

Курсовая работа по теме
«Применение термографии к
исследованию импактной
затопленной струи жидкости»

Выполнил студент 213 группы
Физического факультета
МГУ им. М. В. Ломоносова
Потрашков Максим

Научный руководитель – с.н.с. Коротеева Е. Ю.

В данной работе:

- даётся краткое описание **ИМПАКТНЫХ** затопленных струй жидкости;
- рассматриваются методы исследования **ИМПАКТНЫХ** затопленных струй;
- демонстрируются результаты проведенных экспериментов по термографическому исследованию **ИМПАКТНОЙ** затопленной струи при *одновременной* регистрации теплового потока как с **ИМПАКТНОЙ** пластины, так и из узкого пристеночного слоя жидкости.

Импактные затопленные струи как объект исследования

Импактными струями называются струи жидкости или газа, натекающие на теплоотдающую поверхность.

Применения импактных струй:

- охлаждение турбинных лопаток;
- сушка ткани и бумаги;
- нагревание печей;
- закалка стекла и металла;
- производство пищи и др.

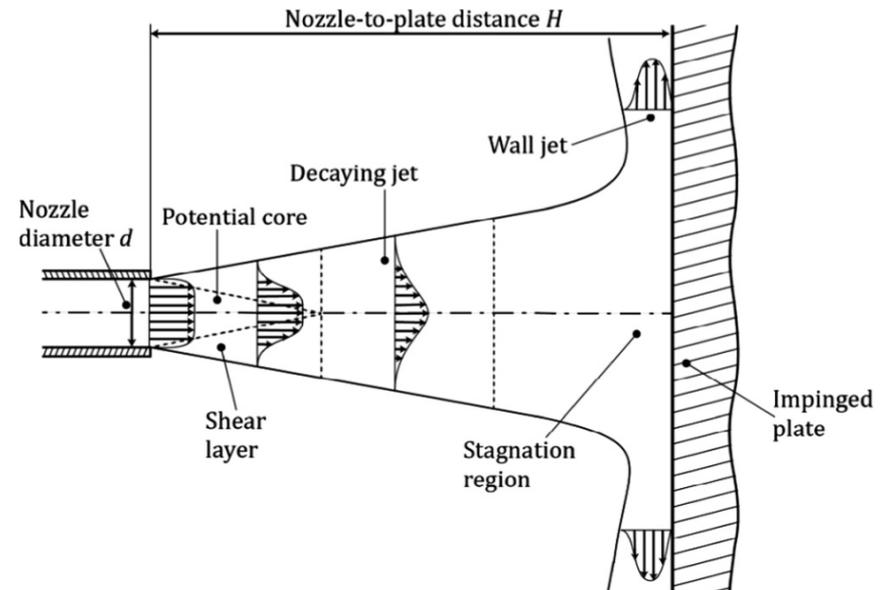


Рис. 1 Схема структуры затопленной импактной струи [3].

Роль турбулентности в теплообмене импактной струи

Турбулентность потока струи можно охарактеризовать числом Рейнольдса Re :

- рассеянная ламинарная струя, $Re < 300$;
- ламинарная струя, $300 < Re < 1000$;
- полутурбулентная струя, $1000 < Re < 3000$;
- турбулентная струя, $Re > 3000$

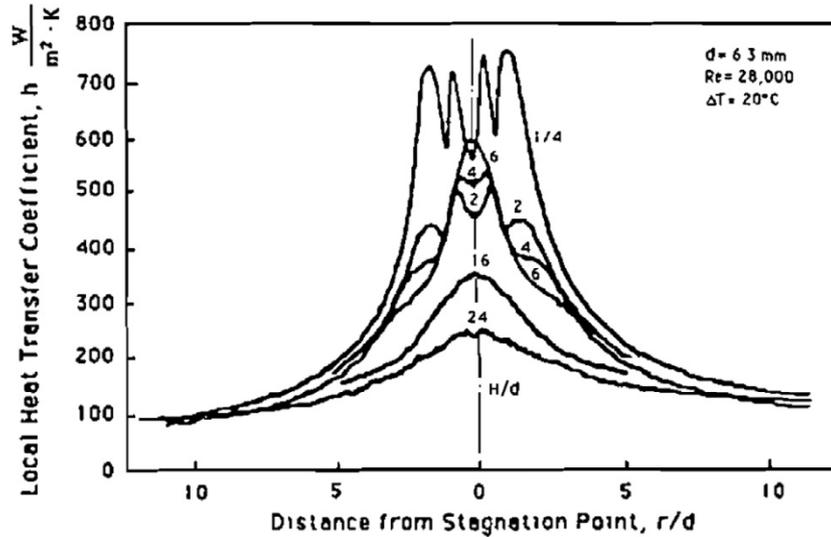


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от расстояния от центра струи для различных H/D [3].

