

6. Безуглый Б. А. Канд. диссертация. Москва, МГУ, 1983. 270 с.
7. Визнюк С. Ф., Суходольский А. Т. // КЭ. 1988. 15, 4. С. 767-770.
8. Grosso R. P., Yellin M. // J. Opt. Soc. Am. 1977. 67. С. 399 — 406.
9. Bezuglyi B. A. // Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity. Rev. Proc. 1st Int. Symp. Hydromech. Heat/Mass Transfer Microgr., Perm-Moscow, Russia, 6-14 July 1991. Gordon & Breach Sci. Publ. Amsterdam. © 1992. P. 335-340.
10. Bezuglyi B. A. // IAC'94, Proc. Aerospace Congress, Moscow 15 — 19 August., 1994, Vol. 1, 1995. P. 261-266.
11. Безуглый Б. А., Низовцев В. В. // Вестн. МГУ, сер. 3. Физика. Астрономия. 1981. 22, 6. С. 37-41.
12. Федин Л. А., Барский И. Я. Микрофотография. Ленинград: Наука, 1971. 107 с.

**Б. А. БЕЗУГЛЫЙ,
О. А. ТАРАСОВ,
С. В. ШЕПЕЛЕНКО**

УДК: 532. 22

**ПРИМЕНЕНИЕ
ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО
ЭФФЕКТА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ
ПЛОСКОСТНОСТИ
ЖИДКОЙ ПОВЕРХНОСТИ¹**

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты экспериментальной работы по применению термокапиллярного (ТК) эффекта индуцированного тепловым действием лазерного излучения для контроля плоскостности поверхности жидкости.

The results of experimental research on the application of thermocapillary (TC) phenomenon induced by heat effect of laser beam for the control of liquid surface flatness are presented.

¹ Данная статья представляет собой расширенное изложение доклада на Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'97 и включена в труды IAC'97, которые будут опубликованы в 1998 году на английском языке.

Как известно, в наземных условиях свободная макроповерхность жидкости, для не слишком тонких слоев, является практически плоской¹. Исключение составляет область $20 + 30$ мм вблизи границ сосуда, где поверхность искривляется за счет их смачивания [1]. Другая ситуация реализуется при микрогравитации, когда кривизна жидкого мениска определяется только краевым углом смачивания и поверхность жидкости теряет плоскостность на всем протяжении. Первые же эксперименты в космосе с тонкими жидкими слоями, проведенные еще в 1971 и 1974 гг., показали, что получить свободную поверхность плоской очень трудно [2,3]. В этих опытах, выполненных на борту космических аппаратов Аполлон 14 и Аполлон 17, при полете от Луны, изучали тепловые потоки и конвекцию в условиях микрогравитации. В одном из опытов масло Критокс 143AZ заливали в кювету, дно которой было выполнено из алюминия, а боковые стенки из термоизолирующего пластика. Предполагалось, что за счет смачивания дна жидкость образует плоский слой. Однако вместо этого возник вогнутый мениск с толщиной в центре приблизительно 0.2 мм при средней толщине 2 мм. Этот факт помешал получить хорошо интерпретируемые результаты. Во втором полете использовали то же масло, а материал стенок был заменен. Мениск превратился в выпуклый с толщиной в центре около 4 мм при средней толщине 2 мм. То есть, ни в том ни в другом случае не удалось даже оценить кривизну поверхности жидкости. Здесь предлагается простой способ ее оценки с помощью ТК эффекта, управляемого тепловым действием лазерного излучения.

МЕХАНИЗМ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЯВЛЕНИЯ, УПРАВЛЯЕМОГО ТЕПЛОВЫМ ДЕЙСТВИЕМ СВЕТА

Существует два типа деформации межфазной жидкой поверхности:

1) статический, является следствием взаимодействия поверхностных сил жидкой и твердой поверхностей в поле сил тяготения и дает равновесную форму жидкой поверхности (мениск, жидкий мостик, сидячая или висючая капля и т. п.) [6];

2) динамический, возникает при приложении к жидкой поверхности механических напряжений (например, с помощью направленной к поверхности струи газа).

