

Н.М. Скорнякова

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: nmskorn@mail.ru*

ТЕНЕВАЯ ФОНОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрена возможность исследования процессов испарения жидкости с твердой поверхности теньвым фоновым методом. Представлены результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований для капель жидкости различных веществ.

ИСПАРЕНИЕ ЖИДКОСТИ, ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ТЕНЕВОЙ ФОНОВЫЙ МЕТОД

ВВЕДЕНИЕ

С активным развитием компьютерной техники в последнее время активно развиваются и бесконтактные методы исследований, такие как метод лазерной анемометрии изображения частиц (PIV метод), спекл и компьютерно-лазерные рефрактометрические метод, теневой фоновый метод (ТФМ)

Оптические методы исследования потоков относятся к старейшим методам, без которых были бы невозможными современные достижения в науке и технике, которые успешно развиваются и в настоящее время [1, 2]. Среди этих методов особое место занимают теневые методы, которые основаны на рефракции световых лучей на крупномасштабных оптических неоднородностях потока. В теневых приборах используются различные пространственные фильтры, устанавливаемые в фокальной плоскости выходного объектива, которые выполняют аналоговую обработку оптического изображения. В качестве такого фильтра наиболее широко используется нож Фуко или пространственные фильтры Гильберта. В этих приборах используется качественная и дорогостоящая оптика, и фотографическая регистрация теневой картины. Теневые приборы являются громоздкими, сложными в юстировке и эксплуатации, поэтому они нашли применение, в основном, в аэродинамических исследованиях сверхзвуковых потоков в промышленных аэродинамических трубах.

С появлением лазеров были разработаны новые рефракционные методы исследования потоков, основанные на когерентных свойствах лазерного излучения – метод спекл полей и компьютерно-лазерный рефракционный метод.

Большой шаг в исследовании потоков был сделан после того, как стало возможным заменить пассивные наблюдения экспериментами, тщательно спланированными для получения количественной информации о потоке.

В 1999 г. Ж.Мейером был предложен теневой фоновый метод (ТФМ) (в англоязычной литературе Background Oriented Shlieren (BOS)) как дальнейшее упрощение оптической теневой системы и переход к использованию компьютерной обработки изображений [3, 4].

В данном методе для получения информации о потоке используется искаженное изображение структурированных фоновых экранов, которое вызвано малыми градиентами показателя преломления потока.

Главная область применения ТФМ – это исследование крупномасштабных потоков, которое было ограничено до настоящего времени размерами теневых приборов. Это особенно актуально, например, для натурного аэродинамического эксперимента.

В настоящее время идет активное исследование ТФМ для применения его в различных областях науки и техники, так как данный метод имеет ряд существенных преимуществ перед классическими теневыми методами: он позволяет уменьшить время на подготовку и обработку результатов эксперимента, провести натурные исследования, упростить схему и настройку установки. Наиболее интересным применением является исследование рефракционных явлений в микромасштабах.

Для реализации данного метода необходимо иметь только подходящий фоновый экран и цифровую фотокамеру с возможностью передачи изображения в компьютер для дальнейшей его обработки.

ПРИНЦИП ТЕНЕВОГО ФОНОВОГО МЕТОДА

Оптическая схема для реализации теневого фонового метода представлена на рис. 1.

В качестве фонового экрана используется белый экран с нанесенным на него рисунком. Рисунок в зависимости от характеристик исследуемых потоков может состоять из точек, линий или других объектов, которые могут быть нанесены как регулярно, так и хаотически. Также в качестве фонового экрана могут использоваться естественные изображения, например, кирпичная стена.

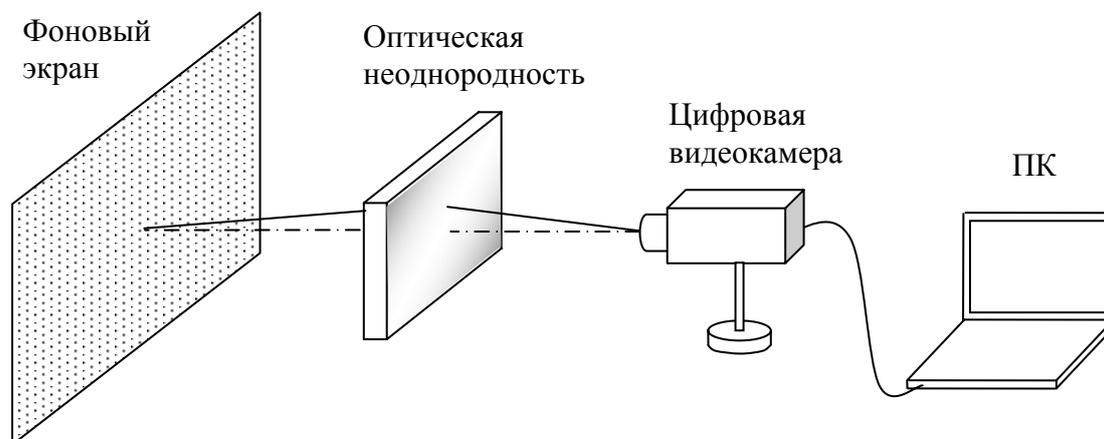


Рис. 1. Оптическая схема ТФМ

Изображение фонового экрана формируется на матричном фотоприемнике, в данном случае используется цифровая видеокамера. Между экраном и объективом располагается оптическая неоднородность, которая и вносит искажение в изображение фонового экрана. Неоднородность характеризуется зависимостью показателя преломления от координат.

Если неоднородность отсутствует, то каждая точка фонового экрана даст идеальное изображение в плоскости матричного фотоприемника. Если неоднородность присутствует, то лучи формирующие изображение точек отклонятся и дадут изображение в отличном от первого случая месте. Иллюстрация искажения изображения неоднородностью схематично представлена на рис. 2.

