

РЕФРАКЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А. С. МИХАЛЕВ, Н. М. СКОРНЯКОВА

Московский энергетический институт (технический университет),
Москва, Россия, e-mail: skorniakovaNM@mpei.ru

Разработана рефракционная система для исследования испарения капель жидкости с твердой поверхности, основанная на теневом фоновом методе визуализации оптически неоднородных сред. Проведено компьютерное моделирование испарения с нагретой поверхности. Дано описание экспериментальной установки, приведены результаты экспериментов по исследованию испарения капель воды, этанола и этилацетата.

Ключевые слова: рефракционная система, компьютерное моделирование, теневой фоновый метод, капли жидкости, испарение.

The system, based on the background oriented schlieren method of optically inhomogeneous mediums, for evaporation of different liquid drops on the solid surface is developed. The computer modeling of evaporation of liquid drops on the heated surface is carried out, the description of the experimental setup is given, and the experimental results of investigations of water, ethanol, and ethyl acetate drops are presented.

Key words: refractive system, computer modeling, background oriented schlieren method, liquid drop, evaporation.

Одним из распространенных случаев испарения жидкостей с плоской поверхности в случае ее расположения горизонтально или под малым углом является образование и испарение капель [1]. Для исследования этих процессов в настоящее время широко используют оптические методы [2 – 6], в частности, фотографирование, которое позволяет получить изображение только контура смачивания капли жидкости на поверхности. Для детального изучения испарения необходимо знать и другие характеристики этого процесса.

Авторами разработана оптико-компьютерная рефракционная система визуализации всей поверхности капли, основанная на теневом фоновом методе исследования оптических неоднородностей [7]. Суть метода состоит в корреляционной обработке двух изображений структурированного экрана. Первое изображение получают при отсутствии между экраном и цифровой фотокамерой оптической неоднородности, второе – при ее наличии. Обработка этих изображений позволяет определять фазовые характеристики неоднородности (градиент показателя преломления). В качестве оптической неоднородности рассматривали малую каплю жидкости, расположенную на твердой горизонтальной поверхности. Была создана программа расчета прохождения оптического излучения через каплю и адаптация полученных результатов к ее экспериментальным изображениям.

Рефракционная система предназначена для определения изменения формы капли в процессе ее испарения и состоит из оптико-компьютерного блока регистрации прошедшего света и программного обеспечения, включающего программы моделирования прохождения световых лучей через каплю жидкости и обработки рефракционной картины.

Компьютерное моделирование рефракционных картин. Разработанные программы моделирования рефракционных картин позволяют:

- формировать фоновые экраны различной сложности и структуры;
- вводить параметры моделируемой капли (такие как высота, диаметр капли, расстояние до камеры);

- выполнять расчеты для капель с различными показателем преломления и формой, обусловленной их испарением и смачиванием поверхности.

Программы SpherMod и LamMod предназначены для моделирования рефракционных картин несмачивающих и смачивающих капель, соответственно. При рассмотрении капель различной формы необходимо создавать две модели: сферу, отсеченную плоскостью (для жидкостей, не растекающихся на поверхности), и сферу с характерными областями растекания. Программы работают в среде Mathcad [8].

На рис. 1 схематически изображена моделируемая капля (выделена цветом) в сечении XZ с указанием параметров, используемых в расчетах, ось X играет роль пластины, на поверхности которой располагается капля.

При моделировании были приняты следующие допущения: прозрачная капля представляет собой часть сферы, лежит на прозрачной пластине (ось X); на каплю перпендикулярно оси X падает параллельный

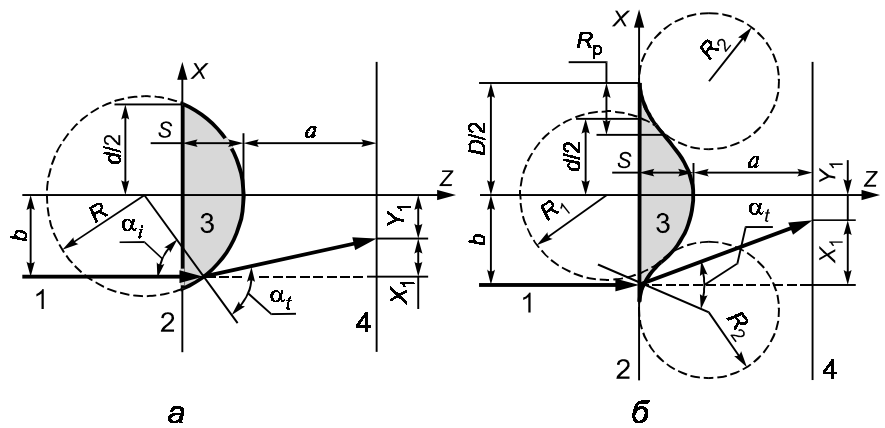


Рис. 1. Схема прохождения луча света через каплю без смачивания (а) и с растеканием (б):

