

# Исследование конвективных структур и фазового перехода, индуцированных нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды

В.А. Арбузов<sup>1,3</sup>, Э.В. Арбузов<sup>1,2,3</sup>, В.С. Бердников<sup>1,3</sup>, Ю.Н. Дубнищев<sup>1,3,4</sup>, О.С. Золотухина<sup>1,3</sup>, С.А. Кислицын<sup>1,3</sup>  
arbuzov@itp.nsc.ru|arbuzov@math.nsc.ru|berdnikov@itp.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|  
melexina-olga17@yandex.ru|100pch@mail.ru

<sup>1</sup>ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

<sup>2</sup>ФГБУН Институт математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Россия;

<sup>3</sup>ФГБУН Новосибирский государственный технический университет, Россия;

<sup>4</sup>ФГБУН Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Методами сдвиговой интерферометрии и численного моделирования исследован процесс эволюции конвективных структур и фазовый переход, индуцированные нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды, ограниченном плоскими теплообменными поверхностями. Выполнено численное моделирование температурного поля как поля изотерм в режиме монотонного охлаждения горизонтальных стенок. Решена задача фрагментарной реконструкции гильбертограмм и сдвиговых интерферограмм из численной модели поля изотерм. Гидродинамика конвективных течений, коэволюция температурных полей, интерференционных и гильберт-структур смоделированы и исследованы с учетом инверсии плотности воды в окрестности изотермы (+4°C), в условиях фазового перехода и роста слоя льда на нижней теплообменной плоскости. Моделирование выполнено с использованием пакета программ собственной разработки. Актуальность такого рода исследований обусловлена особой важностью конвекции в геодинамике, физике атмосферы и океана, в гидродинамических и теплофизических процессах, связанных с образованием и ростом кристаллов.*

**Ключевые слова:** оптическая диагностика, сдвиговая интерферометрия, конвективные потоки.

## Investigation of convective structures and phase transition induced by non-stationary boundary conditions in a horizontal layer of water

V.A. Arbuzov<sup>1,3</sup>, E.V. Arbuzov<sup>1,2,3</sup>, Berdnikov V.C.<sup>1,3</sup>, Yu.N. Dubnishchev<sup>1,3,4</sup>, O.S. Zolotukhina<sup>1,3</sup>, S.A. Kislytsyn<sup>1,3</sup>  
arbuzov@itp.nsc.ru|arbuzov@math.nsc.ru|berdnikov@itp.nsc.ru|dubnistchev@itp.nsc.ru|  
melexina-olga17@yandex.ru|100pch@mail.ru

<sup>1</sup>Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

<sup>2</sup>Sobolev Institute of Mathematics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

<sup>4</sup>Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*The evolution of convective structures and the phase transition induced by non-stationary boundary conditions in a horizontal water layer bounded by flat heat-exchange surfaces were studied by shear interferometry and numerical simulation methods. Numerical modeling of the temperature field as a field of isotherms in the mode of monotonous cooling of horizontal walls was performed. The problem of fragmentary reconstruction of hilbertograms and shear interferograms images from a numerical model of the isotherm field was solved. The hydrodynamics of convective currents, the coevolution of temperature fields, interference and Hilbert structures have been modeled and studied taking into account the inversion of water density in the vicinity of the isotherm (+4°C), under conditions of phase transition and growth of the ice layer on the lower heat transfer plane. The simulation was performed using a proprietary software package. The relevance of this kind of research is due to the special importance of convection in geodynamics, physics of the atmosphere and the ocean, in hydrodynamic and thermophysical processes associated with the formation and growth of crystals.*

**Keywords:** optical diagnostics, shear interferometry, convective currents.

### 1. Введение

Методы оптической диагностики в значительной мере определяют уровень экспериментальных исследований в современной гидро- и газодинамике. Выбор конвективных течений в качестве объекта приложений оптической диагностики объясняется особой важностью конвекции в геодинамике, физике атмосферы и океана, в гидродинамических и теплофизических процессах с фазовыми переходами, связанных с образованием и ростом кристаллов [6, 7]. Актуальность такого рода исследований в последнее время возросла из-за наблюдаемых аномалий в образовании и таянии льда в арктических и антарктических регионах, а также интенсификации освоения морских нефтегазоносных районов Арктики. Экспериментальные и

