

Наталья Анатольевна ИВАНОВА<sup>1</sup>  
Александр Юрьевич МАЛЮК<sup>2</sup>

УДК 536.3; 532.6

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОЙ КОНВЕКЦИИ В СИДЯЧЕЙ КАПЛЕ ЖИДКОСТИ, ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ\***

<sup>1</sup> кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры прикладной и технической физики,  
заведующий лабораторией фотоники и микрофлюидики,  
Тюменский государственный университет  
n.ivanova@utmn.ru

<sup>2</sup> аспирант кафедры прикладной и технической физики,  
младший научный сотрудник лаборатории фотоники и микрофлюидики,  
Тюменский государственный университет  
a.malyuk@utmn.ru

#### **Аннотация**

Приведены результаты численного исследования термокапиллярной конвекции, вызванной локальным тепловым потоком в сидячей капле малолетучей жидкости с неподвижной линией трехфазного контакта. Источником теплового потока служит поглощаемое жидкостью лазерное излучение. В исследовании рассмотрены сидячие капли бензилового спирта и этиленгликоля объемом 0,6 мкл при диапазоне мощности теплового потока от 2 до 85 мВт. В результате численного исследования получены поле скоростей и поле температур в жидкости и газовой фазе при термокапиллярной конвекции. Исследована эволюция профиля сидячей капли жидкости при термокапиллярной деформации. Получены зависимости фокусного расстояния преломляющей

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-31-00231).

---

**Цитирование:** Иванова Н. А. Моделирование термокапиллярной конвекции в сидячей капле жидкости, индуцированной лазерным пучком / Н. А. Иванова, А. Ю. Малюк // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 2. С. 160-174.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-160-174

поверхности сидячей капли от мощности теплового потока. Проведен сравнительный анализ численных и экспериментальных данных фокусного расстояния, который показал хорошую корреляцию между численной моделью и экспериментом.

#### **Ключевые слова**

Термокапиллярная конвекция, сидячая капля, жидкая линза, тепловой поток, кривизна поверхности, численное моделирование, лазерное излучение.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-160-174**

#### **Введение**

На сегодняшний день присутствует четко выраженная тенденция миниатюризации оптических систем устройств для применения их в новых областях и приборах, в связи с чем возникают проблемы сохранения качества и функциональности таких устройств. Решить данную проблему позволяют оптические элементы на основе жидкости.

В основе работы существующих прототипов жидких варифокальных линз использованы самые разнообразные физические и химические эффекты. Среди физических эффектов наиболее широкое применение находят электрические (электросмачивание [2], диэлектрофорез [3]), механические (контроль ламинарных потоков [17], давления на гибкую мембрану [7], гидростатического давления [16]), акустические [10]. К линзам, использующим химические эффекты, можно отнести линзы на основе электро-ПАВ [11] и гидрогелей [5]. Что касается жидких линз на основе термических эффектов, то до недавнего времени они были представлены прототипами на основе термогелей [5] и тепловыми линзами [19]. Недавно было предложено использовать конвекцию Марангони в микрообъемах жидкости для разработки жидкостных линз [12, 13].

Термокапиллярная конвекция в слое жидкости в целом хорошо изучена и многократно была смоделирована [1, 6, 14, 15]. Значительно менее изученной представляется термокапиллярная конвекция в ограниченных объемах жидкости и связанная с этим деформация межфазной границы «жидкость — газ». Среди немногочисленных работ представлены: модель термокапиллярных потоков в сидячей капле жидкости на паттернированной неравномерно нагретой подложке [8], модель движения наночастиц, вызванного лазерным облучением капли суспензии на подложке [4], изменение поверхности капли при испарении за счет перепада температуры поверхности [18] и эффект Марангони в сидячей капле бинарного раствора при испарении одной из компонент [9]. Что же касается моделирования термокапиллярной конвекции и деформации свободной поверхности сидячей капли жидкости, вызванной локальным источником теплового потока в виде лазерного излучения, то работ по данной теме на сегодня нет. Ввиду появления жидких линз на основе лазерно-индуцированного термокапиллярного эффекта в сидячей капле, становится актуальной проблема изучения деформации преломляющей поверхности капли жидкости в данных условиях

с целью подбора оптимальных геометрических параметров капли, свойств рабочей жидкости, мощности теплового потока.

В данной работе приведены результаты численного моделирования термокапиллярной деформации межфазной границы «жидкость — газ» в сидячей капле жидкости с неподвижной линией трехфазного контакта, где термокапиллярная деформация вызвана локальным источником теплового потока в виде поглощения лазерного излучения.

### Постановка задачи и метод решения

На рис. 1 представлена схема задачи. Капля малолетучей жидкости, поглощающей лазерное излучение, помещена в открытую ячейку, которая представляет собой сосуд, выполненный из полиметилметакрилата (PMMA) и силикатного стекла, и окружена воздухом. Гауссов пучок направляется вертикально снизу. Геометрическая форма капли рассматривается как сегмент сферы радиусом  $R$ , который равен радиусу кривизны поверхности капли. Задача реализована в программном пакете COMSOL Multiphysics методом конечных элементов.