Здесь интересен бесконтактный способ создания на жидкой поверхности касательных напряжений с целью получения ее динамической деформации. Этого можно достичь путем локального нагрева поверхности лучом лазера. Вследствие уменьшения поверхностного натяжения σ из-за нагрева на жидкой поверхности возникает центробежное поле касательных сил. Благодаря вязкости их действие приводит к возникновению конвективного вихря внутри жидкости и понижению ее поверхности в зоне падения луча. Это явление известно как термокапиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света. На экране, помещенном в поперечном сечении каустики отраженного луча (Рис.1), возникает интерференционная картина в виде концентрических окружностей (Рис.6, фото 3), которую будем называть ТК откликом. При постоянной мощности пучка и заданном расстоянии до экрана диаметр внешнего кольца D остается неизменным. Подробнее причина интерференции рассмотрена в работе [4].

Установлено [5], что боковые стенки сосуда влияют на величину D : при смачиваемых стенках D растет, а при несмачиваемых — убывает. Прибли-

¹ Под макроповерхностью здесь понимается зеркало жидкости с характерным радиусом $R \gg \sqrt{\rho g / \sigma}$, где ρ — плотность, g — ускорение свободного падения, σ — коэффициент поверхностного натяжения.

жение границ к точке падения луча этот эффект усиливает. Только в случае, если краевой угол θ стенок прямой, жидкая поверхность остается плоской, независимо от их близости, и значение D не изменяется. Таким образом, влияние кривизны статической деформации жидкой поверхности на величину D можно использовать для оценки ее плоскостности.

Этот способ будет более эффективным, если вместо круговой границы использовать две параллельные, симметричные относительно точки падения луча. Тогда кривизна мениска становится одномерной и при $\theta = \text{const}$ зависит лишь от расстояния между границами по линии смачивания. В этом случае круг на экране деформируется в эллипс, один из диаметров которого D_0 соответствует неограниченному, а другой, D' , ограниченному слою.

Оба диаметра D_0 и D' зависят от материала границ, расстояния между ними и угла их наклона. Это связано с тем, что при изменении кривизны свободной поверхности жидкости одновременно меняется и толщина ее слоя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