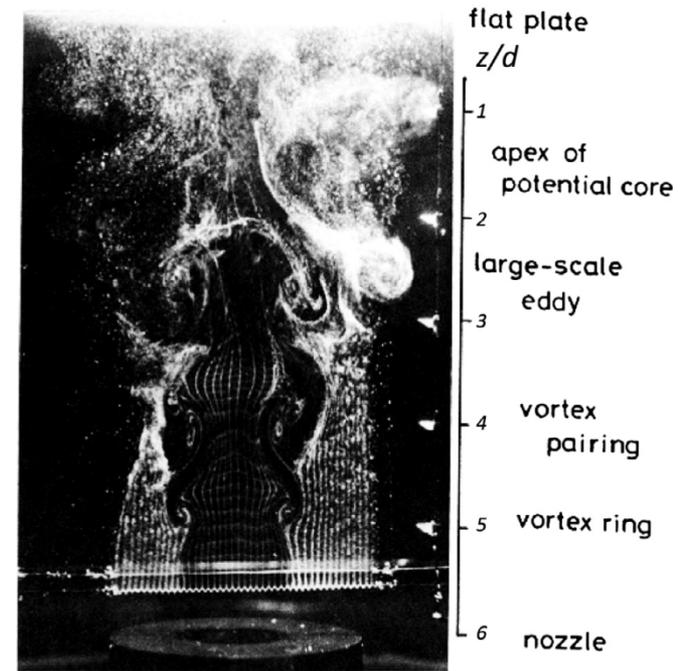


Рис. 2. Визуализация течения импактной струи методом водородных пузырьков. Хорошо наблюдаются вихревые структуры разного масштаба [3].

Методы исследования

- точечные измерения с помощью термопары, прибор Гардона (Gardon's Gauge);
- визуализация изотерм нагретой поверхности с помощью жидких кристаллов;
- инфракрасная термография *импактной поверхности*;
- инфракрасная термография *пристеночного слоя*;
- Particle image velocimetry (PIV)

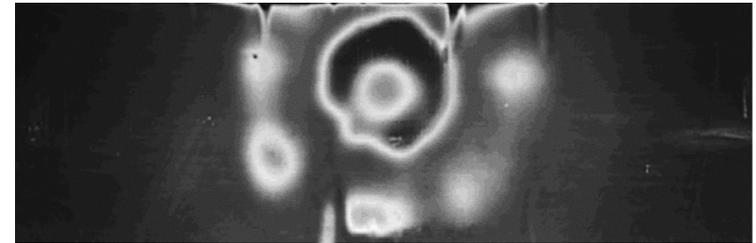


Рис. 4. Визуализация нагретой поверхности с помощью жидких кристаллов [4].

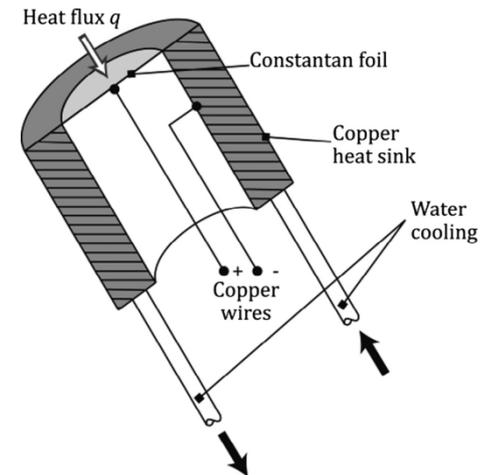


Рис. 5. Схема прибора Гардона [3].