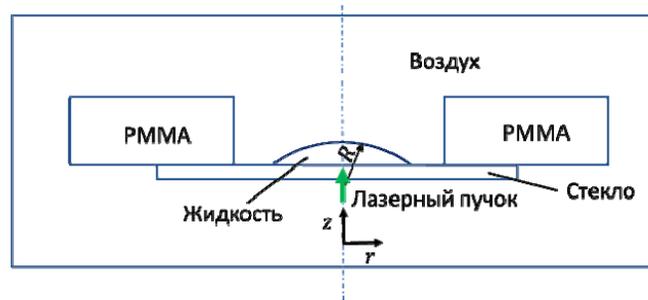


Рис. 1. Постановка задачи

Fig. 1. Statement of the problem

Основная система уравнений состоит из уравнения Навье — Стокса и уравнения непрерывности, которые определяют поле скоростей в жидкой и газовой фазах:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}, \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  и  $\mu$  — плотность и вязкость соответственно;  $\mathbf{u}$  и  $p$  — скорость и давление соответственно;  $I$  — тензор нормальных напряжений;  $\mathbf{F}$  — объемные силы;  $t$  — время. Также в основную систему включены уравнение теплового баланса и уравнение Фурье, определяющие поля температур в газе, жидкости и твердом теле:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}, \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T, \quad (4)$$

где  $C_p$  — изобарная теплоемкость;  $T$  — температура;  $\mathbf{q}$  — плотность теплового потока;  $Q$ ,  $Q_p$  и  $Q_{vd}$  — энергия источника теплового потока, работа давления и энергия вязкой диссипации соответственно;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности. Для определения поля температур в твердой фазе используется уравнение теплового баланса вида:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ied}, \quad (5)$$

где  $Q_{ied}$  — энергия термоупругого рассеяния.

Замыкающие уравнения включают закон изменения поверхностного натяжения от температуры:

$$\gamma(T) = \gamma_0 + \gamma_T (T - T_0), \quad (6)$$

где  $\gamma_T$  — температурный коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Интенсивность источника тепла, возникающего в объеме жидкости при поглощении лазерного излучения:

$$Q = \sum \kappa I_i, \quad (7)$$

где  $I_i$  — интенсивность лазерного излучения;  $\kappa$  — коэффициент поглощения излучения согласно закону Бугера — Ламберта — Бера. Интенсивность лазерного излучения задается гауссовым распределением:

$$I_i(r) = \frac{P_0}{2\pi r_b^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2r_b^2}\right), \quad (8)$$

где  $P_0$  — мощность лазерного излучения;  $r_b$  — радиус лазерного луча.

Начальные условия для системы уравнений (1)-(5) в газовой фазе:

$$\begin{aligned} t = 0: \mathbf{u}(r, z, 0) = \mathbf{u}_0 = 0, \quad p_a(r, z, 0) = p_0 = 101 \text{ kPa}, \\ T(r, z, 0) = T_0 = 298 \text{ K}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $p_a$  — атмосферное давление. Начальные условия для фазы жидкости:

$$\begin{aligned} t = 0: \mathbf{u}(r, z, 0) = \mathbf{u}_0 = 0, \quad p_{жс}(r, z, 0) = p_0 + p_{\kappa} + p_{zc}, \\ T(r, z, 0) = T_0 = 298 \text{ K}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $p_{\kappa}$  и  $p_{zc}$  — капиллярное и гидростатическое давление соответственно.

Граничные условия на межфазных границах следующие. На границе «жидкость — стекло»:

$$\mathbf{u}_{жс} = \mathbf{u}_0 = 0, \quad \begin{cases} T_{ст} = T_{жс}, \\ \lambda_{ст} \frac{\partial T_{ст}}{\partial l_{ст-жс}} = \lambda_{жс} \frac{\partial T_{жс}}{\partial l_{ст-жс}}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\mathbf{u}_{жс}$  — скорость жидкости;  $T_{ст}$  и  $T_{жс}$  — температура стекла и температура жидкости на границе соответственно;  $\lambda_{ст}$  и  $\lambda_{жс}$  — коэффициент теплопроводности

