

УДК 536.242; 532.3
PACS 44.10.+i

Влияние нагрева на изменение веса тела в различных жидкостях

Л. Н. Буркова, А. Н. Кондрашов, К. А. Рыбкин, И. О. Сбоев

Пермский государственный национальный исследовательский университет
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

email: lyubashaburkova@gmail.com, akon.psu@yandex.ru, k.rybkin@gmail.com, ivan-sboev@yandex.ru

В работе экспериментально изучено влияние нагрева на изменение веса тела, помещенного в вязкую жидкость. В качестве объекта исследования использовался конус из сплава Розе, внутри которого располагался электрический нагреватель. В ходе выполненных экспериментов проводилась оценка изменения веса нагреваемого конуса со временем. В качестве рабочих жидкостей выступали дистиллированная вода и глицерин. Для обеих сред показано быстрое уменьшение веса тела в момент включения источника питания с последующим его возрастанием. В момент отключения источника питания наблюдалось резкое увеличение веса, а по окончании опыта его значение оказывалось меньше начального. Эти явления объясняются тем, что при возникновении конвективных течений на погруженное в жидкость тело начинала действовать дополнительная выталкивающая сила, и, как следствие, вес тела уменьшался. Последующее увеличение веса связано с изменением температуры, а значит, и плотности жидкости, вблизи нагретого конуса. Также, в работе исследовались структуры потоков, возникающих при одинаковых интенсивностях нагрева в разных жидкостях. Путем добавления в глицерин флуоресцентных красителей была получена картина конвективных течений в плоскости лазерного ножа; при помощи взвеси светоотражающих частиц проведена оценка скорости течения жидкости. Скорость частиц вблизи поверхности конуса оказалась максимальной и в воде достигала 3.4 мм/с. Однако наибольшее изменение веса составило всего 0.03%. Заметнее оказалось уменьшение веса тела в глицерине, которое составило 0.13 % от начального значения.

Ключевые слова: тепловая конвекция; нагрев; изменение веса.

Поступила в редакцию 19.03.2017; принята к опубликованию 05.05.2017

Weight loss of the heated solid body in viscous fluid

L. N. Burkova, A. N. Kondrashov, K. A. Rybkin, I. O. Sboev

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

email: lyubashaburkova@gmail.com, akon.psu@yandex.ru, k.rybkin@gmail.com, ivan-sboev@yandex.ru

The effect of heating on the change in the weight of a heated body in two different liquids has been experimentally studied. The cone was used, made of the Rose alloy, inside which the resistor was located. During the study, the weighing was carried out in a body placed in a liquid. It is shown that the maximum body temperature in glycerin at the same heat source power is 2.5 times higher than the body temperature in water. For both liquids, it was found that at the initial moment the body weight decreased, and then began to increase. At the time of power supply disconnection, a sharp increase in weight was observed and after the end of the experiment its value turned out to be less than the initial value. This is explained by the fact that when convective currents arise on a body im-

mersed in a liquid, the additional force begins to act, which pushes the body out of the liquid, and as a consequence, the body weight decreases. The subsequent increase in weight is associated with a change in the temperature and density of the fluid near the body, and at the time of switching off the heating, a decrease in weight is caused by a weakening of the convective currents. Structural flows were studied using the laser knife method. By adding fluorescent dyes to glycerin, a picture of the convective currents in the plane of the laser knife was obtained, and mean velocities were found by means of a suspension of light reflecting particles. The velocity in the boundary layer is maximal, in water it reached 3.4 mm / s, in connection with which, the body weight decreased by 0.03%. The greatest change in weight was observed in glycerol and amounted to 0.13%.

Keywords: heating; change of weight; thermal convection.

Received 19.03.2017; accepted 05.05.2017

doi: 10.17072/1994-3598-2017-1-26-30

1. Введение

Установившиеся конвективные течения, возникающие под действием компактных источников тепла, активно исследуются на протяжении последних двух десятилетий [1–9]. Первоначально задача носила преимущественно фундаментальный характер. Однако со временем, в связи с бурным развитием полупроводниковых технологий, проблема приобрела еще и прикладное значение.

