

УДК 536.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ.

Г.Г. Спирин, Н. Д. Хамзин.

В данной статье приведены теоретические и экспериментальные данные по определению теплофизических характеристик перегретых жидкостей.

Исследование области неустойчивых, перегретых состояний сопряжено со значительными экспериментальными трудностями, вместе с тем развитие современной техники ставит на повестку дня их изучение. Подробный обзор состояния изучения теплофизических характеристик в метастабильной области изложен в [1] и мы не будем на нем останавливаться.

Отметим лишь то, что эта область доступна для измерения специальными средствами и одним из них являются кратковременные нестационарные измерения в стадии иррегулярного теплового режима.

Мы остановимся на теплофизических измерениях в изобарических условиях, методика которых предполагает воздействие на резистивный элемент (РЭ) двух импульсов. Один из импульсов разогревает РЭ, а вместе с ним и прилегающий слой жидкости до заранее заданной температуры, соответствующей перегретому состоянию, второй импульс, зондирующий жидкость, содержит информацию о ее теплофизических характеристиках. Измеряемой характеристикой является тепловая активность (РЭ - выполнен в виде пластины) и теплопроводность (РЭ - выполнен в виде нити). За время прохождения измерительного импульса трансформация во времени и пространстве температурного поля, созданного греющим импульсом, мала, т.е. температурное поле греющего импульса приближенно соответствует полю при стационарном нагреве.

Параметры импульсов выбираются из следующих условий. Длительность измерительного импульса лимитируется лишь собственной теплоемкостью элемента и реально может составлять величину порядка 10^{-3} с, длительность же греющего импульса должна быть существенно (на два порядка) больше и составит, соответственно, 10^{-2} - 10^{-1} с. Эти цифры достаточно малы, чтобы говорить о чрезвычайно быстром сдвиге от начальных температурных условий.

Методику рассмотрим на примере задачи с плоским РЭ. Нетрудно видеть, что реализация нагрева с двумя импульсами требует введения в модельную задачу теплового потока вида:

$$q = \begin{cases} q_0, & 0 \leq t \leq t_0 \\ q_0 + q'_0, & t = t_0 + \tau, \tau > 0 \end{cases}$$

(1)

При такой записи t_0 можно рассматривать как длительность греющего импульса, а τ – длительность измерительного импульса. Соответствующая тепловая задача формулируется так:

$$\begin{aligned} a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} &= \frac{\partial T_1}{\partial t}, a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} = \frac{\partial T_2}{\partial t}; t \geq 0, \\ T_1(x, 0) &= T_2(x, 0) = 0, \\ T_1(-\infty, t) &= 0, T_2(\infty, t) = 0, T_1(0, t) = T_2(0, t), \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \begin{cases} q_0, & 0 \leq t \leq t_0 \\ q_0 + q'_0, & t = t_0 + \tau, \tau > 0 \end{cases} \end{aligned}$$

(2)

Здесь пренебрегается зависимостью теплофизических характеристик от температуры. При таком пренебрежении, для $\phi > 0$ температурное поле в жидкости можно представить в виде:

$$T_2 = \frac{2q_0(t_0 + \tau)^{1/2}}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_2(t_0 + \tau)}} + \frac{2q'_0\tau^{1/2}}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2\sqrt{a_2\tau}}. \quad (3)$$

Соответственно, температура элемента ($X = 0$) равна

$$T_0 = T_0(q_0, t) + T'_0(q'_0, t), \quad (4)$$

где

$$T_0(q_0, t) = \frac{2q_0(t_0 + \tau)^{1/2}}{\sqrt{\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}}; \quad T'_0(q'_0, t) = \frac{2q'_0\tau^{1/2}}{\sqrt{\pi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}}. \quad (5)$$

Условие "замороженности" температурного поля запишется в виде:

$$\frac{\partial T_0(q_0, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_0} \ll \frac{\partial T_0(q'_0, t)}{\partial t} \Big|_{t=t_0 + \tau}$$

(6)

или, используя (5):

$$\frac{q_0}{t_0^{1/2}} \ll \frac{q'_0}{\tau^{1/2}} \quad (7)$$

Аналогичное выражение можно получить и из несколько других соображений. В частности, надо потребовать, чтобы за время прохождения измерительного импульса изменение температуры элемента за счет одновременного нагрева его греющим импульсом было мало, то есть

$$\frac{q_0 \tau}{t_0^{1/2}} \ll q'_0 \tau^{1/2} \quad (8)$$

Отсюда имеем:

$$\frac{q_0}{t_0^{1/2}} \ll \frac{q'_0}{\tau^{1/2}} \quad (9)$$

Другое условие корректного использования обсуждаемой методики состоит в том, чтобы длина диффузии температурного поля, созданного греющим импульсом, существенно превосходила аналогичную характеристику измерительного импульса:

$$(a_2 t_0)^{1/2} \gg (a_2 \tau)^{1/2}, \quad t_0^{1/2} \gg \tau^{1/2} \quad (10)$$