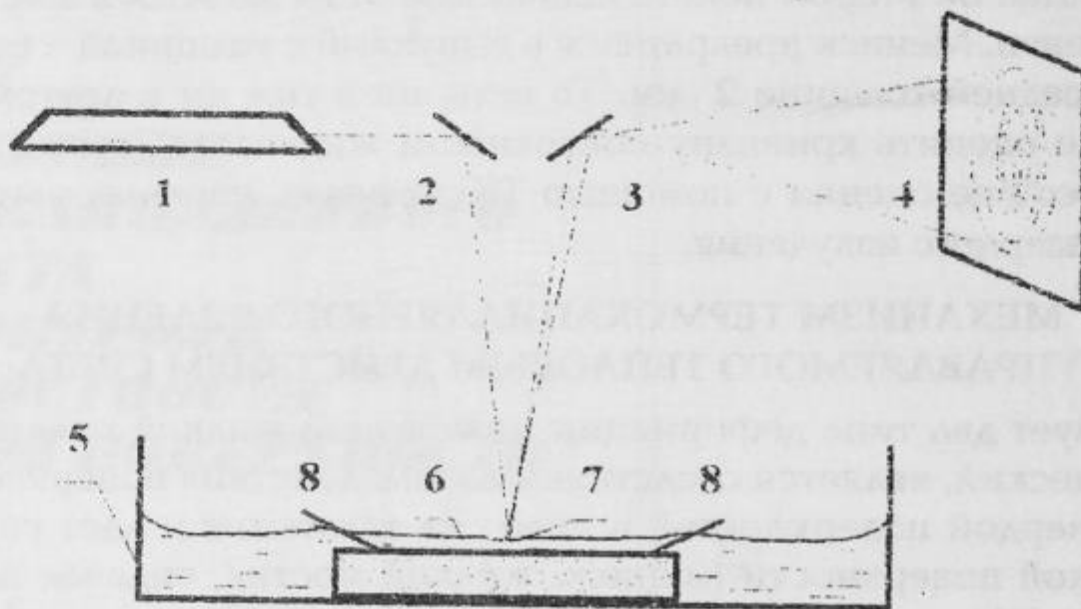


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Излучение He-Ne лазера 1 мощностью 8 мВт направляли зеркалом 2 на слой о-ксилола 7 в чашке Петри 5. Вследствие поглощения излучения карболи-то-вой подложкой 6 в слое возбуждалась ТК конвекция. Диаметр пятна лазерного пучка на подложке равнялся 4 мм, а ее коэффициент поглощения — 0.9. Отраженное от ТК прогиба излучение направляли зеркалом 3 на экран 4. Суммарное расстояние от слоя до экрана составляло 2.0 м. В качестве границ 8 служили две плоские алюминиевые пластинки $2 \times 2 \times 50$ мм³, частично погружаемые в жидкость симметрично относительно точки падения луча.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены зависимости диаметра D_0 от расстояния между пластинами L при угле их наклона $\alpha = 90^\circ$ для различных толщин слоя h в диапазоне от 200 до 380 мкм. Вид зависимости $D_0 = D_0(L)$ при $\alpha = \text{const}$ не зависит от величины h . Фактически графики 1–6 отличаются друг от друга только масштабным коэффициентом. Следовательно, изменение диаметра D_0 связано только с изменением толщины слоя за счет смачивания границ.

Для определения толщины слоя жидкости использовали метод калиброванных проволочек, впервые предложенный в работе [5]. Кривизна мениска между проволочками зависит от их высоты над уровнем жидкости (Рис. 3). Жидкость добавляют в сосуд до исчезновения эксцентриситета.

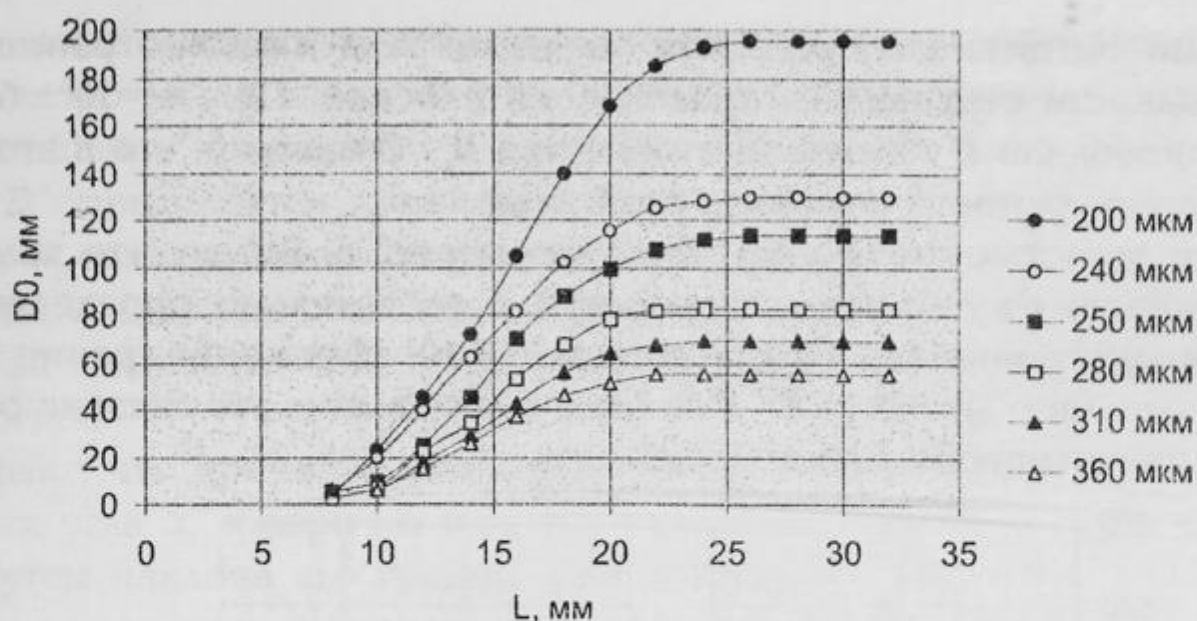


Рис. 2. Зависимости диаметра D_0 от расстояния L между границами для различных толщин слоя.



Рис. 3. Форма поверхности жидкости в присутствии калиброванных проволочек в зависимости от толщины слоя.

