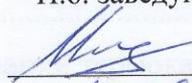


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра Механики многофазных систем

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

И.о. заведующего кафедрой
к.ф.-м.н


П.Ю. Михайлов
13.06. 2017 г

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ ФОТОАДСОРБЦИОННЫМ МЕТОДОМ

03.04.02 Физика

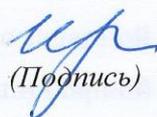
Магистерская программа «Техническая физика в нефтегазовых технологиях»

Выполнил работу
Студент 2 курса
очной
формы обучения


(Подпись)

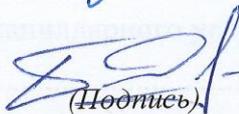
Бахарева
Елизавета
Сергеевна

Научный руководитель
д.ф.-м.н., доцент


(Подпись)

Иванова
Наталья
Анатольевна

Рецензент
Заведующий кафедрой
математического
моделирования
д.ф.-м., профессор


(Подпись)

Татосов
Алексей
Викторович

г. Тюмень, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	3
АННОТАЦИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ.....	9
1.1 Экспериментальные работы в области исследований термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости.....	9
1.2 Теоретические работы в области исследований термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости.....	19
1.3 Выводы к главе 1	24
ГЛАВА 2. ФОТОАБСОРБЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕРМОКАПИЛЯРНЫХ УГЛУБЛЕНИЙ	26
2.1 Фотоабсорбция.....	26
2.1.2. Экспериментальная установка	28
2.2 Вычисление толщины деформированного слоя жидкости	30
2.3 Методика эксперимента.....	35
2.4 Метод восстановления профиля ТК деформации поверхности жидкости. 36	
2.5 Методика работы с программным комплексом PhotoAbsorbtion Snapshot Calculator	39
ГЛАВА 3 ТЕРМОКАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ	42
3.1 Измерение профиля пластины с заданной деформацией	42
3.2 Построение профилей термокапиллярной деформации.....	44
3.3 Динамика развития термокапиллярного углубления	49
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	54
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	61

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

Обозначения:

Аббревиатура:

КК – концентрационно-капиллярный;

ПН – поверхностное натяжение;

ТАВ – тензоактивное вещество;

ТК – термокапиллярный;

ФИКК – фотоиндуцированная капиллярная конвекция.

Латинские:

Bi – число Био;

Le – число Льюиса;

Ma – число Марангони;

D – диаметр, мм;

d – толщина слоя, мм;

h_f – толщина светофильтра, мм;

h_l – толщина исследуемого недеформированного слоя жидкости, мкм;

h_m – неизвестная толщина деформированного слоя жидкости, мкм;

h_w – слой жидкости нулевой толщины, мкм;

I_0 – интенсивность монохроматического пучка света, падающего на вещество, Вт/м²;

I_{l0} – интенсивность падающего света до прохождения недеформированного слоя жидкости, Вт/м²;

I_l – интенсивность падающего света после прохождения недеформированного слоя жидкости, Вт/м²;

I_m – интенсивность падающего света до прохождения деформированного слоя жидкости, Вт/м²;

I_{m0} – интенсивность падающего света после прохождения деформированного слоя жидкости, Вт/м²;

I_{w0} – интенсивность падающего света до прохождения нулевого слоя жидкости,
Вт/м²;

I_w – интенсивность падающего света после прохождения нулевого слоя жидкости,
Вт/м²;

K – волновое число;

k – коэффициент поглощения жидкости;

k_m – поправка на интенсивность света после прохождения светофильтра;

k_l – поправка на интенсивность света после прохождения недеформированного
слоя жидкости;

k_w – поправка на интенсивность после прохождения нулевого слоя;

l – длина волны;

P – мощность индуцированного пучка, мВт;

T – температура, К.

Греческие:

σ – поверхностное натяжение мН/м;

η – вязкость, мПа·с;

ρ – плотность, г/см³.

АННОТАЦИЯ

Представленная магистерская диссертация посвящена изучению поведения, а конкретно, деформации тонких пленок жидкости при локальном воздействии на них тепла. Целью работы являлась экспериментальное исследование профилей термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости фотоабсорбционным методом. Большое внимание было уделено методу, позволяющему определить толщину деформированного слоя жидкости бесконтактным путем с помощью закона Бугера. Полученные результаты позволили получить более широкую картину формирования и развития ТК углубления в полярной жидкости.

В первой главе работы представлен краткий обзор литературы в области исследования поведения тонких пленок. Рассмотрены как экспериментальные работы, так и теоретические работы. Несмотря на большой объем исследований в данной области, большая часть остается неизученной из-за сложности описания всех процессов происходящих одновременно (испарение, наличие расклинивающего давления, градиенты концентрации и температуры).

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установке и методам определения толщины тонких пленок. Представлен алгоритм вычисления толщины деформированного слоя жидкости, с помощью которого протраивались профили термокапиллярной деформации жидкости разных толщин и в разные промежутки времени.

В третьей, заключительной главе представлены результаты экспериментов, проведенных с раствором бриллиантового зеленого в н-бутаноле. Представлены графики динамики формирования термокапиллярной деформации с выходом его на стационар.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

В последние годы, с развитием науки, наибольший интерес представляет изучение поведения поверхности на границе двух сред, изучение поверхностных и межмолекулярных сил, а также процессы, протекающие в макроскопических тонких пленках [1]. Макроскопические тонкие пленки, порядка 0.1 мкм-0.01 мкм, играют немаловажную роль в таких областях науки и техники, как физика, биофизика, химия.

Большое внимание к исследованиям по межфазной конвекции объясняется новейшими разработками в области космоса и космических технологий, а также рост интереса в нефтяной промышленности к остаточной адсорбционно-связанной нефти. Эти факторы привели к интенсивному всплеску развития межфазной гидродинамики.

Хорошо известно, что движение жидкости обусловлено как объемных (массовых), так и поверхностных сил. К массовым силам сила Архимеда, возникающая при селективном изменении плотности жидкости. Поверхностные (капиллярные) силы проявляются при наличии неоднородностей поверхностного натяжения и направлены в сторону его увеличения. Заставляя слои жидкости двигаться, эти силы инициируют развитие объемного конвективного течения, получившего название конвекции Марангони. В свою очередь, причины возникновения градиента поверхностного натяжения могут быть различны. Наиболее распространенная причина - зависимость поверхностного натяжения от концентрации.

Также причиной данного явления может быть либо случай, неоднородного растворения или химической реакции, либо целенаправленный характер, например локальный источник тепла или холода на жидкой поверхности. Одним из простых способов целенаправленного получения локальной неоднородности температуры может быть облучение поверхности раздела фаз пучком лазера. Данный метод позволяет сконцентрировать неоднородность температуры в узком

приповерхностном слое с учетом свойств жидкости и длины волны излучения лазера, т.е. моделируется случай сосредоточенного источника тепла [2].

ТК эффект оказывает огромное влияние на процессы в производстве, таких как, нанесения защитных покрытий на поверхности различных металлов, выращивания кристаллов в космосе, создание сверхчистых материалов и микродозирование веществ. Наибольший интерес к эффекту Марангони обусловлен, прежде всего, исследованиями и разработками в области микрофлюидики – нового междисциплинарного направления, имеющего огромное значение для развития высокотехнологичных устройств, таких как топливные элементы, тепловые трубки, биологические сенсоры, lab-on-the-chip и др. [3].

В большей части ранее проведенных исследований по термокапиллярной неустойчивости предполагалось, что в состоянии механического равновесия температура меняется с поперечной координатой линейно. Но, наибольший интерес представляет анализ и изучение влияния на пороги конвекции более сложных законов изменения температуры. В слое с локальными источниками тепла и возникает такое разнообразие профилей температуры.

Поэтому все вышеуказанные факторы делают исследование профилей термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости фотоадсорбционным методом актуальными и практически значимыми для теории конвективной неустойчивости.

Цели и задачи исследования

Магистерская диссертация посвящена экспериментальному исследованию профилей термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости фотоабсорбционным методом. Для достижения данной цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Сборка экспериментальной установки;
2. Проведение серии экспериментов по изучению профилей термокапиллярной деформации;
3. Анализ полученных данных.

Научная новизна

В представленной магистерской диссертации проведено экспериментальное исследование возникновения и динамики развития термокапиллярного углубления в слое полярной жидкости. Само термокапиллярное углубление исследовано слабо из-за малого числа работ в области исследования профиля деформации свободной поверхности в области нагрева. Усложнение его внедрения в производство также связано с отсутствием информации о связи профиля деформации с формой термокапиллярного отклика.[22]

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ

1.1 Экспериментальные работы в области исследований термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости

Поверхностные (капиллярные) течения интенсивно изучаются последние несколько десятков лет. Интерес к этой тематике связан с широким распространением фундаментальных и прикладных задач, в которых встречается подобный класс течений. Появление капиллярного течения возможно в любой жидкой системе, имеющей границу с жидкой или газовой фазой. Самой распространённой причиной формирования данного течения является градиент поверхностного натяжения, обусловленный неоднородностями температуры, концентрации или электрического потенциала вдоль поверхности жидкости. Таким образом, возникающие течения называются термокапиллярным, концентрационно-капиллярным или электрокапиллярным течением Марангони и направлено вдоль градиента поверхностного натяжения.

Считается, что впервые течение Марангони было обнаружено в виде «слез вина» Томсоном в 1885 году задолго до того как была опубликована первая работа по этой тематике. Явление «слезы вина» легко наблюдать в бокале с крепким спиртным напитком после создания тонкого слоя алкоголя на стенках бокала. Иллюстрация феномена показана на Рис.1.1.

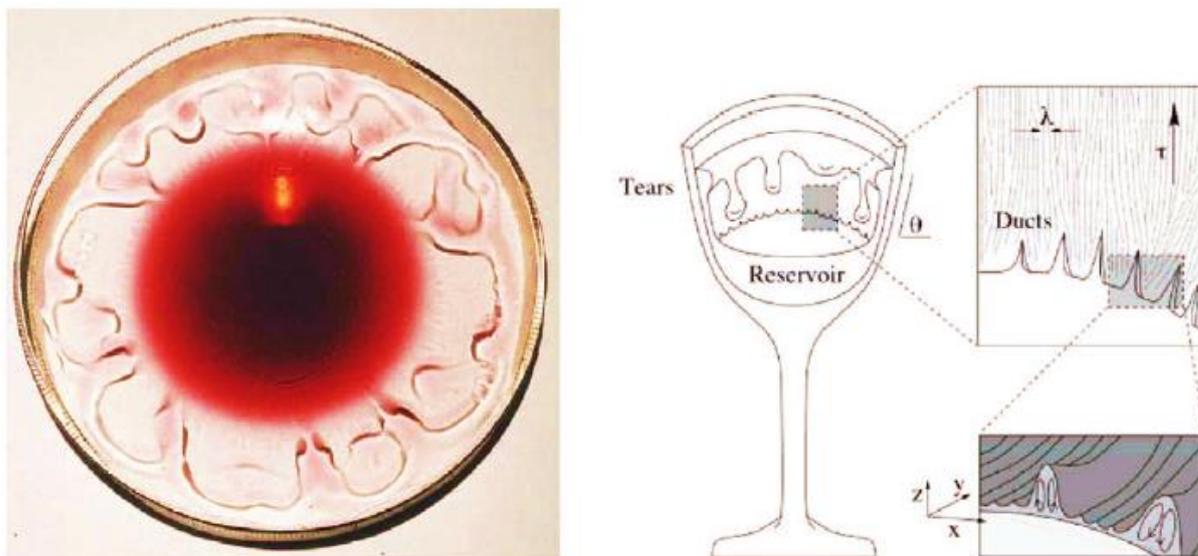


Рис.1.1. Слезы вина. Натекание жидкости на стенки бокала вызвано градиентом концентрации, который инфицируется испарением спирта с свободной поверхности.

Испарение спирта происходит повсюду вдоль свободной поверхности жидкости. Концентрация спирта в тонком слое уменьшается (по сравнению с концентрацией спирта в объеме) благодаря увеличению площади поверхности к его объему. По мере того, как мениск образует пленку на поверхности стенок бокала, концентрация спирта в нем уменьшается еще сильнее, что, в свою очередь, приводит к увеличению градиента поверхностного натяжения. Достигнув верхнего края бокала, раствор накапливается на стенке в форме валика, откуда начинает периодически скатываться вниз в виде капель ("слез" или "ножек"). «Слезы» откатываются назад, чтобы пополнить объемный резервуар жидкостью, которая истощена спиртом. Поток опирается на перенос химической потенциальной энергии в кинетическую и в конечном итоге гравитационную потенциальную энергию. Процесс продолжается до тех пор, пока топливо для процесса- спирт полностью не истощается. Для некоторых жидкостей (например, портвейн) восходящая пленка, слой сдвига Марангони, неустойчива к потоковым вихрям и ассоциированной радиальной гофрировке - «слезные протоки вина».[20] Когда нисходящие слезы достигают ванны, они кажутся отскоками в ответ на

резкое изменение σ . Слезы или ноги вина принимаются сомелье, чтобы быть индикатором качества вина [17].

Конвекция Марангони оказывает существенное влияние на многие технологические процессы, которые широко распространены в металлургической, химической, нефтяной, пищевой и других отраслях промышленности, в том числе в процессах, протекающих в условиях невесомости, где гравитационная составляющая конвективного движения отсутствует. Термо- и концентрационно-капиллярные эффекты имеют также важное прикладное значение для экологии (очистка поверхности воды от загрязнений нефтепродуктами); метеорологии, гидрологии, физики атмосферы и океана; биологии (движение бактерий и клеточных микробъектов); медицины (распространение ПАВ при ингаляции лекарственных аэрозолей) и др. [18].

На физические процессы, которые происходят в жидкости существенное влияние оказывает движение, связанное с термо- и концентрационно-капиллярными эффектами. Кроме того, проблема конвективной устойчивости привлекала заметное внимание исследователей всю вторую половину XX и начало нового века в связи с теоретической важностью проблемы. Далее представим серию экспериментов связанных с термокапиллярной деформацией тонкого слоя жидкости.

Явление фотоиндуцированной капиллярной конвекции впервые было обнаружено в 1975 году. Описание данного открытия представлено в работе Безуглого Б.А., Галашина Е.А. и Дудкина Г.Я., где впервые наблюдалась фотоконденсация паров йода в интенсивном пучке видимого света [4]. На рис.1.2 представлена схема установки, основной частью которой является стеклянная трубка, содержащая исследуемое вещество. Левая половина трубки помещалась в термостат с температурой T_1 , а правая - в термостат с температурой T_2 . Давление насыщенных паров в термостате определялось температурой левого термостата ($T_1 < T_2$).

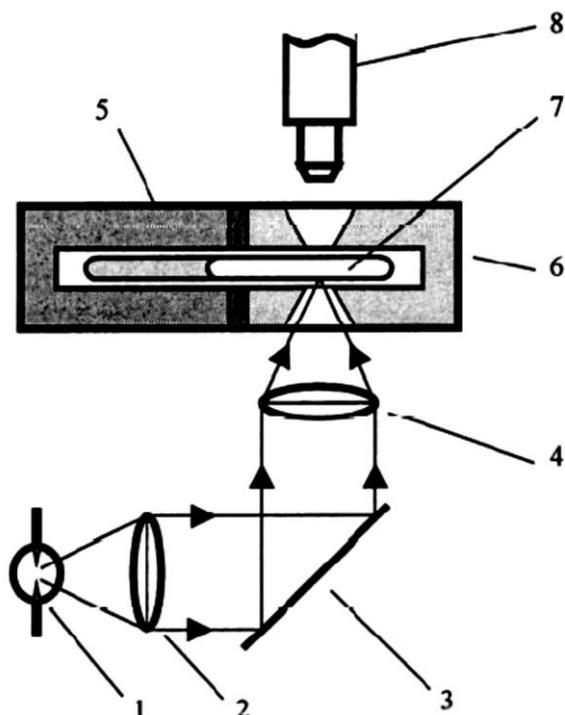


Рис.1.2. Схема экспериментальной установки для наблюдения фотоконденсации йода: 1- ртутная лампа, 2 -коллекторная линза, 3- зеркало, 4- конденсорная линза, 5- термостат с температурой T_1 , 6- термостат с температурой T_2 , 7- стеклянная трубка с исследуемым веществом, 8- микроскоп.

На данной установке обнаружено, что в определенном диапазоне температур под действием излучения происходит конденсация паров йода с появлением капли расплава в центре пучка. В работе также представлены основные свойства капли фотоконденсата, т.к.:

1. При перемещении светового пучка по поверхности запаянной трубки капля движется вслед за ним, стремясь занять положение в фокусе пучка света. (Рис.1.3.)
2. При изменении интенсивности света капля фотоконденсата резко меняет кривизну своей поверхности, что доказывает влияние фотовозбуждения на величину поверхностного натяжения.