При выполнении (10) градиенты температурного поля греющего импульса в области, охваченной температурным полем измерительного импульса, малы и существуют предпосылки характеризовать эту область постоянной температурой, равной температуре РЭ. Эта область возмущается лишь в процессе измерения при воздействии короткого, измерительного импульса.

Таким образом, успешное применение метода, требующего одновременного выполнения условий (7) и (10), обеспечивается при:

$$t_0^{1/2} \gg \tau^{1/2} \quad (11)$$

При написании (11) учтено, что величины q_0 и q'_0 одного порядка.

Полученные оценки могут быть распространены на случай использования линейных РЭ; в последнем случае измерение приращения температуры РЭ за время прохождения измерительного импульса содержит информацию о теплопроводности жидкости.

Разработанный метод, естественно, может использоваться и для изучения стационарных состояний. Так как при измерениях не требуется нагрев образца в термостате или печи, то измерения приобретают важное качество - становятся высокопроизводительными. В первую

очередь, однако, рассмотрим его применение для изучения перегретых жидкостей. При этом мы следуем результатам работ [3,4].

Вначале рассмотрим измерение тепловой активности. Принципиальная схема установки показана на рис.1. Установка содержит следующие основные элементы: генераторы импульсов Г1 (Г5-54) и Г2 (Г5-54), усилитель мощности, мостовая измерительная схема. Для регистрации сигнала с моста использовался осциллограф С1-76.

Рассмотрим работу схемы. С генератора Г1 через усилитель мощности на мостовую схему подается прямоугольный импульс напряжения (греющий импульс), одновременно с началом импульса запускается второй генератор Г2. Задержанный в Г2 сигнал через время t_0 поступает на мостовую схему. Этот сигнал (измерительный импульс) представляет собой прямоугольный импульс напряжения малой длительности τ . По окончании воздействия измерительного импульса греющий импульс обрывается. Таким образом, схема обеспечивала создание на термоэлементе теплового потока вида (1).

