

Б.А. Безуглый, С.И. Чемоданов, А.Ю. Зыков

Тюменский государственный университет, Россия

## ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ КАПИЛЛЯРНАЯ КОНВЕКЦИЯ: ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕПЛОФИЗИКЕ

### АННОТАЦИЯ

Показана возможность использования фотоиндуцированной капиллярной конвекции (ФИКК) в теплофизике. Экспериментально исследован стационарный термокапиллярный (ТК) отклик слоя прозрачной жидкости при нагреве пучком лазера поглощающей подложки, изготовленной из материалов с различными теплофизическими характеристиками. Заметная зависимость диаметра ТК отклика от теплопроводности подложки позволит разработать новый метод ее измерения. Отмечена возможность создания тепловых трубок на основе концентрационно-капиллярной (КК) конвекции.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Явление ФИКК было обнаружено в 1975 году [1] при облучении индуцированным пучком света расплава йода в стеклянной ампуле при температуре выше 573К. Как установка, рис. 1, так и опыты были нацелены на поиск экспериментального подтверждения так называемого «фотофазового эффекта» [2], что помешало своевременно распознать истинную природу обнаруженного явления. О его новизне и сложности говорит тот факт что, лишь к 1977 году удалось доказать, что явление имеет капиллярную природу и в его основе лежит чисто тепловое действие света [3]. Оказалось, что при высокой температуре происходит выщелачивание

натрия и кальция из стекла и примесь иодидов в расплаве йода повышает его поверхностное натяжение (ПН) в зоне облучения, где из-за высокой скорости испарения йода растет концентрация этих солей. Это повышение ПН превосходит его понижение, вызванное нагревом и ТК механизм растекания сменяется КК стягиванием жидкости в пучок света, рис. 2, с образованием «аномальной» капли. При смещении пучка аномальная капля следует за ним, стремясь занять место в центре пучка, тогда как обычный расплав отстает из-за ТК растекания, рис. 3.

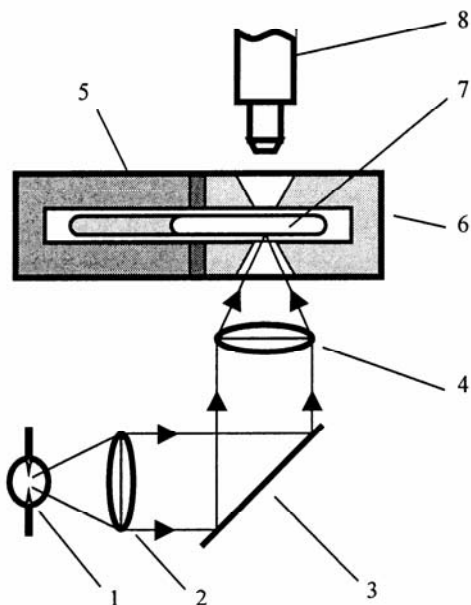


Рис. 1. Экспериментальная установка для наблюдения ФФЭ. 1 – источник света, 2 – коллектор, 3 – зеркало, 4 – конденсатор, 5 и 6 – термостаты, 7 – кювета с исследуемым веществом, 8 – микроскоп.

