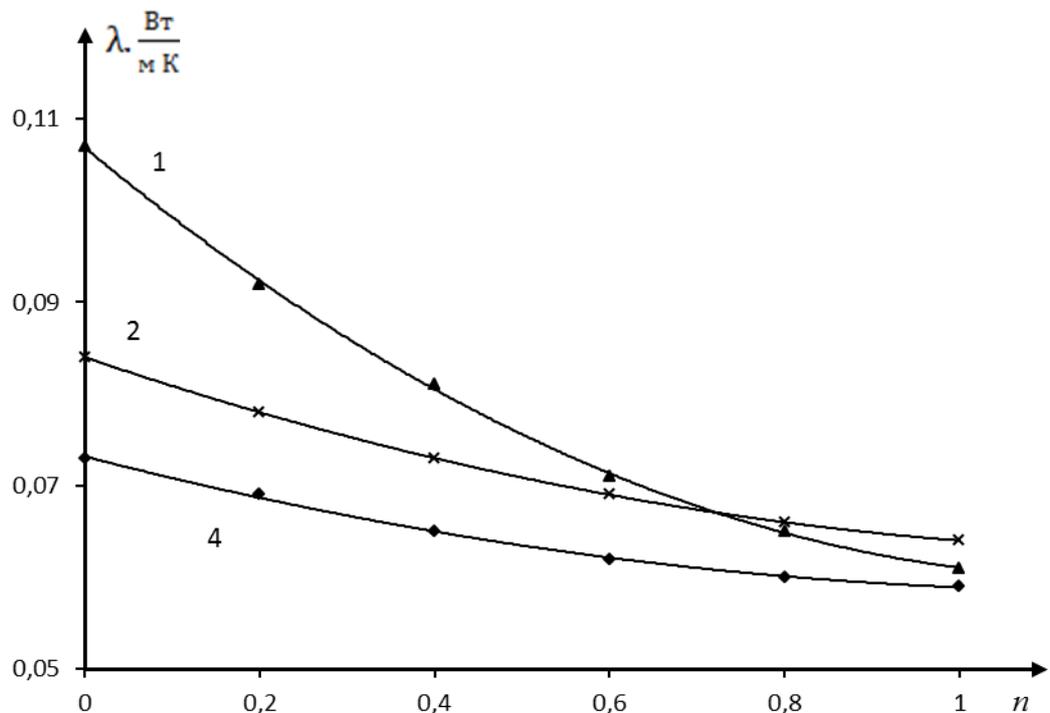


- 1 - Перфтор-3-изопропил-2-метилпентан + 1,1,5-тригидроперфторпентанол
- 2 - Перфтортрибутиламин + α дегидроперфторамиловый спирт
- 3 - Перфтордекалин + Перфтор-2,5,8,11,14,17,20,23,24,26,32,35-додекаоксагексатрианоктан
- 4 - Перфторгексан + 2-фтор,2-пентафторитил-3,3-бистрифторметилгидрофуран

Рисунок 30. Тепловая активность бинарной смеси фторуглеродов

Как можно видеть, рисунок 30, тепловая активность линейно уменьшается при изменении концентрации компонентов в смеси. Темп изменения для каждого

раствора свой, что хорошо согласуется с теорией равнозначного вклада вещества в общий процесс теплопередачи. Для подтверждения этого предположения мы изучили зависимость коэффициента теплопроводности фторуглеродных смесей от концентрации, результаты исследований приведены на рисунке 31.



- 1 - Перфтор-3-изопропил-2-метилпентан + 1,1,5-тригидроперфторпентанол
- 2 - Перфтортрибутиламин + α дегидроперфторамиловый спирт
- 4 - Перфторгексан + 2-фтор,2-пентафторитил-3,3-бистрифторметилгидрофуран

Рисунок 31. Теплопроводность бинарной смеси фторуглеродов

Мы видим, рисунок 31, что теплопроводность нелинейно уменьшается с изменением концентрации одного из компонентов. Такая зависимость не соответствует аддитивной теории теплопереноса. В этом случае, изучая зависимость тепловой активности, рисунок 30, и коэффициента теплопроводности, рисунок 31, мы можем предположить, что теплоперенос в исследуемых жидкостях зависит не только от градиента температуры, но и обусловлен влиянием плотности и теплоемкости на процесс, причем взаимно противоположно.

Таким образом, теплоперенос во фторуглеродных жидкостях нельзя однозначно описать только коэффициентом теплопроводности, необходим учет зависимости других теплофизических характеристик от температуры, вида и концентрации смесей.

### **3.5. Прогнозирование теплофизических свойств растворов**

Прогнозирование теплофизических свойств различных жидких растворов, является важной и неотъемлемой частью, при проведении научного эксперимента. Данная работа, в частности, была посвящена изучению основных закономерностей, концентрационной и температурной зависимостям жидких растворов разной природы. Так в число жидкостей, которые были исследованы, входили: растворы органических жидкостей, а также водные растворы органических жидкостей.

Необходимо остановиться на одном достаточно важном моменте, прежде чем переходить к обсуждению результатов полученных в данной работе, а именно: в каких величинах следует выражать концентрацию жидких растворов? Вопрос этот, имеет очень большое значение, так как от выбора концентрационной переменной существенным образом зависит и сам характер концентрационной зависимости. Поскольку, при переходе от весовых концентраций, к молярным в ряде случаев меняется знак кривизны; вместо вогнутых кривых могут получиться кривые выпуклые [66].

При этом в большинстве исследований физико – химического характера в качестве концентрационных переменных используются молярные доли, однако применительно к теплопроводности жидких растворов преимущества молярных концентраций не очевидны. Если исходить из того, что процесс переноса тепла в жидких растворах является эффектом коллективного движения частиц, то для этого процесса будут более корректны, скорее всего, объёмные концентрации, а не молярные. Но и использование объёмных концентраций не полностью отвечает поставленной задаче, вследствие неопределённости вопроса об изменении средней длины свободного пробега в жидких растворах.

Поэтому, исходя из данного обстоятельства, принято считать, что вопрос о выборе концентрационных переменных должен решаться не путём априорных рассуждений, когда они не могут привести к построению более или менее адекватной теории теплопроводности жидких растворов, а путём изучения характера экспериментальных зависимостей с точки зрения выявления закономерностей более общего характера. С этой точки зрения предпочтение должно быть отдано весовым концентрациям [67].

В изученных растворах органических жидкостей имеют место отрицательные отклонения от аддитивности в переменных  $\lambda(n)$ . Не маловажным свойством при этом является симметрия отклонения от аддитивности относительно концентрации:  $n=0,5$ , которая наблюдается также для растворов, у которых отсутствует химизм взаимодействия молекул. Конкретный вид концентрационной зависимости теплопроводности жидких растворов во всех случаях можно представить формулой:

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 - R n_1 n_2 \\ (n_2 &= 1 - n_1). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Этой формулой можно выразить основную закономерность поведения теплопроводности жидких растворов. Наряду с ней имеется, однако, так же и другая важная закономерность, а именно величина коэффициента  $R$ , который характеризует собой отклонения от аддитивности, и находится в прямой связи с разностью теплопроводностей компонент. Для компонентов, теплопроводности которых близки,  $R$  – будет близко к нулю, а для больших разностей теплопроводности,  $R$  – также оказывается большим. На графике, (рисунок 32) проиллюстрирована эта закономерность для исследуемых растворов органических жидкостей.