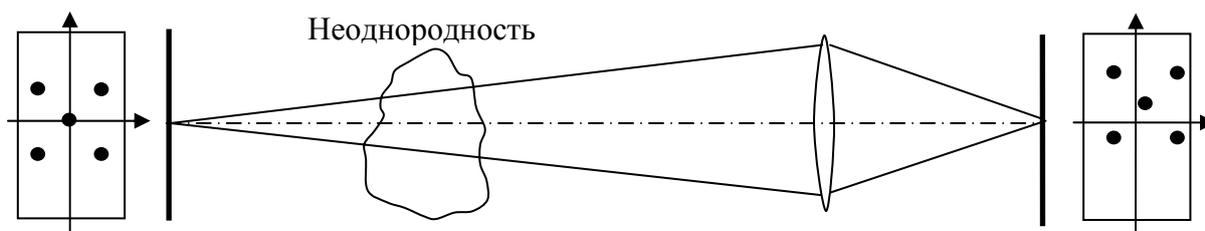


Рис. 2. Искажение изображения неоднородностью

Наряду с перемещением изображений точек возможна и их расфокусировка. Она может появляться при искажении волнового фронта неоднородностью. Сейчас в ТФМ рассматривают только перемещение изображений точек. Но расфокусировка также несет информацию о неоднородности.

В результате получается два изображения: изображение фонового экрана без искажения оптической неоднородностью – опорное изображение и изображение фонового экрана с искажением. Для представления изображения $I(x, y)$ используют свертку

$$I(x, y) = B(x', y') * T(\eta, \xi), \quad (1.5)$$

где $B(x', y')$ - функция фонового экрана и $T(\eta, \xi)$ - функция пропускания исследуемой неоднородности.

Для определения характеристик исследуемой неоднородности необходимо провести операцию обратной свертки. В результате этой операции можно получить функцию, описывающую оптические свойства неоднородности, если знать функции фонового экрана и его изображения. При такой обработке получается двумерная картина градиента показателя преломления неоднородности.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЛИ ЖИДКОСТИ

Предпринята попытка создания модели прохождения света через каплю жидкости, которая расположена на твердой поверхности, и адаптация полученных результатов к экспериментально получаемым изображениям.

Основными требованиями, которым должна удовлетворять разрабатываемая программа, являются:

- возможность формирования фоновых экранов различной сложности и структуры;
- возможность введения параметров моделируемой капли (таких как высота капли, ее диаметр, расстояние до камеры);
- возможность проведения расчетов для капель с различным показателем преломления;
- возможность проведения расчета для капель различной формы.

При подробном рассмотрении поставленной задачи, а именно возможности проведения расчетов для капель различной формы, она распадается на две: создание модели капли представляющей из себя сферу отсеченную плоскостью (для жидкостей, не растекающихся на экспериментальной поверхности) и создание модели капли с характерными областями растекания. Поэтому в среде Mathcad разрабатывались две программы соответствующих данным условиям. Далее рассмотрим более подробно каждую из них.

На рис. 3 представлена схема, на которой изображена моделируемая капля в сечении xz , и отмечены параметры, используемые при расчетах. Ось x играет роль пластины, на которой располагается моделируемая капля.

При моделировании были приняты следующие допущения: прозрачная капля, которая представляет собой часть сферы (на рис. 3 капля выделена серым цветом), располагается на прозрачной пластине (ось x), на каплю перпендикулярно оси x падает параллельный пучок

света, проходя через нее, он преломляется и попадает на экран. Входными данными для разработанной программы являются следующие параметры: высота капли S , диаметр рассматриваемой капли d , коэффициент преломления жидкости n и расстояние до камеры a , а так же фоновый экран со своими характеристиками, которые обуславливают величину b .

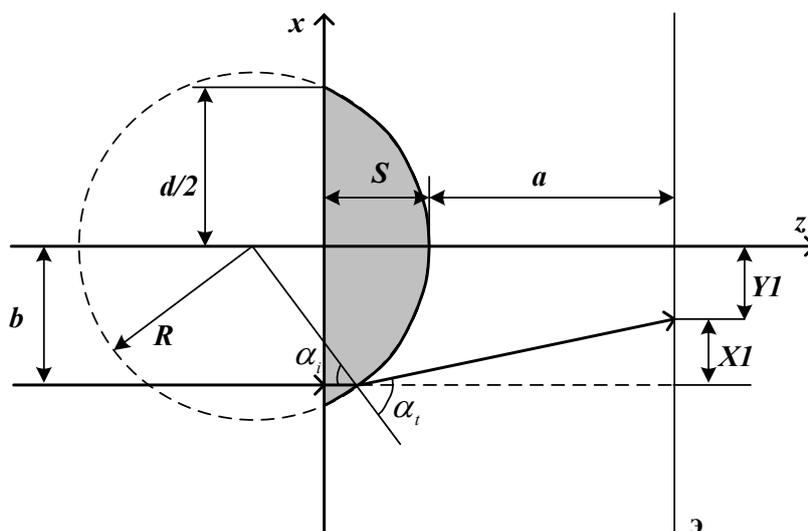


Рис. 3. Схема прохождения света через каплю, используемая в расчетах

На рис. 4 показано рабочее окно разработанной программы.