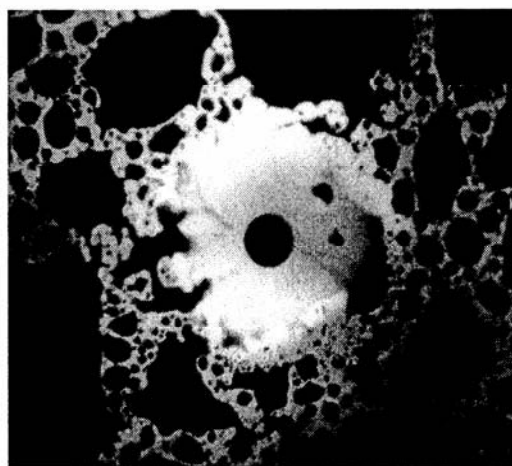
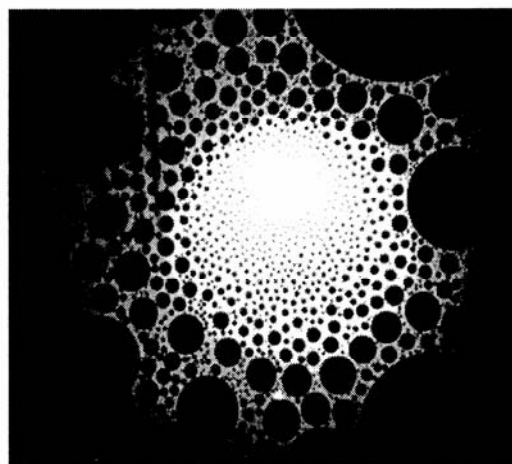


Рис. 2. Обычное (сверху) и необычное (снизу) поведение жидкости в пучке света

К настоящему времени явление качественно хорошо изучено и в самом общем случае выделены его основные стадии рис. 4. Однако построение адекватной математической модели для общего случая, который включает в себя все стадии остаёт-

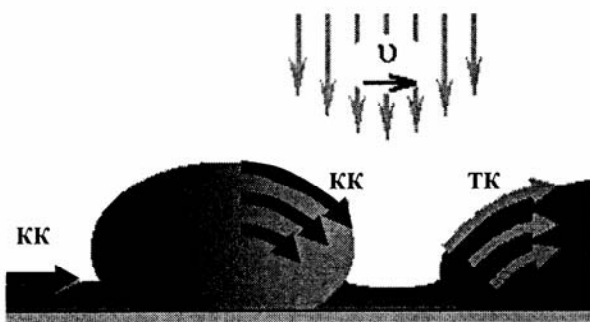
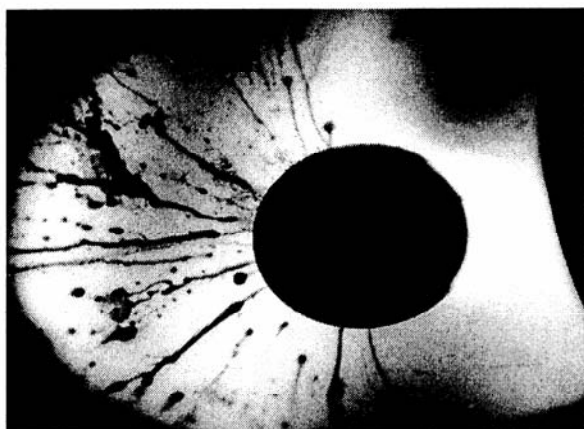


Рис. 3. ТК и КК механизм движения «аномальной» капли.

ся пока нерешённой задачей. Тем не менее, оказалось, что даже одна из начальных стадий ФИКК, известная как фототермокапиллярный эффект,

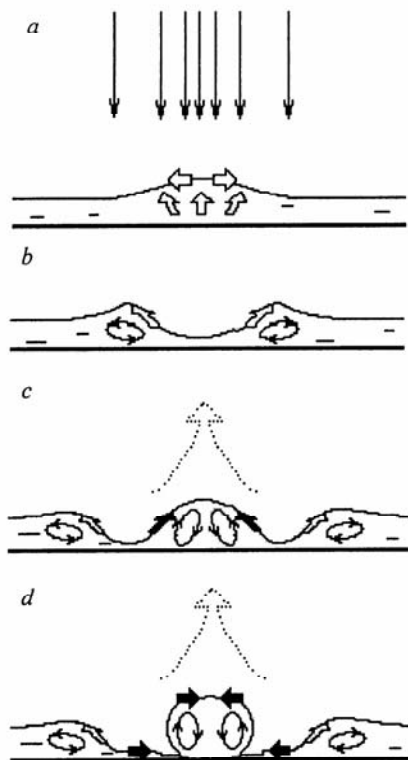


Рис. 4. Стадии ФИКК: *a* – тепловое расширение, *b* – термокапиллярная конвекция, *c* – возникновение концентрационно-капиллярной конвекции, *d* – образование «аномальной» капли

может быть успешно применена в лазерной диагностике жидкостей [4-7].

## 2. ФОТОТЕРМОКАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ

### 2.1. Стационарный ТК отклик

Одна из главных особенностей фототермокапиллярного эффекта состоит в том, что пучок лазера, отразившись от деформированной термокапиллярным течением поверхности жидкости, формирует на экране особую интерференционную картину, названную термокапиллярным откликом, рис. 5, который в отличие от колец Ньютона имеет резкий внешний край [4]. Именно возможность достаточно просто измерить диаметр ТК отклика, который является функцией многих параметров системы пучок/слой/подложка послужила причиной того, что для измерения этих параметров стали использовать ТК отклик. В самом простом случае мерой интенсивности ТК конвекции служит диаметр стационарного ТК отклика.

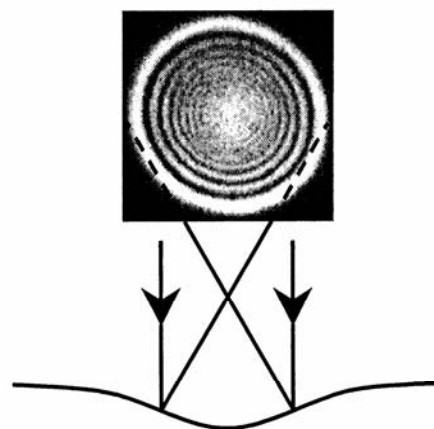


Рис. 5. Характерный вид термокапиллярного отклика слоя жидкости.

На то, что диаметр ТК отклика слоя жидкости, сильнопоглощающей индуцирующее излучение (рис. 6*a*), зависит от теплопроводности подложки впервые показано еще в работе [4]. Объяснение этому состоит в том, что тепло, выделяемое в облучаемом объеме жидкости, частично передается

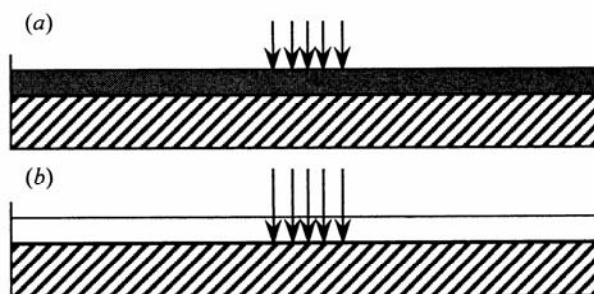


Рис. 6. Два способа фотовозбуждения термокапиллярной конвекции: *a* – в случае сильно поглощающей жидкости нагрев происходит в тонком приповерхностном слое, *b* – если жидкость прозрачна, то можно нагревать поглощающую подложку.

поверхности подложки, а скорость кондуктивного отвода тепла вглубь подложки пропорциональна ее теплопроводности. Таким образом, чем выше теплопроводность подложки тем больше она забирает тепла и тем менее интенсивна ТК конвекция, а следовательно, и ТК отклик меньше. Для прозрачных жидкостей на поглощающей подложке (рис. 6b) эта зависимость еще сильнее, так как тепловой источник находится непосредственно на границе жидкость-подложка.

На рис. 7 показана зависимость диаметра стационарного ТК отклика слоя силиконового масла ( $\eta = 5$  мПа·с) от теплопроводности материала, используемого в качестве поглощающей подложки. Видно, что с ростом  $k$  диаметр ТК отклика падает, так в этом случае возрастает доля тепла уходящая в подложку по сравнению с теплом расходуемым на ТК конвекцию.