График показывает, что экспериментальные точки, каждая из которых характеризует определённый раствор, группируются вокруг прямой:

$$R = 0,72 | \lambda_1 - \lambda_2 |. \quad (3.14)$$

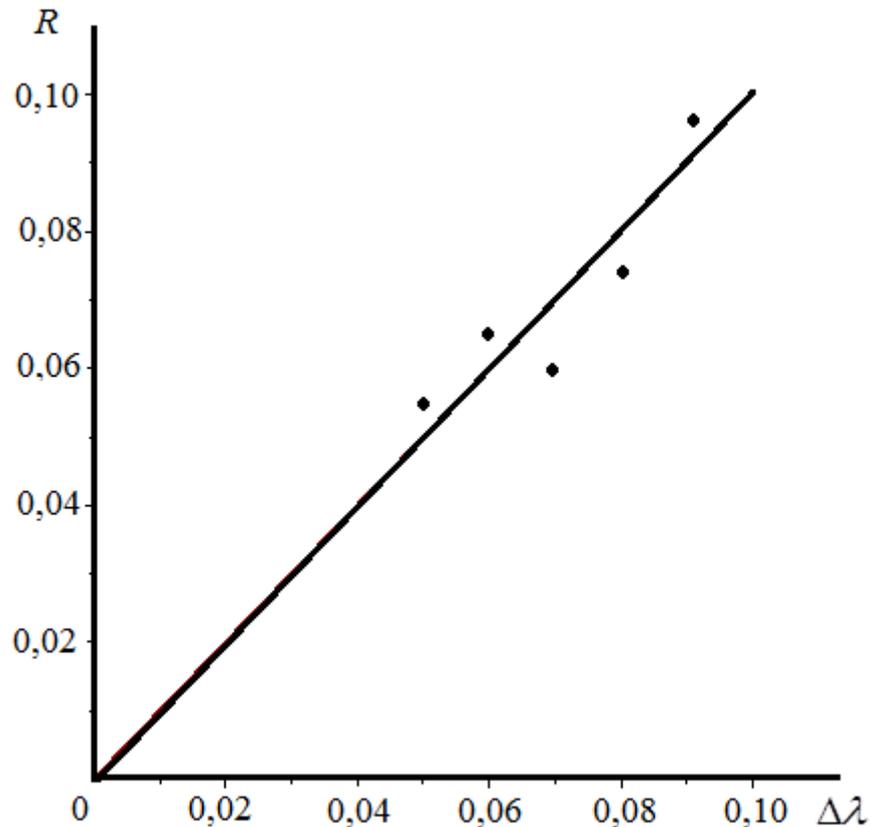


Рисунок 32. Зависимость коэффициента  $R$  в формуле (3.13) от разности теплопроводностей компонент раствора

Таким образом, в целом, теплопроводность растворов органических жидкостей может быть вычислена по формуле,

$$\lambda = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 (1 - n_1) - 0,72 |\lambda_1 - \lambda_2| \cdot n_1 (1 - n_1). \quad (3.15)$$

которая, требует лишь знания теплопроводности компонентов жидкого раствора, при этом отличие расчётных значений от результатов измерений в большинстве случаев находится в пределах 1–2%, а максимальное отклонение составляет не более 3%. Поэтому для практических расчётов использование формулы (3.15), было рекомендовано в целом ряде работ [19, 67, 71]. Теплопроводность получаемую по формуле (3.13) ещё называют эффективной теплопроводностью.

Исследование теплопроводности водных растворов органических жидкостей, которое было проведено в данной работе, ставило задачи: по изучению особенностей концентрационной зависимости теплопроводности такого класса объектов, как водные растворы, также требовалось выявить закономерности температурной зависимости теплопроводности органических

растворов. Следует отметить, что основная формула (3.13) выполняется в изученных случаях. Концентрационная зависимость теплопроводности водных растворов достаточно точно передаётся параболической зависимостью, где коэффициент  $R$  – оказывается функцией температуры, однако его отношение к разности теплопроводности компонентов от температуры практически не зависит.

Данный факт независимости отношения  $\alpha = \frac{R}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$  от температуры эквивалентен существованию следующих формул, которые описывают температурную зависимость теплопроводности:

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) = 0, \quad \frac{d}{dT} \left( \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda} \right) = 0, \quad (3.16)$$

или

$$(\lambda_1 - \lambda_2) \frac{d\lambda}{dT} = (\lambda - \lambda_2) \frac{d\lambda_1}{dT} - (\lambda - \lambda_1) \frac{d\lambda_2}{dT}. \quad (3.17)$$

Также полученные экспериментальные результаты, дали основание использовать при расчётах эффективной теплопроводности формулу:

$$\lambda = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 - \alpha |\lambda_1 - \lambda_2| n_1 n_2. \quad (3.18)$$

с коэффициентом  $\alpha$ , который был получен в результате усреднения его значений для всех температур. Поскольку при таком усреднении необходимо использовать значения  $\alpha$ , то расчёт должен проводиться методом последовательных приближений [73].

Стоит так же отметить, что знание эффективной теплопроводности позволяет использовать формулу (3.18) для вычисления эффективной теплопроводности вторых компонентов даже в тех случаях, когда они в обычных условиях также находятся уже в твёрдой фазе.

При обсуждении основных закономерностей, относящихся к теплопроводности жидких растворов необходимо отметить, что отсутствие до недавнего времени последовательной теории теплопроводности жидкостей являлось причиной отсутствия и эффективной теории теплопроводности жидких растворов. В настоящее время известны несколько групп работ, где предприняты усилия по более или менее последовательному освещению данного вопроса.

Так в работе Г. Лонже-Хиггинса, Дж.. Попля и Дж.. Вале [74] была сделана попытка обобщения результатов теории авторов [75] для случая – смеси. Заметим, что при обсуждении вопроса о теориях теплопроводности жидких растворов данная теория практически не упоминается, ввиду ограниченности её исходных предпосылок, а результатом работы Лонже–Хиггинса, Попля и Валле стала формула для концентрационной зависимости вида:

$$\lambda = \lambda_1 x^2 + (1 - x)^2 \lambda_2 + 2x(1 - x)\lambda_{12}, \quad (3.19)$$

где  $x$  – молярная доля первого компонента.

Наиболее последовательными и развёрнутыми явились работы Р. Бермана [76,77], в основу которых была положена теория теплопроводности Кирквуда. Рассматривая эту теорию применительно к растворам, Берманом сделал ряд дополнительных предположений, а именно: 1) при растворении не происходит изменения объёма, 2) жидкие растворы принадлежат к классу регулярных, 3) радиальная функция распределения молекул не зависит от концентрации, 4) отношение коэффициента теплового расширения к коэффициенту сжимаемости раствора также не зависит от концентрации. Одним из основных следствий работы Бермана явился вывод,

$$\lambda\eta = const, \quad (3.20)$$

где  $\eta$  – вязкость смесей.