теоретические исследования конвективных процессов и динамики фазового перехода вода–лёд с учётом аномалии плотности воды в области 0÷4°C необходимы для многочисленных технических и технологических приложений. Изучение динамики фазовых переходов в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных структур в системе вода–лёд требует применения не возмущающих методов диагностики, основанных на современных достижениях оптики, лазерной техники и информационных технологий. Необходимостью таких исследований мотивирована настоящая работа.

### 2. Метод исследования

Изучение динамики фазовых переходов в переохлаждённой жидкости и эволюции конвективных

структур в системе вода–лёд требует применения не возмущающих методов диагностики, основанных на современных достижениях оптики, лазерной техники и информационных технологий. Структура исследовательского комплекса, содержащего систему оптической диагностики и экспериментальный стенд, аналогична описанной в [5]. Система оптической диагностики содержит последовательно расположенные: осветительный модуль, состоящий из источника света, конденсорной линзы и щелевой диафрагмы, помещённой в передней фокальной плоскости объектива, формирующего зондирующее поле в исследуемой среде. Такой средой является вода, заполняющая прямоугольную полость 1 (рис. 1) с прозрачными стёклами оптического качества.

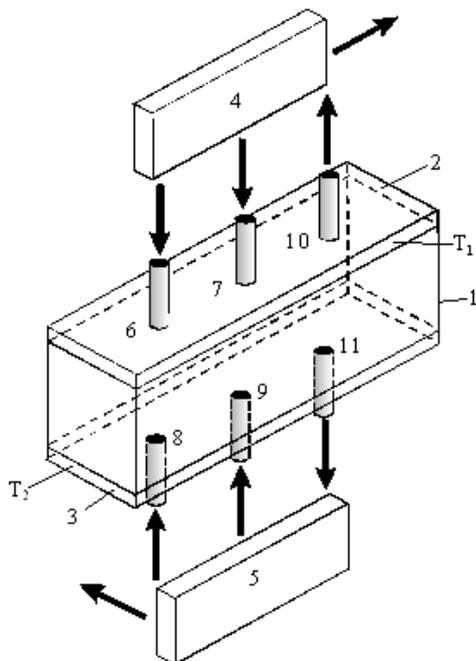


Рис. 1. Гидродинамический стенд

Внутренние размеры полости 136×86×30 мм. Верхняя и нижняя стенки образованы охлаждаемыми плоскопараллельными медными пластинами высокого качества 2 и 3. Температура верхней пластины ( $T_1$ ) регулируется и поддерживается термостатом в пределах до  $-8,5^{\circ}\text{C}$ . Температура нижней пластины ( $T_2$ ) – в диапазоне от комнатной температуры до  $-17^{\circ}\text{C}$ . Внутри пластин имеются полости, в которые подаётся охлаждающая жидкость из термостатов 4 и 5. Термостаты управляются компьютером по заданной программе. Трубки, подающие хладагент в верхнюю и нижнюю пластины, обозначены цифрами 6, 7, 8, 9, трубки оттока – 10, 11. Расположение подающих трубок и трубок оттока может меняться в соответствии с условиями эксперимента. Расстояния между трубками – 80 мм.

Оптическая система диагностики реализована на базе теневого прибора ИАБ–463М с модифицированными под задачи эксперимента модулями светового источника, пространственно-частотной фильтрации оптического сигнала, сдвиговой интерферометрии, гильберт-визуализации, а также модулем регистрации изображения визуализированных фазовых возмущений светового поля, индуцированных исследуемой средой. Модуль сдвиговой интерферометрии реализован на базе модифицированного интерферометра Маха–Цендера. Изображения визуализированных фазовых структур, регистрируются цифровой видеокамерой и подвергаются компьютерной обработке.