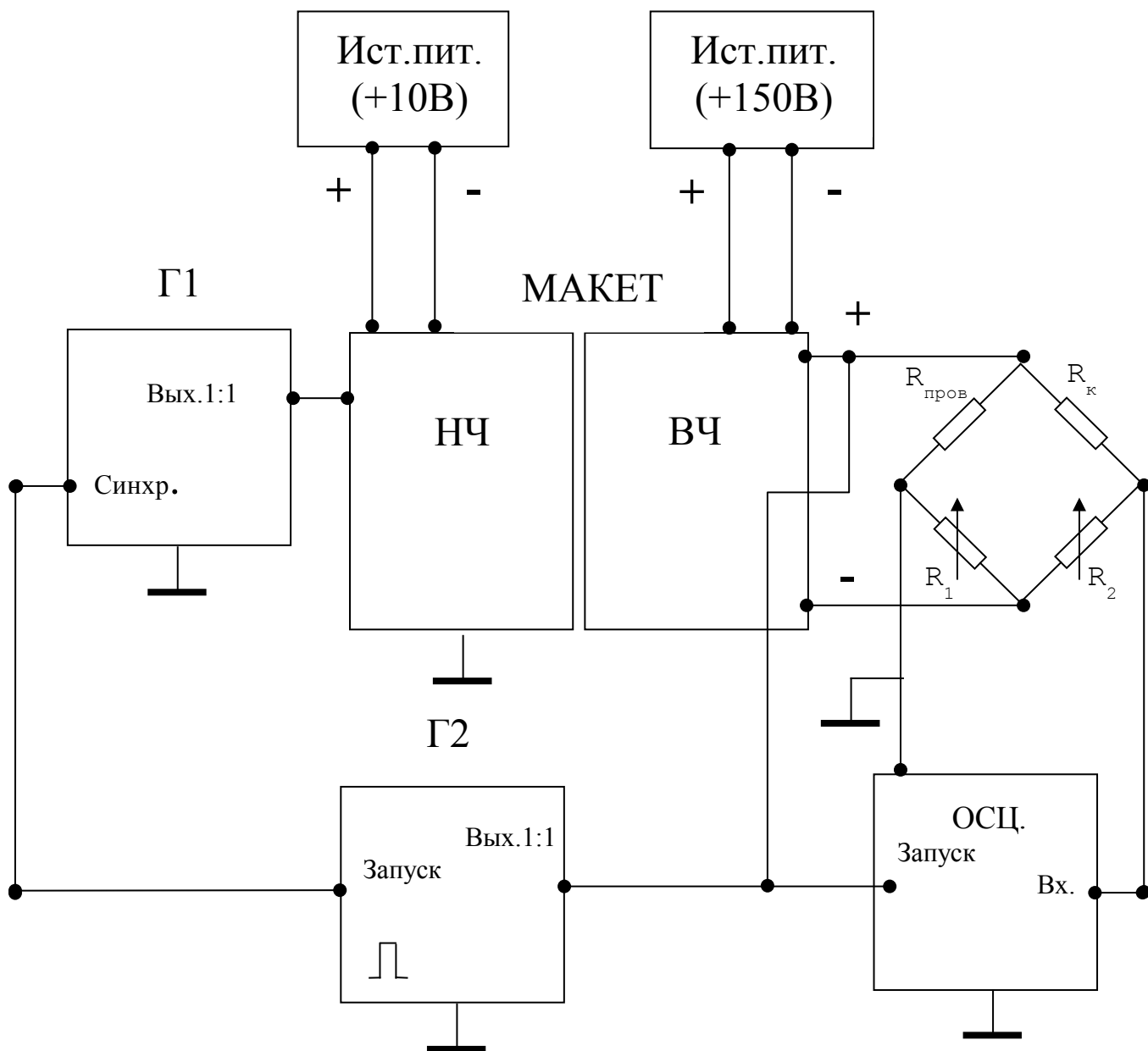


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Компенсационная схема измерений была выбрана с целью повышения точности измерений. В качестве эталона использовался толуол.

В мостовую схему включались две ячейки: измерительная ($R_{\text{пров}}$) и компенсационная ($R_{\text{к}}$). Компенсационная ячейка заполнялась вазелиновым маслом и термостатировалась при 0°C . Измерительная - попеременно эталонной и исследуемой жидкостью. Температура ее в ходе эксперимента менялась.

Рассмотрим технику измерений тепловой активности. Термоэлементами здесь служили тонкие слои никеля и хрома, напыленные на ситалловые или стеклянные подложки. Геометрические размеры резистивных дорожек: 20×1 мм, толщина напыления $200 - 400 \text{ \AA}$.

При проведении испытаний измерительная ячейка предварительно заполняется эталонной жидкостью. При воздействии импульсов проводится полный баланс схемы, т.е. баланс как на переменную, так и на постоянную составляющую температурного сигнала. Баланс проводится для интервала времени, соответствующего длительности воздействия измерительного импульса. После окончания баланса регистрируется сопротивление R_1 . Измерение температуры измерительного элемента, соответствующей нагреву жидкости, проводилось по схеме измерения мгновенных значений сопротивления. Аналогичные операции проводились при помещении измерительного элемента в исследуемую жидкость. Расчет искомого значения тепловой активности проводился с помощью соотношения, аналогичного (12):

$$E(T_2) = [E_0(T_1) + E_{\text{гр}}(T_1)] + \left[\frac{R_1(T_1)}{R_1(T_2)} \right]^3 \frac{R_n(T_2)}{R_n(T_1)} - E_0(T_2) \quad (12)$$

Индекс T_1 характеризует параметры при нахождении элемента в эталонной жидкости, T_2 - в исследуемой.

Рассмотренная методика была применена для изучения тепловой активности ряда жидкостей. Класс чистоты исследуемых жидкостей: ЧДА, ХЧ. Длительность греющего и измерительного импульсов составляли: $t_0 = 15$ мс, $\tau = 50$ мкс. Разогрев элемента при воздействии измерительного импульса не превышал 5°C . Измерения проводились до 110°C . Эталоном служил толуол. При оценке погрешностей учитывались как погрешности, связанные с отклонением реальной модели измерения от идеализированной (собственная теплоемкость элемента, краевые эффекты, нелинейность тепловой задачи), так и аппаратные погрешности. Дополнительный источник погрешности - наличие нестационарного температурного поля, созданного греющим импульсом. Его влияние проявляется, во-первых, тем, что оно вносит искажение в регистрируемую температуру элемента, обусловленную воздействием измерительного импульса.