Соотношение Дж. Барата и Г. Неттельтона [78] было предложено для описания концентрационной зависимости теплопроводности:

$$\lambda sh\mu = \lambda_1 shc_1\mu + \lambda_2 shc_2\mu, \quad (3.21)$$

где  $sh$  – гиперболический синус,  $\mu$  – коэффициент, зависящий от вида раствора и от температуры. Эта формула достаточно хорошо описывает концентрационную зависимость теплопроводности жидких растворов.

Работа Л. П. Филиппова [68], в которой для описания концентрационной зависимости величины плотности, теплоёмкости и молярной массы должны вычисляться по правилу аддитивности в весовых концентрациях, принадлежит к числу более поздних исследований, посвящённых закономерностям исследования теплопроводности жидких растворов. В той же книге Л. П. Филиппова, помимо

указанного способа расчёта можно найти и более общие рекомендации по расчёту теплопроводности жидких растворов, а именно:

I. Правило аддитивности, когда имеется ввиду – аддитивность в весовых концентрациях, можно применять:

а) для растворов двух жидкостей, молекулы которых полярные, при отношении молярных весов не более 1,25;

б) для растворов двух жидкостей, у которых дипольные моменты молекул равны нулю, или для растворов двух жидкостей, молекулы одной из которых полярные, а другие не полярные, при отношении молекулярных весов исходных жидкостей не более 4,6;

в) для растворов двух жидкостей, молекулы которых полярные, при отношении молекулярных весов исходных жидкостей не более 1,9.

г) для растворов двух жидкостей, у одной из которых молекулы полярные, а у другой жидкости, молекулы имеют дипольные моменты равные нулю, при отношении молекулярных весов не более 1,7;

II. Предложенные автором методы для расчёта теплопроводности бинарных растворов, можно применять, определяя каждую величину, по правилу аддитивности при следующих условиях:

а) для растворов двух жидкостей, молекулы которых полярные.

б) для растворов двух жидкостей, молекулы которых полярные, при соотношении молекулярных весов исходных жидкостей не более 1,9;

Все изученные растворы органических веществ без химического взаимодействия хорошо описываются формулой (3.15), а водные растворы формулой (3.18), т. е. той же формулой с одним эмпирическим параметром.

В работе [68] для описания концентрационной зависимости теплопроводности была предложена формула:

$$\lambda = \lambda_{ad}(1 - n_1 n_2 b), \quad (3.22)$$

где

$$\lambda_{ad} = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2. \quad (3.23)$$

Значение величины –  $b$  предлагалось выбирать, в соответствии с принадлежностью раствора к определённому классу, номенклатура классов

соответствует классификации жидкостей по Эвеллу, которая приводится в таблице 4.

В работе [79] была изучена концентрационная зависимость теплопроводности ряда жидких растворов, а для некоторых из них, таких например, как (толуол ÷ ацетон) изменение теплопроводности в зависимости от весовой концентрации было получено близким к линейному. Теплопроводность остальных растворов хорошо описывается формулой:

$$\lambda = \lambda_1 + n_2(0,52n_2 + 0,48) (\lambda_2 - \lambda_1). \quad (3.24)$$

Результаты измерений теплопроводности водных растворов были приведены в работе [80], в ней для определения концентрационной и температурной зависимости авторами была предложена формула:

$$\lambda = \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 - 1,4 n_1 n_2 (\Delta\lambda - 0,2) + 1,4 n_1 n_2 (t - 20^\circ) \cdot 10^{-3}. \quad (3.25)$$

Отметим, что в части концентрационной зависимости эта формула тождественна формуле (3.13), а роль коэффициента  $-R$  в формуле (3.25) выполняет следующее выражение:

$$R = 1.4 [\Delta\lambda - 0,2 - (t - 20^\circ) \cdot 10^{-3}]. \quad (3.26)$$

вместо

$$R = \alpha \Delta \lambda. \quad (3.27)$$

В работе [81] было уделено внимание обсуждению зависимости теплопроводности жидких растворов от концентрации в мольных долях  $N$ . Приведённые авторами примеры хорошо показывают отсутствие тех простых закономерностей в характере концентрационной зависимости, которые наблюдаются при использовании весовых концентраций. А основной результат проведённого научного исследования, и полученных в ходе проведения экспериментальной работы данных, состоит в нахождении корреляции между величиной среднего относительного отклонения от аддитивности  $\frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda}$  и значением отношений молекулярных объёмов компонент  $\frac{V_1}{V_2}$ . Видно, что этот вывод может быть объяснён с точки зрения следующих соотношений: (3.13),

(3.14) и (3.18). Тогда используя связь между весовыми и молярными концентрациями, преобразуем формулу (3.18) к тождественному виду:

$$\lambda = \lambda_1 N + \lambda_2 (1-N) - \frac{(M_1 - M_2)(\lambda_1 - \lambda_2)N(1-N)}{M_1 N + (1-N)M_2} - \frac{\alpha(\lambda_1 - \lambda_2)N(1-N)M_1 M_2}{[M_1 N_1 + (1-N)M_2]^2}. \quad (3.28)$$

Формула, которая получена в результате даёт возможность увидеть, что отклонения от аддитивности в молярных долях зависят от концентрации довольно сложным образом, тогда, как простой закон  $\delta\lambda \sim N(1-N)$  получается лишь в частном случае, при равенстве масс компонент. А если отклонения от аддитивности  $\delta\lambda$  для различных растворов характеризовать единообразно, как отклонения при  $N \sim 0,5$ , то для относительного отклонения из (3.28) получаем формулу:

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{0,5(x^2 - 1) + \alpha x}{(x+1)^2}, \quad (3.29)$$

где  $x = \frac{M_1}{M_2}$ .

Следует отметить, что при постоянном значении параметра  $\alpha$  относительное отклонение от аддитивности должно однозначно определяться отношением молярных весов. При этом, если вместо отношения молекулярных весов брать отношения молекулярных объёмов, то есть величины, которые находятся в довольно тесной корреляции с параметром  $x$  и в среднем близкие к нему так же и по числовым значениям, то вместо более или менее чёткой зависимости (3.29) должна получиться корреляция между  $\frac{\delta\lambda}{(\lambda_1 - \lambda_2)}$  и  $y = \frac{V_1}{V_2}$ . При этом не мало важно, что формула (3.29) позволяет предсказывать все основные особенности этой корреляции, такие как – асимптотическое приближение.

А формула (3.18) наиболее простым и точным образом описывают, как концентрационную, так и температурную зависимость.

Результаты исследований теплопроводности жидких растворов, изложенные выше, позволяют сделать вывод, что для неводных растворов органических жидкостей теплопроводность раствора может быть вычислена по значениям теплопроводности компонентов с помощью формулы (3.15). Данная формула

также может быть использована для ориентировочных расчётов теплопроводности водных растворов органических жидкостей. Для более точного описания концентрационной зависимости теплопроводности водных растворов требуется знание одного значения теплопроводности растворов. И поэтому в этом случае для расчётов может быть применена формула (3.18), а температурная зависимость теплопроводности жидких растворов выражается так же формулами (3.15) и (3.18).

В таблицы 6 приведены расчётные коэффициенты в зависимости от принадлежности конкретного вещества к соответствующей группе веществ по классификации Эвелла.