На рис. 4 представлены зависимости диаметра D_0 от расстояния между пластинами для различных углов их наклона при толщине слоя $h = 350 \div 400$ мкм. Различие в толщине слоя на 50 мкм было обусловлено капиллярным натеканием жидкости под пластины, зависящим от угла их наклона. Графикам 1 – 5 соответствуют углы α : 90° , 45° , 20° , 15° , 10° . Видно, что с уменьшением угла α от 90° до 20° расстояние, на котором границы начинают влиять на величину D_0 , уменьшается от 20 до 10 мм. При $\alpha = 15^\circ$ влияние границ было незаметным вплоть до значения L , равного удвоенному диаметру пятна лазерного излучения на подложке.

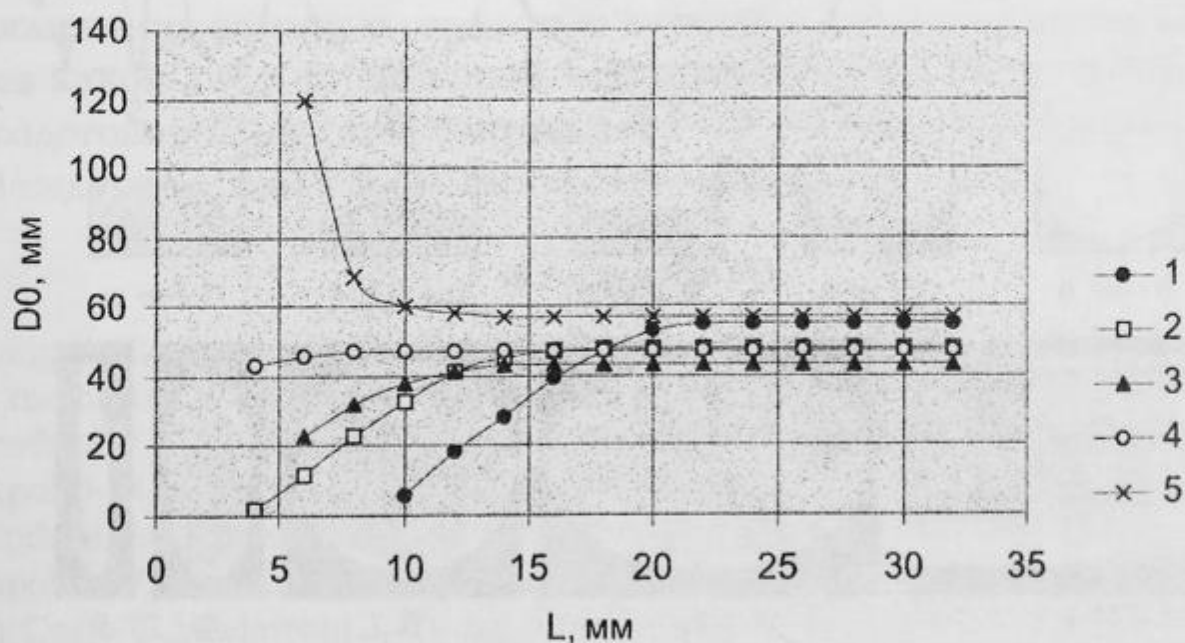


Рис. 4. Зависимости диаметра D_0 от расстояния L между границами для различных углов их наклона.

Можно считать, что при таком значении угла наклона границ поверхность жидкости становилась практически плоской. При $\alpha = 10^\circ$ сближение границ приводило к увеличению диаметра D_0 . Очевидно, что в этом случае кривизна поверхности поменяла свой знак.

Те же зависимости D' представлены на рис. 5. Видно, что величина D' сильно зависит от угла наклона границ и, следовательно, определяется кривизной жидкого мениска. При значении $\alpha = 10^\circ$ сближение границ приводило к уменьшению диаметра D' . Как отмечалось выше, это связано со сменой знака кривизны свободной поверхности.

