

Александр Анатольевич ФЕДОРЕЦ —
доцент кафедры микро- и нанотехнологий,
кандидат физико-математических наук

Эдуард Эдуардович КОЛМАКОВ —
ст. преподаватель кафедры микро- и нанотехнологий,
кандидат физико-математических наук

Павел Юрьевич БАКИН —
инженер

Тюменский государственный университет
fedorets_alex@mail.ru

УДК 536.2.023

О ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТИ ПО ФОТЕКОНОГРАММЕ

ON POSSIBLE USE OF THE PHOTECONOGRAMM FOR MEASURING THE TEMPERATURE CONDUCTIVITY OF LIQUID

АННОТАЦИЯ. Впервые экспериментально подтверждена возможность измерения коэффициента температуропроводности жидкости по фотеконограмме, описана методика обработки фотеконограмм, а также условия эксперимента, соблюдение которых обеспечивает получение точных и воспроизводимых результатов измерения коэффициента температуропроводности.

SUMMARY. Temperature conductivity is one of the fundamental characteristics when investigating the liquid with the phototeconsopy method. It determines the time interval from the start of the heat impact to the marked thermocapillary deformation of the liquid surface. [1,2]. In present work it was for the first time experimentally confirmed that the photeconogramm can be used for measuring the temperature conductivity coefficient. Principles of the photeconogramm data processing are described as well as the experimental conditions that provide precise and reproducible measure results for the temperature conductivity coefficient.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Методы измерения теплофизических характеристик жидкостей, температуропроводность, термокапиллярная конвекция, фотеконскопия.

KEY WORDS. Measuring methods of the thermal and physical characteristics of liquids, temperature conductivity, thermal capillary convection, photeteconsopy.

Коэффициент температуропроводности относится к числу основных характеристик веществ, материалов, конструктивных элементов, знание которых необходимо для решения разнообразных научных и инженерных задач. Несмотря на непрерывное совершенствование приборов и методик, для отдельных классов объектов, например, жидкостей, высокоточное измерение температуропроводности остается задачей, не имеющей простого и универсального решения [3]. Сложность проблемы — в концептуальном противоречии: с одной стороны, для корректного измерения температуропроводности требуется создать температурный градиент в неподвижной среде; с другой — развитие конвекции в неоднородно нагретой жидкости является ее фундаментальным свойством.

Большинство методов измерения температуропроводности базируется на соотношении, определяющем скорость распространения теплового фронта при кондуктивном механизме теплопереноса: если в среде с температуропроводностью a индуцируется тепловой источник с температурой $T=T_0+\Delta T$, то изотерма $\Delta T e^{-n}$ (n — любое положительное число) достигнет точек среды, удаленных от источника на расстояние h через время:

$$\tau = \frac{h^2}{kna} \quad (1)$$

Константа k зависит от геометрии источника тепла, временных характеристик теплового импульса, свойств среды и др. Аналитически (решением уравнения теплопроводности), она может быть определена лишь для идеализированных условий, практически не реализуемых в эксперименте. Например, в случае мгновенного точечного источника тепла в безграничном пространстве, заполненном однородной изотропной средой $k=6$ [4]. Поэтому на практике используются зависимости вида:

$$a(\tau) = K_{np} \frac{h^2}{\tau}, \quad (2)$$

в которые входит эмпирический коэффициент K_{np} .

В основе одного из новых методов анализа жидкостей — фотеконскопии [1], [2] лежит явление термокапиллярной конвекции. Суть метода состоит в том, что на тонкий горизонтальный слой жидкости со свободной поверхностью оказывается воздействие тепловыми импульсами от квазиточечного источника на дне слоя. Возникающая вследствие развития термокапиллярных течений локальная деформация свободной поверхности «считывается» мало-мощным лазерным пучком, который, отражаясь от жидкой поверхности, создает на экране характерное изображение — термокапиллярный (ТК) отклик. График изменения радиуса r термокапиллярного отклика во времени — фотеконскограмма определяется комплексом физико-химических свойств жидкостей и может использоваться для их идентификации и экспресс-анализа.