Таблица 6. Расчётные коэффициенты

Класс	Характеристика соединений	Константа $k$
2	Молекулы содержат активный водород и донор электронов (кислород, азот, фтор)	0,69
5	Молекулы без водородных связей	0,91

Полученные в данной работе результаты являются новыми (были депонированы в ВИНТИ) [66] и в последних публикациях, по данной тематике, отсутствуют, что было отмечено на международной научно-практической конференции - Euroscience – 2014 [52].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы теплофизические свойства более ста совершенно новых растворов органических жидкостей, которые могут применяться в авиационно-космической химической и энергетической отраслях промышленности.
2. На основе проведенных экспериментальных исследований получены зависимости коэффициента теплопроводности и тепловой активности от вида и концентрации компонентов бинарных и тройных жидкостей.
3. Получено математическое соотношение для учёта отклонения от аддитивности при расчёте тепловой активности бинарных растворов.
4. Создан универсальный генератор измерительных импульсов и высокоомные датчики, с помощью которых модифицирован измерительный комплекс, позволяющий проводить измерения в широком диапазоне временных интервалов длительности теплового импульсного воздействия.
5. Усовершенствован экспресс-метод, основанный на методе иррегулярного теплового режима, позволяющий получать коэффициенты теплопроводности и тепловой активности органических диэлектрических жидкостей с погрешностью не более 3%.
6. На основе полученных результатов предложены рекомендации по практическому использованию созданного универсального генератора измерительных импульсов, с помощью которого модифицирован измерительный комплекс, позволяющий проводить измерения в широком диапазоне временных интервалов длительности теплового и измерительного импульсного воздействия.

**ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Френкель, Я.И. Кинетическая теория жидкостей/ Я.И. Френкель. – М.: Изд-во АН СССР, 1977. – 592 с.
- 2 Филиппов, Л.П. Исследование теплопроводности жидкостей/ Л.П. Филиппов. – М.: МГУ, 1970. – 241 с.
- 3 Филиппов, Л.П. Подобие свойств веществ/ Л.П. Филиппов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 256 с.
- 4 Бретшнайдер, С.Т. Свойства газов и жидкостей/ С.Т. Бретшнайдер. - М.–Л.: Химия, 1966. - 537 с.
- 5 Павлович, Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам природных газов и их компонентов/ Н. В. Павлович. - М.: Госэнергоиздат, 1962. - 119 с.
- 6 Blacwell, J.H. Axial heat flow in regions founded internally by circular cylinders/ J. H. Blacwell// Canadian J. Of Physics. – 1953. – 31. - № 4. - p. 472-479.
- 7 Спири́н, Г.Г. Методические особенности кратковременных измерений в стадии иррегулярного теплового режима/ Г.Г. Спири́н// ИФЖ. – 1980. Т. 38. - №3. - С. 403-410.
- 8 Спири́н, Г.Г. Кратковременные измерения в стадии иррегулярного теплового режима и диагностика теплофизических свойств диэлектрических веществ и материалов на их основе: дисс. ... докт. техн. наук: 01.04.14/ Спири́н Геннадий Георгиевич. - М.,1986. - 390 с.
- 9 Horrocks, J.K. Non-steady-state measurements of the thermal conductivities of liquids polyphenyls/ J.K. Horrocks, E.Mc. Laughlin// Proc. Roy. Soc. – 1963. – 273. - №1353 - P. 259-274.
- 10 Литвиненко, И.В. Новый относительный метод измерения теплопроводности жидкостей при нестационарном тепловом режиме./ И. В. Литвиненко, В. В. Литвиненко// УФЖ. – 1967. - Т. 12. №2. С. 203-207.
- 11 Иванников, П.С. Теплопроводность жидких тетрахлоридов/ П.С. Иванников, И.В. Литвиненко, Н.В. Радченко // ИФЖ. – 1972. - Т. 23. - №5. - С. 835-841.

- 12 Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов/ Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк// - Л.: Энергия, 1974. - 264 с.
- 13 Шашков, А.Г./ А.Г. Шашков, Ю.П. Санько// Известия АН БССР серия физ. - энерг. Наук. – 1968. - №3.
- 14 Василевский, Д.В. Экспресс-диагностика теплофизических свойств полупрозрачных сред: дис... канд. техн. наук: 01.04.14/ Василевский Дмитрий Валентинович - Москва, 1999. - 138 с.
- 15 Габитов, Ф.Р. Теплофизические свойства органических жидкостей в широком диапазоне температур, не искаженные радиационным теплопереносом: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.05/ Габитов Фаризан Ракибович. - Казань, 2000. - 535 с.
- 16 Аляев, В.А. Радиационно-кондуктивный теплообмен в плоских слоях органических жидкостей при повышенных температурах: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14/ Аляев Валерий Алексеевич. - Казань, 2004. - 535 с.
- 17 Гарибян, Б.А. Принцип минимума действия в задачах стационарного теплообмена/ Б.А. Гарибян, Г.Г. Спириной// Научное образование. – 2013. - №7. – С. 15-41.
- 18 Сергеев, А.Г. Метрология. Учебное пособие/ А.Г. Сергеев, В.В. Крохин// - М.: Логос, 2000. – 408 с.
- 19 Спириной, Г.Г. Комплексное определение теплофизических свойств в тонких слоях жидкости/ Г.Г. Спириной, Б.И. Ильин, С.А Дроздов, В.Ф. Салохин// ИФЖ. – 1973. Т. 25. - №7.
- 20 Зигель, Р. Теплообмен излучением/ Р. Зигель, Дж. Хауэлл// - М.: Мир, 1975. 935с.
- 21 Keyes, F.G. New measurements of the heat conductivity of steam and nitrogen / F.G. Keyes, D.J. Sandell // Trans ASME. – 1950. - V. 72. - p. 767.
- 22 Суриков, Ю.А. О функциональных уравнениях для теплового излучения при наличии поглощающей и рассеивающей среды/ Ю.А. Суриков. - ДАН СССР. - 1952. Т. 84. - №6. - С. 1159-1162.

- 23 Kellett, B.S. The Steady Flow of Heat through Hot Glass / B.S. Kellett// J. Opt. Soc. Amer. - 1952. - №85.
- 24 Gensel, Z. Der anteil der warmestrahlungbeiwärmeleitungs-vorgängen/ Z. Gensel / ZeitschriftfürPhysik. - 1953. - V. 136. - P. 177-195.
- 25 Poltz, H. Die wärmeleitfähigkeit von flüssigkeiten II: Der trahlungsanteil der effektivenwärmeleitfähigkeit/ H. Poltz// Int J. Heat Mass Transfer. - 1965. - V. 8. - p. 515.
- 26 Андрианов, В.Н. – В сб.: Тепло - и массоперенос/ В.Н. Андрианов.- Минск.: ИТМО АН БССР, 1965. - Т.2. – 280 с.
- 27 Филиппов, Л.П./ Л.П. Филиппов. - Вестник Московского университета.сер. физ. – 1954. – Т. 51. - №2.
- 28 Menashe, J. Effect of absorbtion of radiation on thermal conductivity measurements bu the transient hot - wire technique/ J. Menashe, W.A. Wakeham// Int. J. of heat and mass transfer. – 1982. - V. 25. - № 5. - P. 661-673.
- 29 Стрекалова, Е.А. Радиационно – кондуктивный теплообмен при кратковременных измерениях теплофизических характеристик полупрозрачных сред: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.14 / Стрекалова Елена Анатольевна – М.: МЭИ, 1992. – 144 с.
- 30 Лыков, А.В. Теория теплопроводности/ А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.
- 31 Симанков, Д.С. Критерий комфортности температурных ощущений медико-биологических объектов [Электронный ресурс]/ Д.С. Симанков, С.Ю. Побережский// Современные проблемы науки и образования. – 2012. - №6. – Режим доступа: [www.science-education.ru/106-7725](http://www.science-education.ru/106-7725).
- 32 Мучник, Г.Ф. Методы теории теплообмена, ч.1. Теплопроводность./ Г. Ф. Мучник, И. Б. Рубашов. – М.: «Высшая школа», 1970. – 288 с.
- 33 Спириин, Г.Г. Кратковременные измерения тепловой активности в области плавления веществ/ Г.Г. Спириин, Е.А. Накашидзе, Л.Н. Кудрявцева// ИФЖ. – 1985. Т. 48. - №1.

