

29. Anderson D. M., Davis S. H. // Phys. Fluids. 1995. Т. 7. № 2. С. 248-265.
 30. Фойербахер Б., Науман Р. И., Хамакер Г. Космическое материаловедение: Введение в научные основы космической технологии. М.: Мир, 1989. С. 350.
 31. Kamotani Y., Ostrach S. Pline A. // Phys. Fluids. 1994. Т. 6. № 11. С. 3601-3609.
 32. Bonn D., Kellay H., Ben Amar M., Meunier J. // Phys. Rev. Lett. 1995. Т. 75. № 11. С. 2132-2135.
 33. Mundrane M., Xu J., Zebib A. // Adv. Space Res. 1995. Т. 16. № 7. С. 41-53.
 34. Hsien S. S., Wen M. Y. // Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Т. 36. № 18. С. 4365-4373.
 35. Безуглый Б. А., Низовцев В. В. // Химия и жизнь, 1977. № 7. С. 33-36.
 36. Безуглый Б. А., Майоров В. С. // Ж. науч. и прикл. фотогр. и кинематогр. 1981. Т. 26. № 6. С. 422-427.
 37. Carles P., Cazabat A. M. // Colloids & Surfaces. 1989. Т. 41. С. 97-105.

Борис Антонович БЕЗУГЛЫЙ –
 доцент кафедры радиофизики
 физического факультета,
 кандидат физико-математических наук
Олег Александрович ТАРАСОВ –
 аспирант,
ФЕДОРЕЦ Александр Анатольевич –
 аспирант

УДК: 532.22

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДА НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНКИ ИЗМЕРЕНИЯ КРАЕВЫХ УГЛОВ СМАЧИВАНИЯ

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты экспериментальной работы по применению термокапиллярного эффекта, индуцированного тепловым действием лазерного излучения, для усовершенствования метода наклонной пластинки измерения краевых углов смачивания.

The results of experimental research on the application of thermocapillary phenomenon induced by heat effect of laser beam to improve the tilting plate method of measuring of wetting angle are presented.

Существует [1-3] около двадцати методов определения краевого угла смачивания θ , отличающихся точностью, воспроизводимостью, сложностью экспериментальной установки и тем, измеряют ли θ по геометрии границы раздела (например, по профилю пузырька или капли) или косвенно (по величине поднятия жидкости в капилляре или по силе втягивания пластинки в жидкость).

Метод наклонной пластинки (НП), разработанный Адамом и Джесопом [4], в настоящее время считается самым точным. Он состоит в том, что пластинку шириной около 2 см погружают в жидкость. Вблизи пластинки образуется вогнутый или выпуклый мениск. Затем ее наклоняют до тех пор, пока мениск не станет плоским; при этом угол α между пластинкой и горизонталью и является краевым углом θ .

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД НАКЛОННОЙ ПЛАСТИНКИ

До сих пор при измерениях методом НП экспериментатор оценивал кривизну мениска вблизи пластинки субъективно, на глаз, и воспроизводимость результатов была низкой. Предлагаемое решение этой проблемы основано на сильной зависимости формы термокапиллярного (ТК) отклика от статической кривизны жидкого мениска [5,6].

Схема установки, реализующей усовершенствованный метод НП, дана на рис. 1, где 1 — He-Ne лазер мощностью 5 мВт; 2 и 3 — зеркала; 4 — экран; 5 — чашка Петри с жидкостью; 6 — микрометры, 7 — карболитовая подложка; 8 — полированные тефлоновые пластинки $2.2 \times 40 \times 60$ мм³; 9 — микрометрический треножник. Диаметр пятна лазерного пучка на подложке равнялся 3 мм. Расстояние от слоя до экрана составляло 2.2 м.