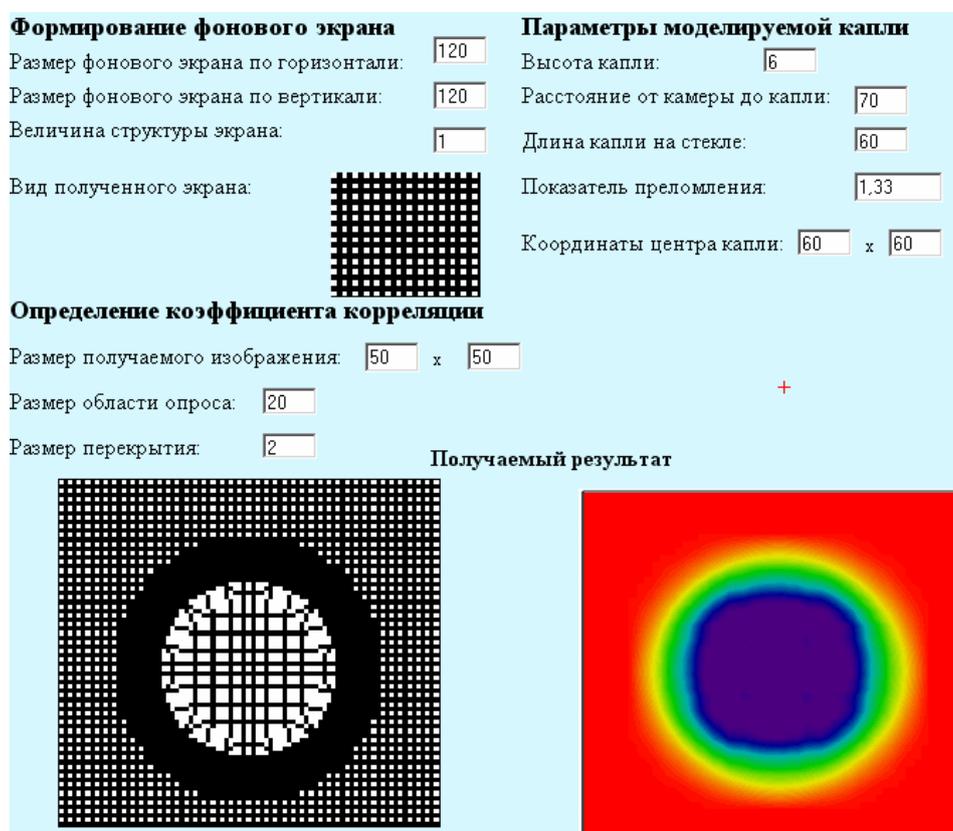


Рис.4. Пример работы разработанной программы SherMod

На рис. 5 показана схема, на которой изображена моделируемая капля, которая отличается от капли описываемой ранее наличием области растекания. Форма области растекания в выбранном приближении представляет собой окружность.

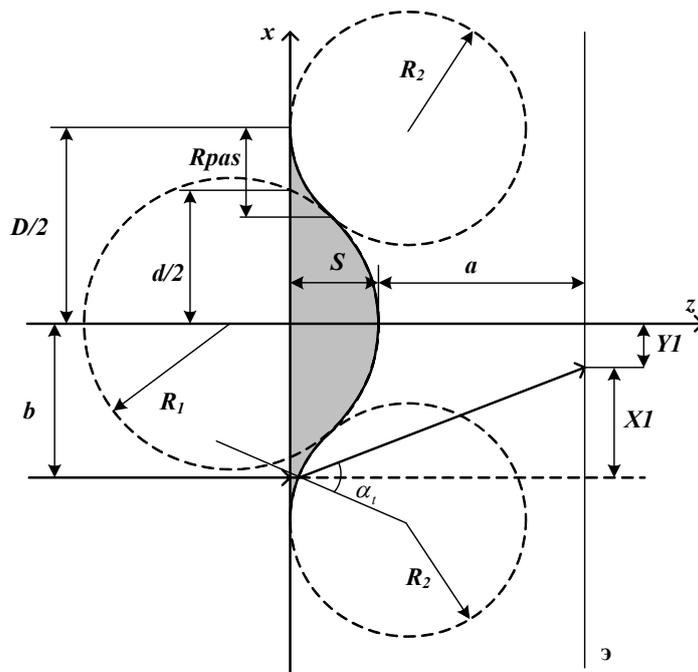


Рис. 5. Схема прохождения света через каплю с растеканием

На рис. 5 показаны обозначения, применяемые в расчетах. Входными данными для разработанной программы являются следующие параметры: высота капли S , полная длина рассматриваемой капли D , коэффициент преломления жидкости n , расстояние от капли до камеры a , длина растекшейся части капли R_{pas} , радиус окружности характеризующей растекание R_2 и длина капли без растекания d , а так же фоновый экран со своими характеристиками, которые обуславливают величину b .

На рис. 6 приведен пример работы разработанной программы LamMod.

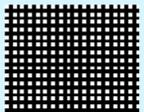
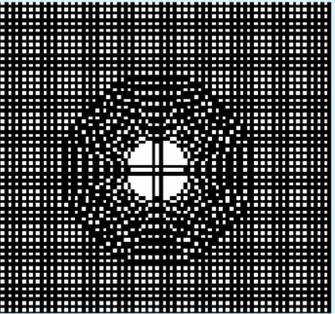
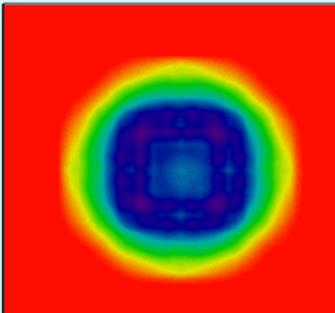
Формирование фонового экрана		Параметры моделируемой капли	
Размер фонового экрана по горизонтали:	<input type="text" value="120"/>	Высота капли:	<input type="text" value="5"/>
Размер фонового экрана по вертикали:	<input type="text" value="120"/>	Расстояние от камеры до капли:	<input type="text" value="50"/>
Величина структуры экрана:	<input type="text" value="1"/>	Длина капли:	<input type="text" value="40"/>
Вид полученного экрана:		Показатель преломления:	<input type="text" value="1,33"/>
Определение коэффициента корреляции		Координаты центра капли:	<input type="text" value="60"/> x <input type="text" value="60"/>
Размер получаемого изображения:	<input type="text" value="50"/> x <input type="text" value="50"/>	Длина растекшейся части:	<input type="text" value="16"/>
Размер области опроса:	<input type="text" value="18"/>	Радиус окружности:	<input type="text" value="43"/>
Размер перекрытия:	<input type="text" value="2"/>	Длина всей капли:	<input type="text" value="60"/>
Получаемый результат			
			

Рис. 6. Пример работы разработанной программы LamMod

Покажем примеры работы программ для капель, имеющих различную геометрию. На рис. 7 показан трехмерный вид капли, которую необходимо смоделировать, в данном случае она представляет собой часть полусферы.

