

## Анализ области визуализации пристеночного слоя жидкости при регистрации методами высокоскоростной термографии

А. М. Шагианова,<sup>а</sup> Е. Ю. Коротева,<sup>б</sup> И. А. Знаменская,<sup>в</sup> М. Э. Дашян, Л. А. Благодрагов, Н. Н. Сысов  
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,  
 кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества.  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 29.11.2019, после доработки 24.01.2020, принята к публикации 27.01.2020.

В работе проанализированы возможности термографии при регистрации теплового излучения с частотой съемки более 100 Гц из нестационарного неизотермического пограничного слоя жидкости через окно, прозрачное для инфракрасного излучения. Проведены эксперименты, позволяющие провести интегральную оценку регистрируемой толщины слоя воды для различных условий; показано, что толщина проникновения инфракрасного излучения в рабочем диапазоне тепловизора (3.7–4.8 мкм) не превышает 0.2 мм.

*Ключевые слова:* инфракрасная термография, излучение, затопленные течения, жидкость.

УДК: 535-1, 532.5. PACS: 47.80.Jk, 44.20.+b, 44.40.+a.

### ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасная (ИК) термография — мощный оптический инструмент, позволяющий регистрировать динамические тепловые поля для решения различных задач. Она широко применяется для инженерных приложений, таких как регуляция теплоизоляции и обнаружение скрытых дефектов [1]. С помощью термографии проводится экспериментальное исследование параметров теплообмена и трения на плоских и рельефных поверхностях с различной геометрией [2, 3]. Показана возможность определения ламинарно-турбулентного перехода при обтекании летательных аппаратов потоками воздуха за счет изменения карт температур на крыльях и лопастях [4].

Другим направлением применения термографии является анализ приповерхностных течений жидкости [5]. В литературе преимущественно встречаются работы, посвященные медленным течениям с малыми числами Рейнольдса на границе раздела жидкость—газ [6, 7] и в жидких пленках [8]. Усредненные тепловые поля потоков получают через металлические подложки [9, 10] на основе теплопередачи исследуемого потока твердой стенки.

Экспериментальные исследования турбулентных затопленных течений жидкости в пристеночной области крайне ограничены. Это обусловлено сложностью визуализации и анализа многомасштабных турбулентных течений, требующих высокого пространственного и временного разрешения при регистрации. В теплообмене неизотермического потока с твердой поверхностью решающую роль играет непосредственно пристеночная область течения, визуализация которой позволяет контролировать механизмы теплопередачи и исследовать пограничный слой жидкости.

Метод высокоскоростной термографии быстротекающих потоков, предложенный в работах [11, 12], применяется для измерения мгновенных тепловых полей неизотермического пограничного слоя жидкости. Регистрируемое инфракрасное излучение проходит через ИК прозрачное окно и поглощается

в тонком пристеночном слое воды субмиллиметровой толщины. Временной масштаб турбулентности много меньше времен распространения теплопроводности, что позволяет визуализировать гидродинамику течения по термограммам. Ранее были получены данные для импактной затопленной струи и неизотермического смешения струй (рис. 1, а) [13]. Для количественного анализа пограничных течений разработаны несколько направлений постобработки изображений: построение спектров и полей среднеквадратичных тепловых пульсаций [14] для исследования области ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое жидкости. При применении кросс-корреляционного алгоритма к последовательностям ИК-изображений вычислены смещения «тепловых точек», а по ним — поля скорости турбулентных течений вблизи поверхности (метод ТТТ [15]). Пример построения усредненного поля скорости смешения двух струй разной температуры методом ТТТ представлен на рис. 1, б.

В работе предложен экспериментальный метод определения толщины слоя визуализации для средневолновой ИК-термографии и анализа влияния сопутствующих тепловых процессов при регистрации динамических процессов в пристеночном слое воды.