Направление основных исследований долгое время определялось необходимостью решения проблемы эффективности охлаждения. Так, за несколько последних десятилетий появилось большое количество статей, посвященных теплообмену в замкнутых полостях с различными граничными условиями.

Одна из работ сотрудников Массачусетского технологического института посвящена проблеме динамики группы нагретых частиц в жидкости [10]. Их исследование показало, что в тех случаях, когда локализованный источник тепла создает в слое жидкости градиент давления, за счет изменения плотности окружающей среды на него начинает действовать дополнительная выталкивающая сила. При этом в описанной системе изучалось отклонение микроскопических частиц (100 – 250 мкм) во внешнем электрическом поле в зависимости от степени нагрева. Изменение температуры столь малых объектов осуществлялось за счет действия лазерного излучения. Возникновение не скомпенсированных кулоновских сил было обусловлено смещением микрочастицы вследствие изменения ее веса.

Последующий обзор литературы показал, что вопрос о поведении нагретых макроскопических тел под действием созданного ими конвективного течения до сих пор остается открытым.

В настоящей работе описаны результаты экспериментов, направленных на изучение влияния интенсивности конвективных процессов, а так же на изменения веса погруженного в жидкость нагретого твердого тела.

2. Описание экспериментальной установки и методики измерений

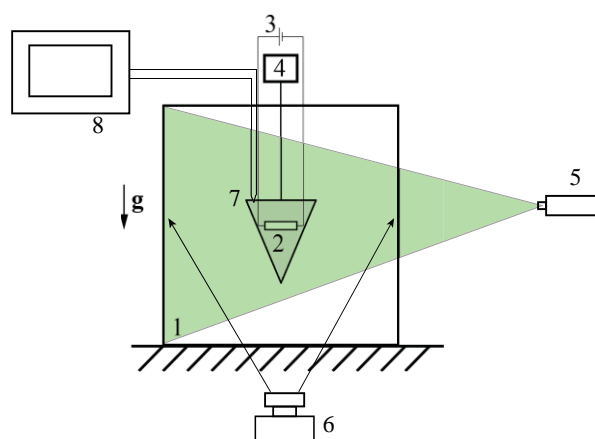


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – стеклянная кювета, 2 – исследуемый объект, 3 – источник питания, 4 – электронные весы, 5 – лазер, 6 – цифровая фотокамера, 7 – терпара, 8 – микровольтметр (Цветной в электронной версии)

Используемая экспериментальная установка включала в себя: исследуемый объект в форме конуса из сплава Розе с диаметром основания 36.5 мм, высотой 48.1 мм и массой 171.3 г; стеклянную кювету с длиной ребра 200 мм; лабораторные весы с дискретностью 0.01 г; медь-константановую дифференциальную терпару; микровольтметр; источник питания; лазер мощностью 0.4 Вт с длиной волны 532 нм; цифровую фотокамеру (рис. 1).

Для создания объекта исследований изготавливался гипсовый негатив в форме полого конуса, в который помещались резистор сопротивлением 100 Ом и основание подвеса. После сборки частей гипсовой формы внутрь заготовки заливался сплав Розе. Спустя 10 мин форма разбивалась, и из нее извлекался затвердевший сплав в форме конуса.

В связи с необходимостью оценки температуры поверхности тела в конусе просверливалось отверстие глубиной 2 мм, куда устанавливался измерительный спай дифференциальной термопары. Контрольный спай поддерживался при комнатной температуре, равной 25°C. Конус подвешивался на весах и располагался в центре кюветы, заполненной исследуемой жидкостью.

В ходе эксперимента на резистор подавалось постоянное напряжение 30 В, при этом сила тока в цепи составила 0,3 А. Таким образом, мощность, выделяющаяся на резисторе в виде тепла, составила 9 Вт. Продолжительность каждой реализации эксперимента составляла 60 мин. В течение этого времени велась запись сигнала дифференциальной термопары и показаний весов со средним периодом опроса 30 с.

Одновременно проводилась визуализация течения при помощи флуоресцентного красителя в глицерине и светоотражающих частиц в воде. В качестве подсветки использовался лазерный нож. Плоскость для освещения была выбрана параллельной вектору гравитационного ускорения g и проходила через центр рабочей полости перпендикулярно двум противоположным боковым стеклянным стенкам.