Во-вторых, температурное поле, инициируемое измерительным импульсом, распространяется в среде, где уже существует нестационарное поле, и, следовательно, следует учитывать эффекты, связанные с температурной зависимостью теплофизических характеристик жидкости. Наконец, в-третьих, в силу оттока тепла с краев элемента следует учесть погрешность в определении его мгновенной температуры.

При оценке погрешностей учитывались как погрешности, связанные с отклонением реальной модели измерения от идеализированной (собственная теплоемкость элемента, краевые эффекты, нелинейность тепловой задачи), так и аппаратные погрешности. Дополнительный источник погрешности - наличие нестационарного температурного поля, созданного греющим импульсом. Его влияние проявляется, во-первых, тем, что оно вносит искажение в регистрируемую температуру элемента, обусловленную воздействием измерительного импульса, во-вторых, температурное поле, инициируемое измерительным импульсом, распространяется в среде, где уже существует нестационарное поле, и, следовательно, следует учитывать эффекты, связанные с температурной зависимостью теплофизических характеристик жидкости; наконец, в-третьих, в силу оттока тепла с краев элемента следует учесть погрешность в определении его мгновенной температуры. При оценке погрешности учитывалось наличие компенсационной схемы, сглаживающей влияние всех перечисленных факторов.

Результирующая погрешность измерений (относительных) оценена в 2%. Разброс экспериментальных данных, их воспроизводимость согласуется с названной оценкой. На рис.2 приведены результаты экспериментального исследования тепловой активности бензола.

Результаты экспериментального исследования показывают, что при достигнутых глубинах захода в метастабильную область для исследованных жидкостей значения коэффициента тепловой активности ложатся на прямую, экстраполированную из стабильной области. Эксперименты ограничивались сравнительно небольшими глубинами захода в метастабильную область, и вскипание на искусственных центрах парообразования или гомогенная нуклеация жидкости не наблюдались. Вместе с тем рассматриваемая методика может обеспечивать значительные глубины захода в метастабильную область. Об этом, в частности, свидетельствуют эксперименты по определению температур гомогенной нуклеации. Чтобы осуществить такие измерения, длительность греющего импульса должна быть уменьшена до 1 мс, а измерительного, соответственно, до 10 мкс. Возможность таких измерений реальна.

Чтобы перейти в рамках рассмотренной выше схемы от измерений тепловой активности к измерению теплопроводности, надо заменить плоский термоэлемент линейным. Техника

измерения и процедура при этом остается без изменений, лишь в расчетном соотношении (12) тепловая активность подложки и изучаемой жидкости заменяется на теплопроводность жидкости.

$$\lambda(T_2) = \lambda_{\text{эт}}(T_1) \left[\frac{R_1(T_1)}{R_1(T_2)} \right]^3 \frac{R_n(T_2)}{R_n(T_1)} \quad (13)$$

Как и при измерении тепловой активности, необходимым условием изучения перегретых жидкостей является кратковременность измерительного импульса. Так как она ограничена снизу собственной теплоемкостью источника тепла, целесообразно использовать в качестве линейных источников тепла нити предельно малого радиуса. Нами были применены платиновые проволочки радиусом 10 мкм. Длительности измерительного и греющего импульсов составляли $0,15 \cdot 10^{-3}$ и $15 \cdot 10^{-3}$ с, то есть, относились как 1:100. Проволочки имели длину 4-6 мм, их максимальный перегрев при воздействии измерительного импульса не превышал 5°C . Эталонном служил толуол, для сравнения использовались значения его теплопроводности в стабильной области. Температурный диапазон измерений начинался в стабильной области. Изменение температуры достигалось как изменением температуры термостата, в котором находилась измерительная ячейка, так и изменением мощности греющего импульса.