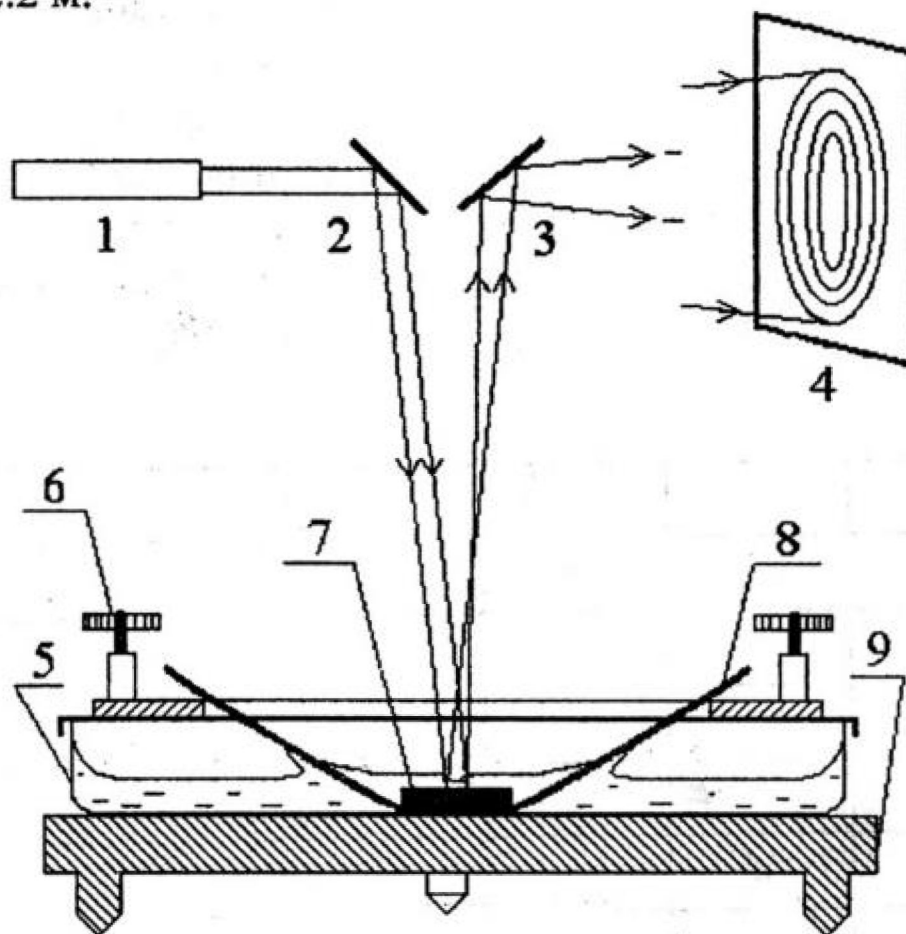


Рис. 1. Схема установки для измерения краевого угла усовершенствованным методом наклонной пластинки

Краевые углы измеряли по следующей схеме:

а) с помощью микрометрического треножника выставляли горизонтальность верхней грани подложки;

б) в промытую этанолом чашку Петри заливали слой жидкости заданной толщины;

в) пластинки под одинаковым углом частично опускали в жидкость. По форме установившегося ТК отклика [5,6] определяли знак статической кривизны мениска между пластинками;

г) с помощью микрометров угол наклона пластинок меняли в сторону уменьшения величины статической кривизны с шагом около 1° и одновременно измеряли диаметры отклика;

д) диапазон изменения углов охватывал приблизительно симметричную область относительно краевого угла смачивания, о чем судили по изменению направления вытянутости ТК отклика.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Краевые углы измерены для бутанола-1, о-ксилола и бензилового спирта на тефлоне. Для выяснения критичности метода к толщине слоя жидкости измерения проводили для двух толщин.

Для характеристики кривизны цилиндрического мениска жидкости, возникающего при смачивании пластинок, удобно ввести коэффициент одномерной статической кривизны [6]:

$$K = D_b/D_i - 1 \quad (1)$$

Здесь D_i — диаметр отклика, соответствующий направлению вдоль пластинок (неограниченному слою жидкости), а D_b — направлению поперек пластинок (ограниченному, статически искривленному слою). При таком определении имеем:

- в случае выпуклого мениска $K < 0$;
- в случае плоского мениска $K = 0$;
- в случае вогнутого мениска $K > 0$.

По экспериментальной оценке, коэффициенту $K = 0,18$ соответствует цилиндрический мениск с радиусом кривизны $\sim 6,5$ м.

На рис. 2 показана зависимость K от угла наклона пластинок α в системе бутанол-1/тефлон. Кривые 1, 2 соответствуют уменьшению α от 39° до 28° , а кривые 3, 4 — увеличению от 50° до 58° . Кривые 1, 3 получены в слое толщиной 435 ± 10 мкм, а кривые 2, 4 — 530 ± 10 мкм. Анализ движения трехфазной линии при изменении α , учитывающий погружение пластинки и капиллярное поднятие мениска возле нее, показал, что в условиях эксперимента при уменьшении α возникали углы оттекания θ_r , а при увеличении — углы натекания θ_a .