В пространстве между верхней и нижней термостатируемыми поверхностями температурные градиенты индуцируют возникновение конвективных структур, которые проявляются как динамические возмущения полей оптической фазовой плотности. Эволюция конвективных структур осложняется аномалией плотности воды в диапазоне температур  $0 \div 4^{\circ}\text{C}$ . Методами сдвиговой интерферометрии выполняется визуализация градиентов возмущений фазовой оптической плотности в слое воды. Эти возмущения индуцируются нестационарными температурными граничными условиями на горизонтальных поверхностях, ограничивающих исследуемую среду (рис. 1).

### 3. Результаты

Нестационарные граничные условия в исследуемой среде задаются температурами верхней и нижней термостатированных поверхностей. Температуры контролируются термопарами. На рис. 2 зелёная линия иллюстрирует зависимость от времени температуры верхней термостатированной теплообменной поверхности. Стационарное значение температуры поддерживается на протяжении временного интервала 7000 с. Красная линия отображает температуру нижней теплообменной поверхности на том же временном интервале. Динамика изменения этой температуры задаёт нестационарность граничных условий, индуцирующих эволюцию конвективных течений и фазовый переход.

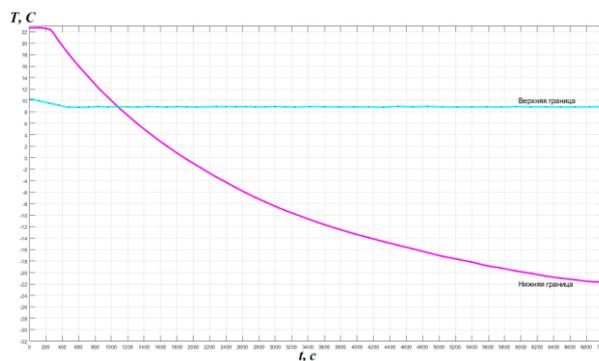
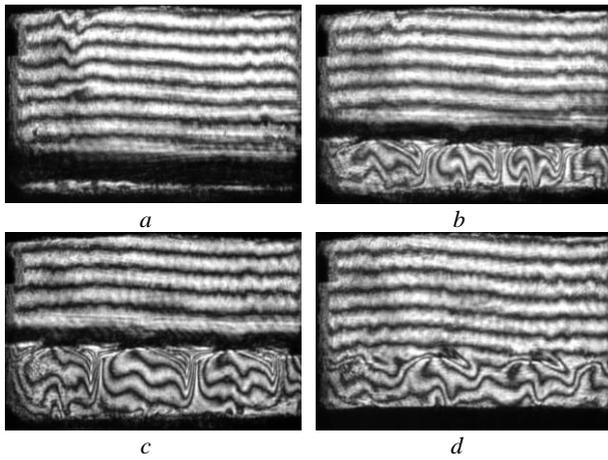


Рис. 2. Температуры верхней (голубая линия) и нижней (красная линия) теплообменных поверхностей, ограничивающих слой воды, на временном интервале  $0 \div 7000$  с.

На рис. 3 показаны примеры сдвиговых интерферограмм, визуализирующих конвективные структуры, фазовый переход и образование ледяного слоя.

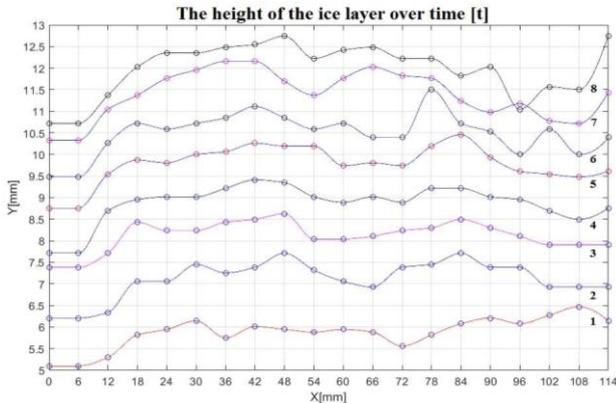
Широкая тёмная полоса соответствует области максимального градиента температуры. Структура полученных интерферограмм определяется температурой исследуемой жидкости, а интерференционные полосы соответствуют изотермам. Широкая тёмная полоса соответствует пространственной локализации больших градиентов температуры, где интерференционные полосы сливаются. В процессе выхолаживания слоя жидкости вблизи нижней термостатированной поверхности при росте градиента температуры вода становится переохлажденной жидкостью, переходя в состояние неустойчивого равновесия. В такой среде возникает переход из жидкой фазы в твердокристаллическое состояние. Это – фазовый переход первого рода, реализация которого проявляется возникновением волны кристаллизации и сопровождается выделением тепловой энергии, что влияет на динамическое распределение градиента оптической плотности, индуцируя фазовые возмущения в зондирующем световом поле.