Для визуализации течения в глицерине вдоль поверхности конуса дополнительно устанавливалась трубка, по которой в рабочий объем подавался флуоресцентный раствор. Съемка производилась на цифровую фотокамеру с частотой 2 Гц, после чего полученная серия фотографий объединялась программными методами на одном кадре.

3. Результаты экспериментов

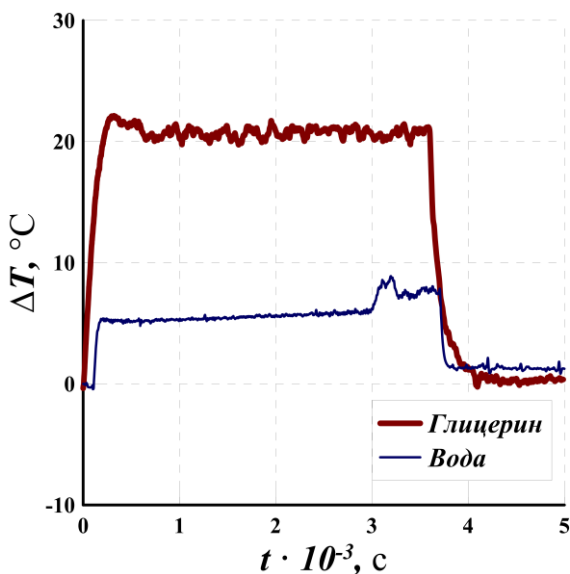


Рис. 2. Изменение превышения температуры исследуемого объекта над комнатной с течением времени (Цветной в электронной версии)

В ходе проведения экспериментов получены зависимости сигнала термопары от времени для обеих рабочих сред (рис. 2).

При включении источника питания температура поверхности тела быстро возрастает, пока в жидкости не устанавливается некоторый стационарный тепловой режим. При этом в глицерине при одинаковой мощности подогрева температура поверхности тела в установившемся режиме более чем вдвое превышает таковую в воде. Очевидно, это связано с различием в вязкостях рабочих жидкостей (динамическая вязкость воды 0,89 мПа·с, глицерина 934 мПа·с при температуре 25°C). Ввиду меньшей текучести интенсивность конвективных процессов в глицерине оказывается мала по сравнению с водой.

В эксперименте это приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи с поверхности тела и, следовательно, к увеличению температуры исследуемого объекта в менее текучей среде. Более высокая температура поверхности конуса в глицерине вызывает значительное уменьшение плотности жидкости вблизи исследуемого объекта. Локальное уменьшение плотности среды должно приводить к увеличению веса тела ввиду уменьшения выталкивающей силы со стороны жидкости (что не подтверждается в эксперименте). На рис. 3 представлено изменение веса тела со временем. Временные промежутки на графике соответствуют аналогичным интервалам на рис. 2.

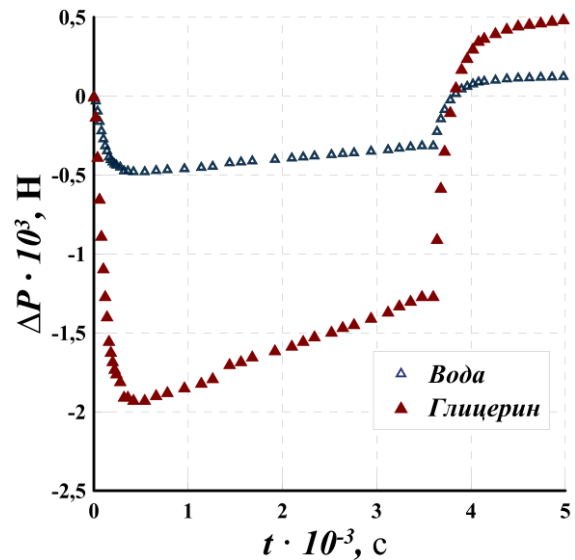


Рис. 3. Зависимости изменения веса тела от времени при нагреве в воде и глицерине (Цветной в электронной версии)

Результаты показали, что изменение веса тела в глицерине в несколько раз превышает соответствующее значение в воде. Причем значения не остаются постоянными, уменьшаясь с течением времени. Пояснить различие в весах можно, если

учесть увлечение конуса конвективным потоком. Восходящий поток жидкости оказывает давление, сила которого направлена против силы тяжести.

