

УДК 532.6

ВЛИЯНИЕ НЕМОНОТОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОБОДНУЮ КОНВЕКЦИЮ ОТ ЛИНЕЙНОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

В. И. Букреев, Н. В. Гаврилов, А. В. Чеботников

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск
E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований свободной конвекции от нагретой проволоки в воде для двух случаев: когда температура воды больше и меньше температуры, при которой вода имеет максимальную плотность. Показано, что в первом случае образующаяся при нагреве конвективная струя поднимается, достигая свободной поверхности. Во втором случае высота подъема конвективной струи ограничена, вследствие того что в головной части струи вода приобретает максимальную плотность и становится тяжелее окружающей воды.

Ключевые слова: немонотонная зависимость плотности воды от температуры, свободная конвекция, линейный источник тепла.

При атмосферном давлении зависимость плотности воды ρ (в килограммах на метр кубический) от температуры T (в градусах Цельсия) описывается следующей формулой, полученной интерполяцией справочных данных для дистиллированной воды:

$$\rho = 999,877 + 0,049\,15T - 0,006\,68T^2 + \dots$$

В диапазоне температур $0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ достаточно ограничиться тремя членами этого ряда. При $T \approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точнее, при $T = 3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$) плотность дистиллированной воды имеет максимальное значение, равное $\rho_{\max} = 999,984\text{ кг/м}^3$. В диапазоне температур $T = 0 \div 8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ одному значению плотности воды соответствуют два различных значения температуры.

Плотность пресной воды при $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше ее значения при $T = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 0,015 %. Однако это оказывает существенное влияние на гидрофизические процессы в водоемах. В тех случаях когда по тем или иным причинам вступают в контакт массы воды с температурами больше и меньше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, часть воды приобретает максимальную плотность и опускается. В частности, поэтому весной и осенью в крупных озерах и водохранилищах средних широт образуется и долго существует термический бар. Обзор работ, посвященных изучению термического бара, приведен в [1–3]. Погружение более плотной воды в окрестности термического бара порождает крупномасштабные циркуляции, которые играют определяющую роль в процессе обмена кислородом и питательными веществами между поверхностными и придонными слоями пресных и слабосоленых водоемов средних широт [1]. Также немонотонная зависимость плотности воды от температуры оказывает существенное влияние на распространение дождевой воды в водоеме [4] и на струйные течения [5, 6]. Ряд экспериментальных (см., например, [7, 8]) и расчетно-теоретических (см.,

например, [9, 10]) работ посвящен решению задачи о проникающей конвекции в горизонтальном слое воды, на нижней границе которого $T = 0$ °С, на верхней границе $T > 4$ °С.

Экспериментальное изучение свободной конвекции от нагретой проволоки в воздухе выполнено в работе [11], в растворах соды и поваренной соли — в [12]. Результаты экспериментальных исследований свободной конвекции от точечного источника в фотохромной жидкости приведены в работе [13]. Обзор современного состояния теоретических исследований свободной конвекции от линейного и точечного источников тепла, а также плавучих струй и термиков содержится в [14–16]. Обзор работ, посвященных изучению проникающей конвекции и интрузии, в частности ныряния потока, отягощенного наносами, дан в [17, 18]. Термокапиллярная конвекция от линейного источника тепла, расположенного вблизи свободной поверхности воды, исследовалась в экспериментальной работе [19]. Отметим, что в [12–19] влияние немонотонной зависимости плотности воды от температуры не изучалось.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования свободной конвекции в воде от линейного источника тепла для случаев, когда температура воды $T > 4$ °С и $T < 4$ °С. Будем называть эти опыты опытами в обычных и аномальных условиях соответственно. Температуру первоначально покоящейся воды обозначим через T_1 в обычных условиях, через T_2 в аномальных условиях.