**Рис. 3.** Визуализация поля фазовой плотности методом сдвиговой интерферометрии:

- (a) –  $t = 48$  [мин] 45 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей (момент образования ячейистой структуры на нижней горизонтальной стенке);
- (b) –  $t = 1$  [ч] 8 [мин] 42 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей;
- (c) –  $t = 1$  [ч] 19 [мин] 41 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей (возникновение волны кристаллизации на нижней горизонтальной стенке);
- (d) –  $t = 1$  [ч] 19 [мин] 41 [с] с момента охлаждения термостатируемых поверхностей (образование слоя льда толщиной 8 мм на нижней горизонтальной стенке).

Рис. 4, иллюстрирующий эволюцию формы и толщины слоя льда на нижней термостатированной стенке по мере её выхолаживания после фазового перехода.



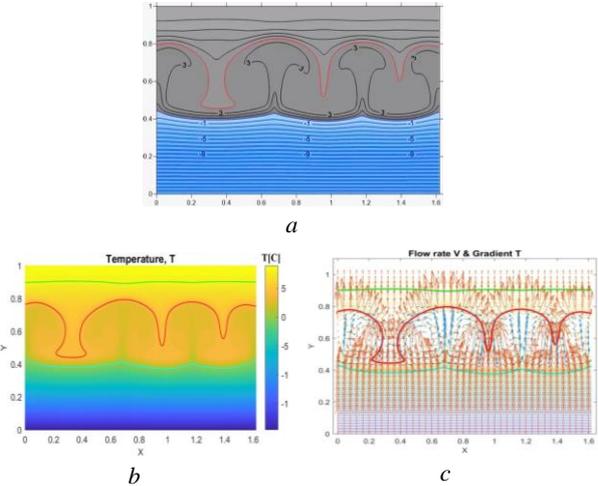
**Рис. 4.** Эволюция толщины слоя льда после фазового перехода:

- (1) – 1 [ч] 23 [мин] 44 [с]; (2) – 1 [ч] 27 [мин] 44 [с];
- (3) – 1 [ч] 31 [мин] 44 [с]; (4) – 1 [ч] 35 [мин] 44 [с];
- (5) – 1 [ч] 39 [мин] 44 [с]; (6) – 1 [ч] 43 [мин] 44 [с];
- (7) – 1 [ч] 47 [мин] 44 [с]; (8) – 1 [ч] 51 [мин] 44 [с].

В качестве верификации результатов, было проведено численное моделирование температурных полей конвективных течений в виде динамической структуры изотерм. Из этих структур реконструировались гильбертограммы и сдвиговые интерферограммы, которые затем сравнивались с результатами, полученными в эксперименте (рис. 5).

Конвективный теплообмен в жидкости в двумерной постановке описывался безразмерной системой уравнений Навье–Стокса, энергии и непрерывности в приближении Буссинеска. Проводящий теплообмен в массивных горизонтальных стенах оргстекла моделировался с использованием уравнения теплопередачи. Уравнения решались численно методом конечных элементов в

сопряженной формулировке. Были учтены зависимости плотности и коэффициента объемного теплового расширения от температуры. На твердых границах для скорости (и, соответственно, для функции тока) были заданы условия адгезии и не протекания. Граничное условие для вихря получено из поля функции тока с использованием метода [3]. На границе раздела жидкости с твердыми стенками принималось условие непрерывности температуры и теплового потока.