Базовые принципы ИК термографии

Формула Планка:

$$\frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

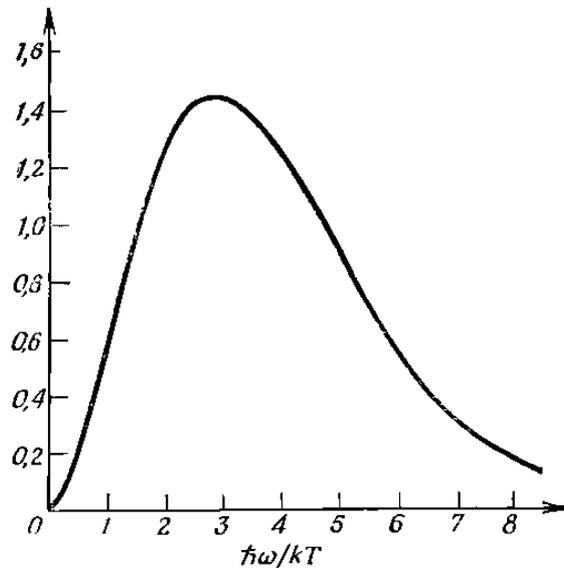


Рис. 6. Спектр излучения абсолютно чёрного тела.

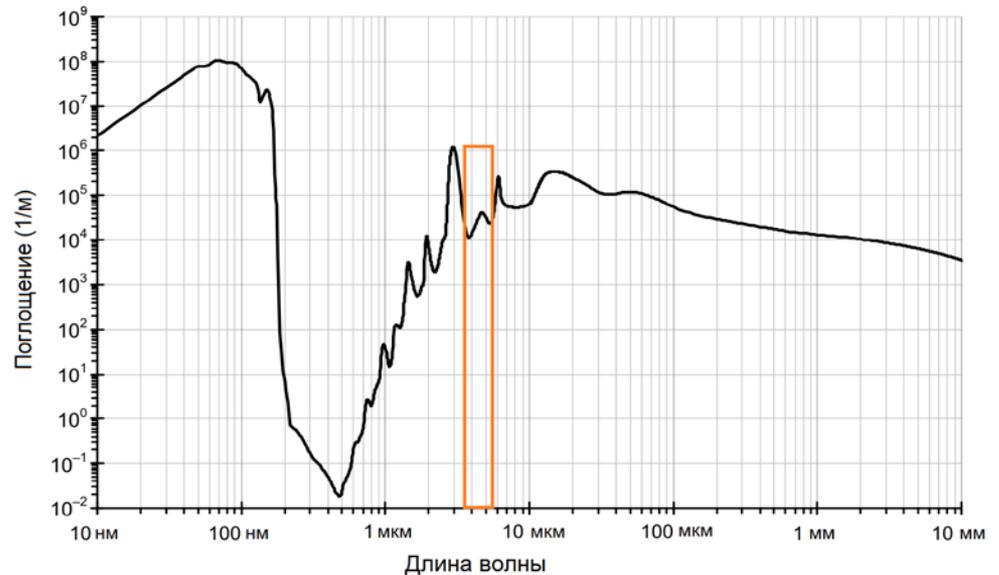


Рис. 7. Спектр поглощения воды, выделенная область соответствует инфракрасному диапазону используемой камеры [7].

Экспериментальная установка

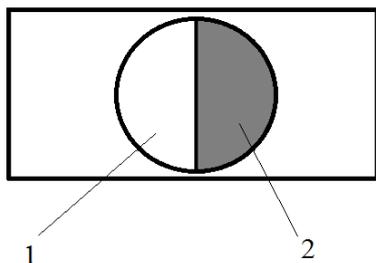


Рис. 8. ИК-прозрачное стекло (селенид цинка):

**1 – половина окна открыта;
2 – половина окна покрыта материалом (фольга , изолента)**

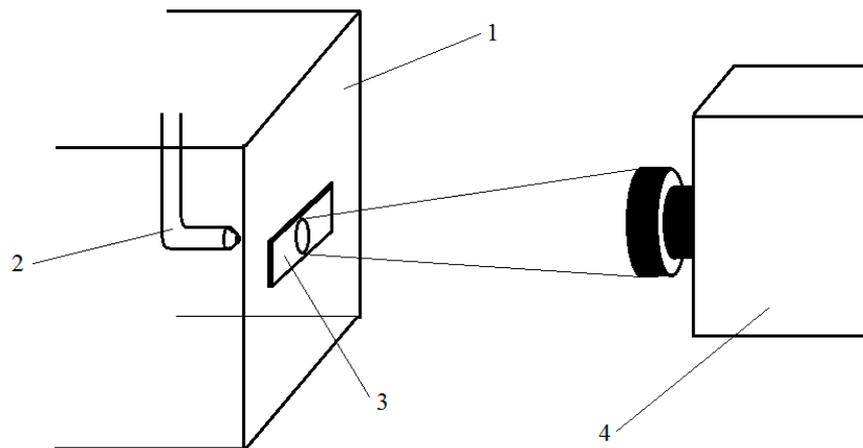


Рис. 9. Схема экспериментальной установки:

1 - непрозрачная ёмкость, 2 - трубка, 3 – ИК-прозрачное окно (ZnSe), 4 – камера FLIR SC7000.