Опыты выполнялись в лотке длиной 63 см, шириной 20 см и высотой 40 см, изготовленном из органического стекла толщиной 1,2 см. Лоток заполнялся водопроводной водой. Охлаждение воды осуществлялось с помощью снега. При указанной толщине стенок лотка наиболее интенсивный теплообмен воды с воздухом в лабораторном помещении происходил через свободную поверхность. При малых градиентах температуры, которые имели место в экспериментах, термокапиллярные эффекты не проявлялись, и свободная поверхность оставалась неподвижной. С учетом этого в ряде экспериментов вода закрывалась сверху пенопластом. В течение одного опыта, продолжавшегося не более 5 мин, изменение плотности воды в лотке вследствие теплообмена с воздухом в лабораторном помещении не превышало 10^{-5} г/см³.

Электрически изолированная манганиновая проволока с диаметром сечения 0,01 см закреплялась на горизонтальных державках диаметром 0,4 см. Проволока нагревалась постоянным электрическим током. В ряде опытов использовалась спираль из нихромовой проволоки с диаметром сечения 0,05 см. Внешний диаметр спирали равен 0,3 см. Потери мощности в проводах, соединяющих источник тока с нагреваемым элементом, пренебрежимо малы. Проволока или спираль располагалась поперек лотка на всю его ширину. Температура воды измерялась термисторными датчиками с погрешностью не более 0,1 °С.

Использовались четыре метода визуализации движения воды. Наиболее объективную информацию об изменении плотности жидкости дают интерферометрический, теневой и шпирен-методы. Эти оптические методы позволяют получать не только качественную, но и количественную информацию. Однако для получения количественной информации изменения плотности должны быть достаточно большими. Значительно изменяется при нагреве плотность воздуха. Например, при изменении температуры воздуха в диапазоне $10 \div 20$ °С его плотность изменяется на 4,4 %. Существенные изменения плотности имеют место при движении стратифицированной по плотности воды, в случае если стратификация обусловлена изменением концентрации растворенной соли, а не изменением температуры. Примеры эффективного применения оптических методов визуализации в воздушных потоках приведены в работе [20], а в водных растворах соли или сахара — в работах [12, 21, 22].

Плотность чистой воды зависит от температуры значительно слабее, чем плотность воздуха. Например, при изменении температуры в диапазоне $T = 10 \div 20$ °С плотность

воды изменяется только на 0,2 %. Особенно малые изменения плотности воды имеют место в окрестности температуры воды, равной 4 °С. Это затрудняет получение количественной информации при изучении конвекции в воде с помощью оптических методов.

В данной работе использовались синтетический шпирен-метод и теневой метод. Суть синтетического шпирен-метода изложена в работе [23]. При реализации данного метода на расстоянии от одной из боковых стенок лотка, равном 1,1 м, помещался ярко освещенный белый экран с произвольно нанесенными на него черными точками или наклонными линиями. На этот экран фокусировался объектив видеокамеры, расположенной на расстоянии 1,2 м от противоположной стенки лотка. На отдельно взятом видеокадре регистрируются образы черных точек или линий на экране в фиксированный момент времени t . Используются два видеокадра, полученные с интервалом времени Δt . На участках этих видеокадров, которым соответствуют области жидкости с постоянной плотностью, положение образов черных точек или линий остается неизменным. На участках, которые соответствуют областям жидкости с переменной во времени плотностью, изображение черных точек или линий изменяется от одного кадра к другому. Изображения, взятые со сдвигом во времени Δt , “вычитаются” друг из друга, например с помощью стандартной компьютерной программы “Adobe Photoshop”. В результате на снимке остаются только изображения тех черных точек или линий, которые сместились за время Δt вследствие изменения плотности.