**Рис. 5.** Численная модель: (a) – изотермическое поле ( $t = 4993$  [с] момента охлаждения); (b) – численная модель температурного поля от начального поля изотерм (голубая линия – изотерма  $0^{\circ}\text{C}$ , красная линия – изотерма  $+4^{\circ}\text{C}$ , зелёная линия – изотерма  $+8^{\circ}\text{C}$ ); (c) – поля скоростей и градиентов температуры.

Использовалась неравномерная треугольная сетка, сгущённая в разной степени до всех границ расчетной области, с числом узлов  $\approx 4 \cdot 10^4$ . Линейные базисные функции даны на элементах. Клеточный пошаговый алгоритм для максимального угла был применён для построения триангуляции [2].

Задача решалась в нестационарной постановке: начальная температура системы  $+10.26^{\circ}\text{C}$ , температура на горизонтальных границах задавалась в соответствии с картой температуры, полученной при проведении эксперимента (рис. 2). Наружные поверхности боковых стенок адиабатические.

Температурные поля восстанавливались из численных моделей изотерм (рисунок 5, a, b). Графики построены в относительных единицах (на рисунках реальный размер длины кюветы, равный 86 мм, взят за масштаб при переходе к безразмерным уравнениям и граничным условиям). Кроме того, моделирование поля изотерм дополняется расчётом поля скоростей и градиентов температуры (рис. 5, c).

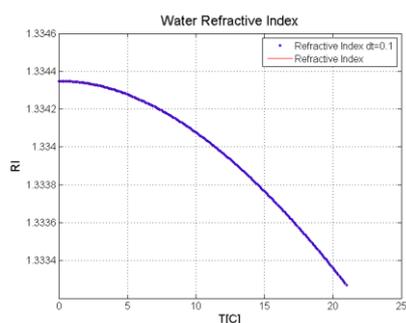
Фазовая структура зондирующего поля, индуцированного в исследуемой среде температурными граничными условиями, определяется как:

$$\Delta\varphi(x, y, T) = k[n(x, y, T) - n_0]l, \quad (1)$$

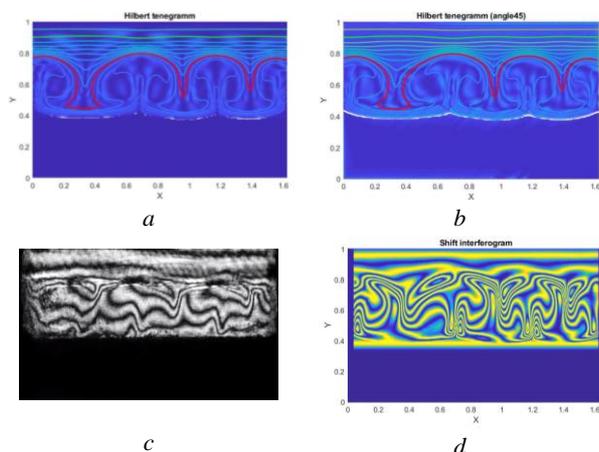
где  $l$  – толщина слоя жидкости,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число светового поля,  $n(x, y, T)$  – показатель преломления жидкости как функция пространственных координат  $x, y$  и температуры  $T$ .

Эта функция определяется температурной зависимостью удельного преломления воды. Температурная зависимость показателя преломления дистиллированной воды рассчитывалась, согласно [1, 4], с учётом плотности и удельного преломления на длине волны  $\lambda = 589,3$  нм при нормальном атмосферном давлении (рис. 6). Из

полученного оптического фазового поля реконструированы гильберт-изображения и сдвиговые интерферограммы (рис. 7).



**Рис. 5.** Зависимость показателя преломления дистиллированной воды от температуры от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $+21^{\circ}\text{C}$  [3, 5].