Сам принцип построения фотеконскограммы подразумевает, что ее начальный участок содержит информацию о времени τ_f реакции жидкой поверхности на тепловой импульс. Параметр τ_f определим как момент времени, когда радиус ТК отклика снижается на 4 % относительно начального уровня (рис. 1). На этом участке фотеконскограммы, благодаря резкому изменению радиуса отклика, существенно превышающему шумовой фон, параметр τ_f может измеряться наиболее точно.

В экспериментах по методу фотеконскопии толщина жидкого слоя (h) задается с точностью порядка 10 мкм, а динамика изменений ТК отклика фиксируется с погрешностью по времени не выше 2 мс. С формальных позиций, при таких условиях эксперимента a может измеряться по времени τ_f с точностью $\pm 0,05 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Фактически же проблема измерения температуропроводности по фотеконскограмме существенно сложнее: жидкости могут отличаться чувствительностью к тепловым воздействиям, а значит, сопоставимые по амплитуде отклонения фотеконскограмм будут соответствовать разным изотермам, достигающим поверхности с различной задержкой.

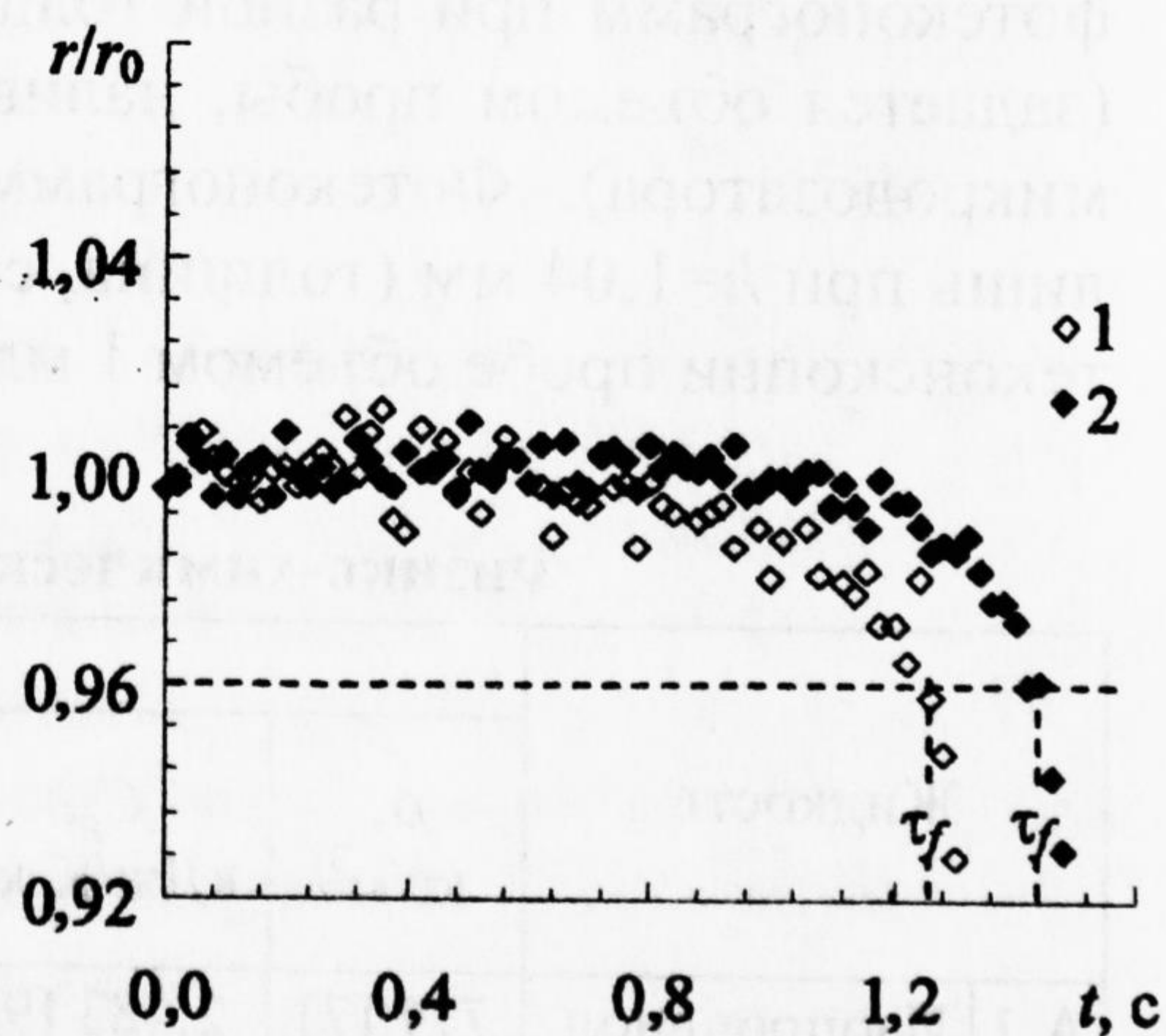


Рис. 1. Начальные участки фотеконскограмм этанола (1) и изопропанола (2). Зависимости нормированы на среднее значение радиуса ТК отклика за первые 0,8 сек. с момента начала измерения

Критерием устойчивости системы к развитию ТК течений является число Марангони [5]:

$$Ma = \frac{L\Delta\sigma}{\eta a} = \frac{L\Delta T\sigma'_T}{\eta a} \quad (3)$$

где L — характерный размер, $\Delta\sigma$ — перепад поверхностного натяжения вследствие изменения температуры, η — динамическая вязкость, σ'_T — температурный коэффициент поверхностного натяжения.

При импульсных воздействиях, применяемых в методе фотеконскопии, число Ma изменяется в процессе измерения. Регистрация зависимости $Ma(t)$ является сложной задачей, выходящей за рамки данной работы, но при постоянстве параметров тепловых импульсов и неизменной геометрии системы ее склонность к возникновению ТК течений определяется комплексом физико-химических свойств жидкости:

$$K_{Ma} = \frac{\sigma'_T}{\eta a} \quad (4)$$

Поэтому ограничимся экспериментальной проверкой предположения о том, что в пределах группы жидкостей незначительно отличающихся по величине K_{Ma} для измерения температуропроводности может использоваться градуировочная кривая вида $a(\tau_f)$.

Описываемые результаты получены с пробами жидкости, термостатированными при 30 °С, при одинаковом режиме воздействия*. В силу поискового характера исследования основными критериями отбора жидкостей для экспериментов являлась их доступность и наличие справочных данных по теплофизическим свойствам.

Отобранные для экспериментов химически чистые жидкости (класс ЧДА) были распределены на две группы (табл. 1). С жидкостями группы А, которые имели наиболее близкие значения комплекса K_{Ma} , были получены серии фотеконограмм при разной толщине слоя: $h=0,67$; $0,84$; $1,04$ и $1,26\pm 0,01$ мм (задается объемом пробы, наливаемой в кювету с помощью высокоточного микродозатора). Фотеконограммы жидкостей группы Б регистрировались лишь при $h=1,04$ мм (толщина, соответствующая стандартной для метода фотеконскопии пробе объемом 1 мл).

Таблица 1

Физико-химические характеристики жидкостей

| Жидкость | Физические свойства при 30 °С | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|--|-------------------------|-------------------|--|
| | ρ , кг/м ³ | C_p , кДж/К·кг | λ , Вт/м·К | $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с | σ'_T , мН/м·К | η , мПа·с | $K_{Ma} =$ $= \sigma'_T / \eta \cdot a,$ $\times 10^8$ |
| А.1 Изопропанол | 777 [7] | 2,483 [9] | 0,133 [10] | 0,689 | 0,0798 [6] | 1,76 [7] | 6,6 |
| А.2 Этанол | 799 [7] | 2,483 [7] | 0,167 [8] | 0,842 | 0,0832 [6] | 0,99 [7] | 10,0 |
| А.3 Додекан | 742 [7] | 2,218 [11] | 0,151 [10] | 0,918 | 0,0879 [6] | 1,25 [7] | 7,7 |

* В методе фотеконскопии под режимом воздействия понимается последовательность тепловых импульсов, действующих на жидкий образец. В зависимости от решаемой задачи режимы воздействия могут отличаться числом импульсов, их мощностью и длительностью, а также продолжительностью пауз, разделяющих импульсы.