### 1. АНАЛИЗ РЕГИСТРИРУЕМОЙ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ВОДЫ

Важным вопросом для ИК-термографии остается толщина регистрируемого слоя жидкости в среднем ИК-диапазоне. Для теоретической оценки толщины слоя воды, поглощающего ИК-излучение, можно воспользоваться законом Бугера:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha(\lambda)x},$$

$I(x)$  — интенсивность излучения, прошедшего через слой вещества толщиной  $x$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $I_0$  — интенсивность излучения на входе в вещество, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha(\lambda)$  — коэффициент поглощения, 1/м.

К сожалению, из-за сильной зависимости коэффициента поглощения жидкой воды от длины волны [16] возможна лишь интегральная оценка, однако можно утверждать, что для рабочего диапазона используемого тепловизора 99% интенсивности излучения поглощается на глубине до  $\delta = 0.4$  мм.

<sup>а</sup> E-mail: shagiyanova@physics.msu.ru

<sup>б</sup> E-mail: koroteeva@physics.msu.ru

<sup>в</sup> E-mail: znamen@phys.msu.ru

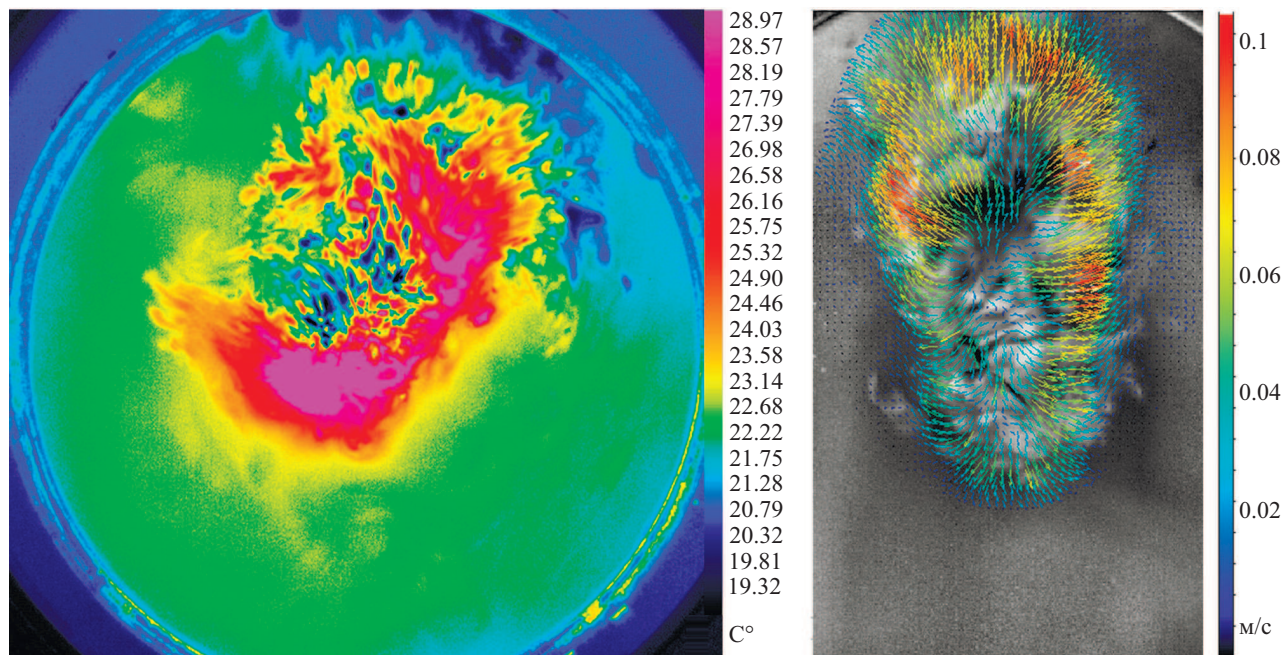


Рис. 1. а — пример мгновенной термограммы неизотермического смешения затопленных струй в тройниковом устройстве, б — усредненное поле скорости методом ТТТ [15]

Экспериментальные оценки толщины слоя проникновения средневолнового ИК-излучения практически не встречаются в литературе. В работе [8] на основе поправочных коэффициентов поглощения рассчитано, что для жидкой пленки температурой  $90^{\circ}\text{C}$  50% детектируемого излучения регистрируется со слоя толщиной  $\delta = 24$  мкм, что в пересчете на поглощение 95% соответствует слою  $\delta = 0.1$  мм. При более низких температурах пленки регистрируемая толщина немного уменьшается.