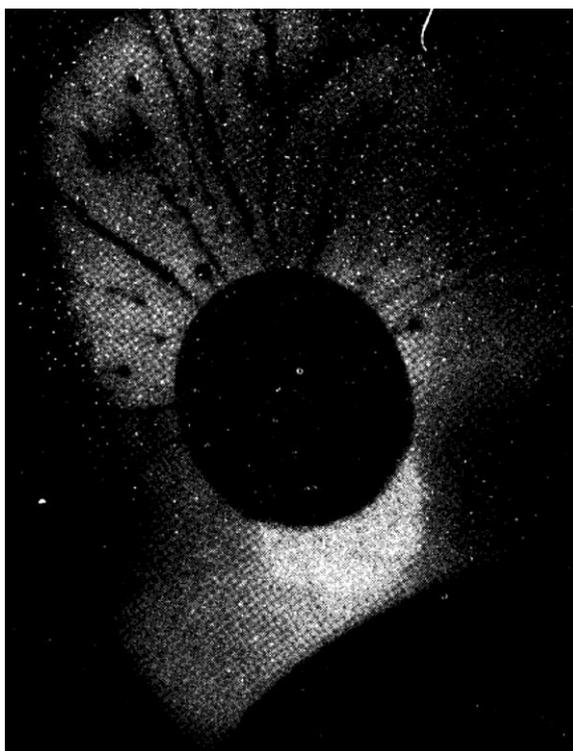


Рис.1.3. Смещение капли фотоконденсата при смещении пучка света.

Фотоиндуцированная капиллярная конвекция находит широкое применение в теплофизике, а именно в определении теплофизических параметров подложек. В работе [5] описаны особенности фототермокапиллярного эффекта и одна из главных состоит в том, что пучок лазера, отразившейся от деформированной термокапиллярным течением поверхности жидкости, формирует на экране особую интерференционную картину, названную термокапиллярным откликом (рис.1.4), которые имеет резкий внешний край, в отличии от колец Ньютона. [6]. ТК отклик является функцией многих параметров (слой жидкости, пучок лазера, материал подложки). Именно возможность достаточно простого измерения и стала причиной использования данного метода для измерения данных параметров.

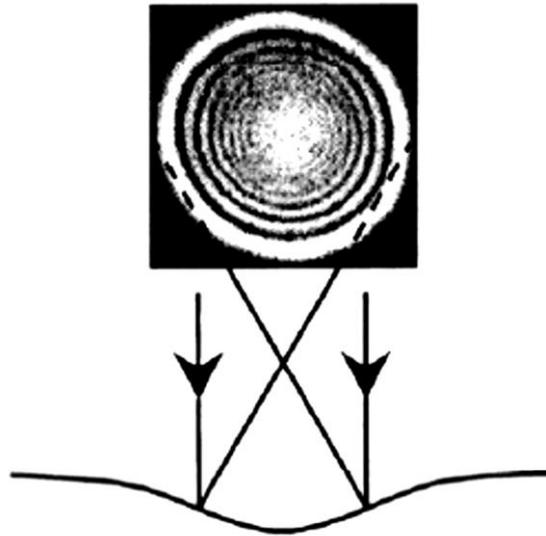


Рис.1.4. Вид термокапиллярного отклика слоя жидкости.

Один из параметров, который можно определить с помощью термокапиллярных откликов - это температура подложки [7]. Суть измерения температуры состоит в сопоставлении диаметров термокапиллярного отклика жидкого слоя на обычной подложке и того же слоя на подложке со встроенным датчиком температуры. Равенство диаметров ТК - отклика будет означать равенство температур подложки и датчика в зоне облучения. Т.к. метод бесконтактный и не внести возмущения в поле скоростей температур, следовательно, механически ТК-вихрь остается невозмущенным. Эксперимент проводили следующим образом.[23] В кювете создавали необходимый слой жидкости, далее снимались зависимости диаметра ТК-отклика от мощности индуцирующего пучка $D(P)$, проецируя пучки на подложку вдали от датчиков температуры. После получения данных, последовательно снимались те же зависимости, но уже проецируя пучок на первый, второй и третий датчик, а также зависимости температуры датчиков от мощности пучка. На рис.1.5 представлены полученные данные по измерению температуры подложки методом ТК - отклика.

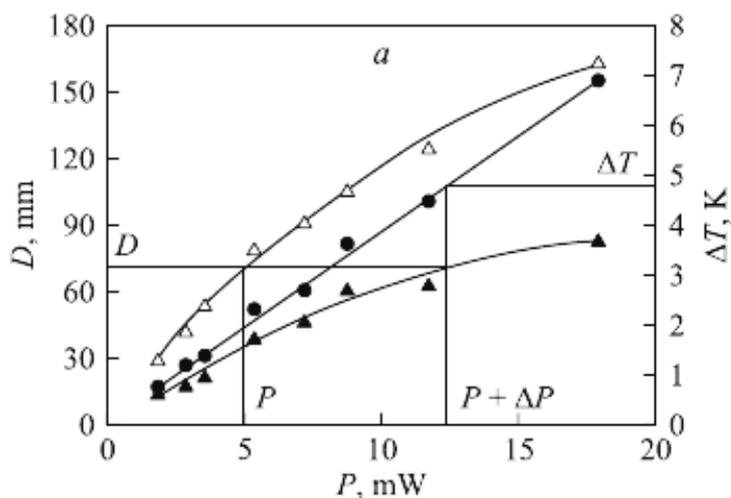


Рис.1.5. Восстановления температуры невозмущенной подложки для слоя ПМС-10.

Фундаментальную ценность также представляет исследование ТК деформации поверхности тонкого слоя жидкости. Такое исследование начато в работах Бенара [8], в которой впервые было отмечена деформация поверхности слоя с установившейся гексагональной картиной конвекции и предприняты попытки измерить величину данного прогиба. (Рис.1.6)

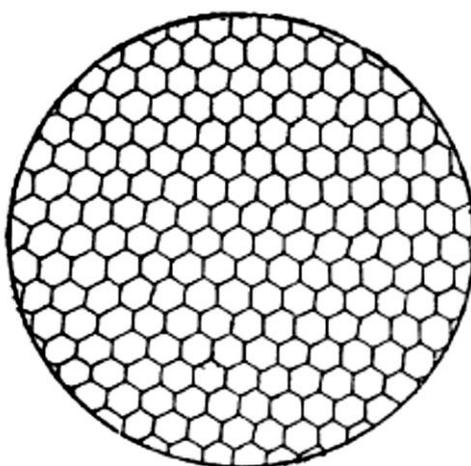


Рис. 1.6. Деформация поверхности слоя с установившейся гексагональной картиной конвекции.

По оценкам Бенара, в ячейках диаметром $D = 3$ мм углубление может достигать 1.7 мкм. В более поздних работах, а именно в работе Б.А. Безуглого, Н.А. Ивановой и А.Ю. Зуева [9] получены оценки стационарного профиля термокапиллярной деформации, индуцированной пучком лазера и сопоставлены с экспериментальными результатами. Для получения уравнения описывающего профиль свободной поверхности была определена математическая модель, которая выглядела следующим образом: на слой поглощающей жидкости h падает пучок лазера мощностью P и диаметром $2w$. (Рис.1.7).

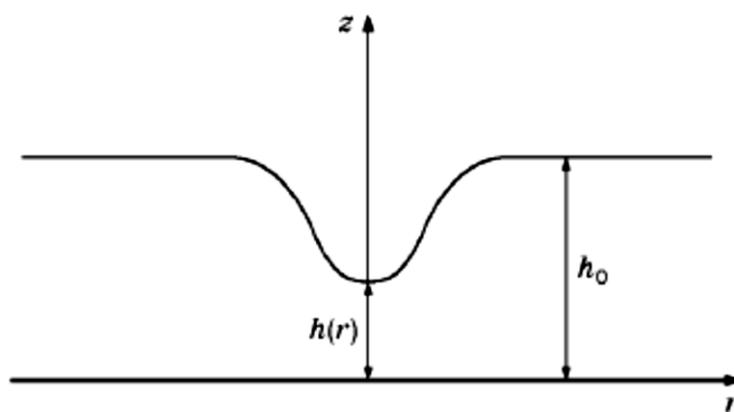


Рис.1.7. Геометрия задачи на оценку стационарного профиля термокапиллярной деформации.

Полученное уравнение (1.1) решается численно и позволяет описывать профиль поверхности жидкости.

$$\frac{d^3 h}{dr^3} \sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial r} \left(\frac{3}{2h} + \frac{d^3 h}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dh}{dr} \right) + \frac{\sigma}{r} \frac{d^2 h}{dr^2} - \frac{\sigma}{r^2} \frac{dh}{dr} = 0 \quad (1.1)$$

На рис.1.8 показаны численный (сплошная кривая) и экспериментальный (точки) профили ТК углубления, образованного в слое этилового спирта. Несмотря на ряд грубых упрощений, допущенных авторами, рассчитанный профиль удовлетворительно согласуется с экспериментальным, что говорит о соответствии реального физического процесса и теоретической модели.

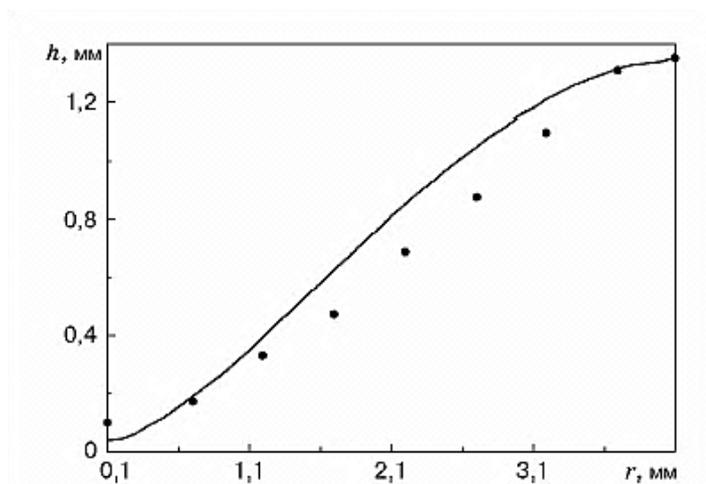


Рис.1.8. Теоретический (сплошная линия) и полученный экспериментальным путем (точки) профили термокапиллярного углубления.

Подобную работу по изучению профилей поверхности тонкого слоя деформированного термокапиллярной конвекцией проводили ученые из Тюменского Государственного Университета. В работе В.М. Флягина [10] профиль деформации поверхности жидкости определяется фотоабсорбционным методом. Его преимущества заключаются в простоте, бесконтактности и возможности измерения во всех точках поверхности. Эксперимент заключался в следующем: тонкий слой раствора помещался в прозрачную кювету. Толщина слоя контролировалась калибровочными проволочками. В дно кюветы монтировались 8 столбиков разной толщины, используемых для определения опорных точек зависимости толщины от интенсивности прошедшего излучения. Нагрев производился пучком $He - Ne$ лазером. Запись производилась с помощью видеокамеры. Определения толщины слоев производилась с помощью столбиков. Зная интенсивность излучения I в областях столбиков, а также толщину слоя h над ними, можно по закону Бугера определить точки профиля деформации.

Рис.1.9.

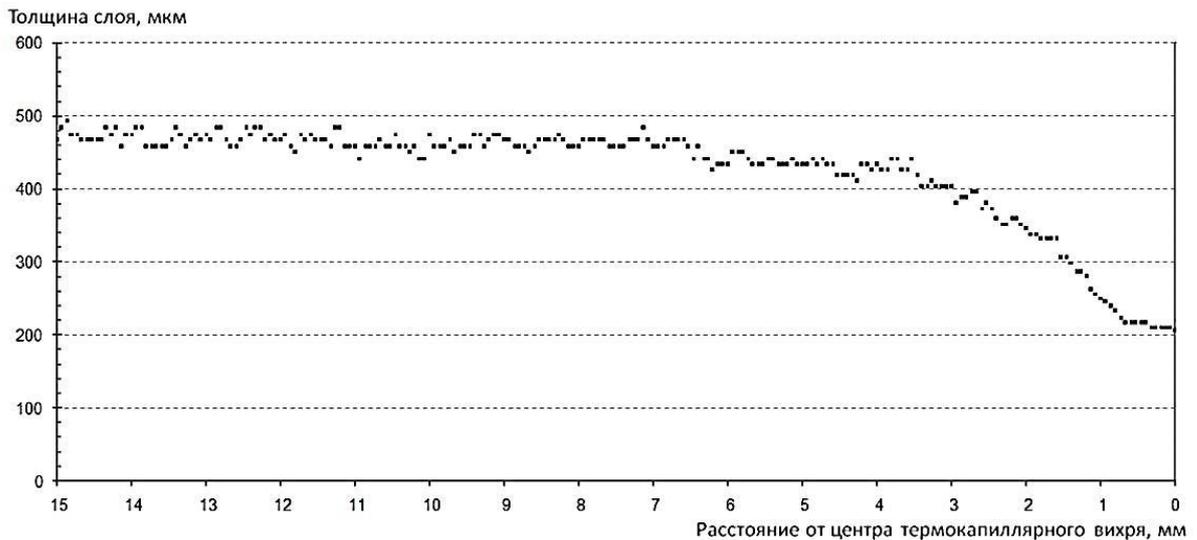


Рис.1.9. Профиль деформации поверхности жидкости.

Особый интерес представляет экспериментальные исследования процессов появления ТК конвекции от локального источника тепла при наличии на поверхности жидкости тонких пленок поверхностно-активного вещества [11]. Авторами в работе выявлено, что на поверхности воды, свободной от любых примесей, конвекция развивается не пороговым образом, независимо от мощности источника. Добавления ПАВ приводит к существенному уменьшению интенсивности конвективного движения и сужению области его существования. Также влияние адсорбированного ПАВ увеличивается по мере уменьшения площади поверхности. Основной трудностью является создание "нулевой" свободной поверхности жидкости, на которой можно создать поверхностное течение без влияния осложняющих факторов. Наличие такой поверхности является условием для искусственного создания поверхностного слоя примесей с контролируемыми свойствами. На рис.1.10 показаны температурные профили, соответствующие различным режимам теплопереноса: диффузионным и конвективным. На графиках видно, что при отсутствии движения, когда теплоперенос происходит только диффузионным механизмом, температурный профиль вдоль отрезка, проходящего через центр источника тепла, имеет вид высокого острого пика (рис. 1.10а). Подобные кривые получаются при нагреве твердой не теплопроводящей поверхности. Ситуация обозначенная на рис.1.9б,

соответствует случаю развитой конвекции Марангони на поверхности воды. Наличие достаточно интенсивного течения существенно уменьшает температуру в центре источника. Нанесение небольшого количества поверхностно-активного вещества на поверхность воды позволяет реализовать промежуточный случай (рис.1.10с). Дополнительные наблюдения за свободной поверхностью показывают, что в этом случае на участке поверхности, соответствующем плоской вершине пика, действует конвективный теплоперенос, а в остальной области движения - нет, и теплоперенос диффузионный. [24]

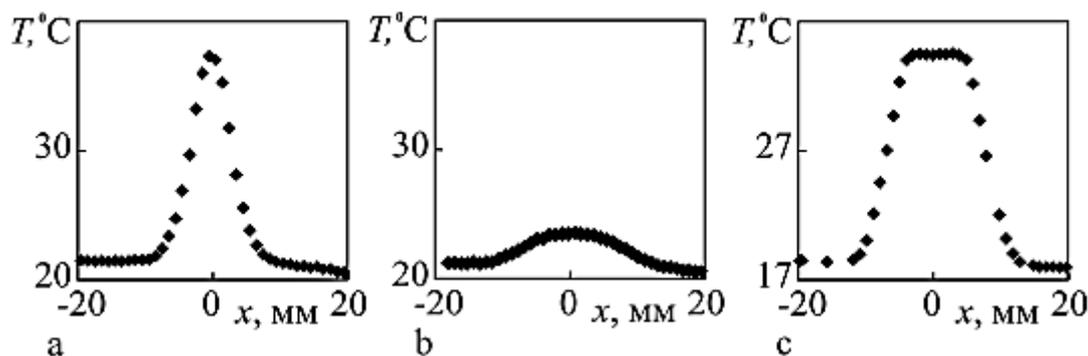


Рис.1.10. Вид температурных профилей в радиальном сечении теплового пятна: теплоперенос диффузионный (а), конвективный (б), смешанный (с).

1.2 Теоретические работы в области исследований термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости

В области термокапиллярной конвекции и деформации поверхностных слоев жидкости также проведено много теоретических работ, которые позволяют подробнее изучить данное физическое явление.

Работы по изучению термокапиллярной устойчивости были проведены В.И. Якушиным [12], где изучалась термокапиллярная устойчивость равновесия плоского слоя жидкости с внутренним тепловыделителем, ограниченного свободной и твердой поверхностями, в условиях невесомости. Изучения данного явления в условиях невесомости необходимо в силу того, что при определенных условиях поверхностные силы могут преобладать над силами Архимеда. Такие

условия возникают в невесомости. Последовавшие многочисленные технологические и специально подготовленные эксперименты в условиях орбитального полета быстро подтвердили эту гипотезу в отношении термокапиллярных эффектов, вызванных изменением температуры жидкости [13].