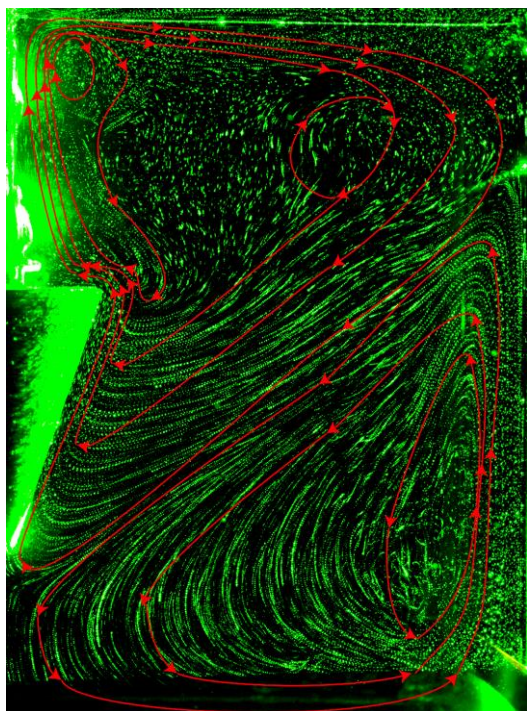


Рис. 4. Визуализация конвективного течения в воде с использованием светоотражающих частиц (Цветной в электронной версии)

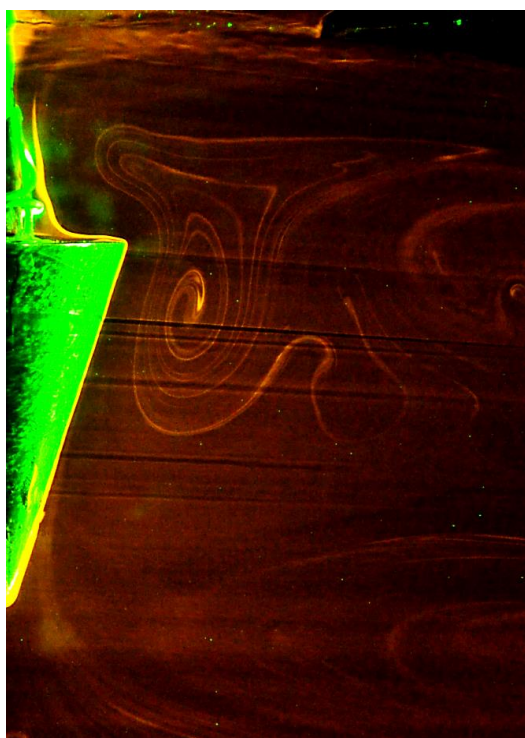


Рис. 5. Визуализация конвективных течений в глицерине с использованием флуоресцентного красителя (Цветной в электронной версии)

В ходе исследования структуры движения жидкости была получена серия фотографий, обработка и объединение которых позволили получить карту установившегося течения (рис. 4, 5). Благодаря этому удалось оценить значение максимальной скорости у поверхности тела, которая составила 3.4 мм/с.

4. Заключение

Из полученных результатов следует, что вклад конвективных потоков в подъемную силу зависит от скорости передачи импульса от жидкости к телу, а значит, и от вязкости рабочей среды. Менее текучая среда оказывает большее влияние на изменение веса нагретого конуса. Кроме того, еще одной причиной различий в изменении веса тела может оказаться структура течения, заметно отличающаяся в воде и глицерине.

В ходе исследования проведена визуализация возникающего в жидкости конвективного течения при помощи светоотражающих частиц в воде и флуоресцентного красителя в глицерине. Выполнена оценка скорости течения жидкости вблизи нагретого тела, величина которой в воде достигает значения 3.4 мм/с. Максимальное изменение веса тела в воде составило 0.03%, а в глицерине – 0.13 %.