Отсутствие данных связано со сложностью проведения таких оценок. На границе раздела жидкость—газ считается, что средневолновое ИК-излучение поглощается на поверхности. Глубина слоя воды, излучение с которого возможно зарегистрировать тепловизором, зависит от многих факторов: рабочего спектрального диапазона тепловизора, температуры воды, пропускающей способностей поверхности, через которую ведется наблюдение, и пр. В этой связи толщину излучающего слоя следует рассчитывать для условий конкретного эксперимента.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1. Экспериментальная установка

Для анализа глубины слоя воды, регистрируемого тепловизором, проведена серия экспериментов. В холодную воду быстро погружался нагретый диск  $T_{\text{disk}} = 20\text{--}60^{\circ}\text{C}$ , прижатый к ИК-прозрачной стенке сосуда ребром (рис. 2). Разность температур в эксперименте составляла  $dT = 5\text{--}30^{\circ}\text{C}$ . Температура диска дополнительно измерялась пирометром перед каждым измерением. Радиус  $R_{\text{disk}} = 33$  мм и толщина диска  $z_d = 2$  мм были выбраны для формирования протяженной зоны дуги в области контакта со стенкой. Погружение объекта со скоростями  $1.5\text{--}10$  см/с позволило минимизировать влияние распространения конвекции и теплопроводности в окружающей жидкости.

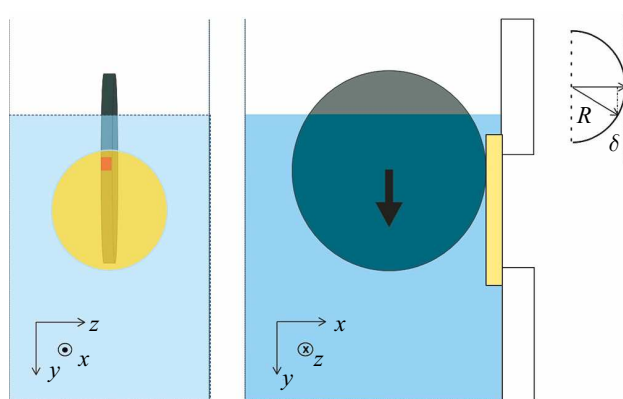


Рис. 2. Схема эксперимента для оценки толщины излучения водного слоя в среднем ИК-диапазоне

Регистрация проводилась с использованием тепловизионной камеры FLIR SC7700, (3.7–4.8 мкм) с частотой съемки 100–115 Гц в полнокадровом режиме. Фокус тепловизора настраивался на внутреннюю стенку ИК-прозрачного окна толщиной 2 мм, изготовленного из фторида кальция с пропускающей способностью более 90% в рабочем диапазоне тепловизора. Таким образом, измерения динамики излучения центральной части движущегося затопляемого объекта, видимого тепловизором в пограничном слое воды, позволили количественно оценить регистрируемую толщину слоя воды.

### 2.2. Особенности регистрации динамических течений с помощью ИК-термографии

В общем случае неизотермические течения реализуются в условиях совместного протекания процессов теплопроводности, излучения и конвекции, которые проявляют себя на разных временных интервалах. Возможность высокоскоростной съемки