При поглощении внешнего излучения в слое жидкости возникает значительная неоднородность, которая является причиной возникновения термокапиллярной конвекции в жидкости. Главной особенностью постановки задачи устойчивости является использование условия теплоотдачи на свободной поверхности для установления стационарного температурного градиента. Т.к. в жидкости имеются внутренние источники тепла, то равновесный температурный градиент неоднороден и зависит от числа Био. Число Марангони не увеличивается с ростом теплоотдачи и только для $Bi > 3$ начинает линейно расти. Для малых значений числа Био, $Bi < 1$, исследуемая система неустойчива и для отрицательных чисел Марангони. Наличие второго типа неустойчивости объясняется тем, что в слое жидкости с внутренним источником тепла существуют области с положительным равновесным градиентом температуры и с отрицательным. В результате непрерывной флуктуаций на поверхности жидкости может оказаться "тепловое пятно" как с более высокой, так и с меньшей температурой, чем температура поверхности. Дальнейшее развитие начального возмущения будет определяться характером зависимости поверхностного натяжения жидкости от температуры.

Подобная работа автора, но уже с бинарной жидкой смесью, одна из компонент которой обуславливает внутреннее тепловыделение проведена немного позже [14]. До сих пор термокапиллярная устойчивость рассматривалась со стороны того, что источник тепла распределен равномерно по всей поверхности. Однако, наибольший интерес представляют более реальные случаи с возникновением локальных источников нагрева в бинарных смесях жидкости. Примером таких явления могут служить химические реакции, селективное поглощение и процессы, протекающие в радиоактивных смесях. Отличия в условиях возникновения ТК конвекции могут быть вызваны характером

распределения в жидкой среде температурных градиентов, возможностью диффузионного и конвективного перераспределения внутренних источников тепла.

Наличие компонент жидкой смеси, которые отвечают за тепловыделение приводит к появлению дополнительного слагаемого в уравнении теплопроводности. Численное исследование, проведенное авторами работы, показала зависимость критических условий возникновения конвекции от отношения коэффициентов диффузии тепловыделяющей компоненты и температуропроводности смеси, определяемого как число Льюиса. При значениях $Le > 0.5$ для изотермической твердой границы критическое число Марангони не возрастает с увеличением теплоотдачи, а вначале быстро убывает, и лишь затем для $Bi > 2$ начинает линейно расти. Структуры критических возмущений изображены на рис. 1.11. На них представлены изолинии тока, температуры и концентрации для волнового числа $k = 1.84$; фрагменты a, b, c соответствуют значению $Bi = 0.8$; $k = 1.84$ и $Ma = 826.1$. Для их определения были найдены собственные функции краевой задачи. Возмущения нормированы так, чтобы их наибольшее значения были равны единице. Как и следует из природы конвекция Марангони, центры конвективных ячеек находятся в верхних частях слоя, для больших Le они располагаются еще более близко к свободной границе.

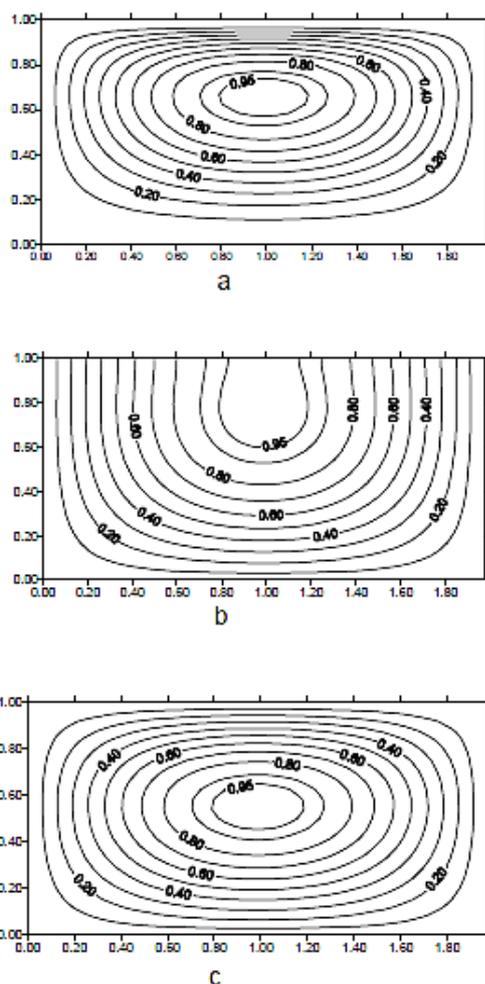


Рис.1.11. Структура критических возмущений для случая изотермической твердой границы для значений числа Льюиса $Le = 0.5$ (фрагменты *a*, *b* и *c* соответствуют значениям $Bi = 0.8$; $k = 1.84$ и $Ma = 826.1$)

Случай, когда одна из составляющих компонент бинарной смеси "выгорает" с выделением или поглощением тепла рассмотрен в работе Братчикова Е.С. В такой системе имеет место механическое равновесие с меняющимся со временем градиентом температуры и концентрации. Градиент температуры в слое бинарной смеси обусловлен "выгоранием" тепловыделяющих компонент исследуемых жидкостей[15].

В процессе расчетов, автор обнаруживает два случая поддержки возмущений: пирсоновский, когда более горячий элемент жидкости поднимается на поверхность, и, в связи с этим, уменьшается коэффициент поверхностного натяжения, что в свою очередь заставляет границу двигаться, увлекая за собой близлежащую жидкость; и диффузионный, когда к границе поднимается элемент

жидкости, который состоит из активной компоненты, которая на границе выделяет тепло, тем самым уменьшается коэффициент поверхностного натяжения.

Для более детального изучения процессов действия этих механизмов были рассмотрены два случая: слой с концентрационными источниками тепла и слой с однородными источниками тепла, которые имеют одинаковый профиль температуры. Из экспериментов стало ясно что, чем меньше диффузия тепловыделяющей компоненты, тем интенсивнее проявляется механизм, связанный с концентрационными источниками тепла. Это представлено рис. 1.12, на котором сравниваются кривые названных выше задач.

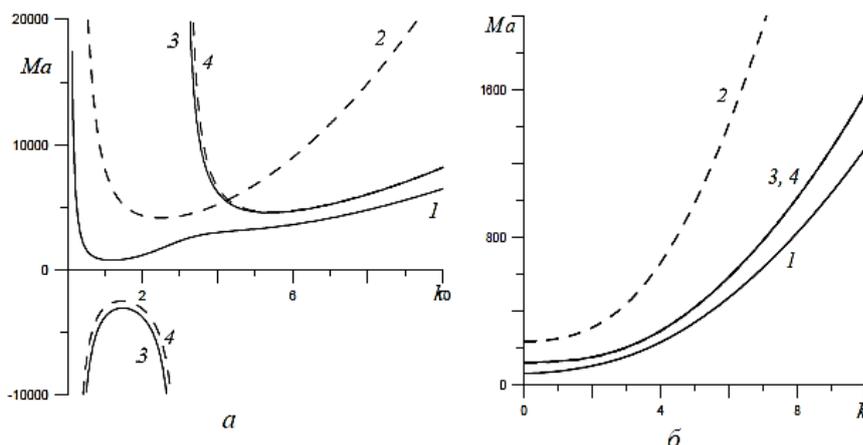


Рис. 1.12. Кривые для различных распределений в момент времени $t = 2$:
a – изотермической твердая граница; *б* – теплоизолированная твердая граница;
 1 – концентрационный источник тепла, $Le = 0.05$, 2 – внутренний источник
 тепла, 3 – концентрационный источник тепла, $Le = 8$, 4 – внутренний источник
 тепла

Т.к. пирсоновский механизм имеет довольно сложный температурный профиль, то при большой диффузии это приводит к возникновению областей с $Ma > 0$ (коротковолновая неустойчивость), и $Ma < 0$ (длинноволновая неустойчивость). Для долгой диффузии тепловыделяющей компоненты наиболее существенным оказывается второй механизм неустойчивости.

Проведенные исследования стали основой для другой работы данного автора (Братчиков Е.С.). Численный эксперимент показал, что в бинарной смеси с

выгорающей компонентой при некотором максимальном ей надкритичности возникают последовательно различные колебательные режимы конвекции [16].

Диаграмма режимов конвекции, которые были получены для области 2:1, показана на рис. 1.14. Сплошные линии изображают зависимость от числа Марангони максимального значения функции тока, штриховые линии – зависимость периода регулярных колебательных режимов. На оси чисел Марангони звездочками указаны значения критических чисел Марангони для монотонного возмущения с длиной волны $l = 1$ и для колебательных возмущений с $l = 2$ и $l = 4$, штрихпунктирные линии разделяют области с разными режимами конвекции. В случае Ma меньше некоторого критического значения движение в ячейке отсутствует, все начальные возмущения со временем затухают.

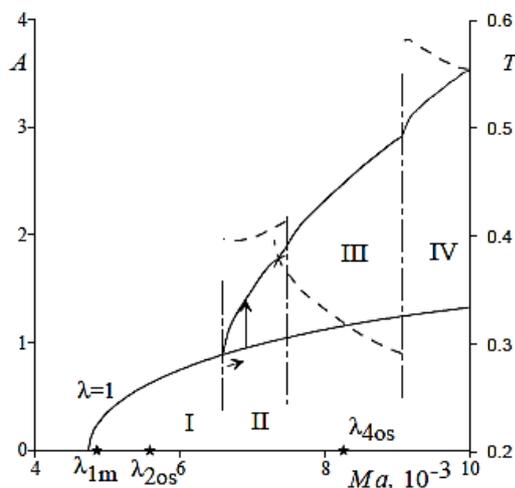


Рис. 1.14. Диаграмма режимов движения жидкости в ячейке 2:1 при $Le = 1$, $Bi = 1$, $N = 1$. Зависимость амплитуды (сплошные кривые) и зависимость периода колебаний от параметра Марангони (штриховые кривые).[17]

1.3 Выводы к главе 1

Из обзора научных публикаций видно, что в научном мире за последние тридцать лет существенно возрос интерес к жидким тонким пленкам и процессам, протекающим в них, не исключено, что такой рост обусловлен развитию

вычислительной техники, которая, в свою очередь, позволяет решать все более сложные задачи, в частности задачи по микрогидродинамике. Полярные жидкости необходимо выделить среди прочих, т.к. их электромеханические свойства вносят дополнительный вклад в эволюцию пленки, в частности, когда заходит речь о микромасштабах.

Как мы видим из различных экспериментальных и теоретических работ, эффект Марангони определяет движение в тонких жидких пленках. Этот эффект возникает и из-за градиента температур и из-за градиента концентрации. По все вероятности, из-за сложности трактовки и исследования пока нет работ, описывающих эффект Марангони в тонких пленках жидкости, где учитывались бы все факторы, влияющие на этот эффект, а именно: испарение, градиент поверхностного натяжения и расклинивающее давление, связанное с присутствием у полярных жидкостей двойного электрического слоя. Однако это не является причиной для приостановления исследований в этой области, т.к. эффект Марангони определяет движение жидкой пленки в различных технологических процессах, а значит, понимание принципа этого физического явления крайне важна.

1. Приведен обзор литературы, посвященной исследованиям в области тонких пленок, а именно термокапиллярной конвекции.
2. Описаны основные эксперименты, проводимые для более детального исследования термокапиллярного эффекта.
3. Рассмотрены теоретические исследования термокапиллярной деформации тонкого слоя жидкости.

ГЛАВА 2. ФОТОАБСОРБЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ТЕРМОКАПИЛЯРНЫХ УГЛУБЛЕНИЙ

2.1 Фотоабсорбция

Как известно, прохождение света через вещество ведет к появлению колебаний электронов и сопровождается потерей энергии электромагнитной волны, затраченной на возбуждение колебаний электронов. Когда на поверхность вещества падает параллельный пучок с интенсивностью I , то все выше описанные процессы должны вести к ослабеванию интенсивности по мере проникновения вглубь вещества. Опыты доказали, что уменьшение интенсивности происходит по закону (2.1):

$$I = I_0 e^{-kh} \quad (2.1)$$

где I_0 - интенсивность монохроматического пучка света, попадающей на вещество, h - толщина слоя, k - коэффициент поглощения, зависящий от длины волны падающего света и от природы вещества.

Общая закономерность данной формулы, которая вводит понятие коэффициента поглощения и показывает, что интенсивность света уменьшается в геометрической прогрессии, когда толщина слоя нарастает в арифметической, была установлена и обоснована Бугером. Она называется законом Бугера. Физический смысл этого закона состоит в том, что показатель поглощения не зависит от интенсивности света, и, следовательно, от толщины поглощающего слоя [21].

Для определения профиля ТК углубления при локальном нагревании слоя жидкости пучком лазера, использовался фотоабсорбционный метод, основанный на изменении интенсивности прошедшего излучения. Основное преимущество заключается в его бесконтактности с поверхностью вещества. Также он позволяет

определять толщину слоя во всех точках поверхности вещества одновременно, что использовалось для динамических измерений.

Суть данного метода заключается в вычислении толщины деформированного слоя жидкости при помощи закона Бугера. Удобно измерять интенсивность падающего I_0 и прошедшего I_1 света, соответственно сквозь толщины h_0 и h_1 , где h_0 – фиксированная толщина недеформированного слоя (Рис.2.1).

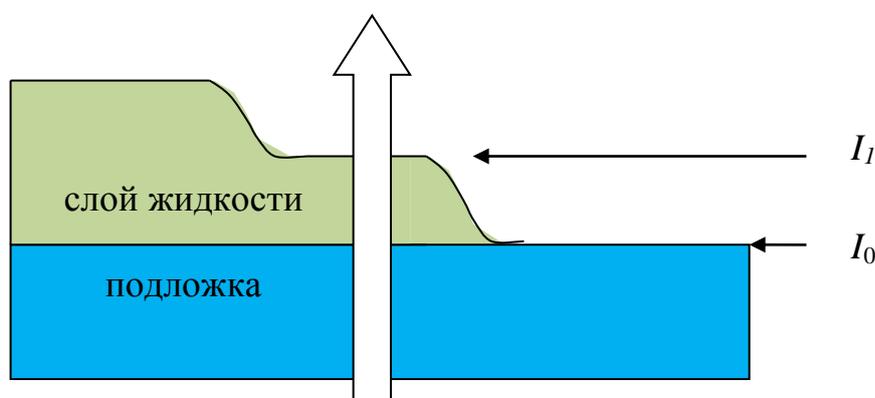


Рис. 2.1. Вычисление толщины деформированного слоя жидкости при помощи закона Бугера.

Вычисляя коэффициент поглощения из уравнения (2.2):

$$\frac{I_0}{I_1} = \exp[k(h_1 - h_0)] \quad (2.2)$$

можно найти точное значение k , без поправок на отражение (т.к. часть света отражается на границе исследуемого вещества). После логарифмирования уравнения (2.2) получаем следующую формулу (2.3), откуда без труда можно выразить необходимую нам толщину слоя.

$$\ln \frac{I_0}{I_1} = k(h_1 - h_0) \quad (2.3)$$

2.1.2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.1. Источник света ИС, в качестве которого используется полупроводниковый лазер с длиной волны 628 нм и мощностью 18.3 мВт, помещался в фокальной плоскости собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 25$ см. Лазерный пучок, проходящий сквозь линзу, падал на кювету с исследуемым веществом. Снизу кювета подсвечивалась светодиодами, которые накрывались матовым стеклом для равномерности подсветки. Свет нижней подсветки попадал в камеру, проходя через синий светофильтр СС5 (максимум пропускания 420 нм) и интерференционный светофильтр от *He-Ne* лазера (максимум отражения 632 нм), которые были предназначены для исключения засветки видеозаписи лазерным излучением. Запись с камеры Ваumer производилась на ПК с частотой 1 кадр/сек при разрешении 656x490 пикселей. Камера позволяет отключать режим автоматической подстройки яркости видео, и вручную выставлять время экспозиции. Предметный столик для кюветы был оснащен регулировочными винтами и отвесом, которые позволяли выставлять горизонтальное положение чашки Петри. Вся установка накрывалась непроницаемой темной занавеской, дабы исключить всю лишнюю засветку.

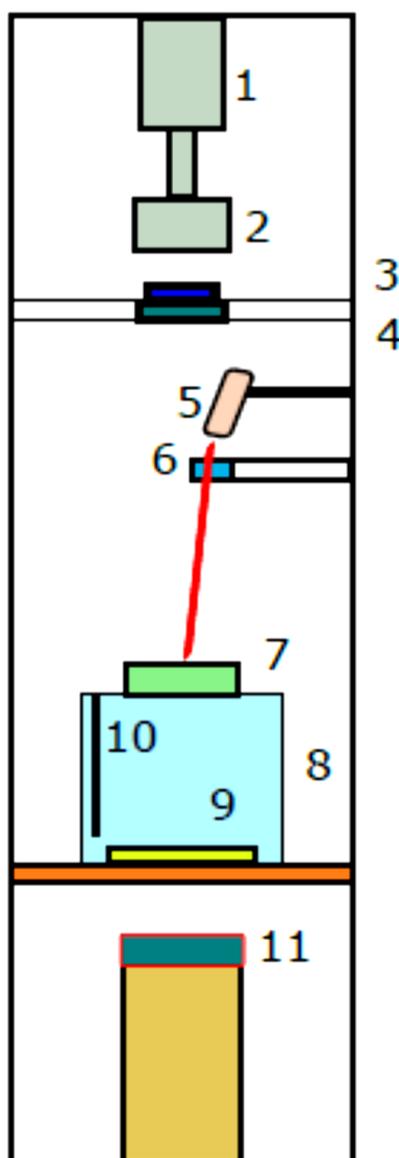


Рис.2.2. Экспериментальная установка

1 – цифровая камера Ваumer; 2 – объектив; 3 – синий светофильтр (CC5); 4 – интерференционный светофильтр; 5 – лазер ($\lambda=628$ нм, $W=18.3$ мВт); 6 – собирающая линза с фокусным расстоянием $F=25$ см, 7 – кювета с исследуемой жидкостью; 8 – предметный столик; 9 – светодиоды; 10 – отвес; 11 – подсветка.