**Рис. 7.** (a) – численно смоделированная гильбертограмма при вертикальной ориентации щелевого источника излучения; (b) – численно смоделированная гильбертограмма при ориентации щелевого источника излучения под углом  $45^{\circ}$ , (белая линия – изотерма  $0^{\circ}\text{C}$ , красная линия – изотерма  $+4^{\circ}\text{C}$ , зелёная линия – изотерма  $+8^{\circ}\text{C}$ ); (c) – экспериментальная сдвиговая интерферограмма; (d) – численно смоделированная сдвиговая интерферограмма.

Структуры экспериментальной и численно реконструированной интерферограмм имеют сходный характер, как и в случае исследования конвективных структур и фазового перехода, индуцированных в вертикальном слое воды, ограниченном параллельными теплообменными поверхностями [4]. Наблюдаемые зависимости могут быть использованы при разработке алгоритма решения обратной задачи восстановления температурного поля по экспериментальным гильбертограммам.

#### 4. Заключение

Методами гильберт-оптики, сдвиговой интерферометрии и численного моделирования исследована структура и эволюция конвективных структур, индуцированных нестационарными граничными условиями в горизонтальном слое воды, ограниченном плоскими теплообменными поверхностями, в условиях монотонного охлаждения. Решена задача восстановления полей гильбертовых изображений и сдвиговых интерферограмм по фазе оптической плотности по численно полученным полям эволюции изотерм и скорости. Исследования конвективных течений, вызванных нестационарными граничными

условиями, актуальны для решения различных фундаментальных и прикладных задач, примером которых является разработка новых технологий выращивания кристаллов, понимание конвективных процессов в толще воды при изучении арктических и антарктических регионов мирового океана.

#### 5. Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А. Гришкову за помощь в работе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (Гос. рег. АААА–А17–117030310010–9, проект П.18.2.5. Гос. рег. АААА–А17–117022850021–3), финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-08-00707), частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-38-00790-мол\_a) и комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН П.1 (проект 0314-2018-0010).

#### 6. Литература

- [1] Иванов А. Введение в океанографию. Перевод с французского Плахина Е.А., Шифриной К.С. Издательство: Мир. Москва. 1978.
- [2] Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Том. ун-та. 2002. 128 с.
- [3] Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г.. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2007. 896 с.
- [4] Таблицы стандартных справочных данных: Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до  $1000^{\circ}\text{C}$ . ГСССД 2-77., Издательство стандартов. Москва. 1978.
- [5] Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Berdnikov V.C., Dubnishchev Yu.N., Melekhina O.S. Dynamics of the Crystallization Front Induced by the Temperature Gradient at the Uped Boundary of a Horizontal Layer of a Fluid // Optoelectronics, Instrumentations and Data Processing. 2017. V. 53, No 2. P. 131–135. DOI: 10.3103/S87566990170220042.
- [6] Dubnishchev Yu.N., Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Berdnikov V.S., Melekhina O.S., Shlapakova E.O. Visualization of Convective Structures by Methods of the Hilbert Optics and Phase-Shift Interferometry // 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing. Naples, Italy, 15–18 June, 2015. pp. 1–6.
- [7] Lappa M. Thermal Collection: Patterns, Evolution and Stability. Chichester: John Wiley Sons. 2010.

#### Об авторах

Арбузов Виталий Анисифорович, д.т.н., в.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@itp.nsc.ru.

Арбузов Эдуард Витальевич, к.ф.-м.н., с.н.с. Институт математики СО РАН, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН, доцент кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: arbuzov@math.nsc.ru.

Бердников Владимир Степанович, д.ф.-м.н., г.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры прикладной математики факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета. E-mail: berdnikov@itp.nsc.ru.

Дубнищев Юрий Николаевич, д.т.н., г.н.с. Институт теплофизики СО РАН, профессор кафедры оптических

информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. E-mail: dubnistchev@itp.nsc.ru.

Золотухина Ольга Сергеевна, аспирантка кафедры оптических информационных технологий физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН. E-mail: melexina-olga17@yandex.ru.

Кислицын Степан Александрович, аспирант кафедры прикладной математики факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь Институт теплофизики СО РАН. E-mail: 100pch@mail.ru.