1 – световой луч; 2 – твердая поверхность; 3 – капля жидкости; 4 – экран

пучок света и, проходя через нее, преломляется и попадает на экран. Входные данные программы SpherMod: высота S и диаметр d капли, коэффициент преломления жидкости n , расстояние a от капли до камеры, характеристики фонового экрана, от которых зависит параметр b (см. рис. 1, а). Входные данные программы LamMod: высота S и диаметр D растекшейся капли, длина R_p растекшейся части капли, радиус R_2 окружности, характеризующей растекание, а также параметры a, n, d, b , описанные выше (см. рис. 1, б).

Изображение капли воды на стекле ($S = 24$ пикс., $d = 60$ пикс., $a = 50$ пикс.) при различных показателях преломления на фоне структурированного экрана показано на рис. 2.

Смещение луча, проходящего через каплю, зависит от расстояния его падения относительно центра капли (см. рис. 1). Таким образом, в центре капли на оптической оси смещение равно нулю и начинает расти при движении к ее краям (черный цвет на краях капли соответствует тому, что точка в этой части экрана сместилась на расстояние большее, чем точка, расположенная ближе к центру, см. рис. 2). Также на отклонение лучей при прохождении через каплю влияет показатель преломления жидкости: для воды с наименьшим показателем преломления $n = 1,33$ из всех выбранных жидкостей (этанол – $n = 1,36$, этилацетат – $n = 1,37$) характерно наименьшее отклонение лучей.

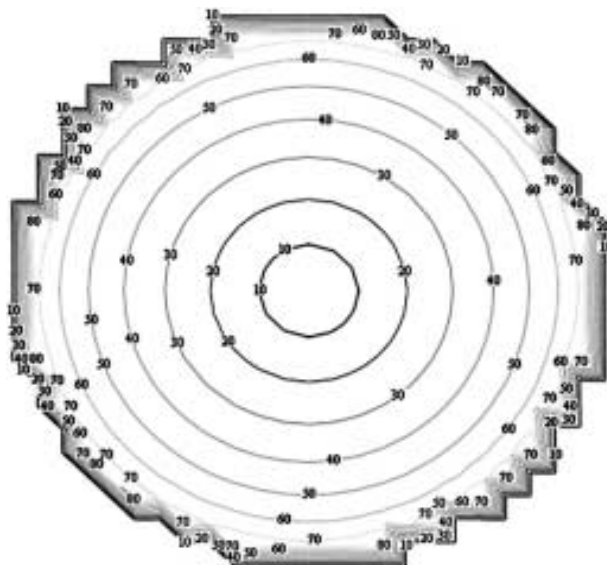


Рис. 2. Распределение углов (в градусах) отклонения луча для капли воды

Из рис. 2 следует, что углы отклонения на выходе из капли увеличиваются при движении к ее краям, минимальный угол отклонения составляет порядка 10° , а максимальный около 70° для выбранного числа линий уровня.

В результате компьютерного моделирования получили изображение структурированного экрана со смещенными элементами, вызванными рефракцией лучей на капле, максимально приближенное к изображению, установленному экспериментальным путем.

Экспериментальная установка была разработана для получения изображений капли жидкости на твердой поверхности теневым фоновым методом (схема представлена на рис. 3). Она состоит из видеокамеры 1 ВИДЕОСКАН-285-USB с максимальной чувствительностью на длине волны 550 нм, исследуемого объекта – капли жидкости 2, стеклянной пластины 3, структурированного экрана 4 и персонального компьютера 5 со специализированным программным обеспечением.