$E, \text{ Дж}/(\text{м}^2 \text{ КС}^{1/2})$

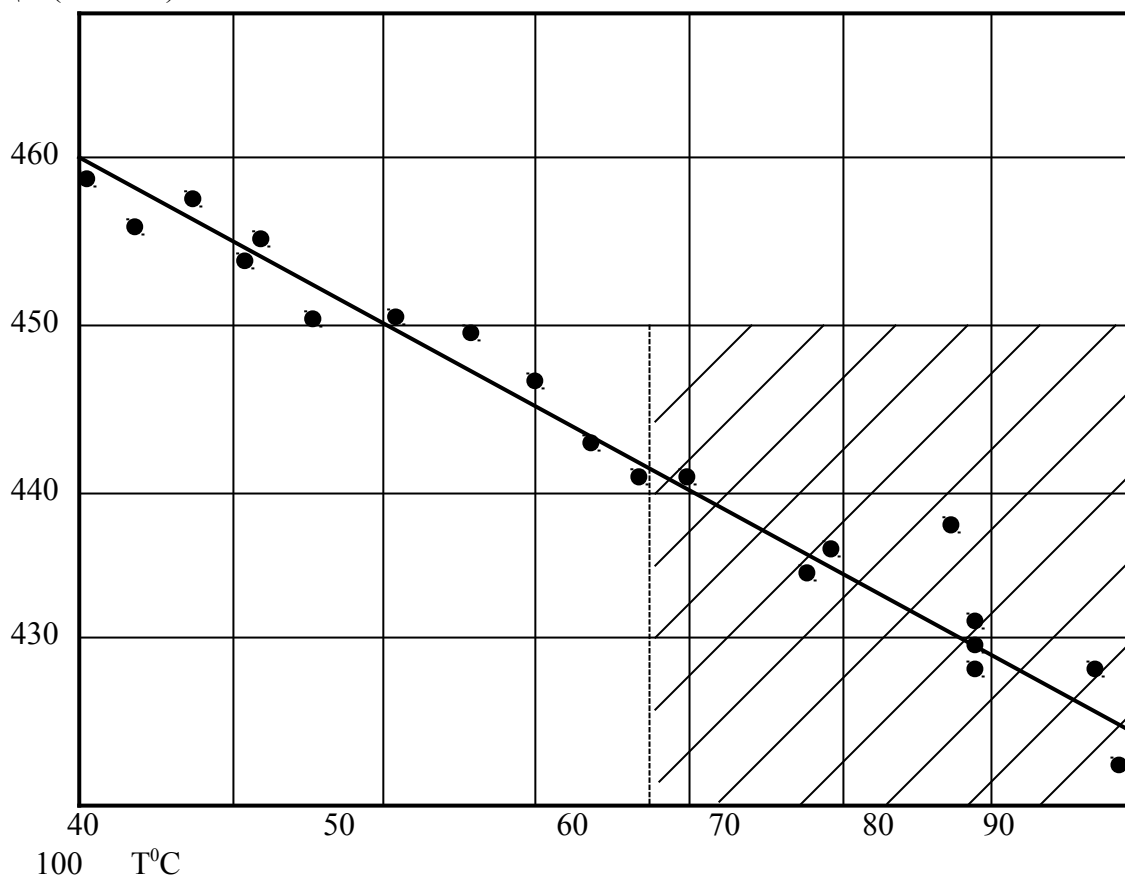


Рис.2. Тепловая активность бензола (область перегретых состояний заштрихована).

При анализе погрешности измерений учитывались следующие факторы: влияние собственной теплоемкости проволоочки, конечность ее длины, температурное поле греющего импульса, неопределенность в индикации компенсации. При оценке погрешности учитывалось наличие компенсационной схемы, уменьшающей погрешность измерений. Результирующая погрешность измерений без учета систематической погрешности в свойствах эталонной жидкости не превышала в измерениях 3%. Разброс данных в экспериментах не превышал 2%.

Максимальный перегрев жидкостей по отношению к температуре равновесного кипения достигал 100°C (для бензола и трихлорэтилена). Факторами, позволяющими получать столь большие перегревы, являются кратковременность нагрева, малость объема перегретой жидкости и, наконец, малая величина поверхности проволоочки, граничащей с жидкостью. Эта поверхность является средоточием искусственных центров парообразования. Т.к. длительность греющего импульса характеризовалась достаточно заметной величиной ($15 \cdot 10^{-3}$ с), условие реализации ударного нагрева не выполнялось, и жидкость вскипала на искусственных центрах парообразования раньше, чем достигалась температура гомогенной нуклеации. Такое вскипание ограничивало сверху диапазон температурных измерений теплопроводности.

Процесс вскипания носил ярко выраженный характер: в момент вскипания температура проволоочки скачком уменьшалась, после чего наблюдались нерегулярные температурные колебания. Эта температура, как правило, не воспроизводилась для всей последовательности импульсов, воздействующих на элемент, хотя для цуга в 3 - 5 импульсов чаще всего наблюдалась. Невоспроизводимость температуры вскипания затрудняла исследование теплопроводности в ее окрестности. Вместе с тем следует отметить возрастание теплопроводности перед вскипанием. На рис.3 показаны результаты измерения теплопроводности для хлористого бензила, включая и область перед вскипанием. Рост теплопроводности в этой области носит нерегулярный характер. По-видимому, это связано с тем, что перед бурным вскипанием жидкости уже имеются стоки тепла, обусловленные ростом паровых пузырьков. Наличие таких стоков тепла несколько снижает рост температуры проволоочки при ее нагреве, что приводит к завышению измеренных значений теплопроводности.