стекла и жидкости соответственно;  $l_{ст-жс}$  — длина межфазной границы «жидкость — стекло». На границе «жидкость — воздух» граничное условие имеет вид условия прилипания и включает в себя уравнения баланса сил:

$$\mathbf{u}_g = \mathbf{u}_{жс}, \quad \mathbf{n}_{жс} \cdot \boldsymbol{\tau}_{жс} - \mathbf{n}_g \cdot \boldsymbol{\tau}_g = \gamma (\nabla_t \cdot \mathbf{n}_{жс}) \mathbf{n}_{жс} - \nabla_t \gamma, \quad \begin{cases} T_g = T_{жс}, \\ \alpha_g (T_g - T_0) = \lambda_{жс} \frac{\partial T_{жс}}{\partial l_{г-жс}}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\mathbf{u}_g$  — скорость воздуха на границе «жидкость — воздух»;  $\mathbf{n}_{жс}$  и  $\mathbf{n}_g$  — векторы нормали для жидкой фазы и воздуха соответственно;  $\boldsymbol{\tau}_{жс}$  и  $\boldsymbol{\tau}_g$  — тензоры вязких напряжений для жидкой фазы и воздуха соответственно;  $\gamma$  — поверхностное натяжение жидкости;  $T_g$  и  $\alpha_g$  — температура и коэффициент теплоотдачи воздуха соответственно;  $l_{г-жс}$  — длина межфазной границы «жидкость — воздух». На границе «стекло — воздух»:

$$\mathbf{u}_g = \mathbf{u}_0 = 0, \quad \begin{cases} T_g = T_{ст}, \\ \alpha_g (T_g - T_0) = \lambda_{ст} \frac{\partial T_{ст}}{\partial l_{г-ст}}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $l_{г-ст}$  — длина межфазной границы «воздух — стекло». На границе «воздух — ПММА»:

$$\mathbf{u}_g = \mathbf{u}_0 = 0, \quad \begin{cases} T_g = T_n, \\ \alpha_g (T_g - T_0) = \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial l_{г-n}}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $T_n$  и  $\lambda_n$  — температура и коэффициент теплопроводности в ПММА соответственно;  $l_{г-n}$  — длина межфазной границы «воздух — ПММА». На границе «стекло — ПММА» система уравнений сводится к двум — (4) и (5), а граничные условия в таком случае:

$$\begin{cases} T_{ст} = T_n, \\ \lambda_{ст} \frac{\partial T_{ст}}{\partial l_{ст-n}} = \lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial l_{ст-n}}, \end{cases} \quad (15)$$

где  $l_{ст-n}$  — длина межфазной границы «стекло — ПММА». На нижней горизонтальной и боковой вертикальной границах области моделирования граничные условия имеют вид соответственно:

$$z = 0, \quad 0 < r < r_b : \mathbf{u}_g = \mathbf{u}_0 = 0, \quad \begin{cases} T_g = T_0, \text{ если } \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_g < 0, \\ -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0, \text{ если } \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_g \geq 0, \end{cases} \quad (16)$$

$$r = r_b, \quad 0 < z < z_l : \mathbf{u}_g = \mathbf{u}_0 = 0, \quad \begin{cases} T_g = T_0, \text{ если } \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_g < 0, \\ -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0, \text{ если } \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_g \geq 0, \end{cases} \quad (17)$$

где  $r_b$  и  $z_t$  — ширина и высота области моделирования соответственно. Верхняя граница модели является открытой:

$$z = z_t, 0 < r < r_b : \left[ -p_e I + \mu_e (\nabla \mathbf{u}_e + (\nabla \mathbf{u}_e)^T) \right] \mathbf{n} = 0, \quad \begin{cases} T_e = T_0, & \text{если } \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} < 0, \\ -\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0, & \text{если } \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \geq 0, \end{cases} \quad (18)$$

где  $p_e$  и  $\mu_e$  — давление и вязкость воздуха.

В качестве источника теплового потока использовался твердотельный лазер АТС-53-250 с длиной волны 532 нм и радиусом пучка  $r_b = 0,4$  мм. В качестве жидкости использовались бензиловый спирт и этиленгликоль с характеристиками, представленными в таблице 1. Для поглощения лазерного излучения жидкости были в равной мере окрашены кристаллическим фиолетовым красителем. Коэффициент поглощения составлял  $\kappa \approx 23\,000 \text{ м}^{-1}$ . Мощность лазерного пучка измерялась датчиком OPHIR 2A-SH. Данные температуры были получены с помощью тепловизора FLIR A655sc. Фокусное расстояние оценивалось с помощью микроскопа Carl Zeiss Stemi 508.

Таблица 1

Основные характеристики жидкостей при температуре 298 К

Table 1

Main parameters of liquids at the temperature of 298 K

Жидкость	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\mu$ , Па · с	$\gamma$ , мН/м	$\gamma_T$ , мН/(м · К)	$\lambda$ , Вт/(м · К)
Бензиловый спирт	1041,1	$5,474 \cdot 10^{-3}$	38,5	-0,094	0,160
Этиленгликоль	1113,5	$16,1 \cdot 10^{-3}$	47,99	-0,078	0,258

### Результаты и обсуждения

Представленная модель решена численно в цилиндрической системе координат с учетом следующих упрощающих предположений. Не учитывается массоперенос жидкости через межфазную границу «жидкость — газ», т. к. в эксперименте использовались малолетучие жидкости, максимальная температура которых достигала 358 К при температурах кипения выше 470 К. Также в задаче не учтено изменение плотности жидкости от температуры, т. к. в условиях реального эксперимента диапазон температур жидкости  $\Delta T \leq 60$  °С, и плотность изменяется незначительно. Соответственно, изменения геометрических параметров сидячей капли за счет термического расширения малы, что позволяет пренебречь изменением плотности в данном интервале температур.