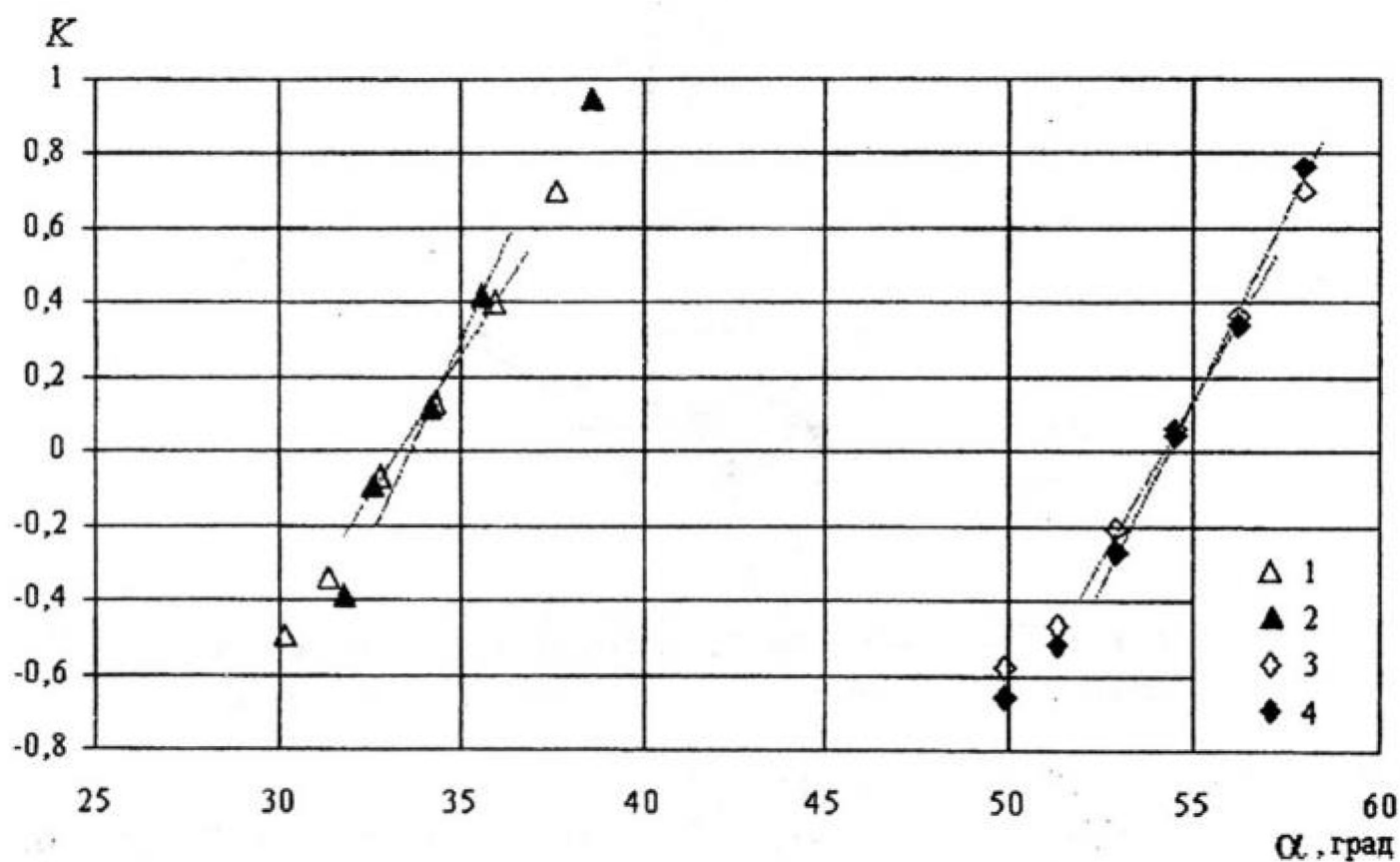


Рис. 2. Зависимость коэффициента K от наклона тефлоновых пластинок в слоях бутанола-1 толщиной 435 и 530 мкм

Экспериментальные зависимости вблизи точек, где знак статической кривизны менялся, были аппроксимированы прямым методом наименьших квадратов с помощью программы Table Curve 2D. Хорошее совпадение кривых для разных толщин говорит о том, что толщина слоя не влияет на эксцентриситет ТК отклика в данном диапазоне.

Точки выше ординаты 0 соответствуют вогнутому, а точки ниже — выпуклому жидкому мениску. Так как при $K=0$ мениск становится плоским, то α , отвечающий точке пересечения зависимости $K(\alpha)$ с осью абсцисс, и является искомым значением краевого угла.

Тестирование показало, что углы натекания, полученные методом сидячей капли (СК), совпадают с углами, измеренными новым методом, в пределах экспериментальной погрешности (табл. 1). Из-за отсутствия необходимого оборудования тестовые измерения для угла оттекания не были выполнены.

Таблица 1

Результаты измерения краевого угла усовершенствованным МНП и МСК

Система	h	θ_r , град	θ_a , град.	
бутанол-1 на тефлоне	435 мкм	33.3 ± 0.5	54.1 ± 0.6	(СК)
	530 мкм	33.5 ± 0.4	54.3 ± 0.5	54.3 ± 1.0
о-ксилол на тефлоне	550 мкм	46.8 ± 0.6	56.3 ± 0.6	(СК)
	620 мкм	46.4 ± 0.6	56.9 ± 0.5	56.9 ± 1.0
бензиловый спирт на тефлоне	280 мкм	62.3 ± 0.4	80.7 ± 0.8	(СК)
	340 мкм	60.6 ± 0.7	80.2 ± 0.8	80.5 ± 1.0

ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ТК ВИХРЯ

С целью повышения чувствительности усовершенствованного метода НП оси вращения пластинок помещали на небольшом расстоянии друг от друга (12 мм). Поскольку размер ТК вихря [9] в 2 ... 3 раза больше диаметра индуцирующего его пучка лазера (3 мм), то возник вопрос: не вызывает ли поверхностное течение из центра вихря заметного натекания жидкости на границы?