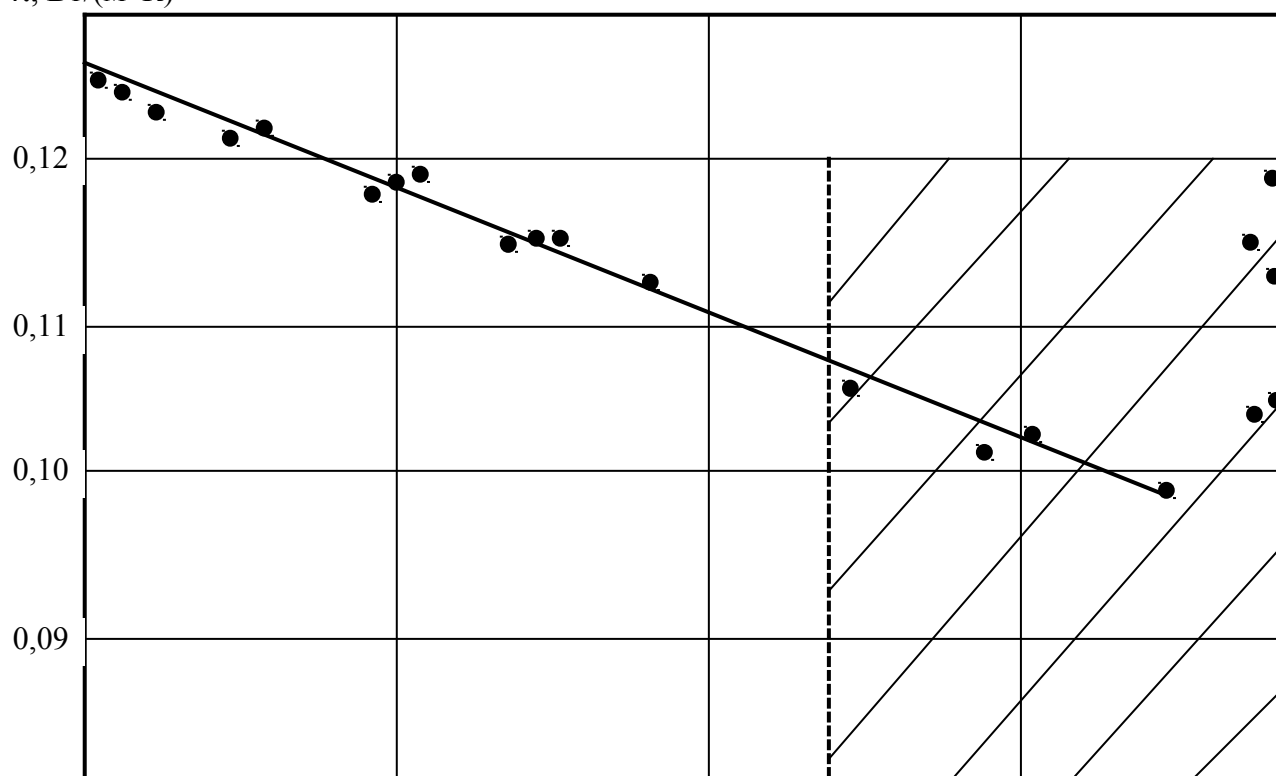
Результаты исследований показывают, что при переходе через температуру равновесного кипения зависимость теплопроводности от температуры сохраняет гладкий характер. Это подтверждает правомерность экстраполяции экспериментальных данных по теплопроводности, полученных в стабильной области, в область метастабильную. Данное утверждение справедливо при достаточно заметных глубинах проникновения в метастабильную область. Однако

экспериментальному исследованию остались недоступными более далекие области, включая и окрестность спинодали.

Данное ограничение связано с вскипанием жидкости на искусственных центрах парообразования. Давление такого вскипания связано с реализацией ударного режима нагрева в греющем импульсе, что в свою очередь требует уменьшения собственной теплоемкости элемента, т.е. уменьшения радиуса проволоочки (по оценкам примерно в три раза). Другая возможность изучения околоспинодальных состояний в условиях изобарического нагрева связана с учетом собственной теплоемкости элемента. Естественно, трудности экспериментального исследования при этом возрастают; вместе с тем они преодолимы. На это в частности указывает [2], где метастабильные состояния изучались в условиях изотермического нагрева.