Кювета была изготовлена из полистироловых чашек Петри диаметром 60 мм на дно которой монтировалось небольшое кольцо изготовленное из полиметилметакрилата высотой 2 мм, внешним диаметром 6 мм и внутренним диаметром 3 мм для обеспечения значения начальной интенсивности I_0 (Рис. 2.2). Кольцо является подобием «сухого колодца», в который не попадает жидкость из остальной кюветы и свет проходит сквозь кольцо не ослабляясь. В качестве

рабочей жидкости был выбран раствор красителя бриллиантовый зеленый в н-бутаноле с массовой концентрацией 1000 мг/литр.

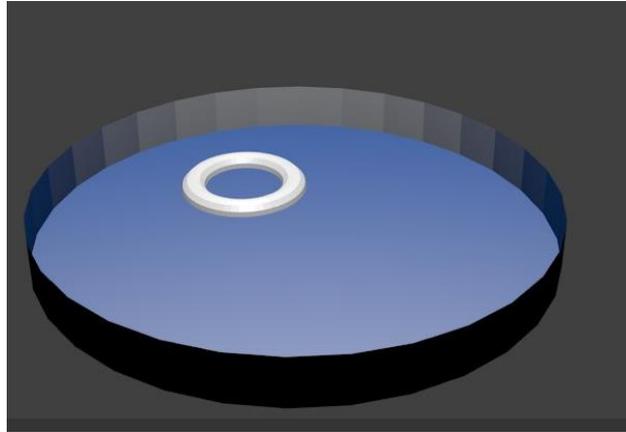


Рис. 2.3. Устройство кюветы.

В кювете расположено кольцо, выполняющее роль «сухого колодца»

В таб.2.1. представлены основные физические свойства одноатомного спирта.

Н-бутанол (C ₄ H ₉ OH)	Молярная масса, г/моль	Плотность, г/см ³	Динамическая вязкость, мПа*с	Поверхностное натяжение, Дин/см	Класс растворителя
	74.12	0.81	33.79	24.57	Полярный

Таб.2.1. Физические свойства н-бутанола.

2.2 Вычисление толщины деформированного слоя жидкости

Рассмотрим тонкий слой жидкости (н-бутанол) на твердой подложке с постоянно действующим на него источником тепла. Под тонким слоем мы будем понимать слой, при котором межмолекулярные силы преобладают над гравитационными, т.е. толщиной вплоть до нескольких сотен микрометров. Здесь можем задать группу связанных параметров, которые можем взять с измеряемого кадра: h_l , $h_w = 0$, I_l , I_m , I_w , где h_l – толщина исследуемого недеформированного слоя жидкости, h_w – слой нулевой толщины (сухое кольцо), I_l – интенсивность

падающего света после прохождения недеформированного слоя жидкости, I_m – интенсивность падающего света до прохождения деформированного слоя жидкости, I_w – интенсивность падающего света после прохождения нулевого слоя жидкости, а также группу параметров с опорного кадра I_{l0} , I_{m0} , I_{w0} , где I_{l0} – интенсивность падающего света до прохождения недеформированного слоя жидкости, I_{m0} – интенсивность падающего света после прохождения деформированного слоя жидкости, I_{w0} – интенсивность падающего света до прохождения нулевого слоя жидкости. (Рис.2.3)

Задача заключается в нахождении толщины деформированного слоя h_m и коэффициента поглощения жидкости k .

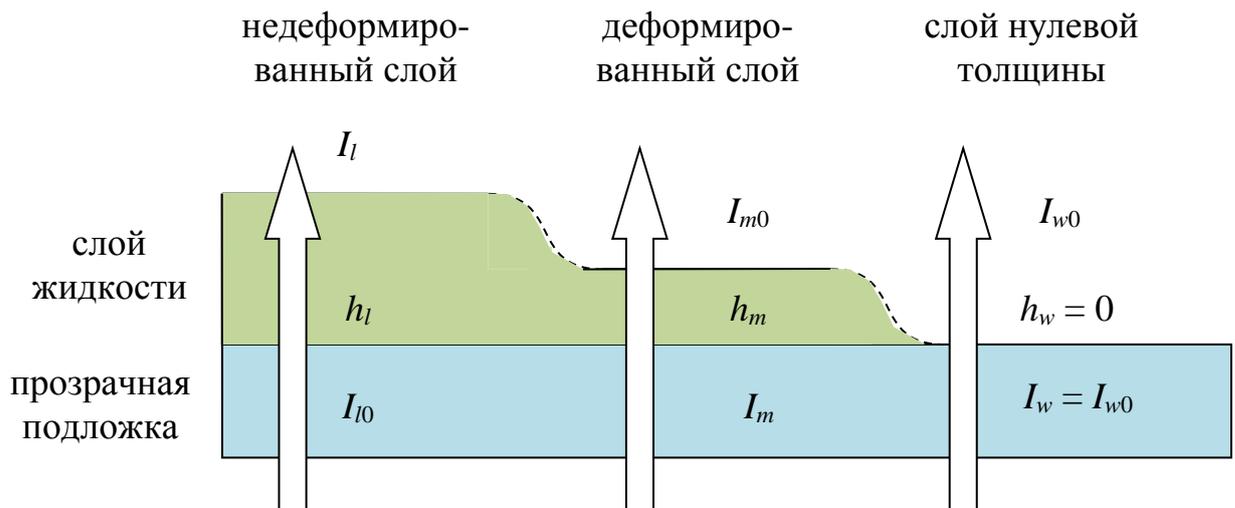


Рис.2.4. Геометрия и определения параметров поставленной задачи.

В соответствии с этим предположением схема прохождения луча света через деформированный слой изменится:

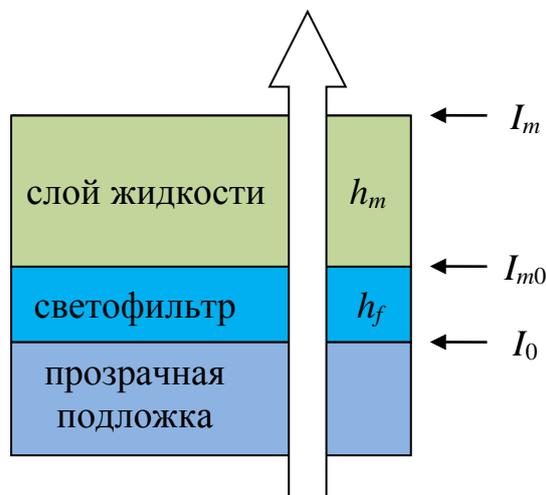


Рис.2.5. Однородная засветка проходящая через светофильтр с неоднородной толщиной.

Интенсивности света до светофильтра (I_0), после светофильтра (I_{m0}), и после слоя жидкости (I_m) связаны через соответствующие толщины:

$$I_{m0} = I_0 e^{-kh_f} \quad (2.4)$$

$$I_m = I_{m0} e^{-kh_m} = I_0 e^{-k(h_m+h_f)} \quad (2.5)$$

Разобьем экспоненту на произведение:

$$I_m = I_{m0} e^{-kh_m} = I_0 e^{-kh_f} e^{-kh_m} = I_0 e^{-kh_m} (e^{-kh_f}) = I_0 e^{-kh_m} k_m \quad (2.6)$$

Коэффициент $k_m = e^{-kh_f}$, вводящий поправку на интенсивность света после светофильтра, зависит только от толщины h_f светофильтра в данной точке. Для других рассматриваемых лучей введем такие же коэффициенты. Тогда интенсивности света до слоя в каждом из лучей будут связаны с изначальной засветкой соотношениями:

$$I_{l0} = I_0 k_l \quad (2.7)$$

$$I_{m0} = I_0 k_m \quad (2.8)$$

$$I_{w0} = I_0 k_w \quad (2.9)$$

Выберем интенсивность света в луче, проходящем через слой нулевой толщины, за опорную, и выразим через нее I_0 :

$$I_0 = \frac{I_{w0}}{k_w} \quad (2.10)$$

Тогда:

$$I_{m0} = \frac{I_{w0} k_m}{k_w} \quad (2.11)$$

$$I_{l0} = \frac{I_{w0} k_l}{k_w} \quad (2.12)$$

Таким образом, поправочный коэффициент $\frac{k_m}{k_w}$ равен отношению соответствующих интенсивностей:

$$\frac{k_m}{k_w} = \frac{I_{m0}}{I_{w0}} \quad (2.13)$$

и по аналогии:

$$\frac{k_l}{k_w} = \frac{I_{l0}}{I_{w0}} \quad (2.14)$$

Поправочные коэффициенты находятся из распределения интенсивностей опорного кадра.

Найдем коэффициент поглощения жидкости:

$$I_l = I_{l0} e^{-kh_l} = I_0 k_l e^{-kh_l} = I_{w0} \frac{k_l}{k_w} e^{-kh_l} \quad (2.15)$$

$$\frac{k_w}{k_l} \cdot \frac{I_l}{I_{w0}} = e^{-kh_l} \quad (2.16)$$

$$\ln \left(\frac{k_w}{k_l} \cdot \frac{I_l}{I_{w0}} \right) = -kh_l \quad (2.17)$$

$$\frac{\ln \left(\frac{k_w}{k_l} \cdot \frac{I_l}{I_{w0}} \right)}{h_l} = -k \quad (2.18)$$

Так как $I_{w0} = I_w$, то:

$$\frac{\ln \left(\frac{k_l}{k_w} \cdot \frac{I_w}{I_l} \right)}{h_l} = -k \quad (2.19)$$

Коэффициент поглощения k в этой формуле зависит только от параметров измеряемого кадра, и поправочного коэффициента.

Аналогичным образом находим неизвестную толщину деформированного слоя по известному коэффициенту поглощения жидкости:

$$I_m = I_{m0} e^{-kh_m} = I_0 e^{-kh_m} k_m = I_{w0} e^{-kh_m} \frac{k_m}{k_w} \quad (2.20)$$

$$\frac{k_w}{k_m} \cdot \frac{I_m}{I_{w0}} = e^{-kh_m} \quad (2.21)$$

$$\ln \left(\frac{k_w}{k_m} \cdot \frac{I_m}{I_{w0}} \right) = -kh_m \quad (2.22)$$

$$\ln\left(\frac{k_w}{k_m} \cdot \frac{I_{w0}}{I_m}\right) = kh_m \quad (2.23)$$

$$\frac{\ln\left(\frac{k_m I_{w0}}{k_w I_m}\right)}{k} = h_m \quad (2.24)$$

и, заменяя I_{w0} на I_w , получим:

$$\frac{\ln\left(\frac{k_m I_w}{k_w I_m}\right)}{k} = h_m \quad (2.25)$$

2.3 Методика эксперимента

Эксперимент проводился следующим образом. В кювету с вмонтированным кольцом наливалась рабочая жидкость. Толщину слоя контролировали методом калиброванных проволочек, которые давали сравнительно точное значение толщины слоя жидкости. После чего кювета накрывалась крышкой для предотвращения испарения и устанавливалась на матовое стекло, подсвеченное снизу светодиодами. Чашка Петри располагалась так, чтобы пучок лазера располагалась на достаточном расстоянии от кольца и края, где на толщину слоя вещества влияет мениск.

В области попадания включенного лазера на жидкость происходит поглощение излучения и, как следствие, возникает градиент температуры, который, в свою очередь, инициирует термокапиллярную конвекцию. За счет ТК деформации слоя локально меняется его толщина и образуется светлое пятно и камера фиксирует светлое пятно на кадре. (Рис.2.6)

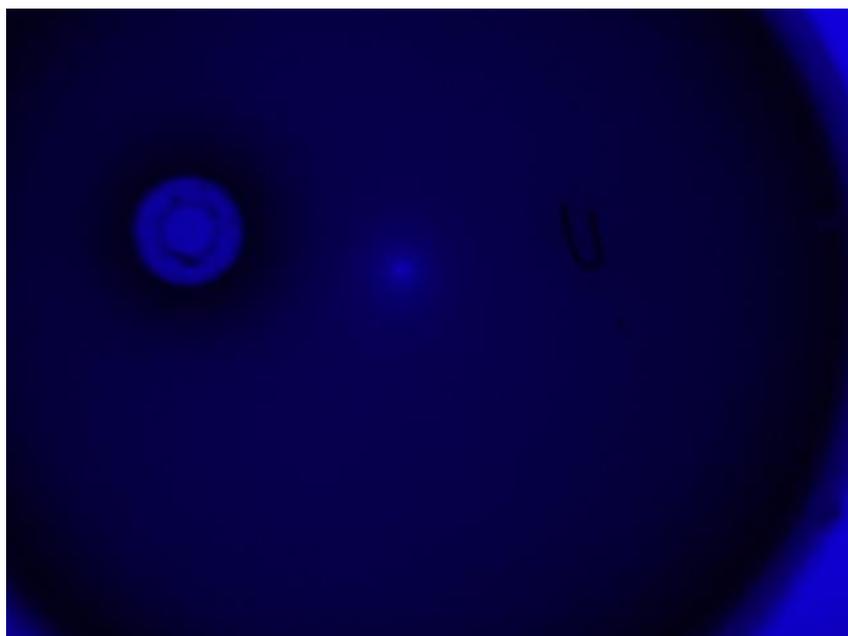


Рис.2.6. Кадр полученный в ходе эксперимента.
Толщина слоя =500 мкм, $t=20$ сек.

На рис.2.6 отчетливо видны основные части кюветы: так называемый «сухой колодец», калибровочная проволочка и само термокапиллярное углубление. Серия экспериментов состояла из отслеживания динамики формирования термокапиллярного углубления на разных толщинах рабочей жидкости и записи их на видео, для последующей обработки.

2.4 Метод восстановления профиля ТК деформации поверхности жидкости

Полученные и записанные данные покадрово обрабатывались в программе, которая рассчитывала толщину слоя в одном из сечений кадра. Покадровая обработка позволяет прописывать динамику ТК деформации жидкости с самого начала формирования углубления до его выхода на стационар.

Данные экспортировались в Excel, после чего строились графики профилей, соответствующих термокапиллярным углублениям деформированной жидкости. Экспортированные данные масштабировались с помощью данных полученных при съемке калибровочной линейки (Рис. 2.7). Полученные значения масштаба составляет примерно 1:12,5 мм/пиксель.

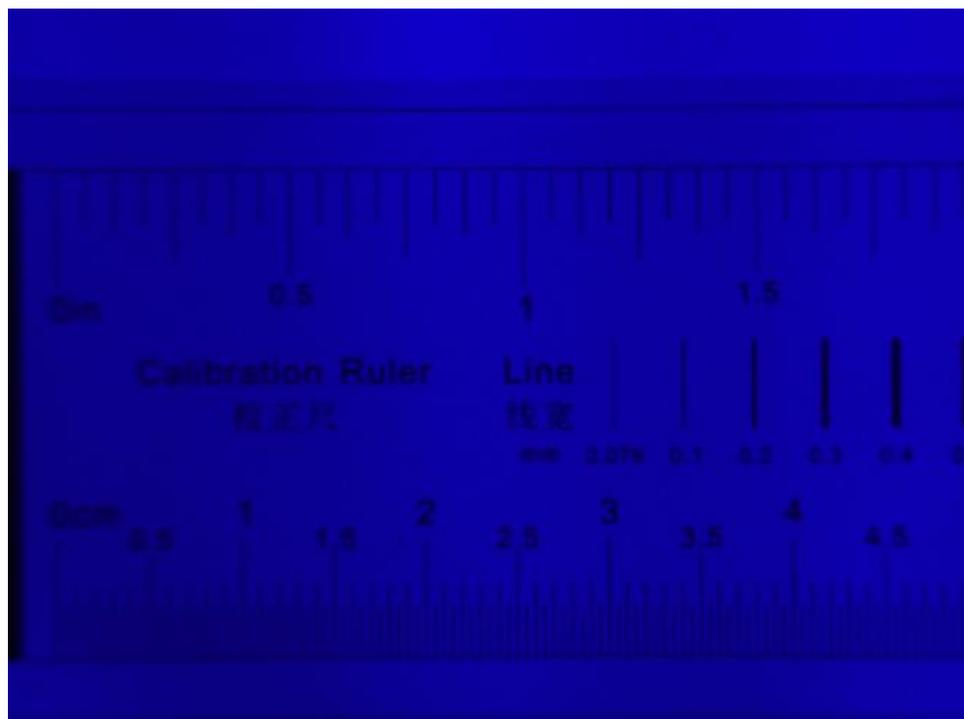


Рис. 2.7. Калибровочная линейка.