- 34 Спири́н, Г.Г. Комплексный метод исследования теплофизических свойств жидкостей/ Г.Г. Спири́н, С.Н. Кравчун, Е.К. Широкова// ИФЖ. – 1991. Т. 61. - №2.
- 35 Слуцкая, В.В. Тонкие пленки в технике СВЧ/ В.В. Слуцкая. - М.: Советское радио, 1967. – 456 с.
- 36 Лаушкина, Л.А. Практический курс физики. Молекулярная физика и термодинамика/ Л.А. Лаушкина, Г.Э. Солохина, М.В. Черкасова// - М.: МАИ, 2008. – 156 с.
- 37 Петров, В.А. Перенос энергии в частично прозрачных твердых материалах/ В.А. Петров, Н.В. Марченко// – М.: Стандарты, 1977. - 189 с. 30
- 38 Van der Held, E.F.M. A method of measuring the thermal conductivity of liquids/ E.F.M. Van der Held, F.G. Van Drunen // Physica. – 1949. – 15. - №10. - P. 865-881.
- 39 Побережский, С.Ю. Генератор для измерения тепловых характеристик жидкости. Материалы IX международной теплофизической школы. Октябрь 2014/ Г.Г. Спири́н, С.Ю. Побережский, И.В. Поярков, Душанбе, Москва, Тамбов, 2014, с. 172-174.
- 40 Poitz, H. The Thermal Conductivity of Dialkylphthalates / H. Poitz// Wärme und Stoffübertragung. – 1970. - V. 3, P. 247-250.
- 41 Hottel, H.C. R-dative Transfer/ H.C. Hottel, A.F. Sarofim// NY. – 1967. - p 520.
- 42 Побережский, С.Ю. Универсальный генератор измерительных импульсов/ С.Ю. Побережский. - Депонир. в ВИНТИ 02.06.2014 № - 152 В2014.
- 43 Баюков, А.В. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник/ А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков, В.М. Петухов, А.К. Хрулёв// - М.: Энергоиздат, 1982. – 744с.
- 44 Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение/ Б. Скляр. - 2-е издание, – Москва – Санкт-Петербург – Киев, 2003. – 1106 с.

- 45 Побережский, С.Ю. Конференция - Международная школа семинар – 2014. Физика в системе высшего и среднего образования. Исследование тепловой активности бинарных растворов/ С.Ю. Побережский, М.: 23-25 Июня 2014, с. 209.
- 46 Побережский, С.Ю. Определение температур гомогенной нуклеации жидкостей [Электронный ресурс]/ С.Ю. Побережский, Д.С. Симанков// Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7923>.
- 47 Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен/ М.Н. Оцисик. - М.: Мир, 1976. - 616 с.
- 48 Спири́н, Г.Г. Оценка влияния излучения на результат кратковременных измерений теплофизических характеристик полупроницаемых сред [Электронный ресурс]/ Д.В. Василевский, С.Ю. Побережский, Д.С. Симанков // Труды МАИ. ISSN: 1727-6924. - 2012. - № 61 Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=35612>.
- 49 Никольский, Б.П. Справочник химика/ Б.П. Никольский. – Л – М.: - Госхимиздат, 1962. - Т. 1. – 1070 с.
- 50 Никольский, Б.П. Справочник химика/ Б.П. Никольский. – М – Л.: -Химия, 1965. - Т. 3. – 1008 с.
- 51 Haynes W.M. Handbook of Chemistry and Physics – 96th edition / W.M. Haynes. – CRC Press, 2004. – 2712 p.
- 52 Побережский, С.Ю. Изучение различных аспектов, теплофизических свойств бинарных растворов органических жидкостей. Тезисы докладов. Материалы международной научно-практической конференции - Euroscience – 2014/ С.Ю. Побережский, И.В. Поярков. Material of science the I international scientific and practical conference, Belgorod-Sheffield. - 2014, P 58-59.
- 53 Побережский, С.Ю. Исследование теплопроводности бинарных растворов органических жидкостей/ С.Ю. Побережский. - Депонир. в ВИНТИ 02.06.2014 № - 150 В2014.

- 54 Побережский, С.Ю. Исследование теплопроводности бинарных растворов. Тезисы докладов. Материалы конференции – Международной школы семинара – 2014. Физика в системе высшего и среднего образования России. / С.Ю. Побережский, М.:23-25 Июня 2014, с. 209.
- 55 Спири́н, Г.Г. Импульсный метод исследования тепловой активности диэлектрических жидкостей/ Г.Г. Спири́н, Ю.А. Поляков// ИФЖ. – 1970. Т. 18. - №2.
- 56 Кравчун, С.Н. О возможности измерения теплофизических свойств жидкостей в потоках методом периодического нагрева/ С.Н. Кравчун, А.С. Тлеубанов// ИФЖ – 1984. - Т.46. - №1. - С. 113-118.
- 57 Побережский, С.Ю. Отклонение от аддитивности при расчёте тепловой активности бинарных растворов органических жидкостей [Электронный ресурс]/ С.Ю. Побережский // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 3. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/117-13800>.
- 58 Побережский, С.Ю. Учёт отклонения от аддитивности при расчёте тепловой активности бинарных растворов органических жидкостей/ С.Ю. Побережский. - Депонир. в ВИНТИ 02.06.2014 № - 153 В2014.
- 59 Рид, Р. Свойства газов и жидкостей/ Р. Рид, Т. Шервуд// - М.: Гостоптехиздат, 1964. - 610 с.
- 60 Побережский, С.Ю. Теплопроводность бинарных растворов органических жидкостей по группам классификации Эвелла [Электронный ресурс]/ С.Ю. Побережский // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - № 4. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/118-13977>.
- 61 Побережский, С.Ю. Расчёт теплопроводности бинарных растворов органических жидкостей по группам классификации Эвелла/ С.Ю. Побережский. - Депонир. в ВИНТИ 02.06.2014 № - 154 В2014.
- 62 Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел/ Г. Карслоу, Д. Егер - М.: Наука, 1964. – 488 с.