Окончание табл. 1

| | | | | | | | | |
|-----|---------------------------|---------|-----------|-----------|--------|------------|----------|------|
| Б.1 | Октан | 694 [7] | 2,241 [7] | 0,128 [8] | 0,823 | 0,0982 [6] | 0,49 [7] | 24,0 |
| Б.2 | Декан | 722 [7] | 2,224 [7] | 0,131 [8] | 0,816 | 0,0920 [6] | 0,72 [7] | 15,7 |
| Б.3 | Бутанол | 802 [7] | 2,603 [9] | 0,152 [8] | 0,728 | 0,0898 [6] | 2,28 [7] | 5,4 |
| Б.4 | Изопропанол, этанол (1:1) | — | — | — | 0,764* | — | — | ~8 |

Примечание. * Среднее от коэффициентов температуропроводности этанола и изопропанола.

Обобщенный график зависимостей τ_f от квадрата толщины жидкого слоя приведен на рис. 2. Как и следовало ожидать из (1), зависимости $\tau_f(h^2)$ хорошо аппроксимируются линейными функциями, пересекающимися с осью ординат в точках, совпадающих в пределах точности эксперимента:

$$\tau_{f0} = 0,30 \pm 0,01 \text{ с} \quad (5)$$

Фактически τ_{f0} — это приборная задержка, то есть время распространения импульса от тепловыделяющего элемента прибора до нижней границы жидкого слоя. Поэтому введем скорректированное время реакции жидкой поверхности:

$$\tau_{fc} = \tau_f - \tau_{f0}. \quad (6)$$

Обобщенные данные по времени τ_{fc} для проб жидкостей объемом 1 мл представлены на рис. 3. Результаты измерений с жидкостями группы А показаны зачерненными маркерами, группы В — светлыми. Семейством кривых, проходящих через экспериментальные точки, отображены зависимости вида $a(\tau_{fc})$ полученной подстановкой известных значений a и h в выражение (2) и подбором K_{np} .

Как видно из рис. 3, у жидкостей, обладающих примерно одинаковой «стойкостью»** к развитию ТК конвекции, значения τ_{fc} ложатся на одну расчетную кривую (назовем ее опорной). Положение экспериментальных точек, отклонившихся от опорной кривой, также согласуются с их K_{Ma} : чем выше значение этого комплекса, тем меньше время реакции жидкости на тепловой импульс. Другими словами, жидкость, более подверженная развитию ТК течений (например, маловязкий октан $K_{Ma} = 24,0 \times 10^8$), при прочих равных условиях реагирует на более ранние изотермы, достигающие свободной поверхности слоя.

Учитывая случайность выбора и разнообразие задействованных в исследовании жидкостей, можно констатировать принципиальную возможность измерения температуропроводности по фотеконнограмме. Жидкости, вне зависимости от их химических свойств, могут быть классифицированы по