Примеры изображений, полученных синтетическим шпирен-методом в обычных ($T_1 = 7,3$ °С) и аномальных ($T_2 = 1,3$ °С) условиях, приведены на рис. 1, *a, б* соответственно (время с момента начала нагрева $t = 22$ с, глубина слоя воды $H = 28$ см, мощность нагрева на единицу длины проволоки $M = 3,0$ Вт/см). Проволока расположена перпендикулярно плоскости изображения. Нижняя и верхняя границы изображения, приведенного на рис. 1, *a*, соответствуют положению дна и свободной поверхности. На рис. 1, *б* масштаб изображения в два раза больше, чем на рис. 1, *a*. Нижняя граница изображения на рис. 1, *б* также соответствует дну лотка, а свободная поверхность расположена выше верхней границы кадра. При проведении опытов в обычных и аномальных условиях

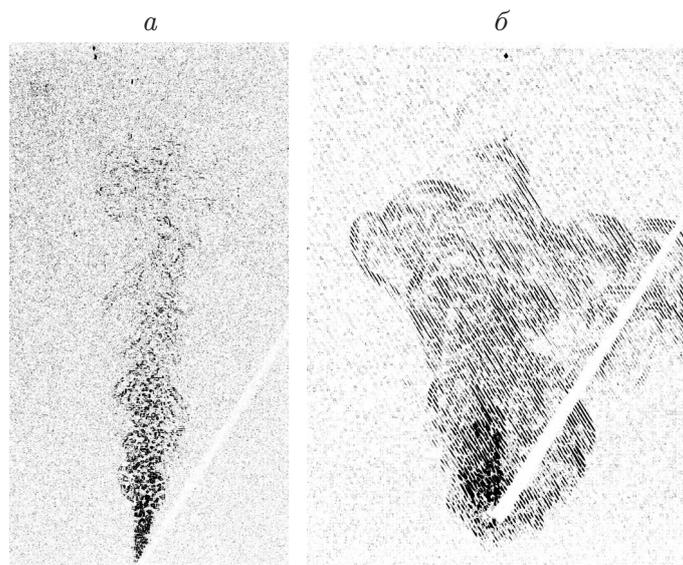


Рис. 1. Картины течения, полученные с использованием синтетического шпирен-метода при $H = 28$ см, $M = 3,0$ Вт/см, $t = 22$ с:
a — $T_1 = 7,3$ °С (обычные условия), *б* — $T_2 = 1,3$ °С (аномальные условия)

различались только значения температуры воды, которые задавались таким образом, что различие соответствующих им значений плотности воды составляло только 0,0005 %. При этом $T_1 > 4\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1, *а*), а $T_2 < 4\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 1, *б*). При проведении опытов в обычных условиях использовался экран с точками, в аномальных условиях — экран с наклонными линиями.

В обычных условиях (см. рис. 1, *а*) нагретая проволокой вода в виде плавучей струи быстро поднялась до уровня свободной поверхности. Через 2 мин после начала нагрева температура воды вблизи свободной поверхности непосредственно над проволокой увеличилась с 7,3 до 8,6 $^\circ\text{C}$, а вблизи дна практически не изменилась. В аномальных условиях (см. рис. 1, *б*) нагретая вода перемешивается с холодной водой, приобретает температуру $T \approx 4\text{ }^\circ\text{C}$ и становится тяжелее окружающей среды. В результате в данном опыте нагретая вода поднялась над проволокой только на 10,5 см и начала опускаться на дно. Через 2 мин после начала нагрева температура воды на дне под проволокой увеличилась с 1,3 до 3,6 $^\circ\text{C}$, а на свободной поверхности практически не изменилась.

При реализации простейшего варианта теневого метода использовался вертикальный белый экран, который располагался на расстоянии 1,5 м от одной из боковых стенок лотка и освещался через толщу жидкости ярким лучом света от источника, расположенного за противоположной от экрана стенкой лотка на расстоянии 1,4 м. Видеокамера располагалась выше лотка со стороны источника света. При наличии неоднородности поля плотности на экране появляется тень, содержащая информацию об изменении второй производной от плотности по времени на пути прохождения света.