Масштабирование выполнялось для более наглядного представления картины термокапиллярного углубления и для определения линейных размеров ТК углубления. На графиках 2.8 и 2.9 представлен термокапиллярный профиль, полученный на 20 секунде воздействия лазера на жидкость с толщиной 500 мкм.

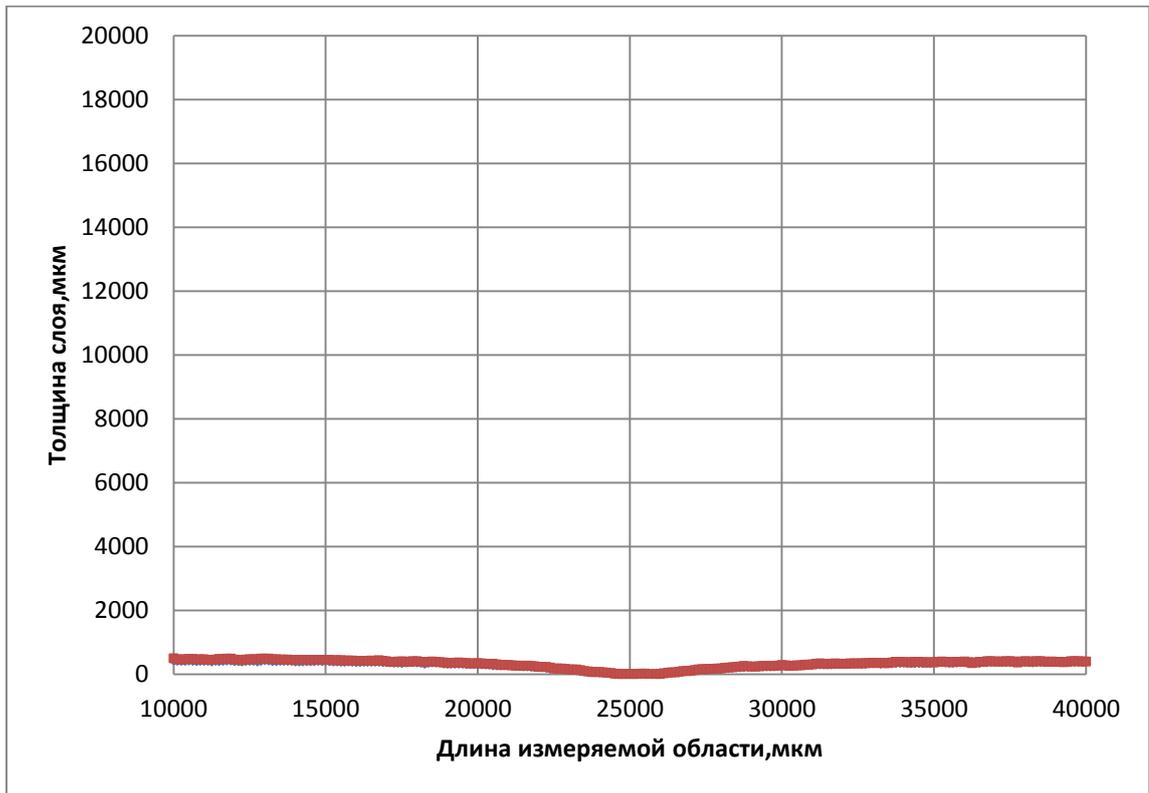


Рис.2.8. Профиль термокапиллярного углубления н-бутанола с учетом масштаба, полученный на 20 секунде воздействия лазера.

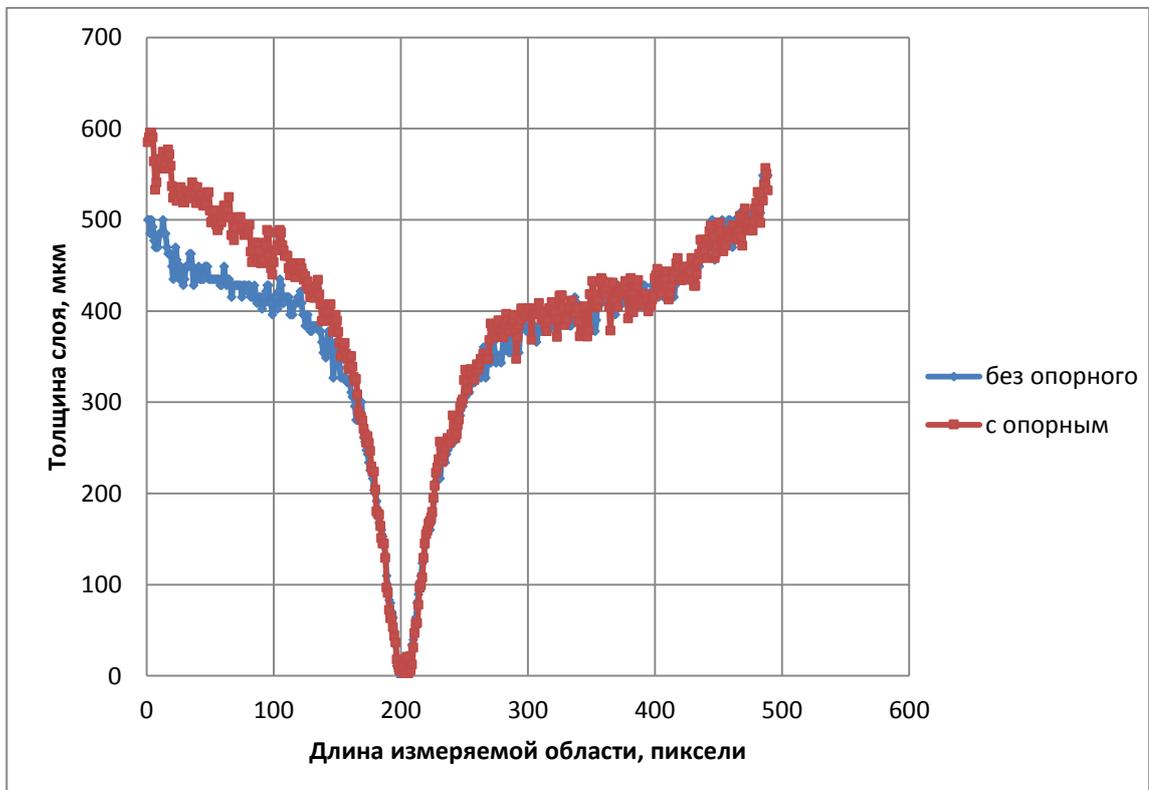


Рис.2.9. Профиль термокапиллярного углубления н-бутанола без учета масштаба, полученный на 20 секунде воздействия лазера.

2.5 Методика работы с программным комплексом PhotoAbsorbtion Snapshot Calculator

Процесс обработки полученных кадров начинался с их выбора из рабочей папки, в которой они сохранялись. Каждая серия кадров должна содержать один опорный кадр, сделанный без слоя жидкости (пустая чашка Петри). В приложении 2 на рисунке 2.10 представлен интерфейс программы, где справа расположены директория фотографий, которые необходимо обработать, а в самой окне программы установлен калибровочный кадр. Под цифрой 1 указаны основные кнопки, с помощью которых устанавливались точки на кадре, с которых происходило считывание значений интенсивности. Также в приложении 2 на рисунке 2.11 представлен вид интерфейса с уже подгруженной фотографией с ТК углублением. В окне «Толщина слоя» устанавливалось необходимое значение толщины недеформированного слоя жидкости, после чего начиналась процедура обработки. На кадр с имеющимся на нем ТК углублением устанавливалось положение реперных точек в которых будут определяться значения интенсивностей I_0, I_w и I_l после выставления реперных точек загружали опорный кадр и кнопкой «Выбрать текущий кадр в качестве опорного» формировали массив интенсивностей подсветки в точках, которые впоследствии использовались для расчета. Опорный кадр вводился для компенсации систематической погрешности, связанной с неоднородной засветкой. Для демонстрации целесообразности использования опорного кадра для компенсации неоднородности засветки был обработан кадр с заданным радиальным градиентом интенсивности с использованием трех различных опорных кадров (Рис.2.12). Толщина псевдослоя равнялась 1000 мкм. Два опорных представляли собой равномерную засветку (темный и светлый кадр), а третий – заливку с линейным градиентом интенсивности для моделирования неоднородной засветки.

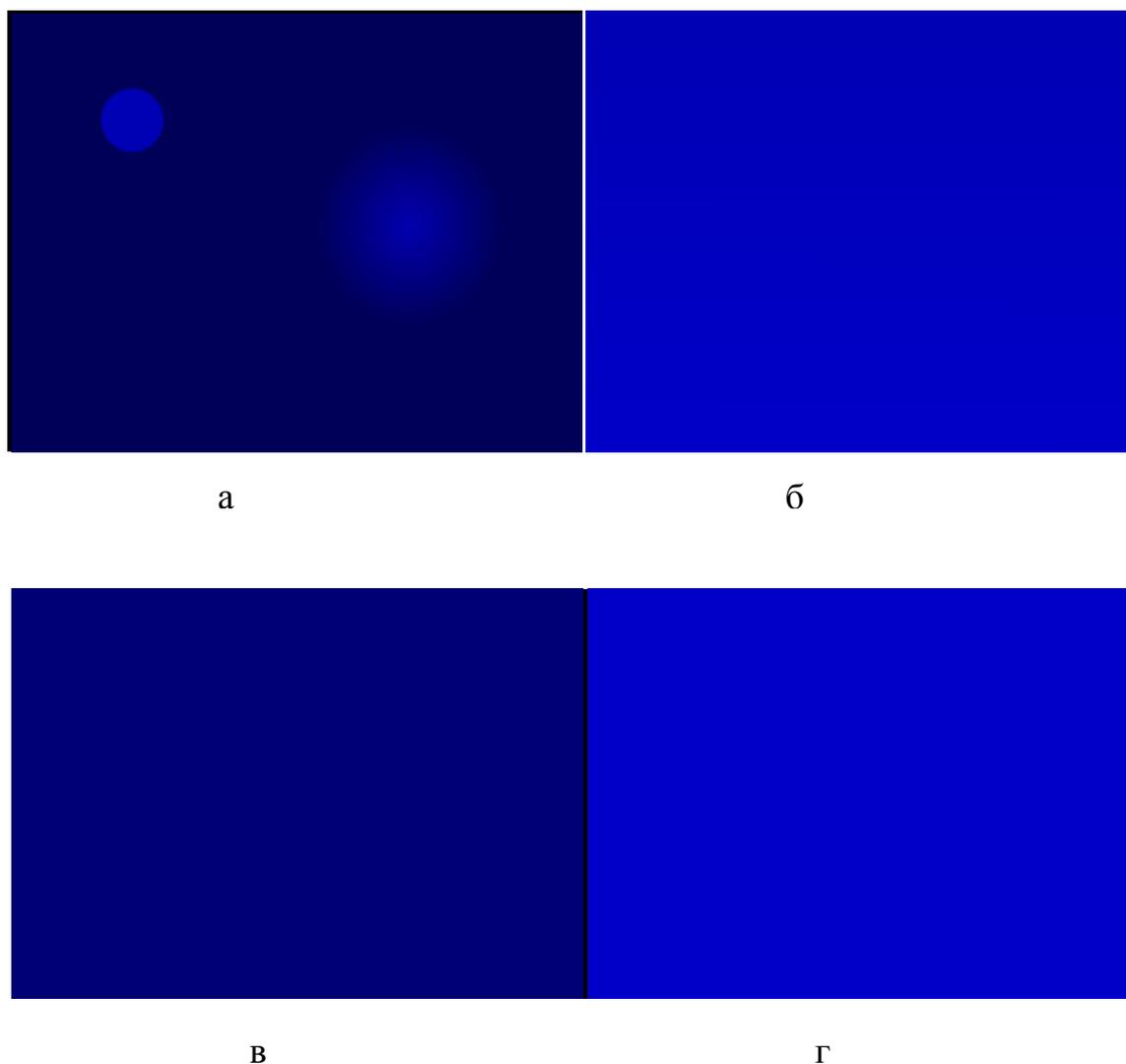


Рис.2.12. Демонстративные опорные кадры и псевдослой.
а – псевдо слой (100 мкм), б – градиентный опорный кадр, в – темный опорный кадр, г – светлый опорный кадр.

Результаты расчета представлены на рисунке 2.13. При неоднородной засветке в точках с одинаковой интенсивностью толщина слоя может значительно отличаться, что скажется на восстановленном профиле. Этот эффект демонстрирует зависимость, полученная с градиентным опорным кадром: первоначально горизонтальная периферийная поверхность восстановлена наклонной, а область градиента искажена. Кроме того, из рисунка видно, что профили, полученные при опорных кадрах с равномерной засветкой, совпадают, а, следовательно, небольшие изменения яркости опорного кадра не будут вносить значительных искажений в расчеты.

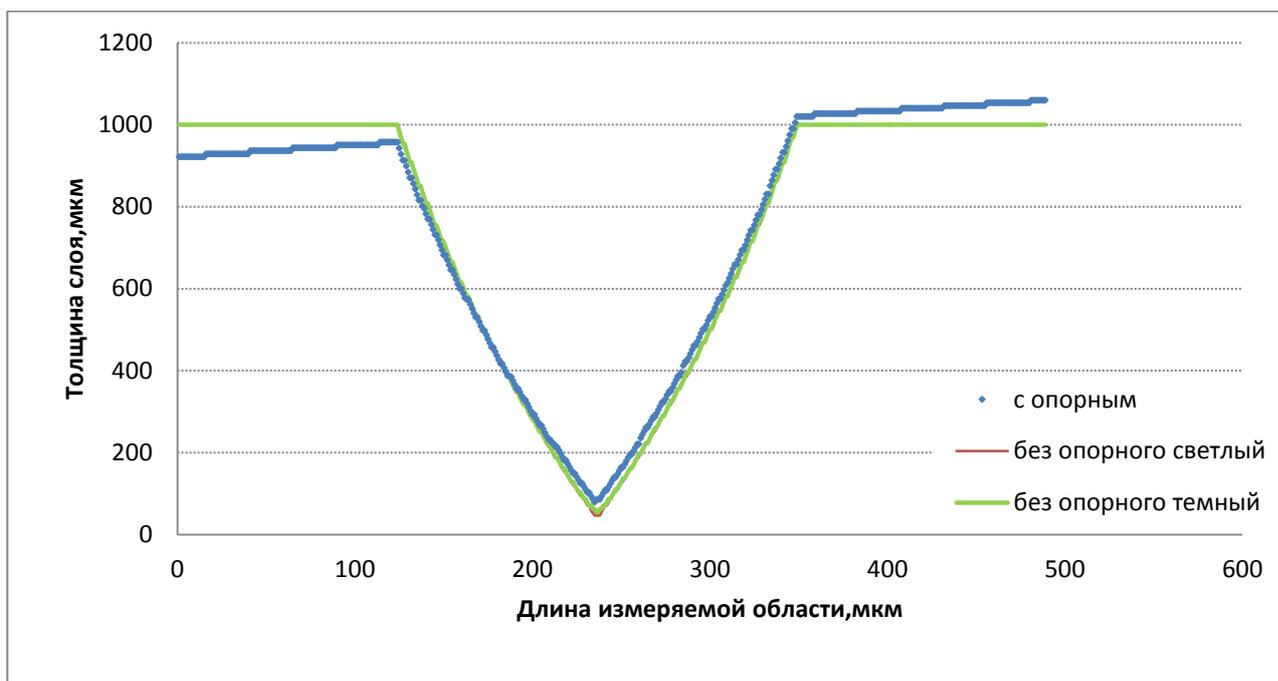


Рис. 2.13. Зависимость, полученная с градиентным опорным кадром

Рассчитанные данные толщин выводились в окне «Результаты расчета» (Рис.2.13), после чего экспортировались в программный пакет Microsoft Excel для дальнейшей обработки и построения графиков.

Программа для обработки кадров была написана в среде Lazarus на языке Pascal. В приложении 1 представлен листинг модуля с классом TProfileCalculate, используемым для расчета толщины деформированного слоя жидкости.

ГЛАВА 3 ТЕРМОКАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ЖИДКОСТИ

3.1 Измерение профиля пластины с заданной деформацией

Достоверность определения профиля поверхности была проверена с помощью эталона, изготовленного горячим прессованием из синего оргстекла (Рис.3.9).



Рис.3.9. Эталон, изготовленный из оргстекла методом горячего прессования.

Внешний вид эталона, и кадр камеры с размещенным в установке эталоном показаны на рисунок 3.10.