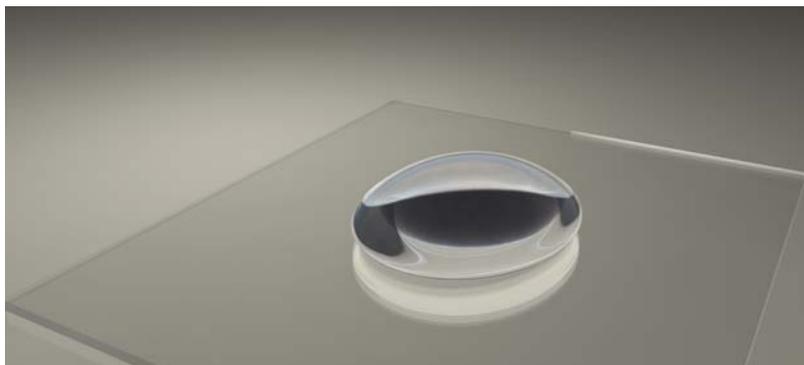


Рис. 7. Трехмерный вид капли

Изображение капли жидкости при различных показателях преломления на фоне структурированного экрана показано на рис. 8. Параметры моделируемой капли были следующие: высота капли на стекле 24 пикселя, длина капли на стекле 60 пикселей, расстояние до камеры 50 пикселей.

На рис. 8 наглядно видно, что смещение луча проходящего через каплю зависит от расстояния его падения относительно центра капли. Т.е. в центре капли на оптической оси смещение равно 0, а при движении к краям капли смещение луча относительно первоначального положения увеличивается (черный цвет на краях капли соответствует тому, что точка экрана в этой части сместилась на расстояние XI большее, чем точка расположенная ближе к центру).

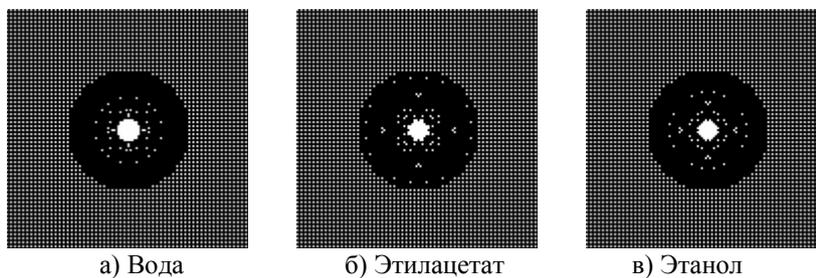


Рис. 8. Смоделированные изображения

Показатель преломления жидкости также влияет на величину отклонения лучей при прохождении через каплю. Так для воды, которой соответствует наименьший показатель преломления (1,33) из всех выбранных жидкостей (этанол – 1,36, этилацетат – 1,37), характерно наименьшее отклонение лучей, что и видно на рис. 8. На рис. 9 представлено расположение линий уровня соответствующих распределению углов отклонения лучей на выходе из капли воды, для наглядности изображения выбрано малое количество уровней.

По изображенным на рис. 9 линиям уровня видно, что углы отклонения на выходе из капли увеличиваются при движении к ее краям, наименьший угол отклонения составляет порядка 10° , а наибольший порядка 70° , для выбранного числа линий уровня.

Далее после обработки кросскорреляционным методом смоделированных изображений получены изображения, показанные на рис 10, а на рис. 11 по рассчитанным коэффициентам корреляции восстановлена форма капли.