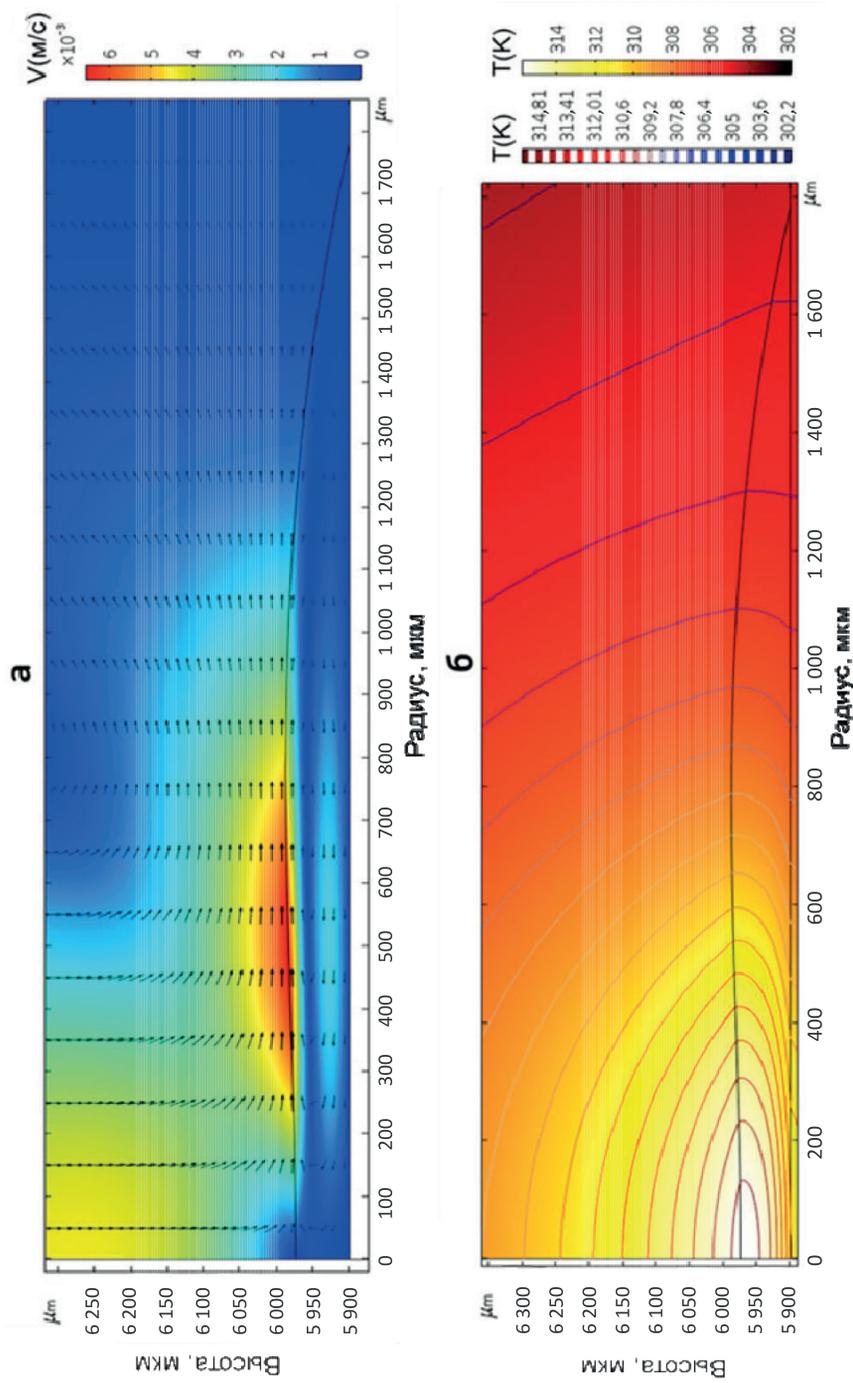


Fig. 2. Velocity field (а) and temperature field (б) in the drop of benzyl alcohol