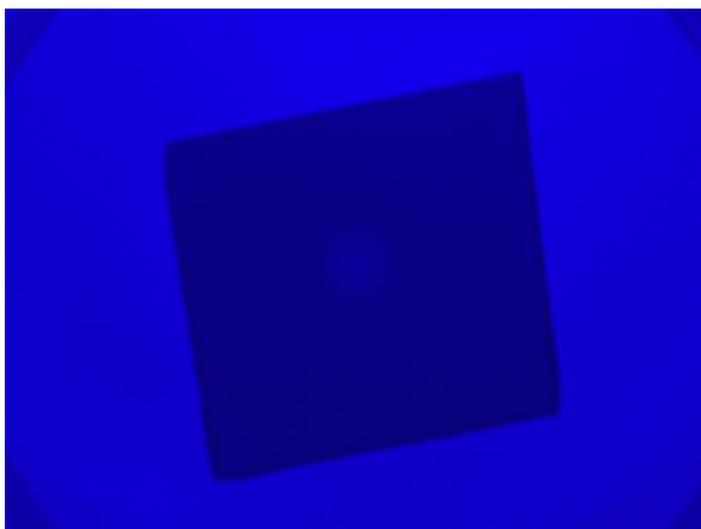


Рис.3.10. Образец деформированного оргстекла.

Углубление получено с помощью нагрева оргстекла с последующим вдавливанием в него стального шарика. Образец также помещался в экспериментальную установку, где производилась его съемка для последующей обработки кадра. Результаты сравнивались с вычисленным значением углубления. Зная толщину пластинки с размещенным в углублении шариком, и диаметр шарика мы можем найти глубину деформации, рисунок 3.11:



Рис. 3.11. Профиль деформации оргстекла в реальном масштабе.

После обработки полученной фотографии в программе PhotoAbsorbtion Snapshot Calculator мы получили следующий профиль деформации оргстекла. Рис.3.12. Для достоверности было сделано два кадра.

Толщина оргстекла в центре деформации, определенная по приведенной схеме, составила 2.3 мм, в то время как программный расчет дал значение около 2 мм. Таким образом, различие толщин составило около 15%, а шарик неплохо вписывается в полученный профиль, рис. 3.12.

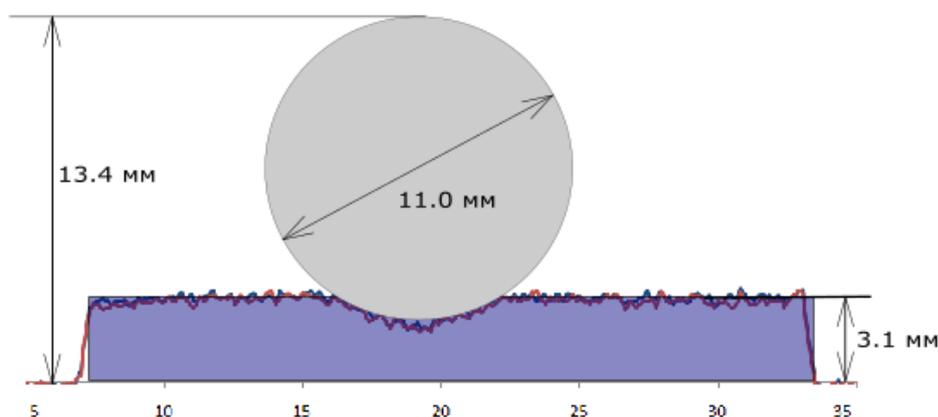


Рис.3.12. Схема эталона выполненного из оргстекла.

3.2 Построение профилей термокапиллярной деформации

Исследования профилей термокапиллярной деформации проводилось в слоях раствора бриллиантового зеленого в н-бутаноле при различных толщинах. Самая минимальная толщина была выбрана 300 мкм. Добиться наименьшей толщины не удалось по нескольким причинам: плохое смачивание полистироловой чашки Петри рабочей жидкостью и, как следствие, отекание н-бутанола к краям кюветы с образованием менисков, непрерывное испарение растворителя из кюветы приводило к уменьшению его объема и изменению концентрации красителя, что сказывалось на поглощении раствором проходящего лазерного излучения. Максимальная толщина слоя жидкости в эксперименте была 900 мкм. Это связано с тем, что с увеличением толщины слоя жидкости,

фиксировать ТК углубления становится труднее из-за его малой глубины за счет непрерывного конвективного распределения тепла в объеме всей жидкости. Деформация слоя жидкости присутствует, но разница высот деформированного и недеформированного слоя может составлять всего лишь несколько микрон. В тонком же слое все происходит более наглядно и быстро. Развитие ТК углубление начинается с образования холмика из-за теплового расширения жидкости, инициированного локальным нагревом лазера (Рис.3.1). Далее происходит растекание жидкости из нагреваемой области за счет градиента температуры, который достигает такого значения, что появляется центробежное ТК течение жидкости. В него вовлекаются слои, расположенные ниже и в центре образуется термокапиллярное углубление, оголяя более нагретые слои жидкости.

Таким образом, был выбран диапазон исследуемых толщин от 300 мкм до 900 мкм.

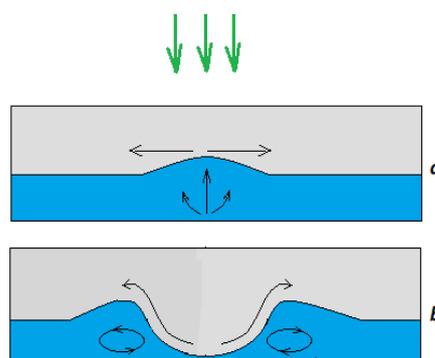


Рис. 3.1. Стадии развития термокапиллярной конвекции

Использование достаточно мощного индуцирующего лазера ($P = 18.3$ мВт) приводило к термокапиллярному разрыву слоя при толщинах 300, 400 и 500 мкм. На рис. 3.2 показан результат восстановления профиля для слоя 300 мкм, и видно, что толщина слоя в центре углубления достигает околонулевых значений. Отрицательные значения связаны, во-первых, со статистической погрешностью из-за шума фотоприемника камеры, а во-вторых, с остаточным излучением лазера, прошедшим через фильтры перед камерой. Поэтому, при дальнейших

обсуждениях, мы будем концентрировать внимание на слое 700 мкм, в котором развитие деформации происходит плавно.

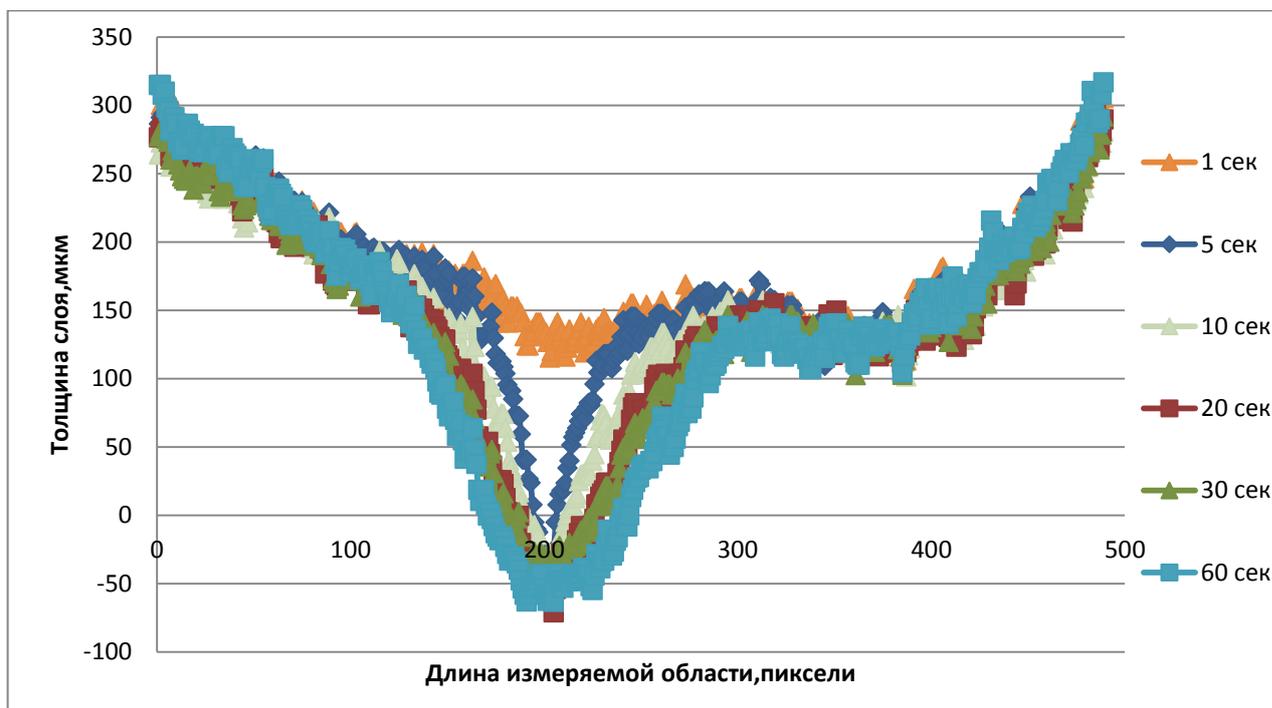


Рис. 3.2. Профили термокапиллярного углубления в слое толщиной 300 мкм.

Рис.3.3 иллюстрирует динамику развития термокапиллярного углубления в слое толщиной 700 мкм. Небольшие изгибы по краям графиков говорят о наличие мениска у бортиков кюветы, которые имеют большую толщину, нежели слой около калибровочных проволочек. Мениск довольно сильно искривляет поверхность жидкости в данной чашке Петри, что свидетельствует о необходимости использования кюветы большего диаметра, дабы свести к минимуму влияние мениска на толщину остального слоя жидкости.

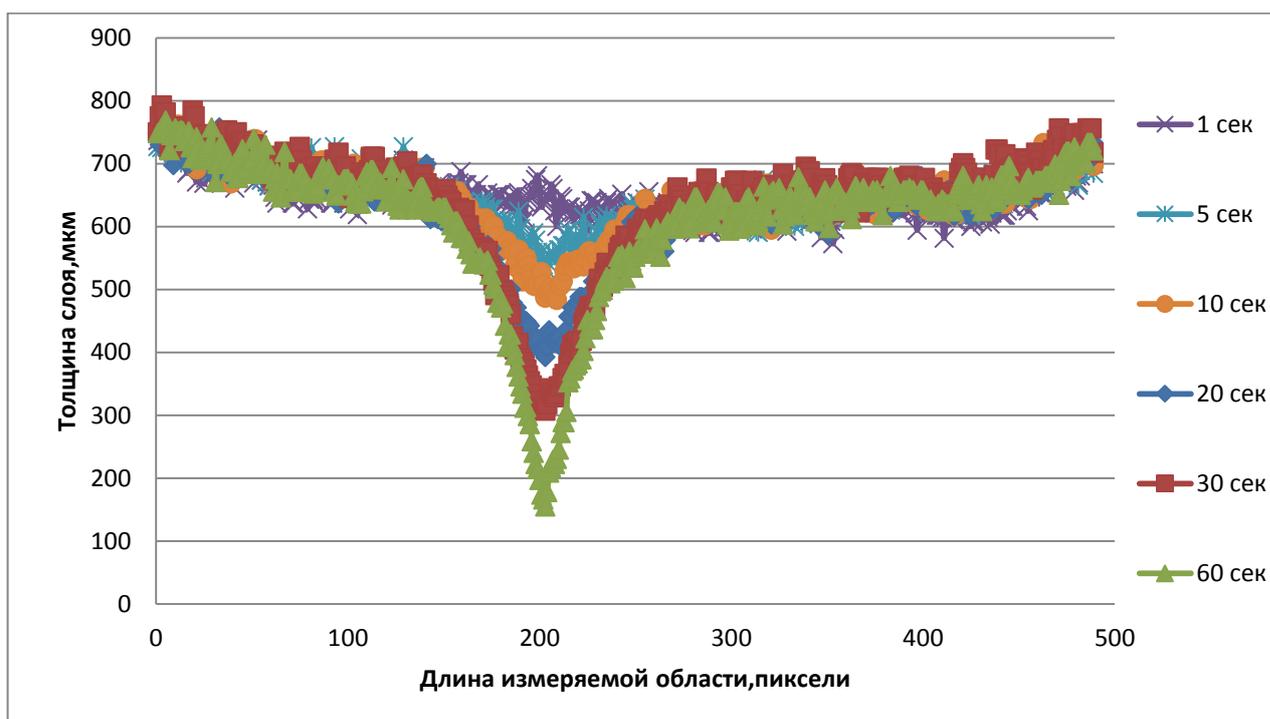


Рис. 3.3. Профили термокапиллярного углубления в слое толщиной 700 мкм.

На рис.3.4 представлена эволюция формирования термокапиллярного углубления в слое жидкости толщиной 700 мкм. На график вынесены первые 15 секунд формирования деформации и последние 10 секунд стационара углубления. Отрицательные значения на оси глубины деформированного слоя говорят о том, что это Δh между толщиной недеформированного и деформированного слоев. Такое представление позволяет более наглядно сравнивать профили, полученные в слоях разной толщины.

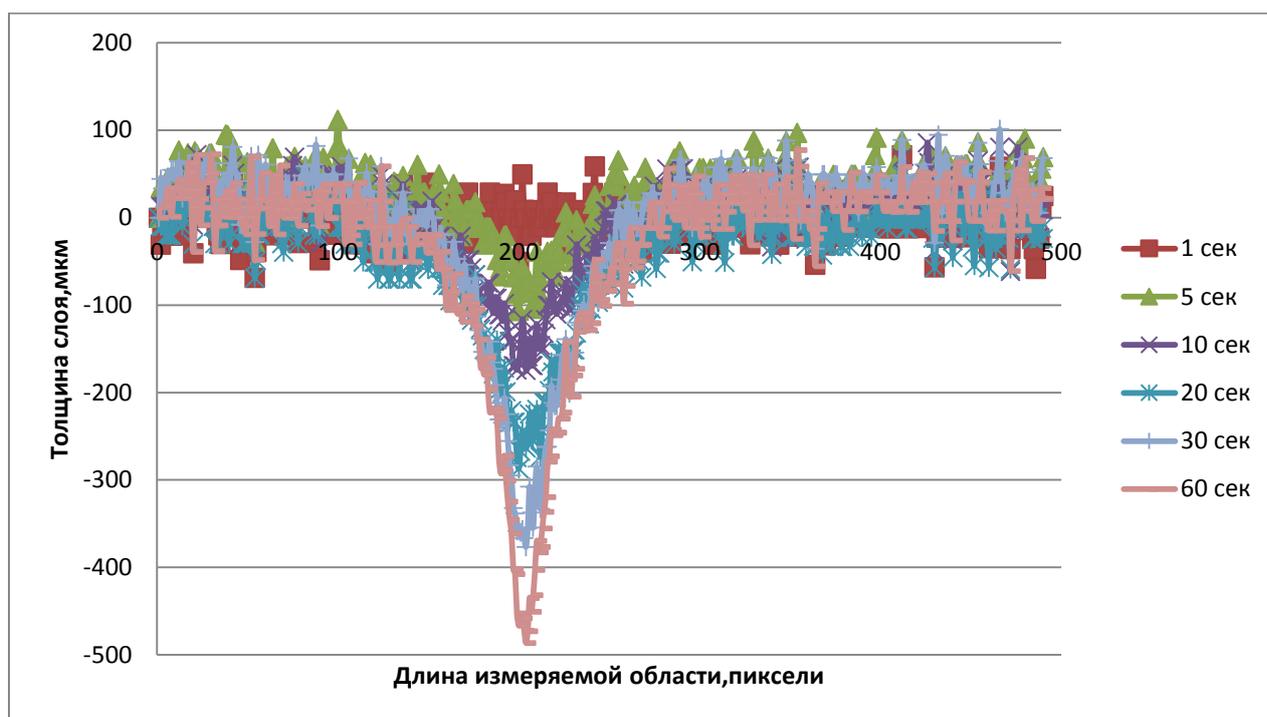


Рис.3.4. Перепад толщин термокапиллярного углубления и недеформированного слоя в слое толщиной 700 мкм.

Необходимо отметить форму ТК прогиба на рис.3.2 и 3.3. Резкий пик при выходе на стационар является следствием масштабирования вертикальной оси относительно горизонтальной для возможности детального изучения интересующего нас участка профиля. После приведения к реальным масштабам графики будут иметь следующий вид (Рис.3.5):

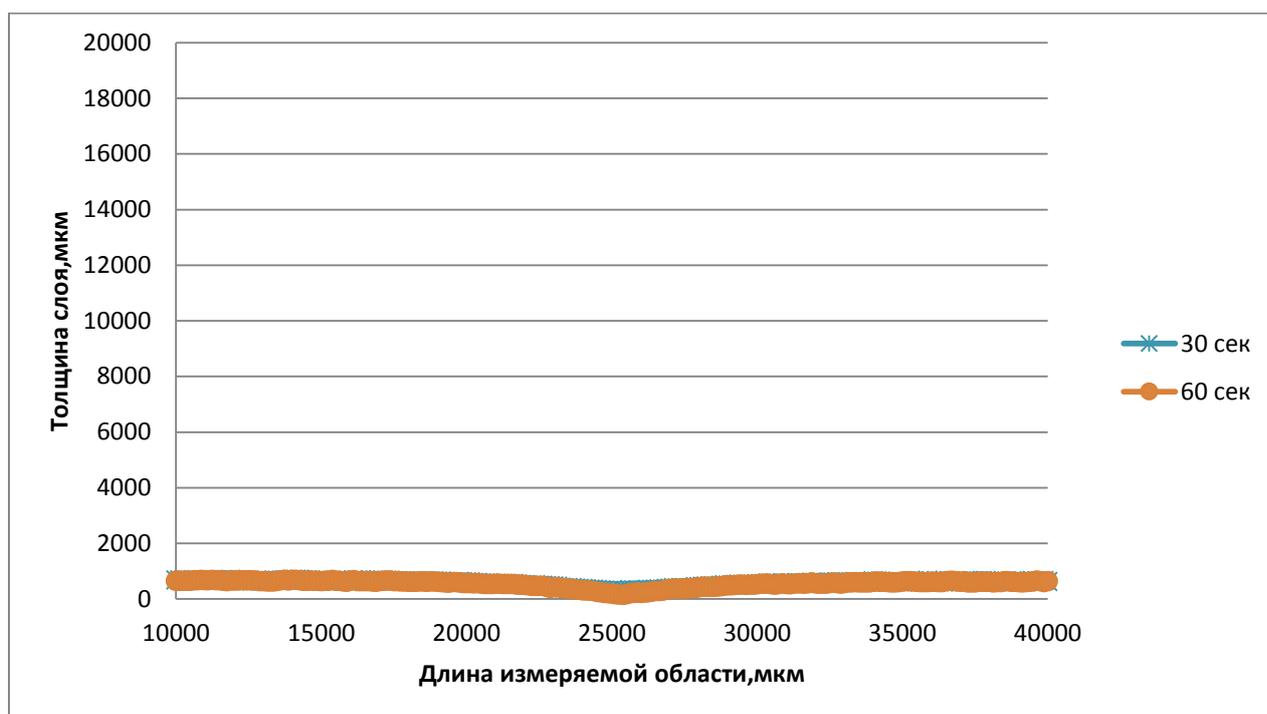


Рис. 3.5. Профили термокапиллярного углубления в слое толщиной 700 мкм (построено с учетом масштаба 1:12.5 мм/пикселей)

3.3 Динамика развития термокапиллярного углубления

По мере проведения экспериментов с разными толщинами тонкого слоя жидкости была выявлена динамика развития термокапиллярного углубления в каждом слое. На рис. 3.6 и 3.7 представлено семейство эволюционных зависимостей. При сопоставлении обоих графиков прослеживается изменение угла наклона части графика, соответствующей активному развитию ТК углубления. Чем толще слой, тем более пологим становится участок графика, тем больше тратится времени на формирование термокапиллярного углубления. В слоях большой толщины (800 и 900 мкм) не смотря на активную конвекцию углубление выражено слабо, так как сопротивление в придонных возвратных потоках термокапиллярного вихря значительно ослабляется [26]. Из-за малых значений интенсивности прошедшего света возрастает влияние шумов фоточувствительного элемента камеры, что сказывается на значительном разбросе экспериментальных точек

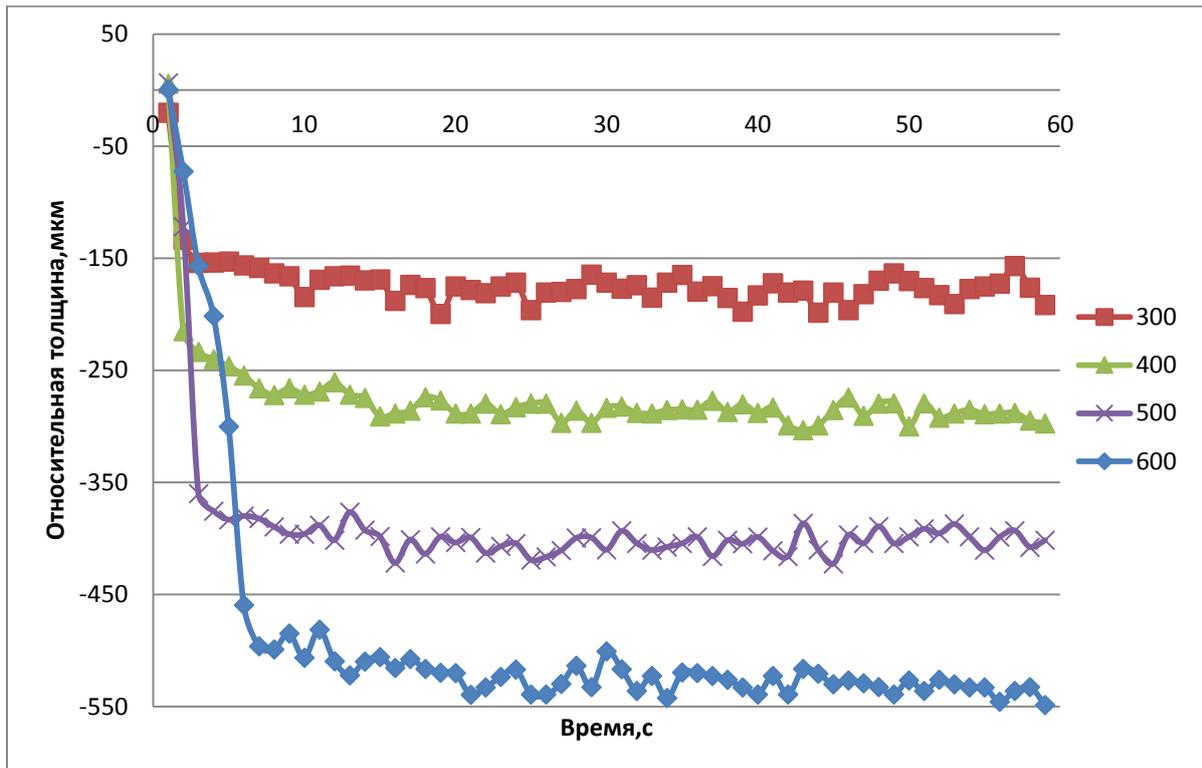


Рис.3.6. Примеры графиков эволюционной зависимости глубины ТК прогиба от времени с начала облучения. Тонкие слои.

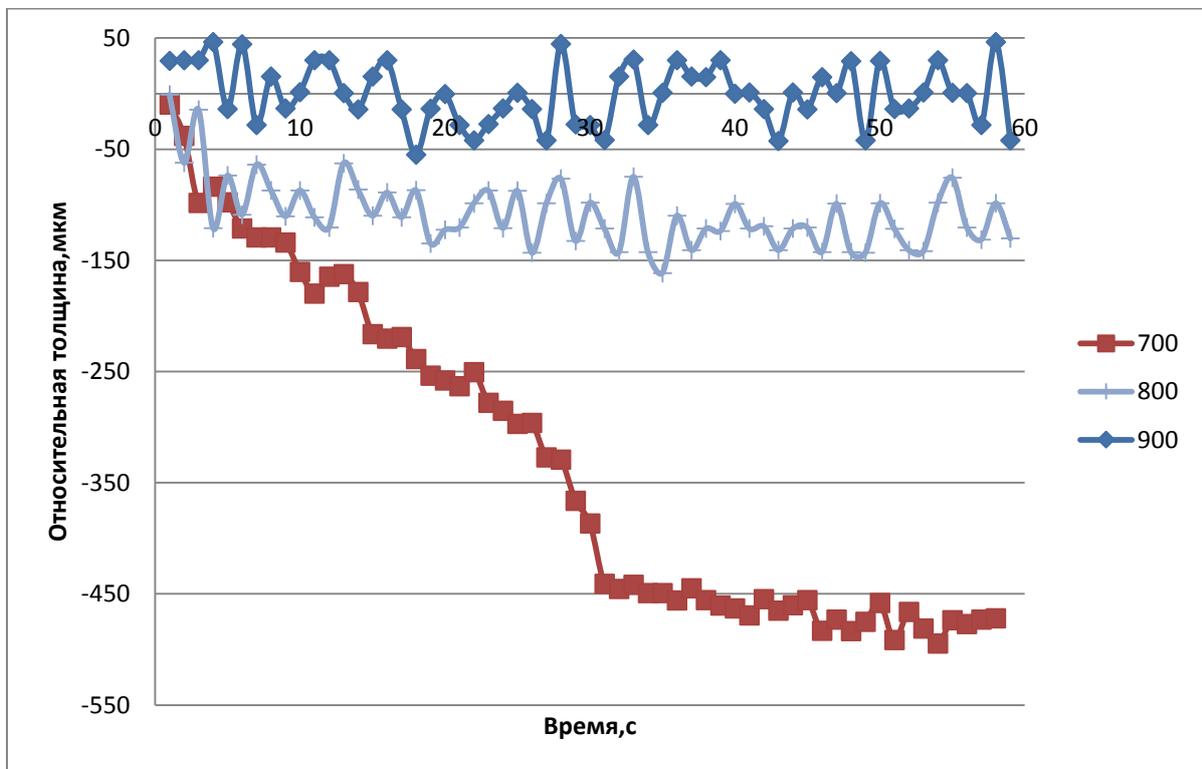


Рис.3.7. Примеры графиков эволюционной зависимости глубины ТК прогиба от времени с начала облучения. Толстые слои.

На графике 3.8 представлена зависимость влияния толщины слоя на стационарную глубину ТК деформации. Первые четыре точки соответствуют тонким слоям, в которых или наблюдается разрыв, или углубление близко к разрыву. Прослеживается корреляция между увеличением ТК углубления на 100 км и увеличением слоя на 100 мкм, что является вполне предсказуемым. При дальнейшем увеличении толщины слоя величина прогиба термокапиллярного углубления начинает снижаться, и согласно работе [25], зависимость величины прогиба от толщины слоя жидкости без влияния термокапиллярного разрыва может быть аппроксимирована показательной функцией. Такое поведение также объясняется снижением сопротивления в возвратном потоке термокапиллярного вихря за счет увеличения его поперечного сечения [26].

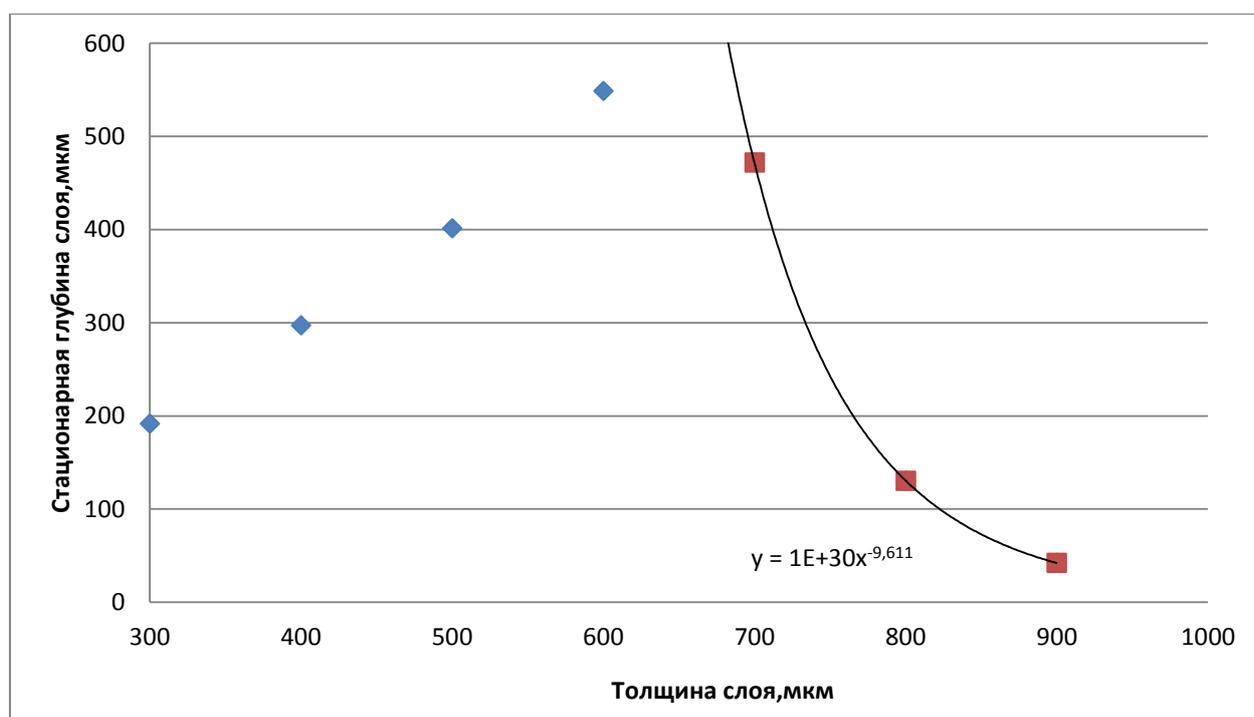


Рис.3.8. Влияние толщины слоя на стационарную глубину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию фотоабсорбционным методом профилей термокапиллярной деформации тонких слоев жидкости при локальном тепловом воздействии лазерного излучения. Анализ литературы показал, что определение профилей термокапиллярной деформации и толщины тонких слоев в целом является актуальной задачей для лазерной диагностики жидкостей и микрофлюидики. Фотоабсорбционный метод позволяет не только получить форму профиля поверхности в стационарном случае, но и проследить динамику его изменения с начала развития термокапиллярной конвекции. Большое внимание было уделено доработке методики определения толщины слоя жидкости при его неоднородной засветке.

По проделанной работе можно сделать следующие **выводы**:

1. Собрана экспериментальная установка, позволяющая проводить изучение профиля термокапиллярной деформации тонкого слоя жидкости фотоабсорбционным методом.
2. Предложена схема компенсации неоднородностей интенсивности подсветки поглощающего слоя жидкости при определении профиля его поверхности фотоабсорбционным методом.
3. Разработана программа для обработки кадров, где реализована схема компенсации неоднородностей интенсивности подсветки;
4. Проведен эксперимент по определению профиля поверхности с известной деформацией для тестирования достоверности получаемых результатов, максимальное отклонение между заданным и восстановленным профилями не превышает 15%.
5. Проведены эксперименты со слоями раствора бриллиантового зеленого в н-бутаноле толщиной 300...900 мкм, получена динамика изменения профилей поверхности термокапиллярных углублений для первых 60 сек. с начала их развития.

Полученные результаты позволили получить более широкую картину формирования и развития ТК углубления в полярной жидкости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Люшин А. В. Динамика движения и процессы структурообразования на поверхности тонкого слоя полярной жидкости: дисс. ... доктор. Физ.-мат. наук: 01.02.05 / Люшин Андрей Витальевич. – ФГБОУ ВПО «ПГГПУ». Пермь. 2015. 307 с
2. Мизев А. И. Экспериментальное исследование термокапиллярной конвекции, индуцированной локальной температурной неоднородностью вблизи поверхности жидкости. 2. Источник тепла, индуцированный излучением / А. И. Мизев // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – № 5. – С. 102-108.
3. Федорец А. А. Эффекты тепломассопереноса при локальном нагреве межфазной поверхности жидкость-газ: автореф. дисс. ... док. техн. наук: 01.04.14 / Федорец Александр Анатольевич – Н.: ИТ СО РАН. 2011. 46 с.
4. Безуглый Б. А. О фотоконденсации йода / Б. А. Безуглый, Е. А. Галашин, Г.Я. Дудкин // Письма в ЖЭТФ. – 1975. – № 22. – С. 76-79
5. Безуглый Б. А. Фотоиндуцированная капиллярная конвекция: применение в теплофизике / Б. А. Безуглый, С. И. Чемоданов, А.Ю. Зыков // Вестник Тюменского Государственного Университета. – 2004. – № 22. – С. 54-58
6. Безуглый Б.А. Капиллярная конвекция, управляемая тепловым действием света и ее применение в способах регистрации информации: дисс. ... канд. Физ.-мат. наук: 01.02.05 / Безуглый Борис Антонович. – МГУ. Москва. 1983
7. Безуглый Б. А. Контактное измерение температуры подложки в зоне облучения при фотоиндуцированной термокапиллярной конвекции в тонком слое прозрачной жидкости / Б. А. Безуглый, В. М. Флягин // Письма в ЖЭТФ. – 2006. – № 32. – С. 82-88
8. Benard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. -Methodes optiques d'observation et d'enregistrement/ Henri Benard // Journal Phys. Theor. Appl., – 1901. – № 10. – С. 254-266

9. Безуглый Б. А. Термокапиллярная деформация тонкого слоя жидкости, вызванная пучком лазера / Б. А. Безуглый, Н. А. Иванова, А.Ю. Зуев // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – № 3. – С. 130-135
10. Флягин В. М. Применение фотоабсорбции для определения профиля поверхности тонкого слоя поглощающей жидкости, деформированного термокапиллярной конвекцией./ В. М. Флягин// Вестник Тюменского Государственного Университета. – 2015. – № 1. – С. 29-33
11. Мизев А. И. Влияние нерастворимого сурфактанта на развитие термокапиллярной конвекции./ А. И. Мизев, А. В. Шмыров// Конвективные течения. – 2013. – № 1. – С. 215-230
12. Якушин В. И. Термокапиллярная неустойчивость плоского слоя жидкости с концентрационными источниками тепла./ В. И. Якушин// Конвективные течения. – 2003. – № 1. – С. 62-75
13. Зуев А. Л. Экспериментальное исследование особенностей концентрационно-капиллярной конвекции./ А.Л. Зуев, К.Г. Костарев// Этюды о механике. – 2017. – С. 23-35
14. Якушин В. И. Термокапиллярная неустойчивость жидкости, поглощающей внешнее излучение./ В. И. Якушин// Конвективные течения. – 2007. – С. 21-30
15. Якушин В. И. Термокапиллярная неустойчивость жидкости, поглощающей внешнее излучение./ В. И. Якушин// Конвективные течения. – 2007. – С. 21-30
16. Братчикова Е. С. Структура нелинейных движений в слое с концентрационным источником тепла./ Е. С. Братчикова// Конвективные течения. – 2007. – С. 7-20
17. Братчикова Е. С. Термокапиллярная устойчивость горизонтального слоя жидкости с концентрационным источником тепла./ Е. С. Братчикова// Конвективные течения. Вып.2 – 2007. – С. 36- 47
18. John W. M. Bush. Interfacial phenomena, fall 2010 – USA, 2011. – 82 p.