Примеры видеокадров, полученных теньным методом в обычных и аномальных условиях, приведены на рис. 2, *а, б* соответственно. Удельная мощность нагрева в обычных и аномальных условиях была одинаковой и в 2,63 раза превышала удельную мощность в предыдущем примере. Нагрев осуществлялся с помощью спирали, расположенной на дне. В аномальных условиях более теплая вода поднялась только на 9 см от спирали, приобре-

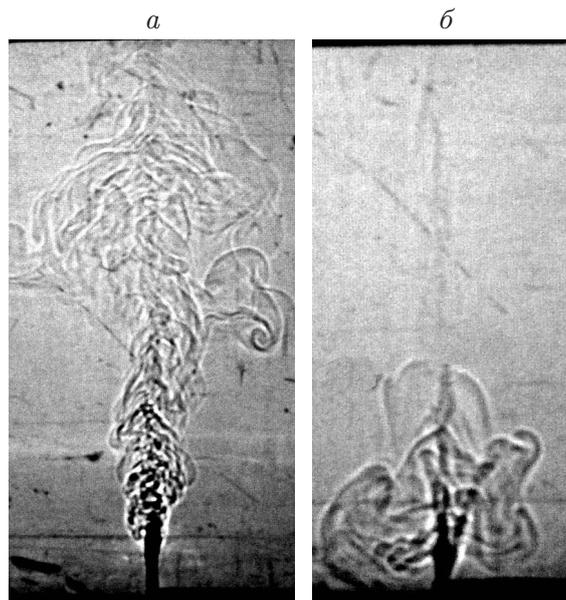


Рис. 2. Картины течения, полученные с использованием теневого метода при $M = 7,9\text{ Вт/см}$:

а — обычные условия ($H = 33\text{ см}$, $T_1 = 19,7\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 39\text{ с}$); *б* — аномальные условия ($H = 23,5\text{ см}$, $T_2 = 1,0\text{ }^\circ\text{C}$, $t = 73\text{ с}$)



Рис. 3. Теневая картина течения при малой мощности нагрева воды в аномальных условиях ($M = 0,82$ Вт/см, $H = 23,5$ см, $t = 60$ с, $T_2 = 2,6$ °С)

ла температуру $T \approx 4$ °С и опустилась на дно. Приблизительно через 40 с после начала нагрева движение более тяжелой воды в аномальных условиях стало хаотическим.

На рис. 3 приведена теневая картина течения в аномальных условиях при малой мощности нагрева спирали (свободная поверхность не показана). В этом опыте температура воды в лотке была меньше $T = 4$ °С только на $1,4$ °С. При слабом нагреве и малом отличии плотности воды в лотке от ее максимального значения интервал времени, на котором картина движения была упорядоченной, значительно увеличился. В частности, форма грибовидной структуры, показанная на рис. 3, сохранялась в течение времени $t = 150$ с. Высота подъема нагретой воды в этом опыте не превышала 5 см.

Метод визуализации, использованный в работе [24], основан на том, что даже очень мелкие взвешенные частицы могут не “отслеживать” движение жидкости, если их плотность отличается от плотности жидкости. В случае конвективных течений на рассматриваемый эффект может также оказывать влияние то, что изменение температуры приводит к значительному изменению молекулярной вязкости. Например, при изменении температуры в диапазоне $0 \div 10$ °С кинематический коэффициент вязкости воды уменьшается на 26 %.

При реализации данного метода в воду в лотке добавлялись частицы обезжиренной алюминиевой пудры размером несколько микрометров. Сверху вода освещалась ярким световым ножом толщиной приблизительно 2 см в окрестности продольной плоскости симметрии лотка. Движение взвешенных частиц в световом ноже регистрировалось видеокамерой. Нагрев осуществлялся с помощью проволоки. Результаты, полученные с использованием данного метода, приведены на рис. 4–6 (верхние границы кадров соответствуют свободной поверхности). На рис. 4, *а, б* сравниваются мгновенные картины распределения взвешенных частиц в обычных и аномальных условиях при одинаковых значениях удельной мощности и времени нагрева. В обычных условиях нагретая вода быстро поднимается до уровня свободной поверхности. В аномальных условиях высота подъема ограничивается, так как вследствие перемешивания и теплообмена вода в головной части струи оказывается тяжелее окружающей среды и опускается на дно.