Рис. 2. Поле скоростей (а) и поле температур (б) в капле бензилового спирта

На рис. 2 представлены поле скоростей и поле температур в капле бензилового спирта объемом 0,6 мкл при мощности теплового потока 34 мВт через 30 с после включения лазера (время установки квазиравновесного состояния системы). На рис. 2а стрелками указано направление тока жидкости, по которому четко просматривается наличие конвективно-капиллярных течений внутри капли. Возле поверхности капли течение имеет центробежное направление, что соответствует градиенту поверхностного натяжения и приводит к прогибу поверхности в центре капли. Над каплей за счет вязких сил на границе «жидкость — воздух» формируются конвективные вихревые потоки воздуха. На рис. 2б линиями обозначены изотермы, которые указывают на максимум температуры в центре под поверхностью капли при основном поглощении излучения придонными слоями жидкости, что говорит о смещении температурного эпицентра конвективными потоками жидкости. Перепад температур между центром и кромкой капли составляет 7-8 К, что совпадает с данными эксперимента, представленными в виде зависимости градиента температуры от мощности теплового потока на рис. 3. Также видно, что для всего диапазона мощности теплового потока между данными экспериментальных измерений и результатами численного эксперимента наблюдается хорошая корреляция.

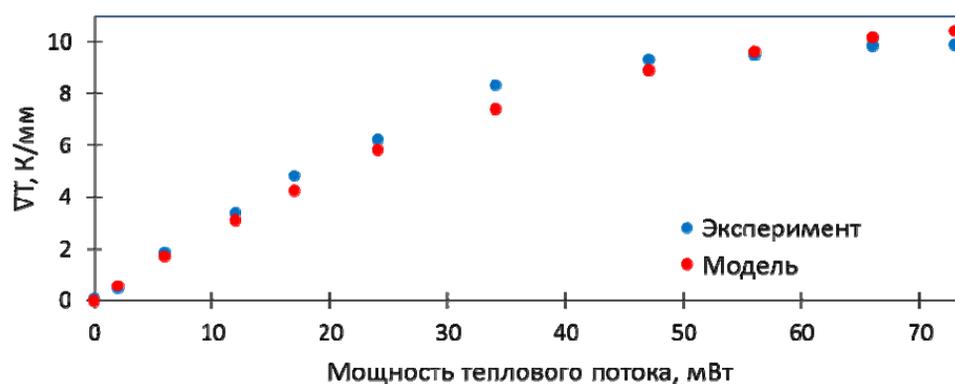


Рис. 3. График зависимости градиента температуры на поверхности капли от мощности теплового потока

Fig. 3. The graph of temperature gradient on the drop surface as a function of heat flux

Эволюция формы поверхности сидячей капли бензилового спирта при 34 мВт мощности теплового потока представлена на рис. 4а, который отображает изменение формы на протяжении первых 10 с после включения лазера. Наиболее значительное изменение формы поверхности происходит в первую секунду облучения, что согласуется с данными экспериментальных измерений. Рис. 4б отображает модель поверхности капли при различных мощностях теплового потока при достигнутом квазиравновесном состоянии. Данная модель также качественно в полной мере соответствует результатам экспериментальных наблюдений.

На рис. 5 отображены зависимости формы поверхности капли, представленной через фокусное расстояние преломляющей поверхности, от мощности теплового потока для капель бензилового спирта и этиленгликоля объемом 0,6 мкл. Результаты экспериментальных измерений и численного моделирования хорошо согласуются между собой. Фокусное расстояние при моделировании капли бензилового спирта имеет тот же порядок величины, что и экспериментально измеренное. Исключением является зона критической мощности теплового потока, где поверхность капли принимает плоскую форму, а фокусное расстояние стремится к бесконечности, с чем связана большая погрешность измерений (рис. 5а). Капля этиленгликоля при том же интервале изменения мощности теплового потока имеет меньший диаметр основания и большую высоту, что приводит к меньшему градиенту температур на поверхности и меньшей деформации поверхности.

Как видно из рис. 5б, преломляющая поверхность капли этиленгликоля сохраняет большую кривизну и короткий фокус, что позволяет более точно оценить его величину. В результате видим различную как качественную, так и количественную корреляцию между результатами моделирования и эксперимента.

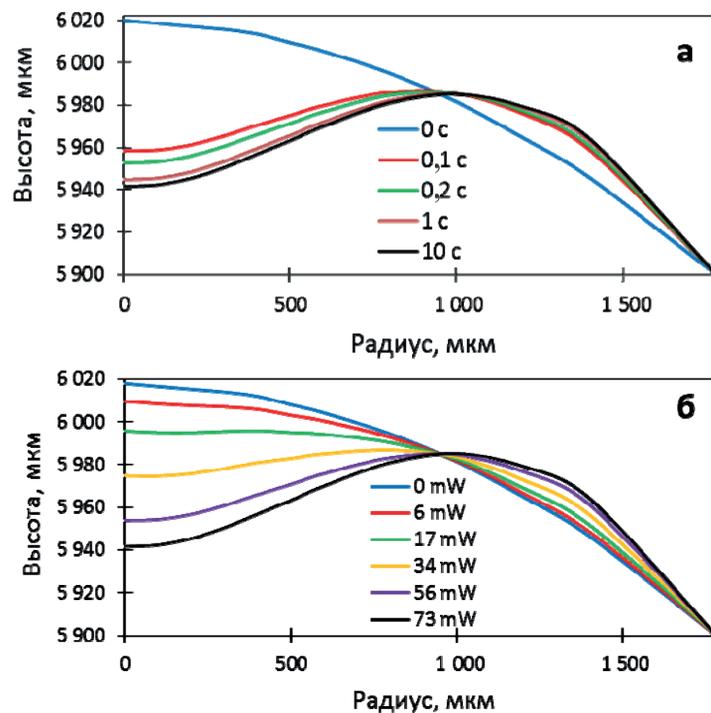


Рис. 4. Эволюция поверхности капли при 34 мВт мощности (а) и форма поверхности капли при различных мощностях (б)