Материал	Толщина, мм
Фольга (на двуст. скотче)	0,02 (+ ~0,08)
Изолента	0,13

Частота съёмки – 300 Гц

Продолжительность – 256 кадров (~850 мс)

Результаты эксперимента

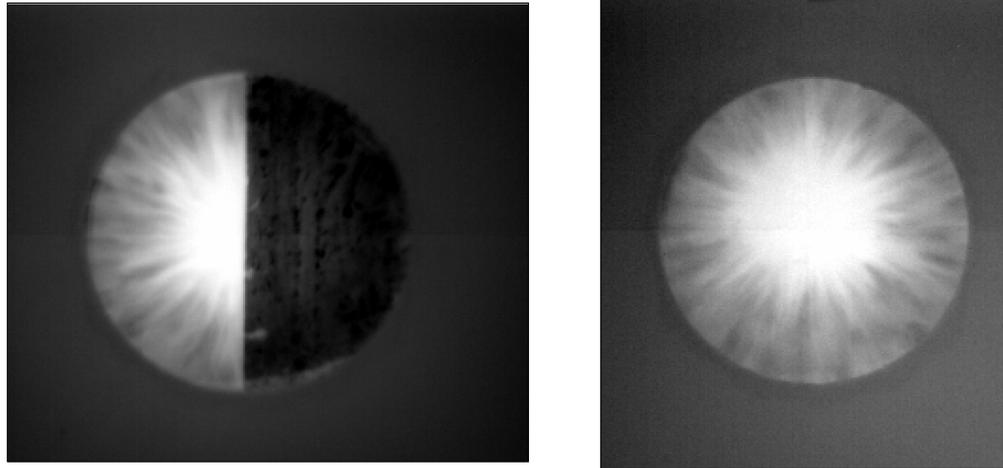
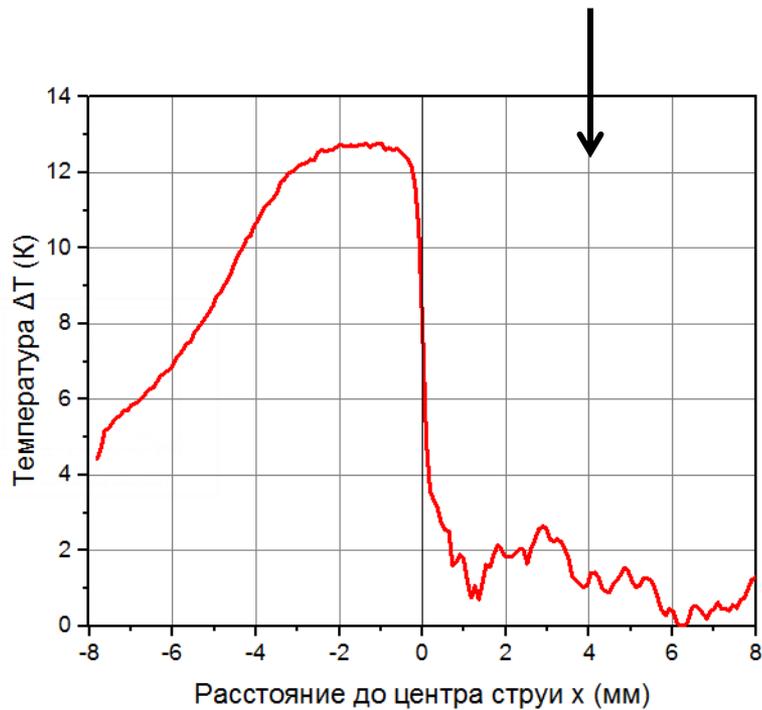


Рис. 10. Типичные кадры поверхности стекла с различными материалами: фольга (слева, правая половина окна), изоленга (справа, левая половина окна).