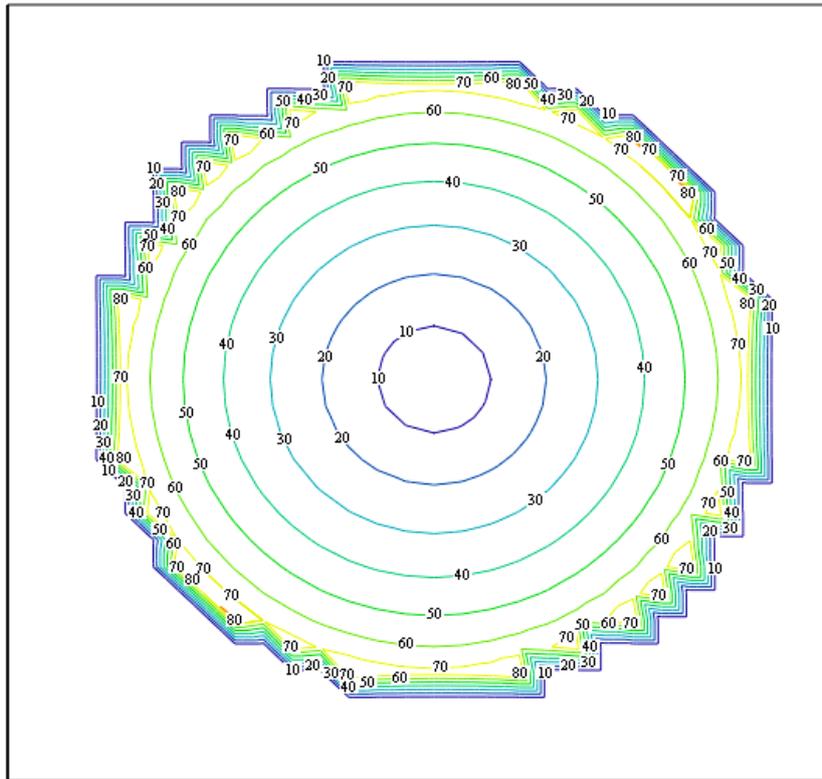


Рис. 9. Распределение углов отклонения луча для капли воды, в градусах

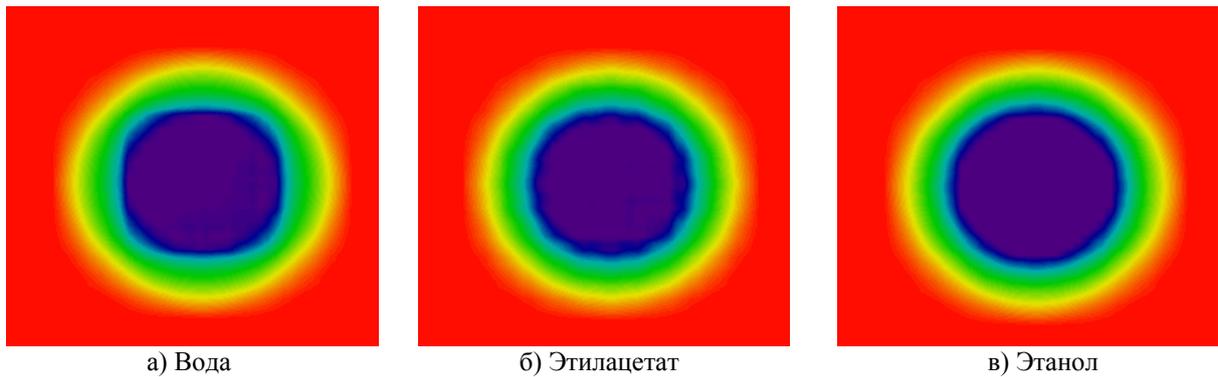


Рис. 10. Результат обработки смоделированных изображений

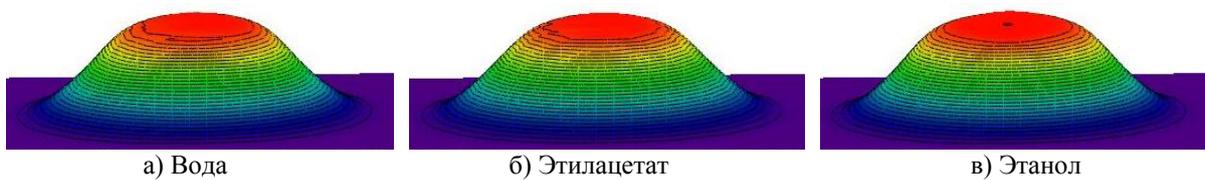


Рис.11. Трехмерный вид смоделированной капли

При рассмотрении изображений показанных на рис. 10 и 11 стоит заметить, что для рис. 10, где цветом отмечены рассчитанные коэффициенты корреляции, красный цвет соответствует значению коэффициента корреляции равному 1, а синий цвет соответствует 0. А на рис. 11 цветом обозначается высота получаемого распределения, здесь красный цвет, наоборот, соответствует максимальному значению, а синий – минимальному.

Рассмотрим нормированные поперечные сечения смоделированной капли в центральной части для различных показателей преломления, показанные на рис. 12.

На графиках рис. 12 кругом обозначены данные, рассчитанные по полученным изображениям, а сплошной линией – аппроксимирующая кривая. Как видно из полученных

распределений, для всех жидкостей характерно наличие области параллельной плоскости, на которой располагается капля.

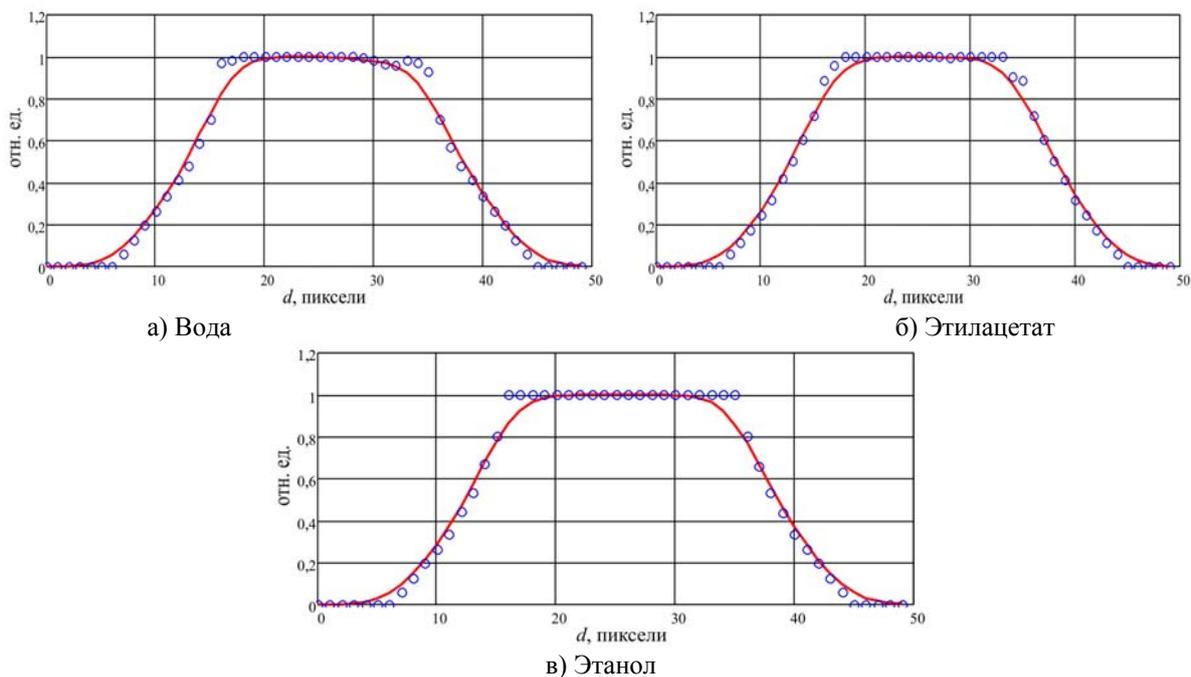
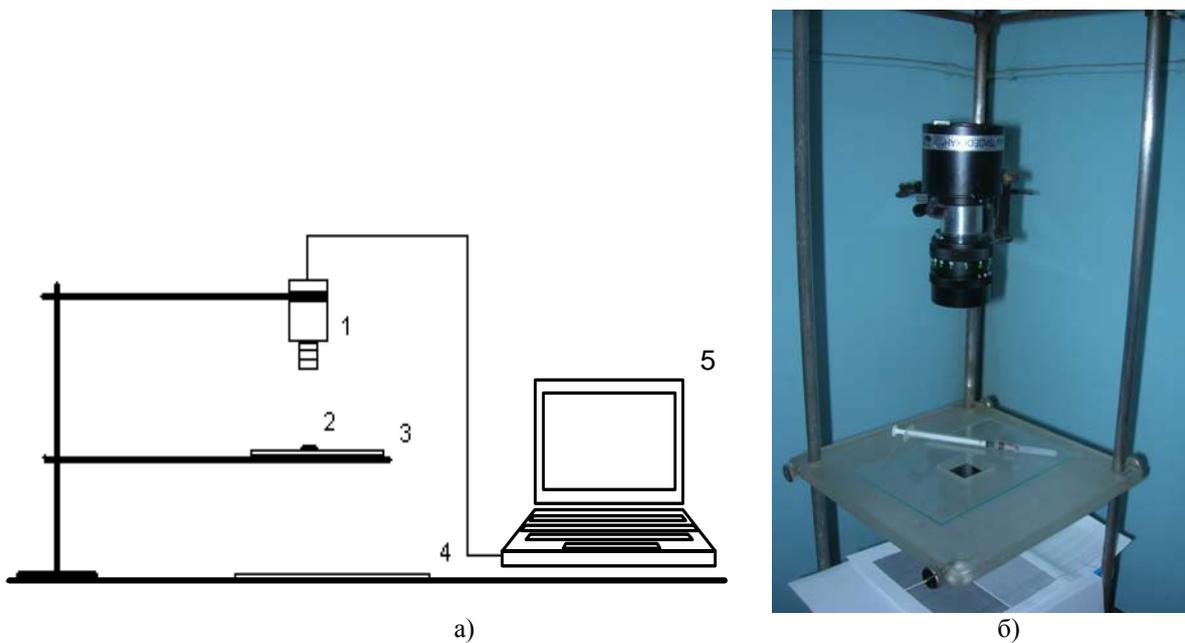