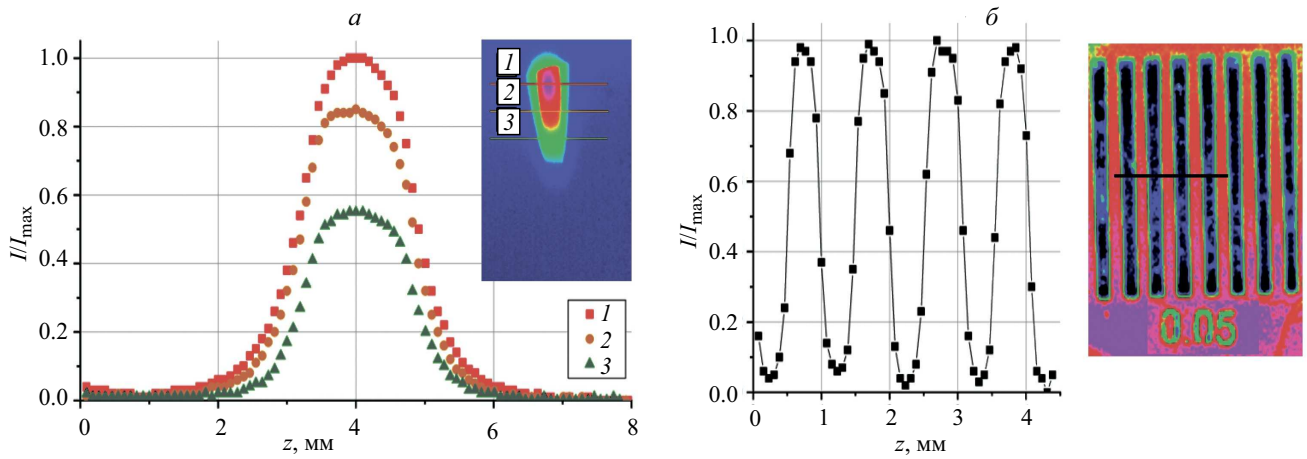


Рис. 3. *a* — поперечные профили, соответствующие термограмме справа, *б* — профиль и сама термограмма мира в воздухе

современными тепловизорами (до нескольких килогерц) позволяет поставить эксперимент для выделения наиболее быстрых процессов — регистрации компоненты теплового излучения жидкости из пограничного слоя — с минимальным влиянием теплопроводности и конвекции, характерные времена которых превышают интервал времени исследуемого быстротекущего процесса.

Метод ИК-термографии быстротекущих процессов применим для определенного класса течений. Поток должен быть неизотермическим, а само течение — динамическим, или турбулентным. В нестационарном потоке поля температур и скоростей являются следствием тепловых и механических взаимодействий [17]. Тепловое поле всегда зависит от гидродинамики течения. Турбулентный неизотермический поток имеет вихревую структуру, в котором вихри образуют «кластеры» одинаковой температуры. Здесь пульсации теплового поля обусловлены гидродинамикой течения, что приводит к корреляции пульсаций температуры и пульсаций скорости.

Для анализа влияния теплопроводности в эксперименте проведена оценка затухания температурной волны в момент погружения диска в воду на основе подхода, использующего идею метода периодического нагрева [18]. Температурная волна представляет собой решение уравнения теплопроводности с периодическими граничными условиями. Температурное возмущение в начальный период времени занимает строго ограниченную область, далее меняет свою форму и охватывает все пространство, т. е. не имеет фронта. Амплитуда колебаний температуры быстро затухает, поэтому температурная волна проявляет себя в области, не превосходящей длины волны.

Метод периодического нагрева применим для различных сред, в том числе и для жидких. В [19] представлены зависимости амплитуд пульсаций температуры затопленного зонда от скорости потока жидкости. Для скоростей менее 10 см/с амплитуда регистрируемых пульсаций падает менее чем на 10% относительно данных в покоящейся среде, что подтверждает возможность применения оценки в движущемся течении.