Fig. 4. Evolution of the drop surface at 34 mW heat flux (a) and shape of the surface of drop at different heat fluxes (б)

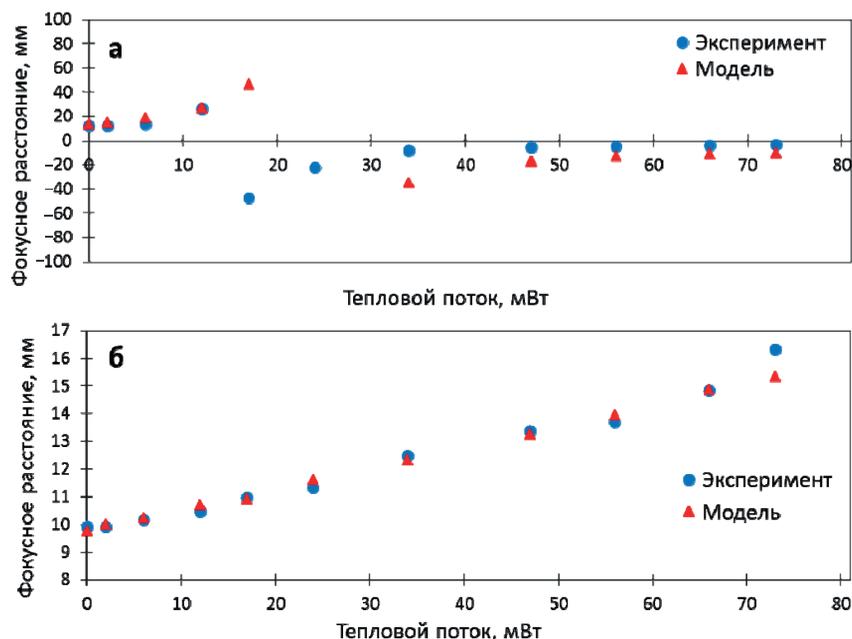


Рис. 5. Зависимость фокусного расстояния преломляющей поверхности капли бензилового спирта (а) и этиленгликоля (б) от мощности теплового потока

Fig. 5. The graph of the focal length of droplet refractive surface as a function of heat flux for benzyl alcohol (a) and ethylene glycol (b)

### Заключение

Впервые представлена модель термокапиллярной конвекции Марангони в сидячей капле малолетучей жидкости с неподвижной линией трехфазного контакта, где градиент температуры создан посредством локального потока за счет поглощения лазерного излучения. Данная модель позволяет достаточно точно определить форму свободной поверхности капли жидкости при термокапиллярной деформации, а также оценить кривизну и фокусное расстояние преломляющей поверхности в зависимости от мощности теплового потока при разработке оптических элементов на основе термокапиллярной конвекции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Визнюк С. А. О термокапиллярном самовоздействии лазерного излучения в тонких слоях поглощающей жидкости / С. А. Визнюк, А. Т. Суходольский // Квантовая электроника. 1988. Том 15. № 4. С. 767-770.