Рис. 12. Поперечное сечение смоделированной капли в центре

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения изображений капли жидкости теньвым фоновым методом была модернизирована экспериментальная установка. Вид установки показан на рис. 13а, она состоит из видеокамеры (1), капли жидкости (2) в качестве исследуемого объекта, стеклянной пластины (3), структурированного экрана (4) и персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (5).



а) – схема установки; б) – фотография установки

Рис. 13. Схема установки

Исследуемая капля жидкости помещается на стеклянной пластине с помощью шприца, экран располагается под каплей. Фокус камеры настраивается на экран, до нанесения капли.

При проведении эксперимента необходимо соблюдать параллельность фонового экрана, пластины с каплей и камеры. В ходе эксперимента получают изображения искаженного фонового экрана, вызванные наличием испаряющейся капли. На рис. 13б представлена фотография установки, на которой проводились эксперименты

В качестве исследуемых веществ были выбраны следующие жидкости: этанол, вода и этилацетат.

После обработки изображений, представленных на рис. 14 кросскорреляционным методом, были получены картины распределения коэффициента корреляции (рис. 15), на которых наглядно видна испаряющаяся капля воды. Так как в теновом фоновом методе используются два изображения фонового экрана, то вокруг капли и ее испаряющейся части экран не искажается, а остается постоянным, что и видно на полученных изображениях (равномерный красный цвет в качестве фона на рис. 15, соответствующий коэффициенту корреляции равному 1).

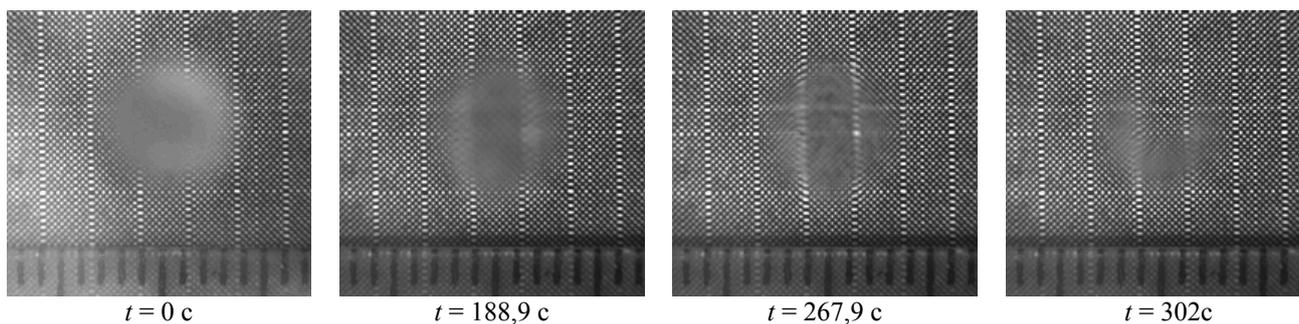


Рис. 14. Изображения испаряющейся капли воды на фоне экрана в различные моменты времени

Капля считается полностью испарившейся, если после обработки кросскорреляционным методом экспериментального изображения, соответствующего определенному моменту времени, получается равномерно покрашенное изображение (коэффициент корреляции равен 1), как на рис. 15 для времени $t = 358 \text{ c}$.

На рис. 15 представлена капля воды в различные моменты времени, на ее краях видно изменение цвета, что соответствует изменению коэффициента корреляции, и наличие градиента преломления среды. В центре этой же капли наблюдаются фиолетово-синие участки, что соответствует наименьшему коэффициенту корреляции. Таким образом, с помощью ТФМ была проведена визуализация испарения микролитровой капли воды, и по изображениям на рис. 15 можно проследить изменения, которые происходят в этой капле в различные моменты времени.