Обеспечивая в эксперименте равномерный нагрев диска до опускания и его быстрое погружение, мы можем оценить распространение тепловой волны для

одного колебания. В данном случае фазовая скорость температурной волны равна  $v = \sqrt{2aw}$ , где  $a$  — температурная проводимость,  $w$  — круговая частота. При опускании со скоростью более 1.5 м/с это соответствует частоте  $w = \frac{v^2}{2a} \approx 7.86 \cdot 10^2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , или  $f = \frac{w}{2\pi} \approx 125$  Гц. Длина температурной волны на этой частоте соответствует расстоянию затухания волны:

$$L_w = 2\pi \sqrt{\frac{2a}{w}} = 0.11 \text{ (мм)}.$$

Значение вклада температурной волны относительно регистрируемой области излучения диска составляет менее 5%, что меньше погрешности измерения в предложенном экспериментальном методе.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Цифровой анализ эволюции распределения мгновенной интенсивности излучения участка дуги ребра нагретого диска дает возможность оценить глубину зоны регистрации ИК-излучения в условиях эксперимента. Основная цель — выделить излучательную компоненту из тепловых процессов, связанных с присутствием нагретого движущегося тела в пристеночном слое воды.

Для полученных термограмм построены продольные и поперечные профили относительно направления погружения. Область максимальной интенсивности излучения соответствует области соприкосновения диска с ИК-прозрачным окном (рис. 3, *a*). Профили построены для начального временного интервала погружения диска  $dt < 0.3$  с с момента появления объекта в кадре. На поперечном профиле значение толщины диска достигается в районе полувысоты профиля. Как видно на рис. 3, *б*, поперечные профили торца диска имеют колоколообразную форму. На термограмме штрихов мира при максимальной фокусировке мы наблюдаем тот же эффект (рис. 3, *б*), что может быть обусловлено аппаратной функцией тепловизора.

Толщина слоя воды  $\delta$ , регистрируемого тепловизором в средневолновом ИК-диапазоне, рассчитывается на основе полученных тепловых полей в передней части диска. Перед диском регистрируется непосредственно излучательная компонента,