Параметры струи	
Число Рейнольдса Re	16200 ± 4200 (20°C); 20300 ± 5300 (30°C)
Диаметр сопла D , мм	2
Безразмерное расстояние H/D	$1,25 \pm 0,25$
Температура струи, $^\circ\text{C}$	23; 32

фольга (непрозрачна в ИК)



изолента (частично прозрачна в ИК)

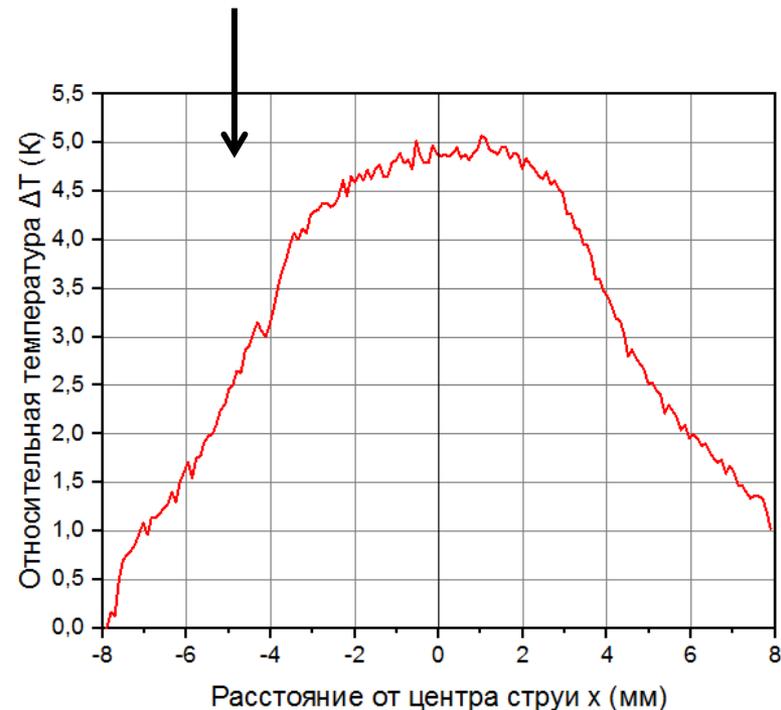


Рис. 11. Поперечные профили среднего распределения температуры (относительно минимума): с фольгой (слева, правая половина), изолентой (справа, левая половина).