На рис. 14 наглядно видно смещение точек экрана при испарении капли, что и отображается на обработанных изображениях (рис. 15). По полученным изображениям испаряющейся капли воды можно выделить несколько характерных особенностей. После растекания по поверхности стекла исследуемой капли, в ней происходит перераспределение жидкости, что соответствует изменению цвета и формы капли на изображениях, полученных после обработки. Испарение происходит со всей поверхности капли, этот процесс наглядно виден на участках с наименьшей толщиной пленки воды, т.е. на краях капли, здесь коэффициент корреляции меняется от 0,4 до 1, что соответствует изменению цвета на полученных после обработки изображениях.

Далее рассмотрим форму капли, восстановленную по рассчитанным коэффициентам корреляции для нескольких моментов времени (все изображения представлены для капли, изображенной на рис. 15). Как уже говорилось ранее, самая высокая точка капли соответствует наименьшему коэффициенту корреляции, по этому принципу определяется форма рассматриваемой капли.

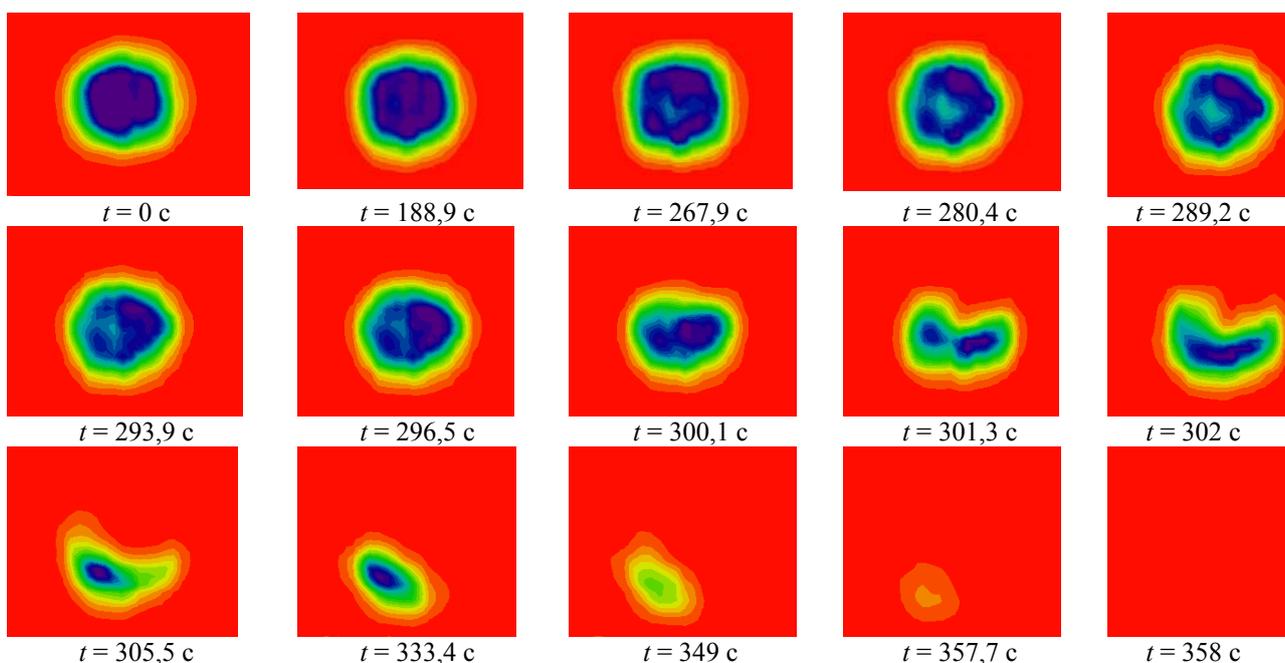
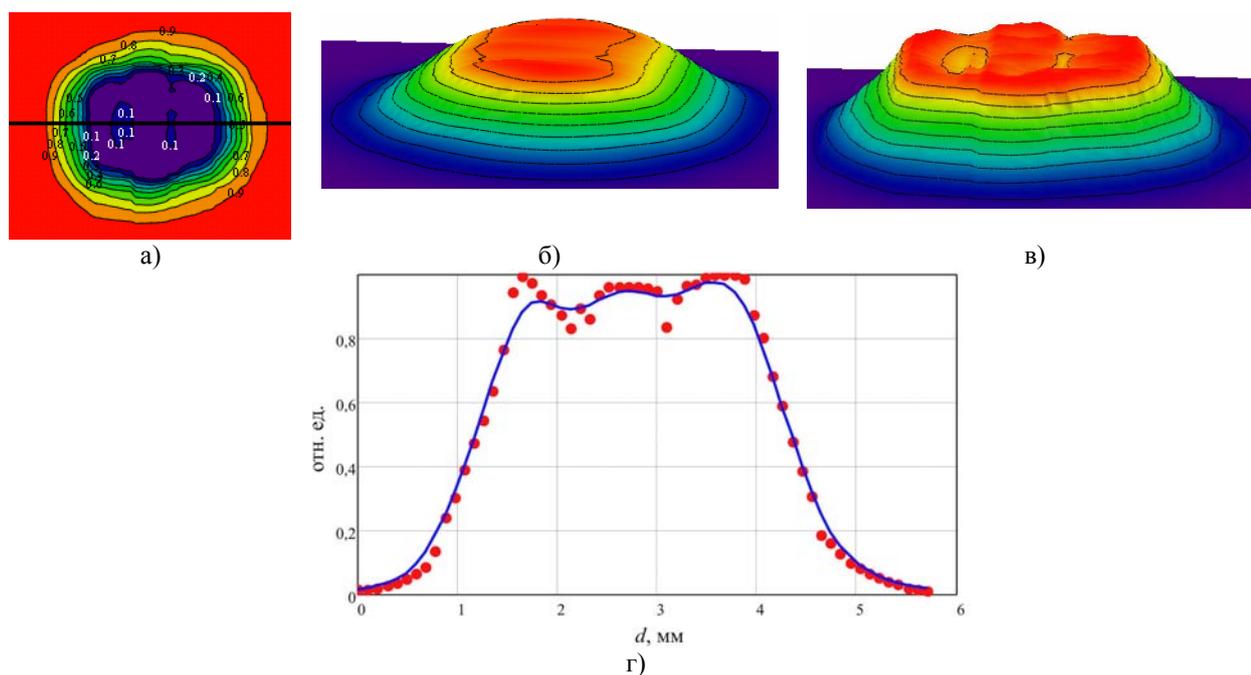


Рис. 15. Обработка данных кросскорреляционным методом в различные моменты времени

На рис. 16 представлен трехмерный вид капли в момент времени $t = 188,9$ с и профиль этой капли по уровню указанному на рис. 16а.