На стеклянную пластину, под которой находится экран, с помощью шприца помещают каплю жидкости. Фокус объектива видеокамеры настраивают на экран до нанесения капли. При проведении экспери-

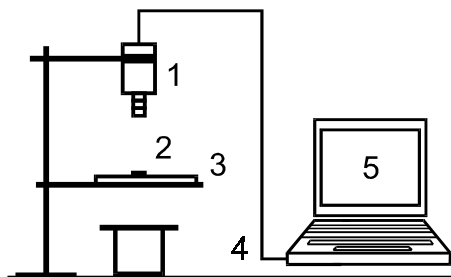


Рис. 3. Схема рефракционной установки:

1 – цифровая фотокамера; 2 – капля жидкости; 3 – подложка; 4 – структурированный экран; 5 – ПК

мента необходимо соблюдать параллельность фонового экрана, пластины с каплей и фотокамеры. В ходе эксперимента получают изображения искаженного структурированного экрана, вызванные испарением капли.

В качестве исследуемых веществ были выбраны этанол, вода и этилацетат, их основные свойства [9] представлены в таблице.

Свойства исследованных жидкостей

Свойство	Вода	Этилацетат	Этанол
Температура кипения, °C	100	77,1	78,15
Показатель преломления при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\lambda = 589,3\text{ нм}$	1,3330	1,3726	1,3611
Поверхностное натяжение при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, Н/м	$72,75 \cdot 10^{-3}$	$23,75 \cdot 10^{-3}$	$22,03 \cdot 10^{-3}$
Вещество, с которым происходит смешивание	Этанол, ограниченно с этилацетатом	Бензол, этанол, хлороформ	Бензол, глицерин, вода, диэтиловый эфир, ацетон, метанол, уксусная кислота, хлороформ

Выбор этих жидкостей обусловлен скоростью их испарения, которая позволяет с помощью фотокамеры зафиксировать изменения, происходящие в капле жидкости, а также прозрачностью, необходимой для проведения экспериментов с помощью рефракционной системы. Из таблицы следует, что рассматриваемые вещества являются прозрачными жидкостями, обладают высокой текучестью, их можно смешивать между собой, что дает возможность исследовать испарение смесей указанных жидкостей. Максимум чувствительности камеры ВИДЕОСКАН-285-USB

наблюдается на длине волны 550 нм, показатель преломления рассматриваемых жидкостей дан для близкой к этому значению длины волны. Наибольшее смачивание из выбранных жидкостей присуще этанолу, так как он обладает меньшим поверхностным натяжением, для воды характерно меньшее смачивание. Поэтому для капель различных жидкостей одного и того же объема характерна различная площадь контакта с твердой подложкой.

Результаты исследований процесса испарения. С помощью рефракционной установки была проведена визуализация испарения микролитровых капель воды, этанола и этилацетата. При анализе экспериментальных данных установлено, что после растекания капли по поверхности стекла в ней происходит перераспределение жидкости, это соответствует изменению цвета и формы капли на изображениях, полученных после обработки. Испарение осуществляется со всей поверхности капли, нагляднее всего это наблюдается на участках с наименьшей толщиной пленки воды.

На рис. 4 представлены восстановленные по результатам обработки теневых картин профили капель этанола в момент времени $t = 35,2$ с и воды в момент $t = 34,93$ с. На рис. 5 приведено нормированное распределение высоты капли в заданном сечении. Здесь точками обозначены экспериментально полученные результаты, а сплошной линией – сглаженная кривая. По полученной форме капли можно сделать вывод, что в этом случае жидкость растекается по поверхности и сама капля не является сферической. Наблюдается «провал» в центре капли, сви-