На рис. 5, 6 приведена серия видеок кадров, полученных методом визуализации течения частицами алюминиевой пудры в обычных условиях при двух значениях мощности нагрева. При увеличении мощности в 4 раза средняя скорость подъема струи увеличилась в 1,5 раза. На рис. 4–6 видно, что на начальном участке конвективной струи частицы алюминиевой пудры не вовлекаются в струю. Это обусловлено большими значениями градиентов скорости и температуры на границах струи.

Наглядные картины позволяет получить метод визуализации чернилами или другим органическим красителем, “отслеживающим” движение частиц жидкости лучше, чем алюминиевая пудра. При реализации данного метода на дно лотка медленно выпускался

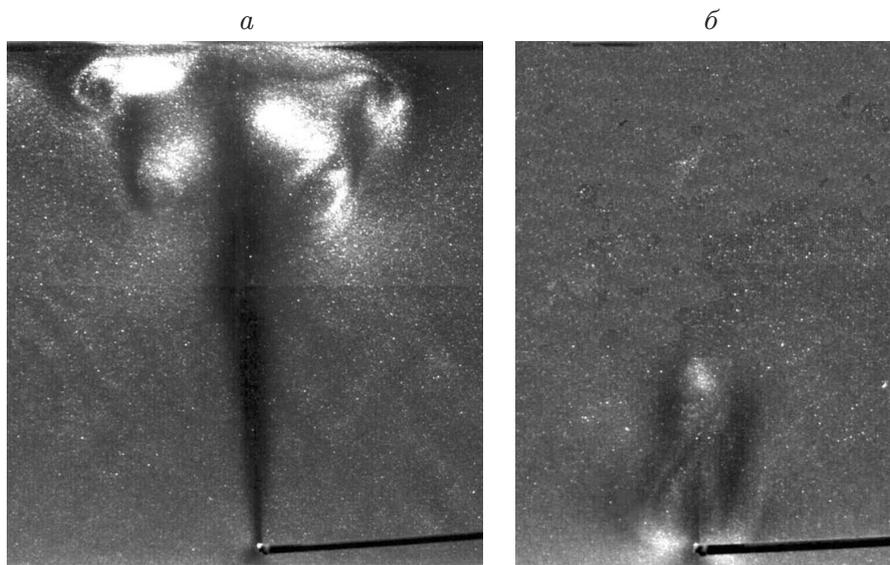


Рис. 4. Картины течения, полученные с использованием метода визуализации алюминиевой пудрой при $M = 1,2$ Вт/см, $H = 18,6$ см, $t = 48$ с:
 а — $T_1 = 21,5$ °С (обычные условия), б — $T_2 = 0,8$ °С (аномальные условия)