2. Berge B. Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting / B. Berge, J. Peseux // *The European Physical Journal E*. 2000. Vol. 3. № 2. Pp. 159-163. DOI: 10.1007/s101890070029
3. Cheng C.-C. Dielectrically actuated liquid lens / C.-C. Cheng, J. A. Yeh // *Optics Express*. 2007. Vol. 15. № 12. Pp. 7140-7145. DOI: 10.1364/OE.15.007140
4. Dietzel M. Laser-induced motion in nanoparticle suspension droplets on a surface / M. Dietzel, D. Poulikakos // *Physics of Fluids*. 2005. Vol. 17. № 10. 102106. DOI: 10.1063/1.2098587
5. Dong L. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels / L. Dong, A. K. Agarwal, D. J. Beebe, H. Jiang // *Nature*. 2006. Vol. 442. № 7102. Pp. 551-554. DOI: 10.1038/nature05024
6. Hitt D. L. Radiation-driven thermocapillary flows in optically thick liquid films / D. L. Hitt, M. K. Smith // *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*. 1993. Vol. 5. № 11. Pp. 2624-2632. DOI: 10.1063/1.858726
7. Jeong K.-H. Tunable microdoublet lens array / K.-H. Jeong, G. L. Liu, N. Chronis, L. P. Lee // *Optics Express*. 2004. Vol. 12. № 11. Pp. 2494-2500. DOI: 10.1364/OPEX.12.002494
8. Karapetsas G. Thermocapillary droplet actuation: Effect of solid structure and wettability / G. Karapetsas, N. T. Chamakos, A. G. Papathanasiou // *Langmuir*. 2017. Vol. 33. № 41. Pp. 10838-10850. DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b02762
9. Karpitschka S. Marangoni contraction of evaporating sessile droplets of binary mixtures / S. Karpitschka, F. Liebig, H. Riegler // *Langmuir*. 2017. Vol. 33. № 19. Pp. 4682-4687. DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b00740
10. Koyama D. High-speed focus scanning by an acoustic variable-focus liquid lens / D. Koyama, R. Isago, K. Nakamura // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 50. № 7. 07HE26. DOI: 10.1143/JJAP.50.07HE26
11. López C. A. Electrochemically activated adaptive liquid lens / C. A. López, C.-C. Lee, A. H. Hirska // *Applied Physics Letters*. 2005. Vol. 87. № 13. 134102. Pp. 1-3. DOI: 10.1063/1.2058209
12. Malyuk A. Yu. Optofluidic lens actuated by laser-induced solutocapillary forces / A. Yu. Malyuk, N. A. Ivanova // *Optics Communications*. 2017. Vol. 392. Pp. 123-127. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.01.040
13. Malyuk A. Yu. Varifocal liquid lens actuated by laser-induced thermal Marangoni forces / A. Yu. Malyuk, N. A. Ivanova // *Applied Physics Letters*. 2018. Vol. 112. № 10. 103701. DOI: 10.1063/1.5023222
14. Marchuk I. V. Thermocapillary deformation of a horizontal liquid layer under flash local surface heating / I. V. Marchuk // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2015. Vol. 24. № 4. Pp. 381-385. DOI: 10.1134/S181023281504013X
15. Marchuk I. V. Thermocapillary deformation of a thin locally heated horizontal liquid layer / I. V. Marchuk // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2009. Vol. 18. № 3. Pp. 227-237. DOI: 10.1134/S1810232809030047
16. Moran P. M. Fluidic lenses with variable focal length / P. M. Moran, S. Dharmatilleke, A. H. Khaw, K. W. Tan, M. L. Chan, I. Rodriguez // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88. № 4. 041120. Pp. 1-3. DOI: 10.1063/1.2168245

17. Seow Y. C. Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate / Y. C. Seow, A. Q. Liu, L. K. Chin, X. C. Li, H. J. Huang, T. H. Cheng, X. Q. Zhou // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93. № 8. 084101. DOI: 10.1063/1.2976210
18. Tsoumpas Y. Effect of Marangoni flows on the shape of thin sessile droplets evaporating into air / Y. Tsoumpas, S. Dehaeck, A. Rednikov, P. Colinet // *Langmuir*. 2015. Vol. 31. № 49. Pp. 13334-13340. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b02673
19. Uchiyama K. Thermal lens microscope / K. Uchiyama, A. Hibara, H. Kimura, T. Sawada, T. Kitamori // *Japanese Journal of Applied Physics*. 2000. Vol. 39. № 9A. Pp. 5316-5322. DOI: 10.1143/JJAP.39.5316

Natalia A. IVANOVA<sup>1</sup>  
Alexander Yu. MALYUK<sup>2</sup>

UDC 536.3; 532.6

### MODELLING OF THE THERMOCAPILLARY CONVECTION IN A SESSILE DROP INDUCED BY A LASER BEAM\*

<sup>1</sup> Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,  
Department of Applied and Technical Physics,  
Head of Photonics and Microfluidics Laboratory,  
University of Tyumen  
n.ivanova@utmn.ru

<sup>2</sup> Postgraduate Student,  
Department of Applied and Technical Physics,  
Junior Researcher of Photonics and Microfluidics Laboratory,  
University of Tyumen  
a.malyuk@utmn.ru

#### Abstract

The results of the numerical study of thermocapillary convection induced by the local heat flux in a sessile drop of non-volatile liquid with a fixed contact line are presented. The laser beam absorbed by the liquid is used as the source of heat flux. Sessile drops of benzyl alcohol and ethylene glycol with a volume of 0.6 mcl and heat flux power from 2 to 85 mW are observed in this paper. The model allows obtaining both velocity and temperature fields for both liquid and gas phases upon thermocapillary convection, evolution of free surface profile upon thermocapillary deformation. The relations between the focal length of refractive surface of the sessile drop and the heat flux are obtained. The comparison of the numerical and experimental data of the focal length shows a good correlation between numerical model and the experiment.

---

\* The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No 18-31-00231).