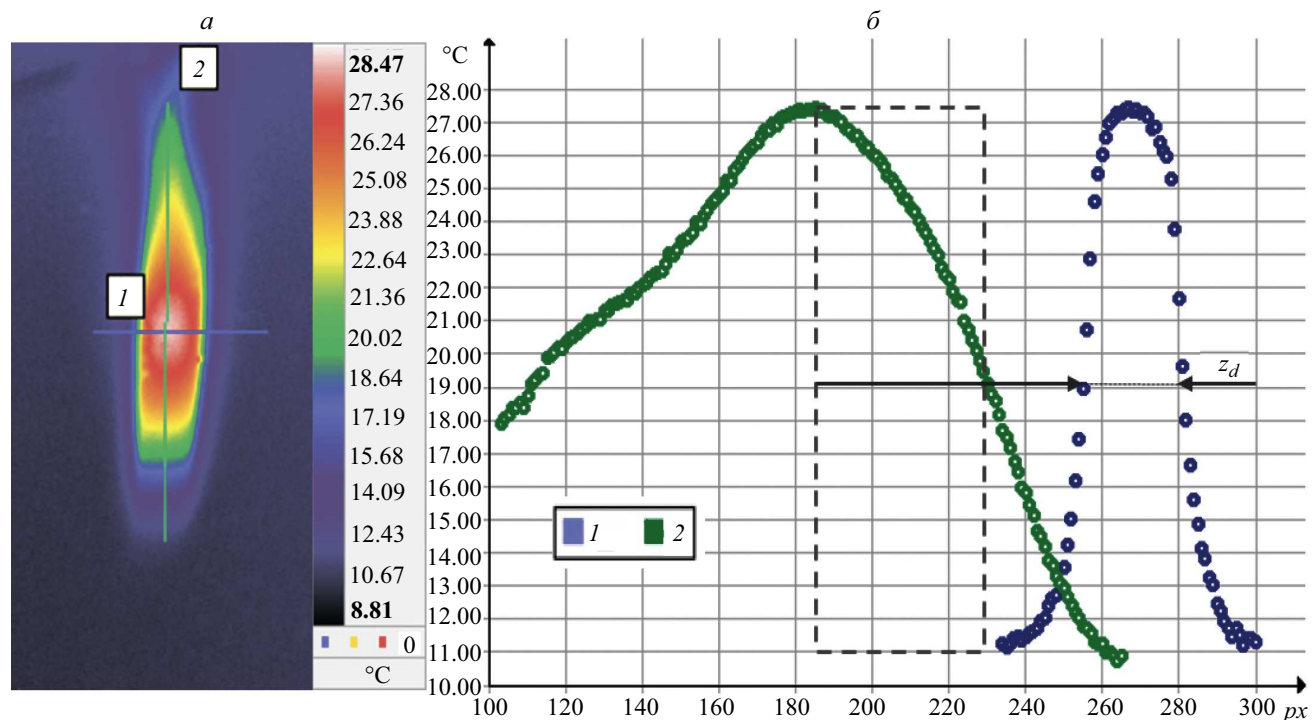


Рис. 4. *a* — Термограмма затопленного диска при опускании, *б* — продольный и поперечный профили диска в соответствии с термограммой *a*

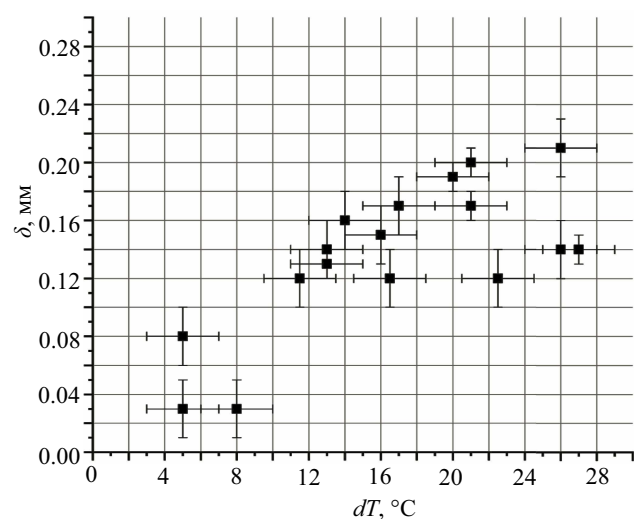


Рис. 5. Зависимость толщины проникновения средневолнового ИК-излучения от температуры объекта

т.к. конвективная компонента развивается за значительно большие времена и не фиксируется на мгновенном изображении. Она распространяется за диском в виде следа. Отрезок продольного профиля от полувысоты до максимального значения профиля принимается за излучение от диска.

На основании полученных термограмм рассчитана толщина проникновения ИК-излучения, которая для температур  $dT = 15\text{--}30^\circ\text{C}$  равна  $\delta = 0.16 \pm 0.02$  мм. Зависимость глубины поглощения от температуры диска для более широкого температурного диапазона  $dT = 5\text{--}30^\circ\text{C}$  представлена на рис. 5. При увеличении температуры  $dT$  между диском и окружающей жидкостью измеряемая толщина слоя воды имеет тенденцию к увеличению.

## ВЫВОДЫ

В работе проанализированы возможности ИК-термографии при регистрации динамических процессов в пристеночном слое воды. Проведены эксперименты по исследованию толщины слоя воды, прозрачного для инфракрасного излучения. Различный масштаб конвективного и радиационного переносов позволил выделить собственно излучательную компоненту при термографической регистрации быстропротекающих процессов. Выделен поток излучения, испускаемого с поверхности нагретого тела, погружаемого в контакте с окном в воду со скоростью до 10 см/с; показано, что для условий экспериментов толщина проникновения не превышает  $\delta = 0.2$  мм. Получена экспериментальная зависимость толщины слоя проникновения ИК-излучения в спектральном диапазоне (3.7–4.8 мкм) для различной величины температурного контраста,  $dT = 5\text{--}30^\circ\text{C}$ .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 19-79-00162.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд., доп. М.: Спектр, 2013.
2. Leontiev A. I., Kiselev N. A., Burtsev S. A. et al. // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016. **79**. P. 74.
3. Kiselev N. A., Leontiev A. I., Vinogradov Yu. A. et al. // *International Journal of Thermal Sciences*. 2019. N 136. P. 396.
4. Simon B., Filius A., Tropea C., Grundmann S. // *Exp Fluids*. 2016. 57:93
5. Carlomagno G. M., Cardone G. // *Exp Fluids*. 2010. **49**. P. 1187.
6. Judd K. P., Smith G. B., Handler R. A., Sisodia A. // *Phys. Fluids*. 2008. N 20. 115102.