19. Зуев А. Л. Особенности концентрационно-капиллярной конвекции./ А.Л. Зуев, К.Г. Костарев// Успехи физических наук. – 2008. – С. 1065-1085
20. Hosoi A.E. Evaporative instabilities in climbing films./ A.E. Hosoi, W.M. Bush// Journal fluid mechanic. – 2001. –№442 - С. 217-239
21. Ландсберг Г. С. Оптика. Учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг // 6-ое изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 848 с.
22. Тарасов О. А. Бесконтактная диагностика жидкостей и их слоев на основе термокапиллярного эффекта, индуцированного пучком лазера: автореф. дисс. ... канд. ф.-м. наук: 02.04.04 / Тарасов Олег Александрович – М.: ИФХ СО РАН. 2004. 20 с.
23. Флягин В. М. Гидродинамические характеристики термокапиллярного вихря в тонком слое жидкости на твердой подложке: автореф. дисс. ... док. ф.-м. наук: 01.02.05 / Флягин Виктор Михайлович – Н.: ИГ СО РАН. 2006. 32 с.
24. Самойлова А. Е. Конвективная устойчивость горизонтальных слоев жидкости с деформируемой границей раздела: дисс. ... док. ф.-м. наук: 01.02.05 / Самойлова Анна Евгеньевна – П.: ПГНУ. 2015. 120 с.
25. Федорец А. А. Фотоиндуцированный термокапиллярный эффект и его применения для измерения свойств жидкости: автореф. дисс. ... канд.ф.-м.наук: 02.04.04 / Федорец Александр Анатольевич – Н.: ИТ СО РАН. 2002. 20 с.
26. Безуглый Б. А. Термокапиллярная конвекция в слое жидкости с квазиточечным источником тепла в подложке / Б. А. Безуглый, В. М. Флягин // Механика жидкости и газа. – 2007. – №6. – С. 124-134

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Модуль расчета с реализуемым классом для расчета профилей термокапиллярного углубления, написанный в среде программирования Lazarus.

```
unit phcalc;
```

```
{ $mode objfpc } { $H+ }
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Classes, SysUtils, Graphics, Forms, ComCtrls;
```

```
type TProfileCalculate = class (TObject) // переменные
```

```
CalculatedProfile: array of extended; // массив точек рассчитанного профиля
```

```
ReferenceFrame: array of byte; // массив для хранения данных опорного кадра
```

```
ReferenceLayer: byte; // интенсивность недеформированного слоя
```

```
ReferenceWell: byte; // интенсивность нулевой толщины
```

```
InitialHeight: extended; // начальная толщина слоя
```

```
LayoutArea: Record // зона интереса
```

```
X1, Y1, X2, Y2: integer;
```

```
end;
```

```
DeformationCenter: record // Центр ТК деформации
```

```
X, Y: integer;
```

```
end;
```

```
WellCenter: record // Центр колодца - слоя нулевой толщины
```

```
X, Y: integer;

end;

LayerCenter: record //Центр недеформированного слоя

X, Y: integer;

end;

iStart,iEnd: integer;//методы

procedure CalculateProfile(Canvas:TCanvas);

end;

function GetRed(Color:TColor):Byte;

function GetGreen(Color:TColor):Byte;

function GetBlue(Color:TColor):Byte;

implementation

uses main;

function GetRed(Color:TColor):Byte;

begin

GetRed:= (Color and $000000FF);

end;

function GetGreen(Color:TColor):Byte;

begin

GetGreen:= Round((Color and $0000FF00)/256);

end;
```

```

function GetBlue(Color:TColor):Byte;

begin

GetBlue:= Round((Color and $00FF0000)/(256*256));

end;

procedure TProfileCalculate.CalculateProfile(Canvas:TCanvas);

var i: integer;

k, a: extended;

Iw, Iw0, Il, Il0, Im, Im0: byte;

begin

Iw:= GetBlue(Canvas.Pixels[WellCenter.X,WellCenter.Y]);

Iw0:= ReferenceWell;

Il:= GetBlue(Canvas.Pixels[LayerCenter.X,LayerCenter.Y]);

Il0:= ReferenceLayer;

a:= Iw/Iw0;

k:= ln((Iw/(a*Il))*(Il0/Iw0))/InitialHeight;

SetLength(CalculatedProfile,Canvas.Height);

for i:= 0 to Canvas.Height-1 do

begin

Im:= GetBlue(Canvas.Pixels[DeformationCenter.X,i+1]);

Im0:= ReferenceFrame[i];

CalculatedProfile[i]:= ln((Iw/(a*Im))*(Im0/Iw0))/k;

```

end;

end;

end.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

В приложении представлен фотографии интерфейса программы PhotoAbsorbtion Snapshot Calculator использованной для построения профилей термокапиллярной деформации.

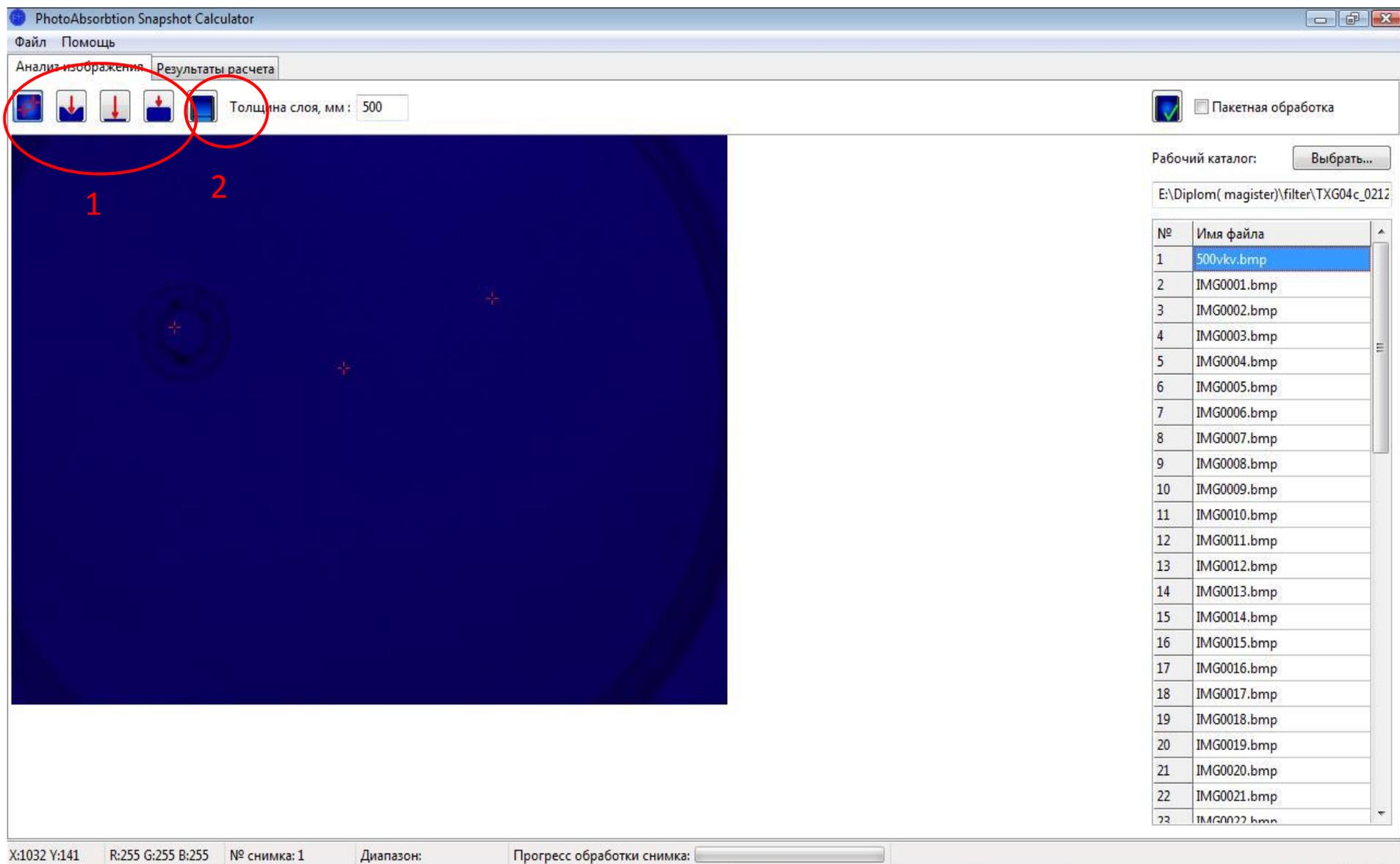


Рис. 2.10. Общий интерфейс программы с калибровочным кадром.

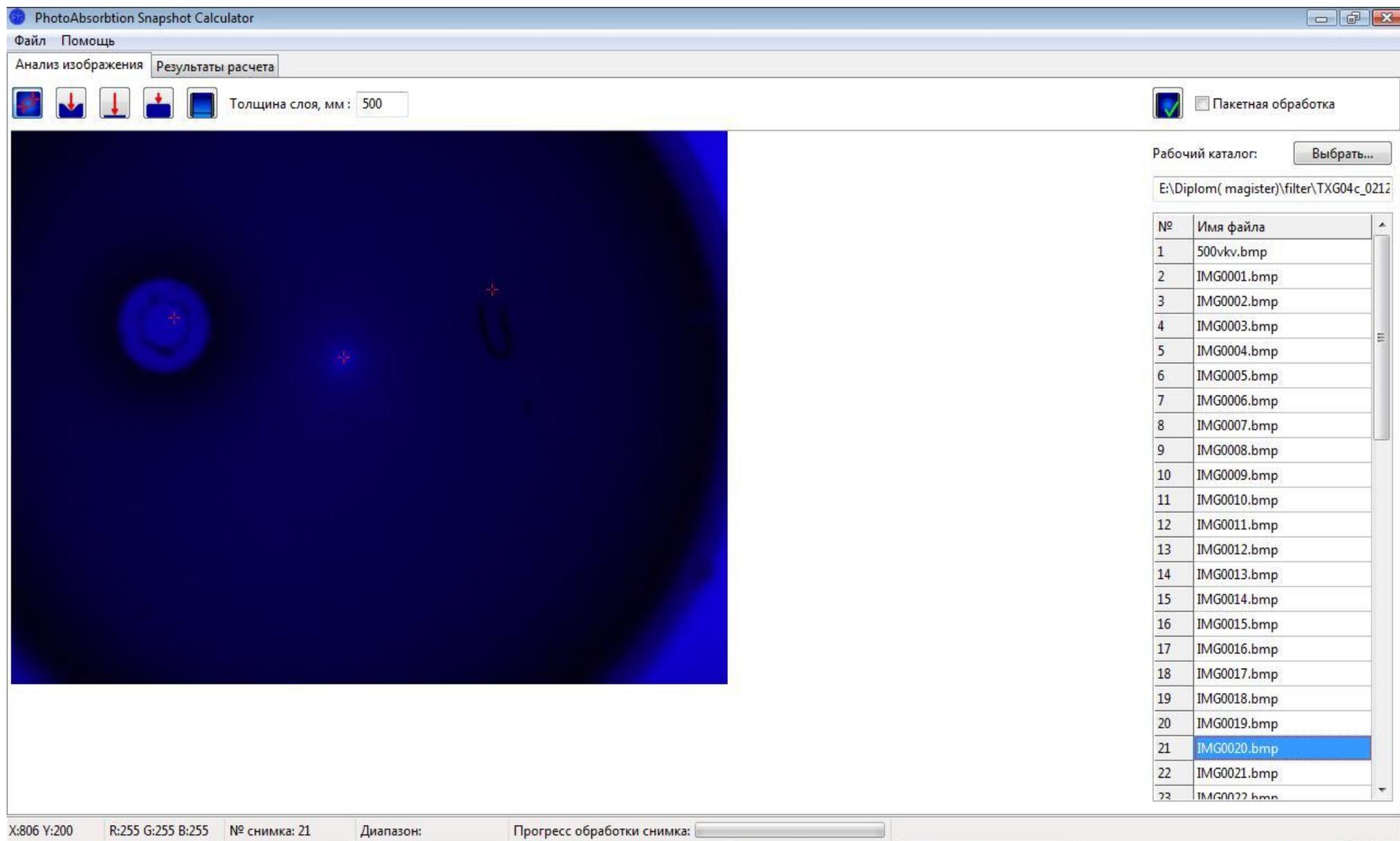


Рис. 2.11. Общий интерфейс программы с кадром ,ТК углублением и реперными точками.

PhotoAbsorbion Snapshot Calculator

Файл Помощь

Анализ изображения Результаты расчета

№	500vkv.bmp	IMG0001.bmp	IMG0002.bmp	IMG0003.bmp	IMG0004.bmp	IMG0005.bmp	IMG0006.bmp	IMG0007.bmp	IMG0008.bmp	IMG0009.bmp	IMG0010.bmp	IMG0011.bmp	IMG0012.br
1		507.171	491.764	483.802	514.359	514.168	499.100	514.359	531.020	491.228	483.896	498.666	449.686
2		524.602	501.002	507.780	523.706	500.295	508.618	523.706	524.442	485.735	492.957	492.917	472.087
3		540.422	515.839	530.971	508.463	485.483	524.139	508.463	524.442	471.609	492.957	471.445	472.087
4		524.602	523.429	507.780	523.706	478.242	524.139	523.706	501.045	471.609	485.735	478.496	485.975
5		514.902	514.192	469.382	530.086	469.019	499.100	514.359	491.408	462.548	483.896	483.802	484.167
6		514.902	514.192	469.382	514.359	469.019	514.622	491.667	491.408	483.896	483.896	469.382	484.167
7		507.171	514.192	469.382	506.679	461.884	514.622	477.097	499.089	498.674	476.674	469.382	498.696
8		502.252	487.079	464.760	509.619	471.583	494.273	486.927	494.201	472.078	479.300	457.708	472.548
9		492.269	463.172	448.328	500.000	469.442	469.420	477.308	461.581	448.626	469.975	448.328	463.379
10		502.252	479.826	457.708	486.927	457.207	479.215	486.927	478.954	472.078	494.078	457.708	472.548
11		507.171	499.127	462.330	477.097	461.884	499.100	484.328	476.386	498.674	498.674	469.382	484.167
12		502.252	487.079	479.180	486.927	457.207	494.273	479.588	471.498	479.300	494.078	464.760	479.648
13		515.819	463.172	484.664	500.000	462.093	476.893	484.757	461.581	462.753	462.753	469.800	485.009
14		509.983	472.679	471.916	486.927	486.395	486.688	494.376	486.521	457.952	457.952	471.916	479.648
15		487.130	458.690	457.708	472.356	493.973	486.688	494.376	486.521	457.952	444.230	471.916	479.648
16		487.130	487.079	471.916	458.202	478.933	471.851	486.927	486.521	464.963	472.078	457.708	472.548
17		487.130	501.916	471.916	451.274	471.583	471.851	494.376	486.521	479.300	494.078	443.906	472.548
18		489.668	482.349	467.249	460.443	466.861	466.977	482.141	489.267	460.323	474.660	453.041	460.990
19		487.204	458.348	443.569	457.857	442.901	457.086	457.857	494.968	450.906	443.895	443.569	451.731
20		497.285	467.948	453.041	467.570	452.485	481.814	453.416	451.970	453.312	467.438	467.249	460.990
21		497.285	467.948	467.249	467.570	459.620	481.814	453.416	444.827	460.323	467.438	467.249	454.097
22		487.130	472.679	464.760	479.588	443.241	471.851	458.202	449.761	457.952	472.078	471.916	472.548
23		472.441	472.679	457.708	486.927	436.405	457.438	458.202	456.905	472.078	457.952	471.916	479.648
24		457.394	444.359	443.569	472.428	422.099	442.674	443.703	441.955	443.895	430.173	443.569	444.838
25		462.459	449.183	448.328	462.738	426.915	440.588	448.584	446.987	434.904	434.904	434.526	435.999
26		472.441	472.679	457.708	486.927	443.241	457.438	458.202	456.905	457.952	444.230	443.906	458.659
27		451.166	487.079	443.906	486.927	457.207	457.438	472.356	456.905	457.952	457.952	464.760	458.659

X:189 Y:1 R:5 G:0 B:64 № снимка: 22 Диапазон: Прогресс обработки снимка:

Рис. 2.13. Результаты расчетов программы с кадром и ТК углубление