В результате эксперимента по описанной методике были получены теплофизические свойства ряда жидкостей (рис.4 и рис.5). В целом, результаты исследования показывают, что при достижимом перегреве не проявляются какие-либо аномалии в поведении теплофизических характеристик тепловой активности в теплопроводности, а также их производных - температуропроводности и объемной теплоемкости. Аналогичной результат отмечен в [2], где, как уже отмечалось, реализация перегретых состояний достигалась изотермически, при резком сбросе давления, что позволяло достигать значительных степеней перегрева жидкости.

λ , Вт/(м*К)



80 120 160 200 T°С

Рис.3. Теплопроводность хлористого бензила.

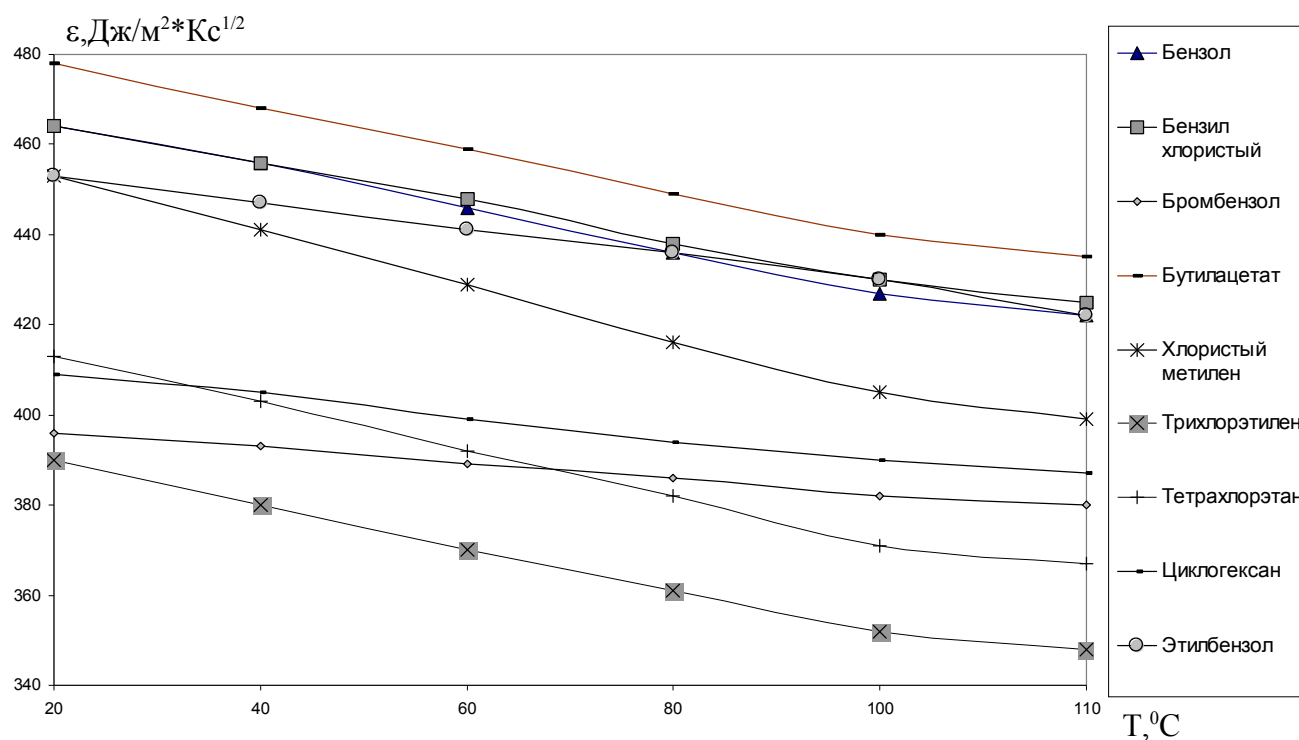


Рис.4. Тепловая активность исследованных жидкостей.