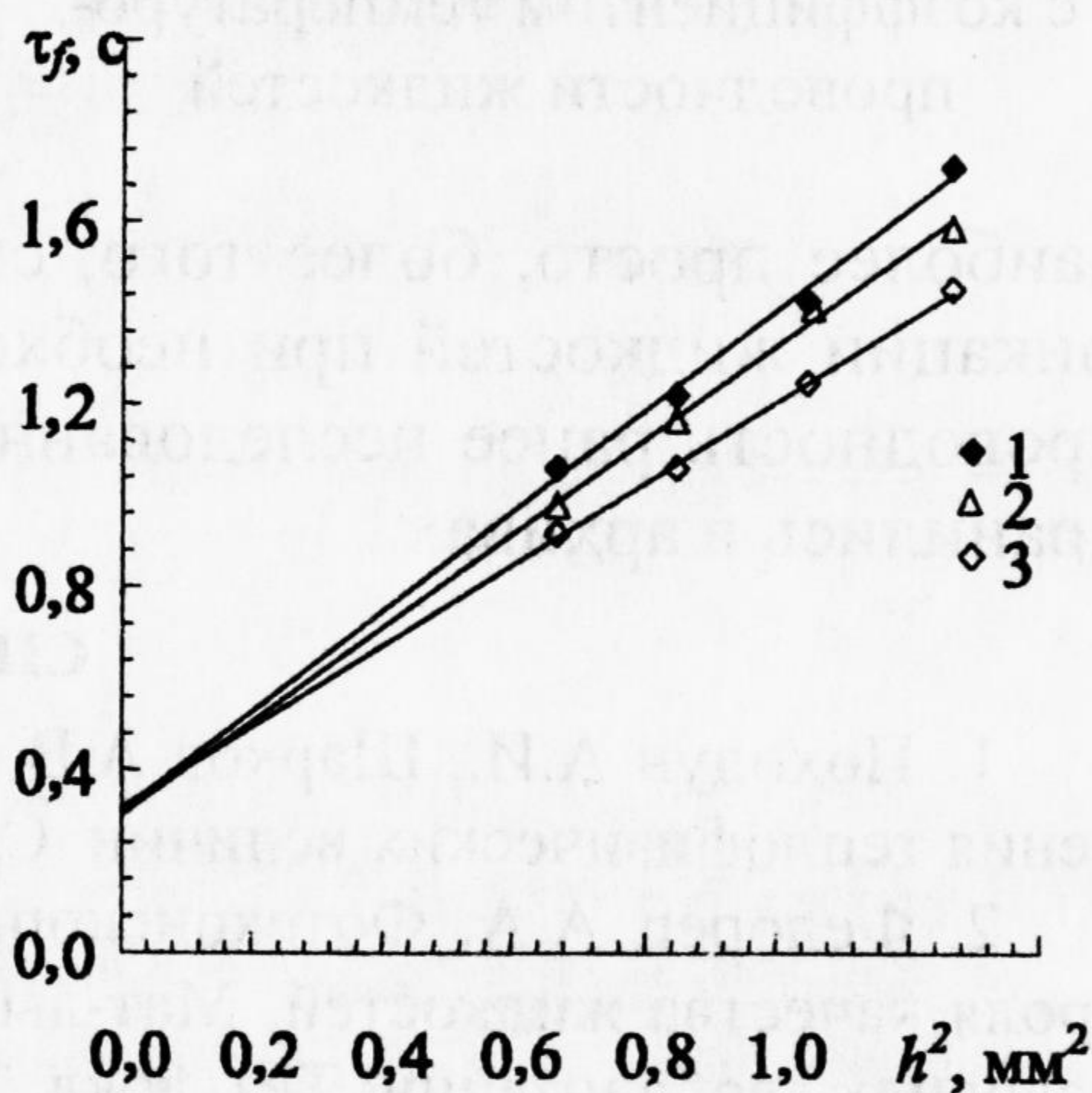


Рис. 2. Зависимость времени реакции жидкой поверхности от квадрата толщины жидкого слоя: 1 — изопропанол, 2 — этанол, 3 — додекан

** Жидкости группы А, а также смесь этанола с изопропанолом — их значения K_{Ma} лежат в относительно узком диапазоне $(8,3 \pm 1,7) \times 10^8$ (табл. 1).