- 63 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров/ Г. Корн, Т. Корн - М.: Наука, 1968. – 720 с.
- 64 Шашков, А.Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности/ А.Г. Шашков, Волков Г.В., Т.Н. Абраменко, В.П. Козлов. – М.: Энергия, 1973. – 336с.
- 65 Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности/ Л.А. Коздоба. – М.: Наука, 1975. – 228 с.
- 66 Побережский, С.Ю. Исследование теплопроводности бинарных и тройных водных растворов органических жидкостей/ С.Ю. Побережский. - Депонир. в ВИНТИ 28.05.2014 № 149 – В2014.
- 67 Гуренкова Т.В. Изучение радиационного переноса в полупрозрачных жидкостях различной химической природы. Сб.: Тепло и массоперенос в химической технологии / Т.В. Гуренкова, Л.Л. Сулейманова, Т.Н. Горшенина А.Г. Усманов. – Казань, 1981 - Вып. № 9. – С. 68.
- 68 Филипов, Л.П. Измерение теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева/ Л.П. Филипов. – М.: Энергоатомиздат, 1984, -105с.
- 69 Побережский, С.Ю. Исследование теплопроводности тройных растворов органических жидкостей/ С.Ю. Побережский. - Депонир. в ВИНТИ 02.06.2014 № - 151 В2014.
- 70 Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса/ Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут. – М.: Химия, 1974. 688 с.
- 71 Широкова, Е.К. Комплексное исследование теплофизических свойств фторуглеродов и их обобщение на основе теории подобия: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.14/ Широкова Елена Константиновна. – М.: МЭИ, 1989. - 127 с.
- 72 Побережский, С.Ю. Измерение теплофизических характеристик фторуглеродов импульсным методом [Электронный ресурс]/ С.Ю. Побережский, Д.С. Симанков // Современные проблемы науки и образования. - 2012. - № 6. — Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7730>.

- 73 Спирин, Г.Г. Исследование молекулярной теплопроводности органических жидкостей/ Г.Г. Спирин // ИФЖ. – 1980. – Т. 38. - №4.
- 74 Longuet – Higgins, H.C. Int. Symposium on Transport Processes in Statistical Mechanics. Brussels, 1956/ H. C. Longuet – Higgins, J.A. Pople, J.P.B. Vallean // N. Y. – 1959. - p. 73.
- 75 Longuet – Higgins, H.C. Transport Properties of a Dense Fluid of Hard Spheres / H. C. Longuet – Higgins, J.A. Pople// J. Chem. Phys. – 1956. – 25. – p. 884.
- 76 Bearman, R.J. Statistical Mechanics of Transport Processes. XI. Equations of Transport in Multicomponent Systems / R.J. Bearman// J. Chem. Phys. – 1958. - 28. - P. 136.
- 77 Bearman, R.J. On the molecular basis of some current theories of diffusion / R.J. Bearman// J. Chem. Phys. – 1961. - 65. – pp. 1961-1968.
- 78 Barrat, T. Intern. Critical Tables/ T. Barrat, H.R. Nettleton// Mc. Grow-HillBook, – 1929. - v. 5. - p. 227.
- 79 Геллер, З.И. Нефть и газ/ Ю.Л. Расторгуев, Ю.А. Ганиев// - М.: Изв. вузов, 1966. – Т.88. - №2.
- 80 Ганиев Ю.А. Теплопроводность органических жидкостей./ Ю.Л. Расторгуев, Ю.А. Ганиев // ИФЖ. – 1968. – Т. 15, № 3. – С. 519–525.
- 81 Григорьев Б. А. Экспериментальное исследование P–V–T-зависимости воды/ Б. А. Григорьев, Р. М. Мурдаев, Ю. Л. Расторгуев// ТВТ. –1974. - № 12. – С. 83–91.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

Теплопроводность органических жидкостей.  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ .

№№ п / п	Название жидкости, химическая формула	Температура, °С						
		-25	0	20	25	50	75	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	Бензин $C_2-80$	-	-	0,117	-	-	-	-
3	Бензол $C_6H_6$	-	-	0,147	-	-	-	-
4	Гептан $C_7H_{16}$	0,1378	0,1303	0,129	0,1228	0,1152	0,1077	-
5	Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$	-	-	0,139	-	-	-	-
6	Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$	-	-	0,148	0,122	0,119	0,115	-
7	Диметилформамид $(CH_3)_2NC(O)H$	-	-	0,193	0,183	0,175	0,167	0,159
8	Дистиллированная вода $H_2O$	-	0,5562	0,596	0,6062	0,6423	0,6643	0,6729
9	1,4-диоксан $C_4H_8O_2$	-	-	0,161	0,159	0,147	0,135	0,123
10	Керосин ТУ 10227-86	-	-	0,118	-	-	-	-
11	н-Бутанол $C_4H_9OH$	-	0,158	0,157	0,153	0,147	0,142	0,137
12	н-Гексан $C_6H_{14}$	0,133	0,1250	0,122	0,1167	0,1083	-	-
13	о-Ксилол $C_8H_{10}$ (1,2-диметилбензол)	-	-	0,134	0,131	0,126	0,120	0,114
14	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$	-	0,109	0,108	0,103	0,098	0,092	0,087
15	Толуол $C_7H_8$	0,1455	0,1385	0,135	0,1310	0,1235	0,1162	0,1095

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	Циклогексан $C_6H_{12}$	-	-	0,124	0,123	0,117	0,111	-
17	Циклогексанон $C_6H_{12}$	-	-	0,142	0,138	0,134	0,130	0,126
18	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	-	-	0,265	-	-	-	-

Теплопроводность бинарных жидких растворов при различной концентрации смеси (при  $t = 20^\circ \text{C}$ )  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$ .

№№ п / п	Основная и добавочная компонента жидкого раствора, химическая формула	Концентрация смеси					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
		Теплопроводность смеси $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$					
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Бензол $C_6H_6$ - Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$	0,145	0,141	0,136	0,129	0,121	0,115
2.	Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$ - Циклогексанон $C_6H_{12}$	0,148	0,147	0,146	0,145	0,144	0,143
3.1	н-Гексан $C_6H_{14}$ - о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$	0,122	0,123	0,124	0,125	0,126	0,127
3.2	н-Гексан $C_6H_{14}$ - Циклогексанон $C_6H_{12}$	0,122	0,124	0,125	0,126	0,128	0,133
3.3	н-Гексан $C_6H_{14}$ - Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	0,122	0,141	0,160	0,179	0,197	0,217

1	2	3	4	5	6	7	8
4.1	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Диметилформаид $(CH_3)_2NC(O)H$	0,113	0,115	0,117	0,119	0,120	0,122
4.2	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$	0,116	0,115	0,114	0,112	0,110	0,109
5.1	Толуол $C_7H_8$ – Бензол $C_6H_6$	0,135	0,136	0,137	0,138	0,140	0,141
5.2	Толуол $C_7H_8$ – Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$	0,135	0,137	0,139	0,142	0,143	0,144
5.3	Толуол $C_7H_8$ – Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$	0,135	0,131	0,128	0,124	0,122	0,119
5.4	Толуол $C_7H_8$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$	0,135	0,136	0,137	0,139	0,140	0,142
5.5	Толуол $C_7H_8$ – Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	0,135	0,143	0,157	0,171	0,184	0,198

1	2	3	4	5	6	7	8
6.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Бензол $C_6H_6$	0,281	0,278	0,275	0,268	0,265	0,239
6.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$	0,281	0,275	0,261	0,237	0,218	0,199
6.3	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Диметилформамид $(CH_3)_2NC(O)H$	0,281	0,279	0,277	0,275	0,273	0,270
6.4	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$	0,281	0,273	0,251	0,238	0,217	0,209
6.5	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ - н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,281	0,276	0,274	0,256	0,241	0,229
6.6	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$	0,281	0,269	0,257	0,244	0,233	0,220

Теплопроводность тройных жидких растворов при различной концентрации

смеси (при  $t = 20^\circ \text{C}$ )  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ .