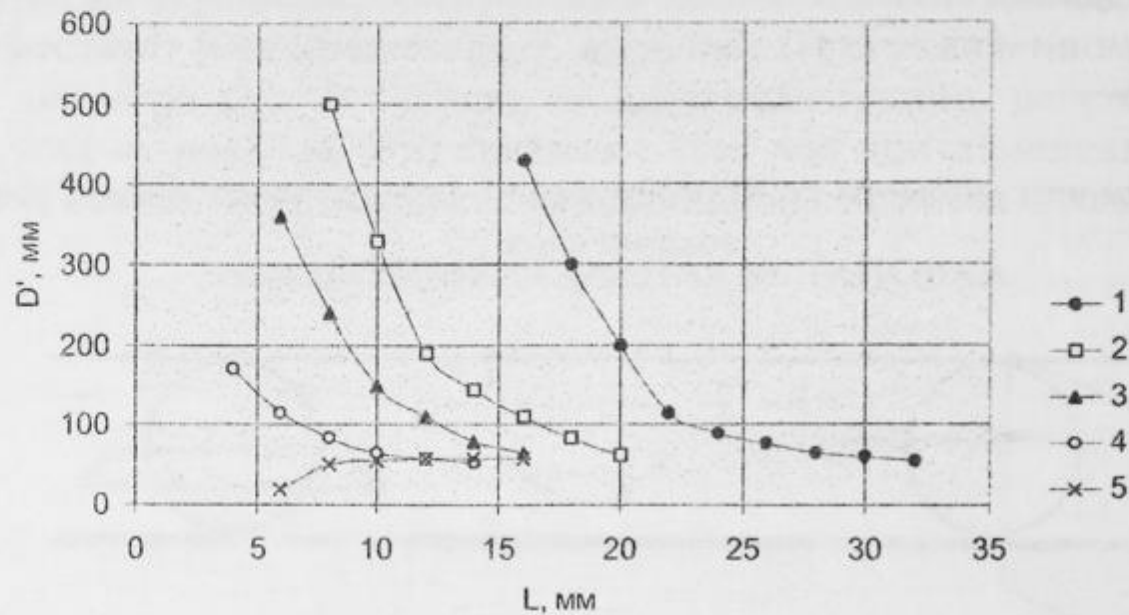


Рис. 5. Зависимости диаметра D' от расстояния L между границами для различных углов их наклона.

Эксперимент по определению краевого угла смачивания алюминия о-ксиллом по профилю капли дал оценку $\theta \approx (20 \pm 5)^\circ$. Это согласуется с фактом плоскостности поверхности жидкости при угле наклона пластинок $\alpha = 15^\circ$.

На рис. 6 показана качественная зависимость формы ТК отклика от краевого угла смачивания границ при фиксированной в точке падения луча толщине слоя. Смачиваемые пластины (фото 1 и 2) были изготовлены из алюминия, несмачиваемые (фото 4 и 5) из тефлона. Эксцентриситет эллипсов меняли путем наклона границ.