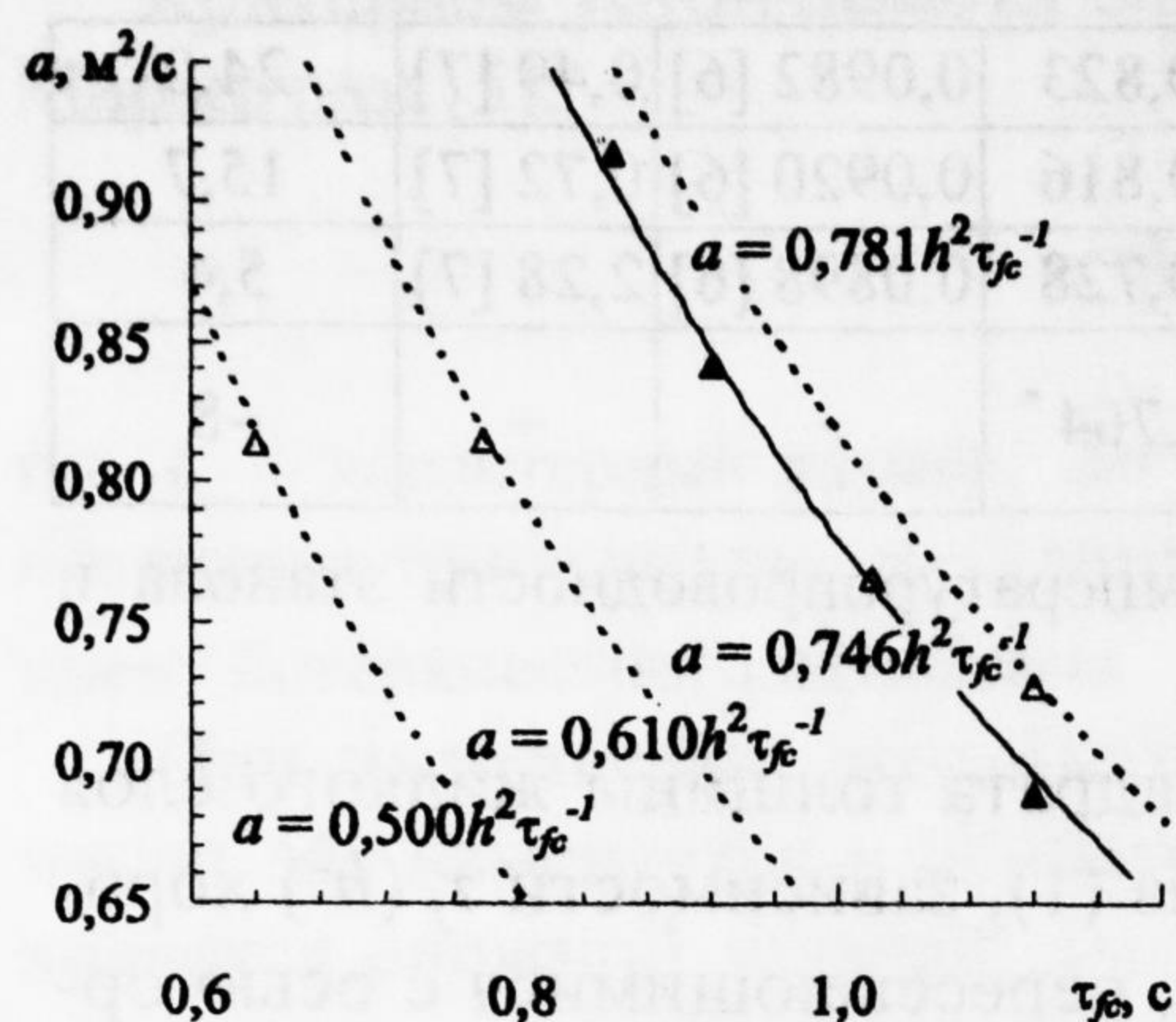


Рис. 3. Взаимосвязь времени реакции жидкой поверхности с коэффициентом температуропроводности жидкостей

склонности к развитию ТК течений, определяемой комплексом K_{Ma} . Как видно из рис. 3, приемлемая точность измерения температуропроводности достижима при условии использования градуировочной кривой $a(\tau_{fc})$, соответствующей классу жидкости.

Любая фотеконотограмма в неявном виде содержит информацию о температуропроводности жидкости. Существенная доля задач, решаемых методом фотеконскопии (например, в области технологического контроля), связана с анализом жидкостей, химический состав и комплекс физических свойств которых варьируется незначительно. В таких задачах проблема корректного выбора градуировочной кривой решается

наиболее просто, более того, сформулированный в работе принцип классификации жидкостей при необходимости позволяет вычислить температуропроводность ранее исследованных жидкостей, фотеконотограммы которых сохранились в архивах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Походун А.И., Шарков А.В. Экспериментальные методы исследований. Измерения теплофизических величин. СПб.: ИТМО, 2006.
2. Федорец А.А. Фотеконскопия: новый экспресс-метод идентификации и контроля качества жидкостей. Мат-лы Междунар. конф. // Модернизация образования в условиях глобализации: Тез. докл. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2005. С. 103.
3. Патент РФ № 2301415. Устройство для идентификации и контроля качества жидкостей. А.А. Федорец // Бюл. № 17. 2007.
4. Кислицын А.А., Федорец А.А. Термокапиллярные и концентрационно-капиллярные течения в тонких слоях жидкости. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2008. 175 с.
5. Hinkebein, T.E., Berg J.C., Int. J. Heat Mass Transfer 21, 1241 (1978).
6. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества: Спр. / Под ред. А.А. Абрамзона, Е.Д. Щукина. Л.: Химия, 1984.
7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 720 с.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
9. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Спр. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. Danbert, T.E., Danner, R.P., et al. Physical and Thermodynamic Properties of Pure Compounds: Data Compilation; Taylor&Francis. Bristol. 1994.
11. <http://athas.prz.rzeszow.pl>.