Для внесения ясности скорости потоков и размеры ТК вихря, в случае неограниченного и ограниченного слоя жидкости, были оценены по трекам частиц алюминиевой пудры.

Учитывая, что скорость течений в ТК вихре растет с уменьшением вязкости жидкости, эксперимент проводили с октаном, вязкость которого меньше, чем у используемых веществ.

При мощности лазера 5 мВт в слое октана толщиной 400 мкм вихрь имел вид тора с внешним диаметром 9.3 ± 0.6 мм. Скорость потоков вблизи свободной поверхности составляла 4.0 ± 0.2 мм/сек, что согласуется с данными [9]. Для ограниченного слоя (при расстоянии между алюминиевыми пластинками 11 мм) скорость течений в направлении нормальном к границам уменьшилась до 0.9 ± 0.2 мм/сек, в направлении же вдоль границ наблюдали скорости 8.2 ± 0.4 мм/сек.

Отсюда можно сделать вывод, что течения в ТК вихре не приводили к заметному натеканию жидкости на границы и не влияли на результаты измерения краевых углов.

ВЫВОДЫ

Для контроля плоскостности жидкой поверхности в МНП удобно использовать принцип аддитивности динамической кривизны ТК отклика и статической кривизны жидкого мениска. Поскольку отклик представляет собой оптическое изображение, процесс измерения θ легко автоматизировать, что устраняет из процесса измерения субъективность и повышает воспроизводимость результатов.

Усовершенствованным МНП измерены углы натекания и оттекания в диапазоне от 34 до 80° с точностью до 0.5°. Высокая чувствительность отклика к статической кривизне жидкой поверхности позволяет считать, что точность измерений может быть повышена в несколько раз.

По материалам статьи подана заявка на изобретение, получившая положительное решение формальной экспертизы [10].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства общего и профессионального образования (грант № 97-0-8.1-60) и Тюменского госуниверситета (грант 15-98 1998 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979.
2. Де Жен П. Ж. // УФН. 1987. 7, 4.
3. Абрамзон А. Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества. Л.: Химия, 1984.
4. Adam N. K., Jessop G. // J. Chem. Soc. 1863 (1925).
5. Безуглый Б. А., Тарасов О. А., Шепеленок С. В. // Вестник ТГУ. 1998. 2. С. 66-71.
6. Безуглый Б. А., Тарасов О. А., Федорец А. А. // Тез. докл. Международной конференции «Передовые технологии на пороге XXI века». Ч. II. М.: Изд-во НИЦ «Инженер», 1998. С. 457-459.
7. Good R. J. // J. Amer. Chem. Soc. 1952. 74. 5041.
8. Dettre R. H., Johnson R. E., Jr. // Adv. Chem. 1964. 43. 112.
9. Низовцев В. В. // ПМТФ. 1989. 142. 1.
10. Заявка на изобретение № 99106763/28(006503). Способ измерения краевых углов смачивания с помощью наклонной пластинки, основанный на использовании эффекта индуцированной лазерным лучом термокапиллярной конвекции. Приоритет от 26.03.1999.

Борис Антонович БЕЗУГЛЫЙ –
 доцент кафедры радиофизики
 физического факультета,
 кандидат физико-математических наук,
Олег Александрович ТАРАСОВ –
 аспирант,
Александр Анатольевич ФЕДОРЕЦ –
 аспирант

Удк: 532.22

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКОГО СЛОЯ ЖИДКОСТИ

АННОТАЦИЯ. Предложен новый способ измерения толщины тонкого слоя жидкости, основанный на термокапиллярном эффекте, индуцированном лазерным пучком. Способ позволяет определять толщину слоя в диапазоне 50...1000 мкм с разрешением ~ 1 мкм и может найти применение в лакокрасочной, химической и электронной промышленности, а также в научно-исследовательских приборах.

A new method of measuring of thin liquid layer thickness based on the thermocapillary phenomenon induced by laser beam is proposed. The method allows to measure the thickness over the range from 50 to 1000 μm with resolution ~ 1 μm and can be used in paintwork, chemical and electronic industries as well as in physical devices.

подавляющее большинство способов определения толщины слоя конденсированной среды применимы к твердым образцам и малоприспособны для жидкостей.