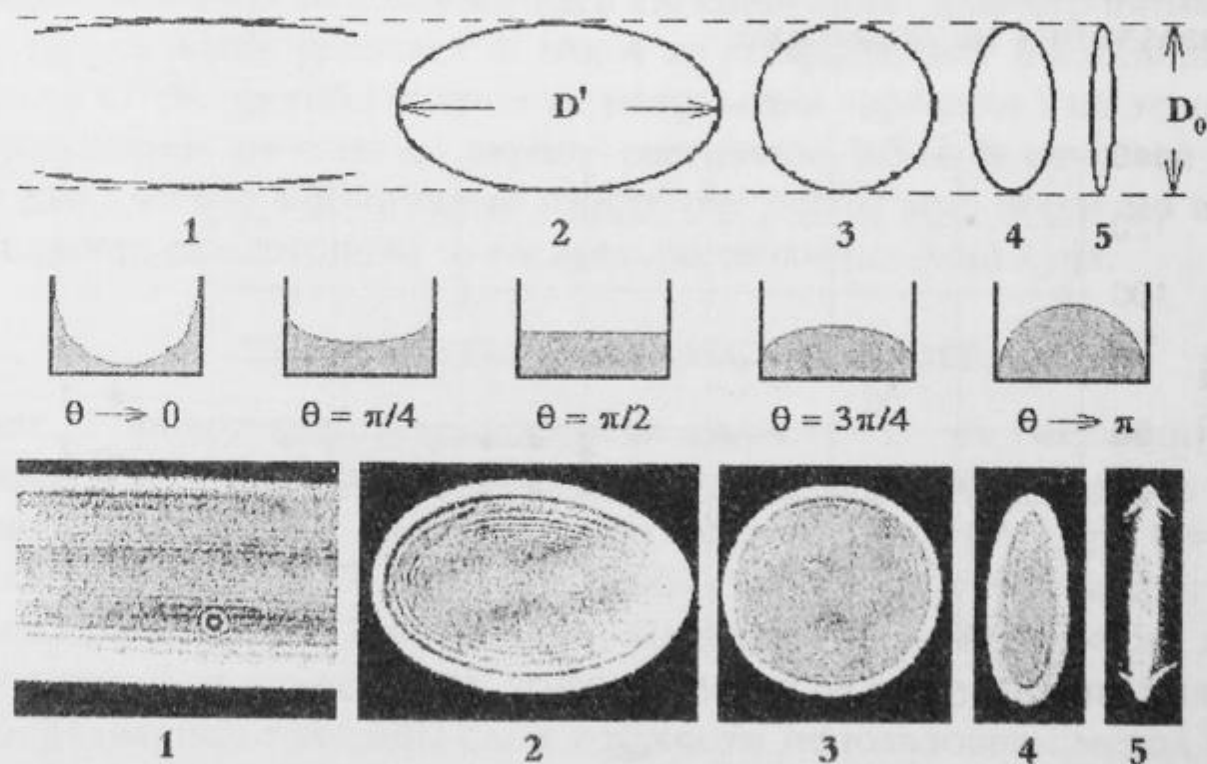


Рис. 6. Качественная зависимость формы термокапиллярного отклика от величины и знака статической кривизны жидкого мениска при фиксированной толщине слоя.

Здесь можно отметить работу, выполненную в аналогичных условиях (He—Ne лазер мощностью 10 мВт, карболитовая подложка) с раствором антрахинонового яркосинего в о-ксилоле [5]. В ней было показано, что диаметр D' определяется кривизной свободной поверхности, а изменение диаметра D_0 связано только с изменением толщины слоя за счет смачивания границ. Следовательно, как в случае окрашенной, так и в случае неокрашенной жидкости можно говорить об аддитивности кривизны мениска и ТК прогиба.

Тот факт, что кривизна свободной поверхности меняет свой знак при изменении угла α , говорит о том, что возможна полная ее компенсация в сосуде путем наклона его границ. Для устранения кривизны поверхности жидкости в наземных условиях и при микрогравитации предлагается помещать в сосуд кольца с внутренними стенками, наклоненными на угол θ . В этом случае можно работать в одном сосуде с различными жидкостями, используя набор таких колец. Предложенный способ устранения кривизны жидкого мениска удобнее обычно применяемого, основанного на подборе материала стенок сосуда [2,3], так как позволяет работать в одном сосуде с разными жидкостями и при различных условиях.

ВЫВОДЫ

Показано, что статическая кривизна жидкого мениска влияет на величину и форму ТК отклика. В случае двух бесконечно длинных плоских границ отклик имеет форму эллипса, один из диаметров которого остается постоянным при фиксированной толщине слоя, а другой определяется кривизной свободной поверхности.

Свойство аддитивности статической кривизны жидкого мениска и динамической — ТК углубления можно использовать для контроля плоскостности свободной поверхности жидкости в наземных условиях и при микрогравитации.

Такой способ контроля позволит, в частности, повысить точность измерения краевых углов смачивания методом наклонной пластинки. Это достигается тем, что здесь используется не одна, а две пластинки, угол наклона которых можно менять независимо, а значение измеренных углов усреднять.

В заключение авторы с гордостью заявляют, что их исследования выполнены без какой-либо финансовой поддержки как со стороны гос.бюджета, так и хоздоговоров. Авторы благодарят Г. Ф. Куцева за поддержку их участия в Международном аэрокосмическом конгрессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maijgren B, Odberg L. Surface tension data from slight deformations of the surface. The ring method. *J. Colloid & Interf. Science*. 18(1) 197-203 (1982).
2. Grodzca P. G., Bannister T.C. Heat flow and convection demonstration experiment aboard Apollo 14. *Science*, 176(4034). 506-508 (1972).
3. Grodzca P.G., Bannister T. C. Heat flow and convection demonstration experiment aboard Apollo 17. *Science*, 187(4172) 165-167 (1975).
4. Da Costa G., Calatroni J. Transient deformation of liquid surfaces by laser induced thermocapillarity. *Appl. Optics*. 18(2) 233-235 (1979).
5. Bezuglyi B.A. *PhD Thesis*. Moscow State University. Moscow, 1983. 280 p.
6. Финн Р. Равновесные капиллярные поверхности. М.: Мир, 1989. 460 с.