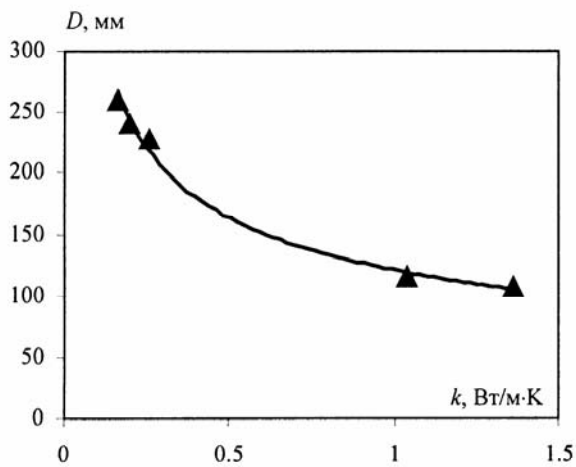


Рис. 7. Зависимость диаметра стационарного ТК отклика от теплопроводности материала кюветы.

## 2.2. Эволюция ТК отклика

В 2002 г. было обнаружено [8], что в слоях прозрачных жидкостей на поглощающей подложке ТК

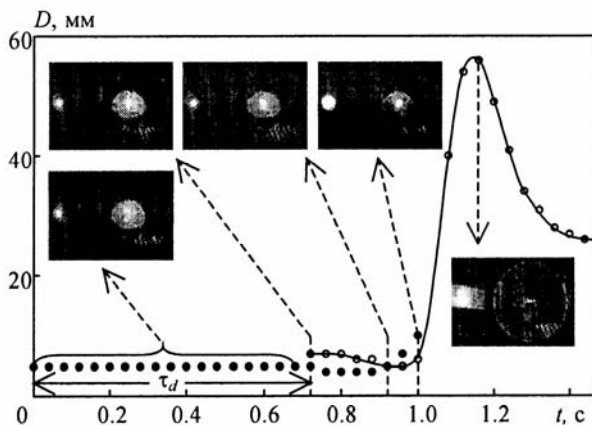


Рис. 8. Эволюция ТК отклика слоя бутанола ( $h = 810$  мкм,  $P = 20.9$  мВт). На снимках изображен индуцирующий ● (слева) и пробный ○ (справа) пучок. (a) отклики, (b) начало деформации,  $t = \tau_d$  (c) фокусировка пробного пучка, (d) начало перефокусировки, (e) всплеск.

отклик появляется не сразу, а с задержкой [9]. В большинстве случаев после задержки следует всплеск ТК отклика, рис. 8. Очевидно, что изменение теплофизических свойств подложки будет влиять на эти эффекты (изменять время задержки и характеристики всплеска). Таким образом, решая обратную задачу по эволюционной кривой ТК отклика можно судить о теплофизических свойствах подложки.

## 3. КОНЦЕНРАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫЙ ЭФФЕКТ

### 3.1. Бесфитильные тепловые трубки

Концентрационно-капиллярная стадия ФИКК интересна тем, что на ее основе можно создать очень перспективные тепловые трубки. Как известно, наиболее эффективным способом переноса тепла является использование тепловых трубок, т.к. они способны передавать тепло в несколько тысяч раз быстрее, чем медный стержень [10]. Применение тепловых трубок в большом масштабе ограничено сложностью изготовления фитильной структуры, главная задача которой создать капиллярное давление для возвратного переноса рабочей жидкости от конденсатора к испарителю. Фитильная структура может быть выполнена в виде желобков с изменяющимся вдоль оси трубки радиусом кривизны, либо в виде пористого материала (фитиля). В желобковых тепловых трубках сопротивление возвратному течению жидкости меньше, чем в фитильных, благодаря чему они способны переносить больший тепловой поток. Однако, в желобковых трубках при некотором критическом перепаде температуры между испарителем и конденсором наблюдается эффект ТК запираания возвратного течения рабочей жидкости, что ограничивает диапазон рабочих температур этих устройств [11], и в конечном счете ведет к их термическому разрушению

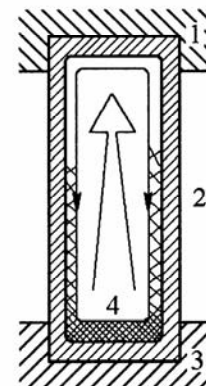


Рис. 9. Схема тепловой трубки нового типа, где возвратный поток жидкости управляется КК механизмом. 1 конденсор, 2 тепловая трубка, 3 испаритель, 4 рабочая жидкость. Неравномерная штриховка соответствует неоднородному распределению ТАВ [4].