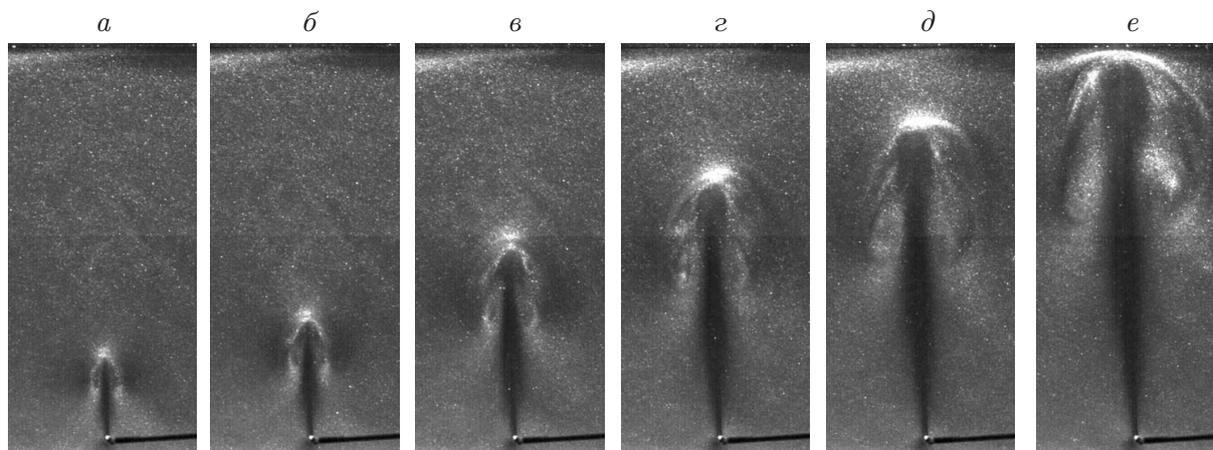


Рис. 5. Эволюция конвективной струи в обычных условиях при мощности нагрева $M = 1,2$ Вт/см и $H = 18,6$ см, $T_1 = 21,5$ °С в различные моменты времени:
 а — $t = 9$ с, б — $t = 13$ с, в — $t = 20$ с, г — $t = 24$ с, д — $t = 31$ с, е — $t = 38$ с

слабый водный раствор чернил с температурой 4 °С. Вследствие более высокой плотности воды при температуре $T = 4$ °С, чем при любой другой температуре, окрашенная вода растекалась только по дну. Чернила практически не увеличивали плотность, поскольку использовался коммерческий раствор чернил, дополнительно разбавленный водой в соотношении 5 мл коммерческого раствора на 3 л чистой воды. Нагреваемая проволока располагалась на расстоянии 0,2 см от дна. Когда толщина окрашенного слоя становилась равной $0,2 \div 0,3$ см, выпуск раствора чернил прекращался. Через несколько минут движение в лотке прекращалось, и начинался основной опыт.

Примеры мгновенных картин течения в обычных и аномальных условиях, полученные с использованием данного метода визуализации, приведены на рис. 7. Визуализация с помощью чернил качественно подтверждает отмеченное выше влияние немонотонной

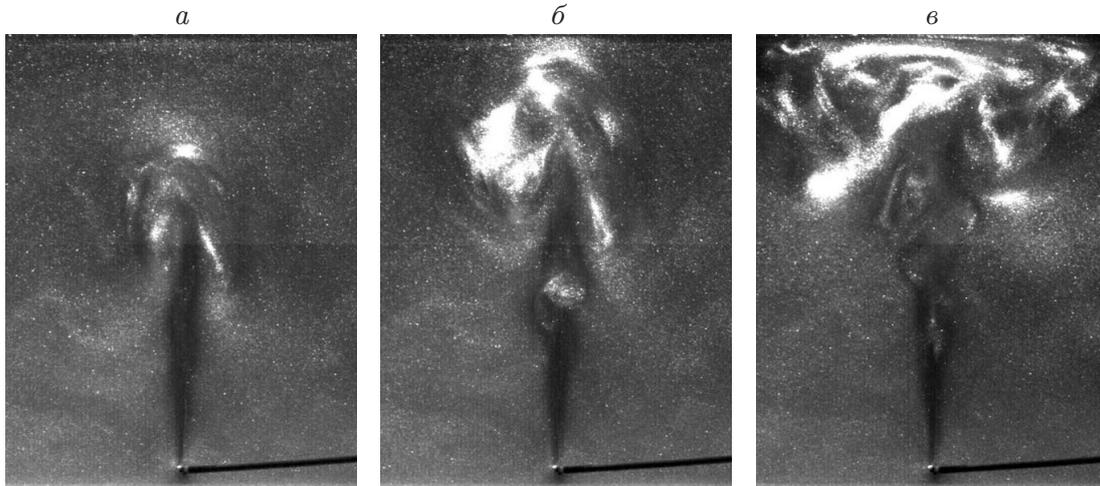


Рис. 6. Эволюция конвективной струи в обычных условиях при мощности нагрева $M = 3,0$ Вт/см и $H = 18,6$ см, $T_1 = 21,5$ °С в различные моменты времени: $a - t = 20$ с, $б - t = 25$ с, $в - t = 36$ с