№ п / п	Базовая жидкость – жидкий двухкомпонентный раствор, химические формулы	Концентрация базовой жидкости, $n$					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
		Теплопроводность смеси, $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$					
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Бензол $C_6H_6$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + Циклогексан $C_6H_{12}$	0,145	0,143	0,141	0,139	0,138	0,136
2.1	Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,146	0,143	0,137	0,133	0,132	0,131
2.2	Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + Керосин ТУ 10227- 86	0,146	0,145	0,139	0,136	0,134	0,133

1	2	3	4	5	6	7	8
3.1.1	н-Гексан $C_6H_{14}$ – о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,126	0,128	0,132	0,134	0,137	0,141
3.1.2	н-Гексан $C_6H_{14}$ – о-Ксилол $C_8H_{10}$ (1,2-диметилбензол) + Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	0,126	0,131	0,137	0,145	0,164	0,176
3.2.1	н-Гексан $C_6H_{14}$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,133	0,134	0,136	0,137	0,139	0,142
3.2.2	н-Гексан $C_6H_{14}$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	0,133	0,141	0,161	0,177	0,198	0,234
3.3.1	н-Гексан $C_6H_{14}$ – Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ + Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$	0,217	0,209	0,196	0,187	0,173	0,169
3.3.2	н-Гексан $C_6H_{14}$ – Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ + Керосин ТУ 10227-86	0,217	0,203	0,187	0,174	0,159	0,151

1	2	3	4	5	6	7	8
4.1.1	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Диметилформаид $(CH_3)_2NC(O)H$ + Бензин C2-80	0,122	0,1215	0,120	0,119	0,118	0,117
4.1.2	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Диметилформаид $(CH_3)_2NC(O)H$ + Керосин ТУ 10227-86	0,122	0,123	0,124	0,125	0,127	0,128
4.1.3	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Диметилформаид $(CH_3)_2NC(O)H$ + о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$	0,122	0,124	0,126	0,130	0,135	0,141
4.2.1	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + Бензол $C_6H_6$	0,112	0,113	0,117	0,120	0,123	0,124

1	2	3	4	5	6	7	8
4.2.2	Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$	0,112	0,115	0,119	0,121	0,125	0,130
5.1	Толуол $C_7H_8$ – Бензол $C_6H_6$ + о- Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$	0,141	0,139	0,137	0,135	0,134	0,132
5.2.1	Толуол $C_7H_8$ – Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,144	0,146	0,148	0,149	0,150	0,152
5.2.2	Толуол $C_7H_8$ – Дибутилфталат $C_{16}H_{22}O_4$ + Керосин ТУ 10227-86	0,144	0,143	0,142	0,141	0,140	0,139
5.3.1	Толуол $C_7H_8$ – о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,135	0,137	0,142	0,146	0,149	0,151

1	2	3	4	5	6	7	8
5.3.2	Толуол $C_7H_8$ – о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$ + Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	0,135	0,143	0,147	0,153	0,168	0,175
5.4.1	Толуол $C_7H_8$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,142	0,143	0,145	0,146	0,147	0,148
5.4.2	Толуол $C_7H_8$ – Циклогексанон $C_6H_{12}$ + Этиленгликоль $C_4H_8O_2$	0,142	0,146	0,152	0,168	0,185	0,201
5.5.1	Толуол $C_7H_8$ – Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ + Бензин C2-80	0,198	0,178	0,155	0,139	0,133	0,127
5.5.2	Толуол $C_7H_8$ – Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ + Керосин ТУ 10227-86	0,198	0,196	0,188	0,179	0,175	0,173
5.6.1	Толуол $C_7H_8$ – Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ + Гептан $C_7H_{16}$	0,119	0,120	0,122	0,123	0,125	0,127

1	2	3	4	5	6	7	8
5.6.2	Толуол $C_7H_8$ – Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ + 1,4-диоксан $C_4H_8O_2$	0,119	0,124	0,127	0,131	0,136	0,138
6.1.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Бензол $C_6H_6$ + Бензин $C2-80$	0,239	0,222	0,205	0,184	0,179	0,162
6.1.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Бензол $C_6H_6$ + Керосин ТУ 10227- 86	0,239	0,207	0,186	0,171	0,157	0,151
6.2.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$ + Бензин $C2-80$	0,199	0,196	0,189	0,174	0,143	0,135
6.2.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Диметиланилин $C_6H_5N(CH_3)_2$ + Керосин ТУ 10227-86	0,199	0,197	0,192	0,186	0,184	0,180
6.3.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Диметилформамид $(CH_3)_2NC(O)H$ + Бензин $C2-80$	0,270	0,256	0,239	0,207	0,189	0,160

1	2	3	4	5	6	7	8
6.3.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Диметилформамид $(CH_3)_2NC(O)H$ + Керосин ТУ 10227-86	0,270	0,262	0,241	0,229	0,216	0,203
6.4.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – н-Бутанол $C_4H_9OH$ + Бензин C2-80	0,229	0,218	0,207	0,179	0,157	0,148
6.4.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – н-Бутанол $C_4H_9OH$ + Керосин ТУ 10227-86	0,229	0,221	0,211	0,205	0,191	0,185
6.5.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$ + Бензин C2-80	0,209	0,205	0,201	0,192	0,186	0,184
6.5.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – о-Ксилол (1,2-диметилбензол) $C_8H_{10}$ + Керосин ТУ 10227- 86	0,209	0,199	0,192	0,164	0,139	0,127

1	2	3	4	5	6	7	8
6.6.1	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ + Гептан $C_7H_{16}$	0,220	0,216	0,212	0,203	0,197	0,191
6.6.2	Этиленгликоль $C_4H_8O_2$ – Тетрахлорметан (четырёххлористый углерод) $CCl_4$ + н-Бутанол $C_4H_9OH$	0,220	0,218	0,215	0,213	0,209	0,208

Тепловая активность фторуглеродов  $\varepsilon, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{К с}^{1/2}}$

№№ п / п	Название жидкости, химическая формула	Температура, °С				
		20	40	60	80	100
1	2	3	4	5	6	7
1	Перфторгексан, $C_6 F_{14}$	330	300	280	270	250
2	Перфторгептан, $C_7 F_{16}$	340	320	300	290	280
3	Перфтороктан, $C_8 F_{18}$	350	330	320	310	300
4	Перфтордекалин, $C_{10} F_{18}$	330	325	320	315	310
5	Перфторметилциклогелсан, $C_7 F_{14}$	330	320	310	300	280
6	Перфтор-4,7-диокса- 5-метилнонан, $C_8 F_{18} O_2$	325	320	310	300	290
7	Перфтор-1,3-диметил- циклогексан, $C_8 F_{16}$	330	320	315	310	305
8	Перфтор-2-бутилтетра- гидрофурин, $C_8 F_{16} O$	345	335	325	315	305
9	2-фтор-2-пентафторитил-3,3- бистрифторметилгидрофуран, $C_8 F_{12} O H_4$	385	375	365	355	340
10	Перфтор-2,5,8,11,14,17,20, 23,24,26,32,35- додекаоксагексатрианоктан, $C_{24} F_{50} O_{12}$	420	400	380	365	350
11	Перфтор-4,7,10,13-окса- 5,8,9,12- тетраметилгексадекан, $C_{10} F_{22} O_2$	340	335	330	325	320