---

**Citation:** Ivanova N. A., Malyuk A. Yu. 2019. "Modelling of the thermocapillary convection in a sessile drop induced by a laser beam". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 2, pp. 160-174.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-2-160-174

**Keywords**

Thermocapillary convection, sessile drop, liquid lens, heat flux, surface curvature, numerical simulations, laser irradiation.

**DOI:** 10.21684/2411-7978-2019-5-2-160-174

**REFERENCES**

1. Viznyuk S. A., Sukhodolskiy A. T. 1988. "Thermocapillary self-interaction of laser radiation in thin layers of an absorbing liquid". *Quantum Electronics*, vol. 15, no 4, pp. 767-770. [In Russian]
2. Berge B., Peseux J. 2000. "Variable focal lens controlled by an external voltage: an application of electrowetting". *The European Physical Journal E*, vol. 3, no 2, pp. 159-163. DOI: 10.1007/s101890070029
3. Cheng C.-C., Yeh J. A. 2007. "Dielectrically actuated liquid lens". *Optics Express*, vol. 15, no 12, pp. 7140-7145. DOI: 10.1364/OE.15.007140
4. Dietzel M., Poulikakos D. 2005. "Laser-induced motion in nanoparticle suspension droplets on a surface". *Physics of Fluids*, vol. 17, no 10, 102106. DOI: 10.1063/1.2098587
5. Dong L., Agarwal A. K., Beebe D. J., Jiang H. 2006. "Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels". *Nature*, vol. 442, no 7102, pp. 551-554. DOI: 10.1038/nature05024
6. Hitt D. L., Smith M. K. 1993. "Radiation-driven thermocapillary flows in optically thick liquid films". *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, vol. 5, no 11, pp. 2624-2632. DOI: 10.1063/1.858726
7. Jeong K.-H., Liu G. L., Chronis N., Lee L. P. 2004. "Tunable microdoublet lens array". *Optics Express*, vol. 12, no 11, pp. 2494-2500. DOI: 10.1364/OPEX.12.002494
8. Karapetsas G., Chamakos N. T., Papathanasiou A. G. 2017. "Thermocapillary droplet actuation: effect of solid structure and wettability". *Langmuir*, vol. 33, no 41, pp. 10838-10850. DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b02762
9. Karpitschka S., Liebig F., Riegler H. 2017. "Marangoni contraction of evaporating sessile droplets of binary mixtures". *Langmuir*, vol. 33, no 19, pp. 4682-4687. DOI: 10.1021/acs.langmuir.7b00740
10. Koyama D., Isago R., Nakamura K. 2011. "High-speed focus scanning by an acoustic variable-focus liquid lens". *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 50, no 7, 07HE26. DOI: 10.1143/JJAP.50.07HE26
11. López C. A., Lee C.-C., Hirs A. H. 2005. "Electrochemically activated adaptive liquid lens". *Applied Physics Letters*, vol. 87, no 13, 134102, pp. 1-3. DOI: 10.1063/1.2058209
12. Malyuk A. Yu., Ivanova N. A. 2017. "Optofluidic lens actuated by laser-induced solutocapillary forces". *Optics Communications*, vol. 392, pp. 123-127. DOI: 10.1016/j.optcom.2017.01.040
13. Malyuk A. Yu., Ivanova N. A. 2018. "Varifocal liquid lens actuated by laser-induced thermal Marangoni forces". *Applied Physics Letters*, vol. 112, no 10, 103701. DOI: 10.1063/1.5023222

14. Marchuk I. V. 2015. "Thermocapillary deformation of a horizontal liquid layer under flash local surface heating". *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 24, no 4, pp. 381-385. DOI: 10.1134/S181023281504013X
15. Marchuk I. V. 2009. "Thermocapillary deformation of a thin locally heated horizontal liquid layer". *Journal of Engineering Thermophysics*, vol. 18, no 3, pp. 227-237. DOI: 10.1134/S1810232809030047
16. Moran P. M., Dharmatilleke S., Khaw A. H., Tan K. W., Chan M. L., Rodriguez I. 2006. "Fluidic lenses with variable focal length". *Applied Physics Letters*, vol. 88, no 4, 041120, pp. 1-3. DOI: 10.1063/1.2168245
17. Seow Y. C., Liu A. Q., Chin L. K., Li X. C., Huang H. J., Cheng T. H., Zhou X. Q. 2008. "Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate". *Applied Physics Letters*, vol. 93, no 8, 084101. DOI: 10.1063/1.2976210
18. Tsoumpas Y., Dehaeck S., Rednikov A., Colinet P. 2015. "Effect of Marangoni flows on the shape of thin sessile droplets evaporating into air". *Langmuir*, vol. 31, no 49, pp. 13334-13340. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b02673
19. Uchiyama K., Hibara A., Kimura H., Sawada T., Kitamori T. 2000. "Thermal lens microscope". *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 39, no 9A, pp. 5316-5322. DOI: 10.1143/JJAP.39.5316