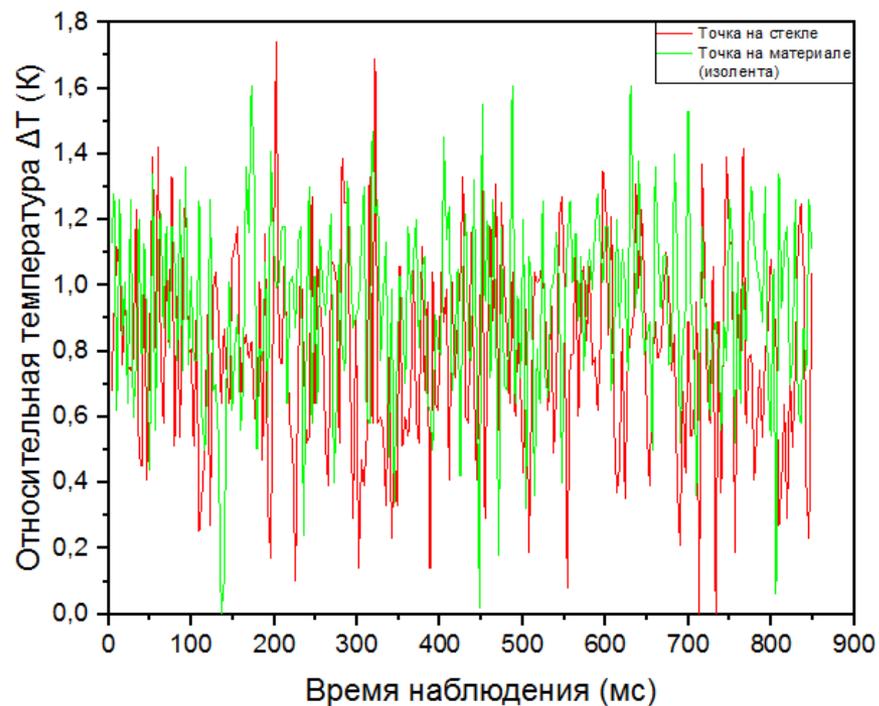
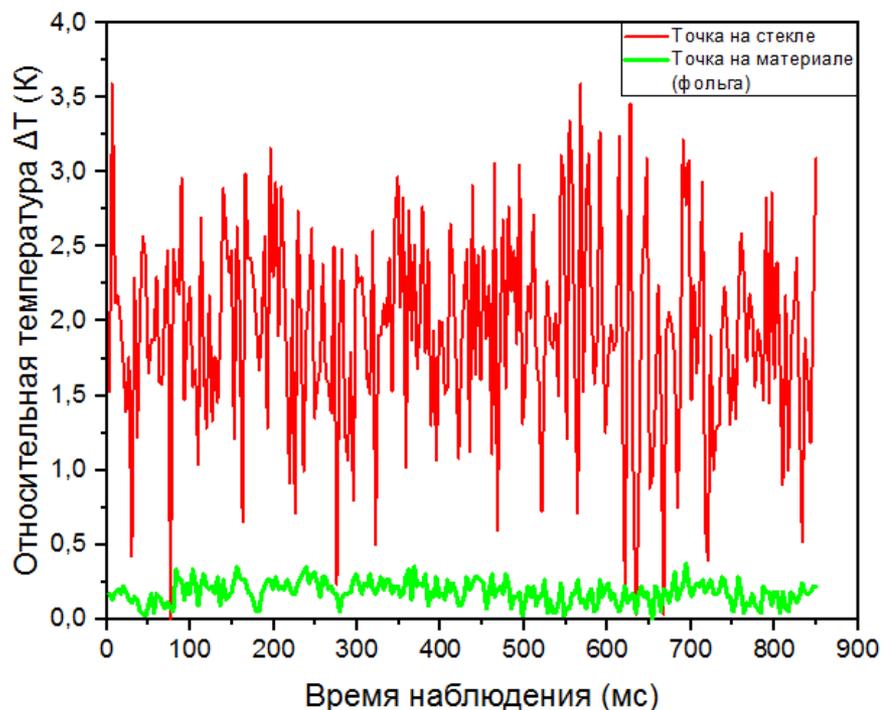


Рис. 12. График изменения температуры (относительно минимума) для двух равноудалённых от центра струи точек на стекле и материале: фольга (слева), изолента (справа).

Выводы

- Были показаны возможности ИК термографии в исследовании температурного распределения пристеночного течения, импактной поверхности.
- Была реализована методика одновременного измерения теплового потока как с импактной поверхности, так и из узкого пристеночного слоя воды.
- На основе реализованной экспериментальной методики было исследовано течение импактной затопленной струи с параметрами: $D = 2$ мм; $H/D = 1,25 \pm 0,25$; $Re = 16200 \pm 4200$ (20300 ± 5300).
- На основе полученных данных были сопоставлены результаты для двух различных импактных материалов, оценены их оптические и термодинамические свойства.

Список литературы

- [1] R. Gardon, J. Cobonpue, Heat transfer between a flat plate and jets of air impinging on it, *Int. Developments in Heat Transfer*, ASME, New York, 1962, pp. 454–460.
- [2] Бильский А. В. Гидродинамическая структура осесимметричной импактной струи: дис. канд. ф.-м. наук: 01.04.14.
- [3] G. M. Carlomagno, A. Ianiro, Thermo-fluid-dynamics of submerged jets impinging at short nozzle-to-plate distance: A review. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014.
- [4] J. Vejrazka, P. Marty, An alternative technique for the interpretation of temperature measurements using thermochromic liquid crystals, *Heat Transfer Eng.* 28 (2007) 154–162.
- [5] T.E. Cooper, R.J. Field, J.F. Meyer, Liquid crystal thermography and its application to the study of convective heat transfer, *J. Heat Transfer* 97 (1975) 442–450.
- [6] Znamenskaya I., Koroteeva E., Shagiyanova A. Thermographic analysis of turbulent non-isothermal water boundary layer // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. — 2019. — Vol. 26, no. 1. — P. 49–56.
- [7] S. Prahл Optical absorption of water <http://omlc.ogi.edu/spectra/water/> (2012)
- [8] Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с., ил.
- [9] FLIR Systems SC7000 – руководство пользователя