а) – капля после обработки кросскорреляционным методом, с нанесенным уровнем и значениями коэффициента корреляции; б) – трехмерный вид капли с применением сглаживания; в) – трехмерный вид капли без применения сглаживания; г) – профиль капли в указанном сечении

Рис. 16. Профиль капли воды для времени $t = 188,9$ с

При рассмотрении изображений, показанных на рис. 16, стоит заметить, что для изображения 16а, где цветом отмечены рассчитанные коэффициенты корреляции, красный цвет соответствует значению коэффициента корреляции равному 1, а фиолетовый цвет соответствует 0. А на изображениях 16б, 16в цветом обозначается высота получаемого распределения, здесь красный цвет, наоборот, соответствует максимальному значению, а

синий – минимальному. Такое соответствие цветов применяется и для остальных изображений представленных ниже для других жидкостей. На рис. 16г представлено нормированное распределение высоты капли в заданном сечении. Здесь точками обозначены экспериментально полученные результаты, а сплошной линией – сглаженная кривая. Из полученного изображения можно сделать вывод о том, что имеет место небольшое растекание жидкости.

По полученным экспериментальным изображениям построен график зависимости диаметра капли воды от времени испарения (рис. 17), на котором можно выделить несколько областей: область от $t = 8$ с до $t = 250$ с, где диаметр капли меняется незначительно, а при обработке изображений соответствующих этому промежутку времени наблюдаются изменения внутри капли и промежуток времени от $t = 250$ с до $t = 360$ с где наблюдается уменьшение диаметра капли до полного ее испарения.

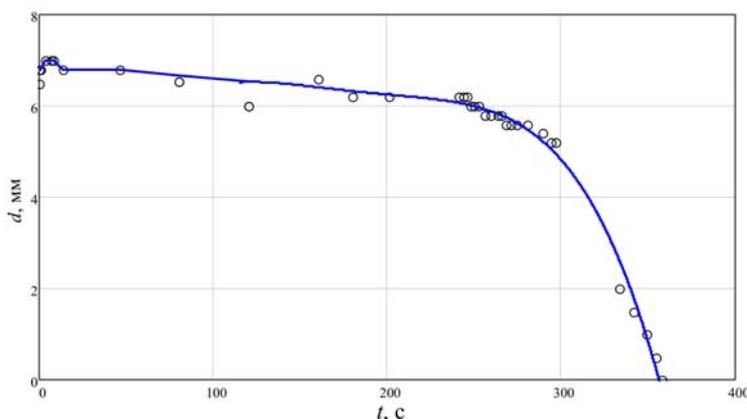


Рис. 17 – График зависимости диаметра капли воды от времени испарения

Такое большое время испарения рассматриваемой капли воды можно отнести к тому, что изначальный объем капли составлял 0,1 мл. А так как вода обладает большим поверхностным натяжением по сравнению с остальными выбранными жидкостями $\sigma_{\text{в}} = 72,75$ Н/м, то под его воздействием капля воды стремится принять сферическую форму, поэтому площадь контакта со стеклом уменьшается по сравнению с площадью контакта поверхности капли с воздухом, и испарение происходит дольше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны алгоритмы программ моделирования прохождения лучей света через прозрачную каплю жидкости, расположенную на твердой поверхности для ее различных геометрических форм – сфера отсеченная плоскостью и часть сферы с характерными областями растекания. Результатом работы этих программ является изображение структурированного экрана со смещенными элементами. Результат работы программы максимально приближает изображения, получаемые экспериментальным путем.

Представлены изображения фонового экрана, полученного экспериментальным путем, для капель воды, этанола и этилацетата и полученные изображения после их обработки кросскорреляционным методом. На основе полученных распределений коэффициентов корреляции была восстановлена форма капли для рассматриваемых жидкостей в различные моменты времени и построено поперечное сечение капли, которое строится так же по полученным коэффициентам корреляции, и соответствует физическим характеристикам капель малого объема расположенным на твердой поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-08-00936-а и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (ГК № 02.740.11.0449).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ринкевичюс Б.С.** Лазерная диагностика потоков. – М.: Издательство МЭИ, 1990. 287 с.
2. **Белозеров А.Ф.** Оптические методы визуализации газовых потоков. – Казань, 2007.
3. **Richard H., Raffel M., Rein M. and etc.** Demonstration of the applicability of a Background Oriented Schlieren (BOS) method // Proc. of the 10th int. symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon. Springer, Berlin: Heidelberg: New York: 2000.
4. **Meier G.E.A.** Computerized background-oriented schlieren // Experiments in Fluids. 33. 2002. P. 181 – 187.

N.M. Skornyakova

*Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: nmskorn@mail.ru*

BACKGROUND ORIENTED SHCLIEREN VISUALIZATION OF LIQUID EVAPORATION FROM A FIRM SURFACE

The opportunity of research of a liquid evaporation processes from a firm surface is considered by a background oriented shclieren method. Results of computer modelling and experimental researches for a liquid drops of various substances are presented.

**EVAPORATION OF THE LIQUID, OPTICAL METHODS, BACKGROUND ORIENTED
SHCLIEREN METHOD**