Список литературы

1. *Andrä W.* Temperature distribution as function of time around a small spherical heat source of local magnetic hyperthermia // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 1999. Т. 194. №. 1. С. 197–203.
2. *Martynenko O.G. Khramtsov P.P.* Free-convective heat transfer: with many photographs of flows and heat exchange. Berlin: Springer, 2005. 518 p.
3. *Koca A. Oztop H.F. Varol Y.* The effects of Prandtl number on natural convection in triangular enclosures with localized heating from below // *International communications in heat and mass transfer.* 2007. V. 34. No. 4. P. 511–519.
4. *Kuznetsov G. V., Sheremet M. A.* Conjugate heat transfer in an enclosure under the condition of internal mass transfer and in the presence of the local heat source // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2009. Т. 52. №. 1. С. 1–8.
5. *Aminossadati S. M., Ghasemi B.* Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure // *European Journal of Mechanics-B/Fluids.* 2009. Т. 28. №. 5. С. 630–640.
6. *Yu Z.T.* Prandtl number dependence of laminar natural convection heat transfer in a horizontal cylindrical enclosure with an inner coaxial triangular cylinder // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2010. V. 53. No. 7. P. 1333–1340.

7. Eslami M. Jafarpur K. Laminar free convection heat transfer from isothermal convex bodies of arbitrary shape: a new dynamic model // *Heat and Mass Transfer*. 2012. V. 48. No. 2. P. 301–315.
8. Bergman T.L. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken: Wiley, 2011. 1048 p.
9. Гибанов Н.С. Шеремет М.А. Влияние формы и размеров локального источника энергии на режимы конвективного теплопереноса в квадратной полости // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2015. Т. 7. № 2. С. 271–280.
10. Amato W.S., Chi T. Free convection heat transfer from isothermal spheres in water // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1972. Т. 15. № 2. С. 327–339.
4. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. Conjugate heat transfer in an enclosure under the condition of internal mass transfer and in the presence of the local heat source *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009, vol. 52, no. 1, pp. 1–8.
5. Aminossadati S. M., Ghasemi B. Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2009, vol. 28, no. 5, pp. 630–640.
6. Yu Z.T. Prandtl number dependence of laminar natural convection heat transfer in a horizontal cylindrical enclosure with an inner coaxial triangular cylinder *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, vol. 53, no. 7, pp. 1333–1340.

References

1. Andrä W. Temperature distribution as function of time around a small spherical heat source of local magnetic hyperthermia. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1999, vol. 194, no. 1, pp. 197–203.
2. Martynenko O. G. Khramtsov P. P. *Free-convective heat transfer: with many photographs of flows and heat exchange*. Berlin: Springer, 2005. 518 p.
3. Koca A. Oztop H. F. Varol Y. The effects of Prandtl number on natural convection in triangular enclosures with localized heating from below. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2007, vol. 34, no. 4, pp. 511–519.
7. Eslami M. Jafarpur K. Laminar free convection heat transfer from isothermal convex bodies of arbitrary shape: a new dynamic model. *Heat and Mass Transfer*. 2012, vol. 48, no. 2, pp. 301–315.
8. Bergman T.L. *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken: Wiley, 2011. 1048 p.
9. Gibanov N. S. Sheremet M. A. Influence of a form and the sizes of a local energy source on regimens of convective heattransfer in a square cavity. *Computer researches and modeling*. 2015, vol. 7, no. 2, pp. 271–280 (In Russian).
10. Amato W.S., Chi T. Free convection heat transfer from isothermal spheres in water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1972, vol. 15, no. 2, pp. 327–339.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Буркова Л. Н., Кондрашов А. Н., Рыбкин К. А., Сбоев И. О. Влияние нагрева на изменение веса тела в различных жидкостях // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2017. № 1 (35). С. 26–30. doi: 10.17072/1994-3598-2017-1-26-30

Please cite this article in English as:

Burkova L. N., Kondrashov A. N., Rybkin K. A., Sboev I. O. Weight loss of the heated solid body in viscous fluid // *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 1 (35), pp. 26–30. doi: 10.17072/1994-3598-2017-1-26-30