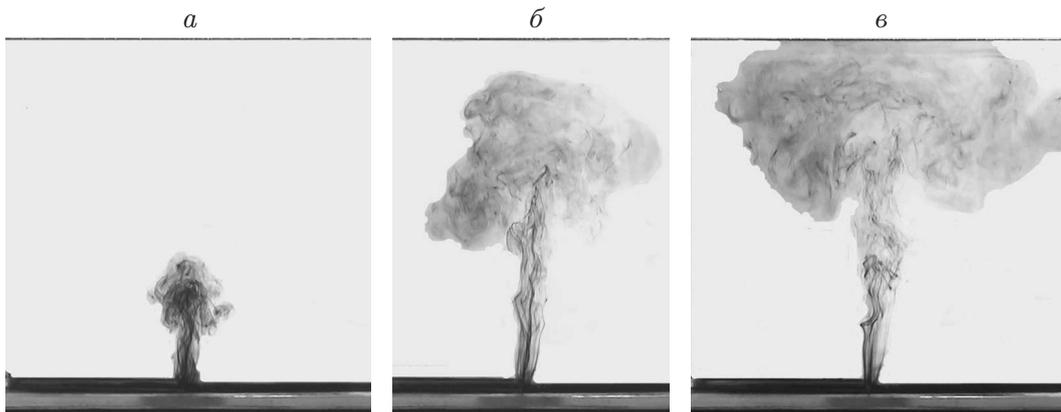


Рис. 7. Картины течения, полученные с использованием метода визуализации раствором чернил в обычных условиях при $H = 33$ см, $M = 3,0$ Вт/см, $T_1 = 21,7$ °С в различные моменты времени: $a - t = 18$ с, $б - t = 38$ с, $в - t = 78$ с

зависимости плотности воды от температуры на конвекцию. Серия видеок кадров, полученных с использованием метода визуализации течения чернилами в аномальных условиях, приведена на рис. 8.

Сравнение результатов, полученных методами визуализации с помощью алюминиевой пудры и чернил, показывает, что в отличие от частиц алюминиевой пудры чернила хорошо вовлекаются в струю даже в окрестности нагретой проволоки, где градиенты скорости и температуры особенно велики. Это необходимо учитывать при выборе частиц-меток, используемых при измерении скорости жидкости PIV-методом. Визуализация чернилами позволяет получать более точную количественную информацию о скорости подъема переднего фронта струи по сравнению с другими рассмотренными методами визуализации.

Следует отметить, что все четыре рассмотренных метода визуализации дают одинаковые результаты. В частности, они показали, что в аномальных условиях конвективная струя от линейного источника тепла поднимается на ограниченную высоту, и через

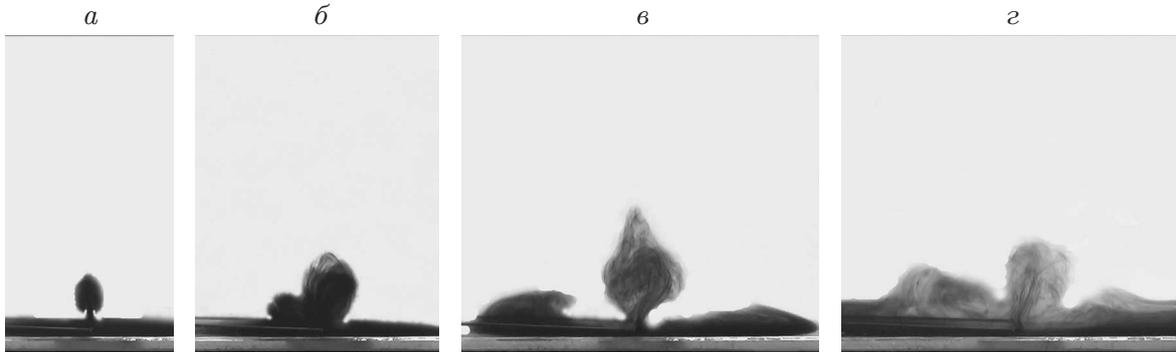


Рис. 8. Картины течения, полученные с использованием метода визуализации раствором чернил в аномальных условиях при $H = 28$ см, $M = 3,0$ Вт/см, $T_2 = 1,1$ °С в различные моменты времени:
 $a - t = 18$ с, $б - t = 78$ с, $в - t = 232$ с, $г - t = 360$ с