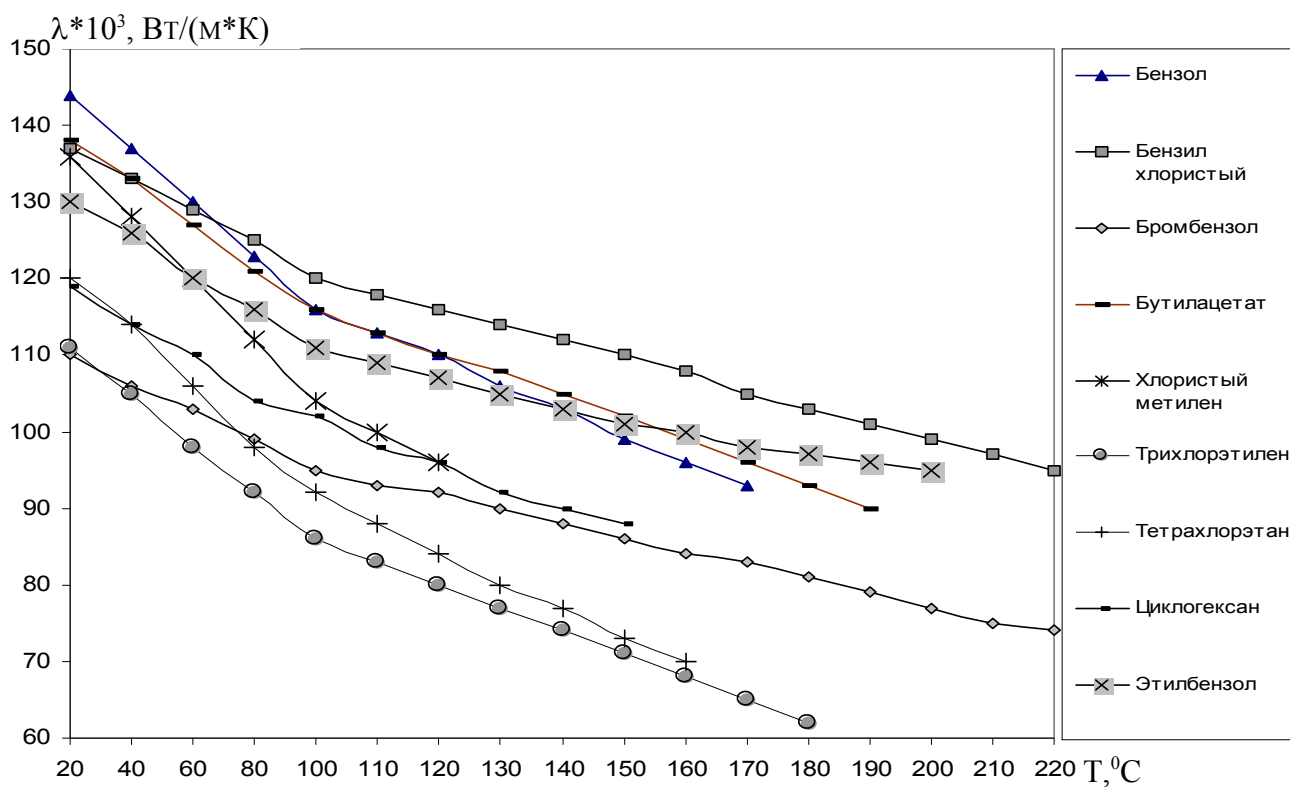


Рис.5. Теплопроводность исследованных жидкостей.

Вместе с тем остается нерешенной задача экспериментального исследования теплофизических характеристик непосредственно на спинодали. Экспериментально до настоящего времени исследовалась единственная точка спинодали - критическая как единственная, имеющая выход к стабильной области. Более того, не существует в настоящее время практических доказательств существования самой спинодали как реальной линии на фазовой диаграмме. Неустойчивость метастабильной жидкости к зародышам конкурирующей фазы затрудняет достижение границы абсолютной неустойчивости.

Список литературы.

1. Скрипов В.П., Синицин В.Н., Павлов П.А. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильной области. - М.: Атомиздат, 1975. -206 с.
 2. Милуков Р.Р. Комплексное исследование теплофизических свойств перегретой жидкости.: дис. к.ф.-м.н.// Уральский политехнический институт. –Свердловск: 1981. -108 с.
 3. Ильин Б.И., Гурская А.В., Салохин В.Ф., Спирин Г.Г. Измерение тепловой активности перегретой жидкости. //Инженерно-физический журнал. -1975, 29, №4. -с.302-304.
 4. Спирин Г.Г. Измерение теплопроводности перегретых жидкостей. //Инженерно-физический журнал. -1978, 35, №3. -с.445-449.
-

Сведения об авторах.

Спирин Геннадий Георгиевич, профессор кафедры физики Московского авиационного института (государственного технического университета), д.ф.-м.н.

Хамзин Наджим Данилович, аспирант кафедры физики Московского авиационного института (государственного технического университета).

тел. 253-57-22 (раб.) с 9⁰⁰ до 17⁰⁰.