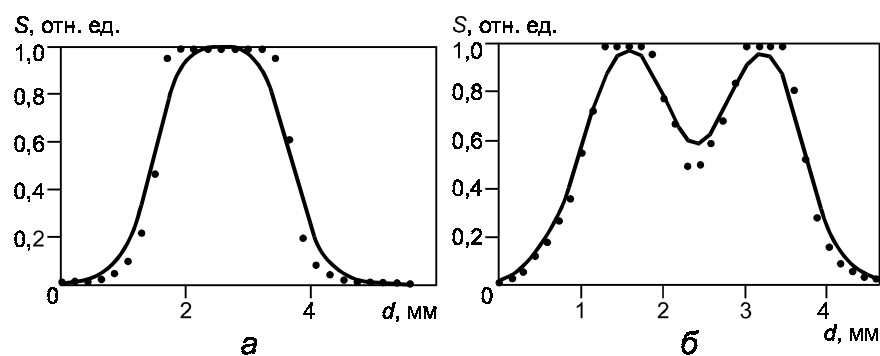


Рис. 4. Профили капель этанола (а) при $t = 35,2$ с и воды (б) при $t = 34,93$ с

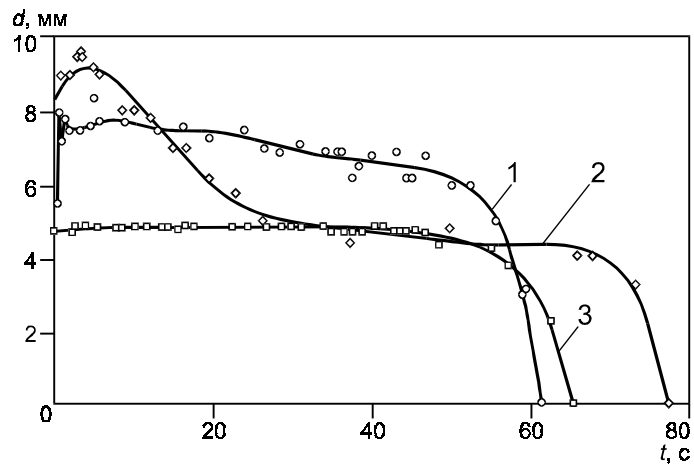


Рис. 5. Зависимость диаметра капли от времени испарения:

1 – этанол; 2 – этилацетат; 3 – вода; точки – экспериментальные данные; сплошная линия – их аппроксимация

детельствующий о том, что в данный момент времени в центральной части капли становится несферической.

Для определения диаметра капли в кадр вносили линейку. Анализ рефракционных картин показывает, что в момент касания подложки диаметр капли меньше, чем в следующий момент времени. В интервале 5 – 45 с диаметр капли практически не изменяется. На последнем временном промежутке 45 – 65 с наблюдается увеличение скорости испарения вследствие быстрого уменьшения диаметра капли до полного ее испарения.

По полученным результатам исследования испарения капли воды малого объема можно сделать общие выводы. Для таких капель при испарении характерно наличие промежутка времени, когда ее диаметр практически не изменяется и внутри капли появляется углубление.

На основе полученных данных построены обобщенные графики зависимости диаметра капли от времени испарения для воды, этилацетата и этанола (см. рис. 5). Из графиков видно, что капля этанола с начальным диаметром 6 мм испаряется быстрее, чем капля воды с начальным диаметром 4,75 мм. В соответствии с физическими свойствами этилацетат испаряется быстрее этанола, но вследствие того, что первоначальный диаметр этой капли был в два раза больше, чем у капли этанола, то увеличилось время испарения.

Выводы. Разработана оптико-компьютерная рефракционная система с программным обеспечением моделирования рефракционных картин. Такая система для наблюдения и обработки рефракционных картин позволяет исследовать испарение малых капель жидкости диаметром 1 – 10 мм. Были изучены закономерности испарения капель воды, этанола и этилацетата.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (гос. контракт № П2527).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Алексеев С. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г.** Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992.
2. **Евтихий Н. Н. и др.** Информационная оптика: Учеб. пособие /Под ред. Н. Н. Евтихьева. М.: Изд-во МЭИ. 2000.
3. **Ринкевичюс Б. С.** Лазерная диагностика потоков. М.: Изд-во МЭИ, 1990.
4. **Skornyakova N., Tropea C.** BOS visualization of levitated drop evaporation //Optical methods of flow investigations: Proc. 9th sci. tech. conf. М.: МРЕИ, 2007. Р. 234 – 237.
5. **Михалев А. С.** Одновременное определение размеров и скоростей одиночных капель воды лазерным интерференционным методом //Оптические методы исследования потоков: Труды 9-й Междунар. науч.-техн. конф. М.: МЭИ, 2007. С. 502 – 505.
6. **Попова Е. М.** Теневой фоновый метод в задачах тепломассообмена: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 2008.
7. **Гимбутис Г.** Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Вильнюс: Моксклас, 1988.
8. **Кирьянов Д. В.** Самоучитель Mathcad II. СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
9. **HighExpert.RU** [Офиц. сайт]. <http://highexpert.ru> (дата обращения: 25.08.2010).

Дата принятия 11.10.2010 г.