некоторое время после начала нагрева движение струи становится хаотическим. Высота подъема струи изменяется во времени периодически. В примере, приведенном на рис. 8, такой период равен примерно 100 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров А. И. Термика крупных озер. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1983.
2. Zilitinkevich S. S., Kreiman K. D., Terzhevik A. Yu. The thermal bar // J. Fluid Mech. 1992. V. 236. P. 27–42.
3. Чубаренко И. П., Демченко Н. Ю. Лабораторное моделирование структуры термобара и связанной с ним циркуляции в бассейне с наклонным дном // Океанология. 2008. Т. 48, № 3. С. 356–370.
4. Букреев В. И. Влияние немонотонной зависимости плотности воды от температуры на перемешивание дождевой воды в пресном водоеме // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41, № 4. С. 567–570.
5. Букреев В. И. Влияние аномальной зависимости плотности воды от температуры на распространение круглой струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. Т. 40, № 2. С. 40–47.
6. Букреев В. И. Влияние немонотонной зависимости плотности воды от температуры на распространение вертикальной плоской струи // ПМТФ. 2006. Т. 47, № 2. С. 23–29.
7. Townsend A. A. Natural convection in water over an ice surface // Quart. J. Roy Meteorol. Soc. 1964. V. 90. P. 248–259.
8. Adrian R. J. Turbulent convection in water over ice // J. Fluid Mech. 1975. V. 69, pt 4. P. 753–781.
9. Musman S. Penetrative convection // J. Fluid Mech. 1968. V. 31, pt 2. P. 343–360.
10. Надолин К. А. О проникающей конвекции в приближении изотермически несжимаемой жидкости // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1996. № 2. С. 40–52.
11. Rouse H., Yih C. S., Humphreys H. W. Gravitational convection from a boundary source // Tellus. 1952. V. 4, N 3. P. 201–210.
12. Shlien D. J., Voxman R. L. Laminar starting plumes temperature field measurements // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1981. V. 24. P. 919–931.

13. **Moses E., Zocchi G., Libchaber A.** An experimental study of laminar plumes // *J. Fluid Mech.* 1993. V. 251. P. 581–601.
14. **Turner J. S.** Buoyant plumes and thermals // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1969. V. 1. P. 29–44.
15. **Baines D. W., Chu V. H.** Jets and plumes // *Environmental hydraulics* / Ed. by V. P. Shingh, W. Hager. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996. P. 7–61.
16. **Lee J. H. F.** Turbulent jets and plumes / J. H. F. Lee, V. H. Chu. Boston: Kluwer Acad. Publ., 2003.
17. **Imberger J., Hamblin P. F.** Dynamics of lakes, reservoirs, and cooling ponds // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1982. V. 14. P. 153–187.
18. **Dallimore C. J., Imberger J., Hodges B. R.** Modeling a plunging underflow // *J. Hydraulic Engng.* 2004. V. 130, N 11. P. 1068–1076.
19. **Мизев А. И.** Экспериментальное исследование термокапиллярной конвекции, индуцированной локальной температурной неоднородностью вблизи поверхности жидкости. 1. Твердотельный источник тепла // *ПМТФ.* 2004. Т. 45, № 4. С. 36–49.
20. **Ван-Дайк М.** Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986.
21. **Макаров С. А., Неклюдов В. И., Чашечкин Ю. Д.** Пространственная структура пучков двумерных монохроматических волн в экспоненциально стратифицированной жидкости // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1990. Т. 26, № 7. С. 744–754.
22. **Ermanyk E. V., Gavrilov N. V.** On internal waves generated by large-amplitude circular and rectilinear oscillations of a circular cylinder in a uniformly stratified fluid // *J. Fluid Mech.* 2008. V. 613. P. 329–356.
23. **Adrian R. J.** Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1991. V. 23. P. 261–304.
24. **Elder J. W.** The unstable thermal interface // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 32, pt 1. P. 69–96.

Поступила в редакцию 15/XII 2009 г.