1	2	3	4	5	6	7
12	Перфтортрибутиламин, $N(C_4F_9)_3$	350	345	340	335	330
13	Перфтор-3-изопропил-2- метилпентан, $C_9F_{20}$	330	330	325	330	320
14	Перфтор-2-метилдекалин, $C_{11}F_{20}$	330	330	325	330	320
15	Перфтор- <i>N</i> -4-метил- циклогексил $C_{12}F_{23}$	335	330	325	325	320
16	Перфтор-4-окса-2-метилгексан, $C_9OF_{20}$	340	330	320	310	300
17	$\alpha,\alpha$ дегидроперфторамиловый спирт, $C_4F_3CH_2OH$	460	450	440	430	420
18	1,1,5-тригидроперфтор- пентанол, $C_5F_2H_3OH$	510	500	490	480	485
19	Перфтордиамиловый эфир, $C_5F_{12}O$	450	450	440	430	420
20	Перфтор-2,4-диметил-3- этилпентен, $C_9F_{12}$	360	360	360	360	360

Теплопроводность фторуглеродов  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ 

№№ п / п	Название жидкости, химическая формула	Температура, °С				
		20	40	60	80	100
1	2	3	4	5	6	7
1	Перфторгексан, $C_6 F_{14}$	0,059	0,055	0,051	0,048	0,045
2	Перфторгептан, $C_7 F_{16}$	0,060	0,057	0,054	0,051	0,048
1	2	3	4	5	6	7
3	Перфтороктан, $C_8 F_{18}$	0,063	0,061	0,058	0,056	0,053
4	Перфтордекалин, $C_{10} F_{18}$	0,058	0,056	0,054	0,052	0,050
5	Перфторметилциклогелсан, $C_7 F_{14}$	0,061	0,059	0,056	0,053	0,050
6	Перфтор-4,7-диокса- 5-метилнонан, $C_8 F_{18} O_2$	0,059	0,057	0,055	0,054	0,052
7	Перфтор-1,3-диметил- циклогексан, $C_8 F_{16}$	0,058	0,056	0,054	0,052	0,049
8	Перфтор-2-бутилтетра- гидрофурин, $C_8 F_{16} O$	0,061	0,059	0,057	0,055	0,052
9	2-фтор-2-пентафторитил-3,3- бистрифторметилгидрофуран, $C_8 F_{12} O H_4$	0,073	0,068	0,063	0,058	0,054
10	Перфтор-2,5,8,11,14,17,20, 23,24,26,32,35- додекаоксагексатрианоктан, $C_{24} F_{50} O_{12}$	0,077	0,076	0,075	0,074	0,073
11	Перфтор-4,7,10,13-окса- 5,8,9,12- тетраметилгексадекан, $C_{10} F_{22} O_2$	0,064	0,063	0,062	0,061	0,060

1	2	3	4	5	6	7
12	Перфтортрибутиламин, $N(C_4F_9)_3$	0,064	0,062	0,061	0,060	0,059
13	Перфтор-3-изопропил-2- метилпентан, $C_9F_{20}$	0,061	0,059	0,058	0,057	0,056
14	Перфтор-2-метилдекалин, $C_{11}F_{20}$	0,060	0,058	0,056	0,054	0,053
15	Перфтор- <i>N</i> -4-метил- циклогексил $C_{12}F_{23}$	0,059	0,057	0,055	0,054	0,053
16	Перфтор-4-окса-2-метилгексан, $C_9OF_{20}$	0,060	0,058	0,056	0,054	0,052
17	$\alpha,\alpha$ дегидроперфторамиловый спирт, $C_4F_3CH_2OH$	0,084	0,083	0,082	0,081	0,080
18	1,1,5-тригидроперфтор- пентанол, $C_5F_2H_3OH$	0,107	0,105	0,103	0,100	0,098
19	Перфтордиамиловый эфир, $C_5F_{12}O$	0,082	0,081	0,079	0,078	0,077
20	Перфтор-2,4-диметил-3- этилпентен, $C_9F_{12}$	0,061	0,059	0,058	0,057	0,056

Тепловая активность растворов фторуглеродов при различной концентрации

смеси (при  $t = 20^\circ \text{C}$ )  $\varepsilon, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \text{К с}^{1/2}}$ 

№№ п / п	Название жидкости, химическая формула	Концентрация, $n$					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Перфторгексан, $C_6 F_{14}$ – 2-фтор-2-пентафторитил-3,3- Бистрифторметилгидрофуран, $C_8 F_{12} O H_4$	385	374	363	352	341	330
2	Перфтордекалин, $C_{10} F_{18}$ – Перфтор-2,5,8,11,14,17,20, 23,24,26,32,35- додекаоксагексатрианоктан, $C_{24} F_{50} O_{12}$	420	402	384	366	348	330
3	Перфтортрибутиламин, $N(C_4 F_9)_3$ – $\alpha, \alpha$ дегидроперфторамиловый спирт, $C_4 F_3 C H_2 O H$	460	438	416	394	372	350
4	Перфтор-3-изопропил-2- метилпентан, $C_9 F_{20}$ – 1,1,5-тригидроперфтор- пентанол, $C_5 F_2 H_3 O H$	510	474	438	402	366	330
5	Перфтор-2-метилдекалин, $C_{11} F_{20}$ – Перфтордиамиловый эфир, $C_5 F_{12} O$	460	434	402	382	356	330

Теплопроводность растворов фторуглеродов при различной концентрации смеси

(при  $t = 20^\circ \text{C}$ )  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ 

№№ п / п	Название жидкости, химическая формула	Концентрация, $n$					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Перфторгексан, $C_6 F_{14}$ – 2-фтор-2-пентафторитил- 3,3- Бистрифторметилгидрофу ран, $C_8 F_{12} O H_4$	0,073	0,069	0,065	0,062	0,060	0,059
2	Перфтордекалин, $C_{10} F_{18}$ – Перфтор-2,5,8,11,14,17,20, 23,24,26,32,35- додекаоксагексатрианокта н, $C_{24} F_{50} O_{12}$	0,077	0,070	0,063	0,061	0,059	0,058
3	Перфтортрибутиламин, $N(C_4 F_9)_3$ – $\alpha, \alpha$ дегидроперфторамиловый спирт, $C_4 F_3 C H_2 O H$	0,084	0,078	0,073	0,069	0,066	0,064
4	Перфтор-3-изопропил-2- метилпентан, $C_9 F_{20}$ – 1,1,5-тригидроперфтор- пентанол, $C_5 F_2 H_3 O H$	0,107	0,092	0,081	0,071	0,065	0,061
5	Перфтор-2-метилдекалин, $C_{11} F_{20}$ – Перфтордиамиловый эфир, $C_5 F_{12} O$	0,082	0,075	0,069	0,065	0,061	0,060