Для устранения ТК запираания Безуглый предложил использовать в качестве рабочей жидкости для бесфитильной (гладкостенной) и желобковой тепловых трубок раствор ТАВ в легколетучем растворителе [4], рис. 9. В этом случае в конденсоре будет накапливаться в основном чистый растворитель, ПН которого меньше, чем раствора ТАВ в испарителе. При выполнении условия  $|\sigma'_c \Delta C| > |\sigma'_T \Delta T|$ , где  $\Delta C$  и  $\Delta T$  — разности концентрации ТАВ и температуры между испарителем и конденсором, ТК механизм течения будет подавлен КК механизмом и возникнет (либо усилится уже существовавший) возвратный поток жидкости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытое более 30 лет назад явление ФИКК предлагается использовать в новой для него области — теплофизике. Показано что даже на термокапиллярной стадии можно бесконтактно определять теплофизические свойства материала, используемого в качестве поглощающей излучение подложки для прозрачного слоя жидкости. Концентрационно-капиллярный механизм может быть с успехом применен для создания тепловых трубок нового поколения.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

КК — концентрационно-капиллярный;  
 ПН — поверхностное натяжение;  
 ТАВ — тензоактивное вещество;  
 ТК — термокапиллярный;  
 ФИКК — фотоиндуцированная капиллярная конвекция;  
 $C$  — концентрация, М/м<sup>3</sup>;  
 $T$  — температура, К;  
 $\sigma$  — поверхностное натяжение, мН/м;  
 $\eta$  — вязкость, мПа·с;  
 $\tau_d$  — время задержки ТК отклика, с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Дудкин Г.Я. О фотоконденсации йода // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22. № 2. С. 76-79.
2. Галашин Е.А., Алфимов М.В., Аптекарь И.Л., Галашин А.Е. Открытие № 351/БИ. 1989. № 5. С. 3.
3. Безуглый Б.А., Галашин Е.А., Криндач Д.П., Майоров В.С. Разделение примесей в жидкости при тепловом действии лазерного излучения // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. № 18. С. 832-838.
4. Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: Дис... канд. физ.-мат. наук, Москва, МГУ, 1983.
5. Федорец А.А. Фотоиндуцированный термокапиллярный эффект и его применение для измерения свойств жидкостей: Дис... канд. физ.-мат. наук, Тюмень, ТюмГУ, 2002.
6. Тарасов О. А. Бесконтактная диагностика жидкостей и их слоев на основе термокапиллярного эффекта, индуцированного пучком лазера: Дис. ... канд. физ.-мат. наук, Тюмень, ТюмГУ, 2004.

7. Чемоданов С.И. Эволюция фототермокапиллярного эффекта и разработка методов лазерной диагностики жидкостей на его основе: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Тюмень, ТюмГУ, 2006.
8. Безуглый Б.А., Чемоданов С.И. Эволюция термокапиллярного отклика тонкого слоя прозрачной жидкости на поглощающей подложке // Теплофизика, гидродинамика, теплотехника: Сборник статей. Выпуск I. Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2002. С. 47-52.
9. Безуглый Б.А., Чемоданов С.И. Эффект задержки термокапиллярного отклика слоя прозрачной жидкости при лазерном нагреве поглощающей подложки // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 136-138.
10. Eninger J.E., Markus B.D. Marangoni effect and capacity degradation in axially grooved heat pipes // AIAA Journal. 1979. Vol. 17. No 7. P. 797-799.
11. Kosson R.L., Harwell W. The Marangoni effect in axially grooved variable conductance heat pipes (VCHP) // Prog. Astronaut. Aeronaut. 1983. Vol. 86. P. 222-238.