7. Rohlf W., Hausteин H.D., Garbrecht O., Kneer R. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. **55**, N 25–26. P. 7728.
8. Dupont J., Mignota G., Paladino D., Prasser H. // *Nuclear Engineering and Design*. 2018. N 336. P. 80.
9. Nakamura H., Shiibara N., Yamada S. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2017. N 63. P. 46.
10. Carlomagno G.M., Ianiro A. // *Exp. Thermal Fluid Sci*. 2014. N 58. P. 15.
11. Большушин М. А., Знаменская И. А., Фомичев В. И. // Доклады Академии наук. М.: Наука. 2015. **465**. № 1. С. 38.
12. Знаменская И. А., Коротеева Е. Ю., Новинская А. М., Сысоев Н. Н. // ПЖТФ. 2016. № 13. С. 51. (Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Yu., Novinskaya A. M., Sysoev N. N. // *Technical Physics Letters*, Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom). **42**, N 7. P. 686.)
13. Koroteeva E., Znamenskaya I., Ryazanov P., Novinskaya A. // PSFVIP-11. 2017. Кумamoto, Япония. 087-1-087-3.
14. Знаменская И. А., Коротеева Е. Ю., Новинская А. М., Рязанов П. А. // РНКТ-7. 2018.
15. Znamenskaya I., Koroteeva E., Shagiyanova A. // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. 2019. **26**, N 1. P. 49.
16. Zolotarev V.M., Mikhailov B.A., Alperovich L.L., Popov S.I. // *Optics and Spectroscopy*. 1969. **27**. P. 430.
17. Кутеладзе С. С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
18. Филипов Л. П. Измерение теплофизических свойств методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1984.
19. Кравчун С. Н., Лунаев А. А. Метод периодического нагрева в экспериментальной теплофизике. Изд. Казанского университета, 2006.

### Analysis of the Visualization Region in Near-Wall Fluid Layer by High-Speed Infrared Thermography

A. M. Shagiyanova<sup>a</sup>, E. Yu. Koroteeva<sup>b</sup>, I. A. Znamenskaya<sup>c</sup>, M. E. Dashyan, L. A. Blagonravov, N. N. Sysoev

*Department of Molecular Processes and Extreme Matter States, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>shagiyanova@physics.msu.ru, <sup>b</sup>koroteeva@physics.msu.ru, <sup>c</sup>znamen@phys.msu.ru.*

The capabilities of infrared thermal imaging at a rate of over 100 Hz to measure thermal fields of nonisothermal boundary liquid layer through an infrared-transparent window are analyzed. Experiments have been carried out to conduct an integrated estimate of the recorded water layer thickness for various conditions; it was shown that the penetration depth of infrared radiation in the operating range of the thermal imager (3.7–4.8  $\mu\text{m}$ ) does not exceed 0.2 mm.

*Keywords:* infrared thermography, radiation, submerged flows, liquid.

PACS: 47.80.Jk, 44.20.+b, 44.40.+a.

*Received 29 November 2019.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2020. **75**, No. 2. Pp. 143–147.

#### Сведения об авторах

1. Шагианова Анастасия Михайловна — аспирант; тел.: (495) 939-27-41, e-mail: shagiyanova@physics.msu.ru.
2. Коротеева Екатерина Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-27-41, e-mail: koroteeva@physics.msu.ru.
3. Знаменская Ирина Александровна — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: znamen@phys.msu.ru.
4. Дашян Марк Эрикович — студент; e-mail: mark.dashyan@gmail.com.
5. Благонравов Лев Александрович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-43-88, e-mail: blagonravovla@mail.ru.
6. Сысоев Николай Николаевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru.