

УДК 532.5.013.4

ВЛИЯНИЕ НЕМОНОТОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОЙ СТРУИ

В. И. Букреев

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

Приведены результаты двух опытов, в которых более теплая вода выпускалась в виде плоской вертикальной струи в более холодную воду. В одном опыте температуры вытекающей и первоначально покоящейся воды превышали $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и теплая вода распространялась только вдоль свободной поверхности. В другом опыте температура вытекающей воды была выше, а покоящейся воды — ниже $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае сначала сформировались две струи — поверхностная и придонная, а затем вся вытекающая жидкость сосредоточилась в придонной струе.

Ключевые слова: температура максимальной плотности воды, неустойчивость Рэлея — Тейлора, поверхностная струя, придонная струя.

При атмосферном давлении плотность дистиллированной воды максимальна при температуре T_* около $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ она меньше примерно на $0,07\%$. Когда в контакт вступают массы воды, температуры которых $T_1 > T_*$ и $T_2 < T_*$, из-за теплообмена образуется слой максимальной плотности, неустойчивый по механизму Рэлея — Тейлора. Особенности гидродинамических процессов, обусловленные немонотонной зависимостью плотности воды от температуры, далее для краткости будут называться аномальными эффектами. Условия для развития таких эффектов создаются в пресных водоемах при таянии льда, стоке речной воды, выпадении дождя и снега, сбросе бытовых и промышленных вод. Различия температур прибрежных и глубоководных частей водоема приводит к формированию весеннего и осеннего термобаров [1–3]. В лабораторных условиях аномальные эффекты изучались на примерах распространения плоской и круглой горизонтальных струй [4–6]. В данной работе приводятся результаты опытов, схема которых представлена на рис. 1.

Бассейн длиной $3,8\text{ м}$ и шириной 20 см разделялся на две части вертикальной перегородкой со щелью внизу. В начальном состоянии щель закрывалась щитом. Левая на схеме часть бассейна заполнялась окрашенной слабым водным раствором чернил водой с температурой $T_1 > T_*$. Вода в правой части с температурой $T_2 < T_1$ была прозрачной. Далее приводятся результаты двух опытов. В опыте 1 $T_1 = 20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оба эти значения больше T_* , поэтому при контакте окрашенной и прозрачной воды аномальные эффекты отсутствовали. В опыте 2 $T_1 = 19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, так что создавались условия для развития аномальных эффектов. В обоих опытах начальная разность плотностей слева и справа от перегородки была одинакова и составляла $0,159\%$ максимальной плотности

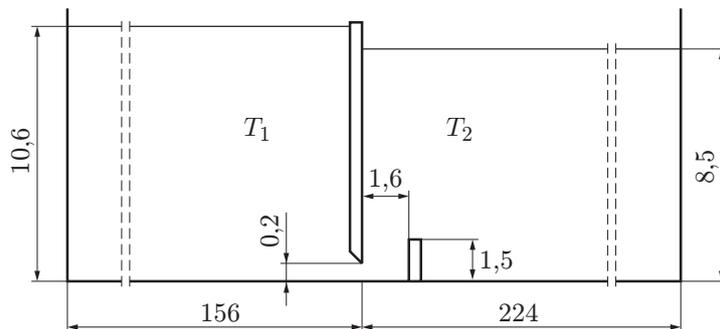
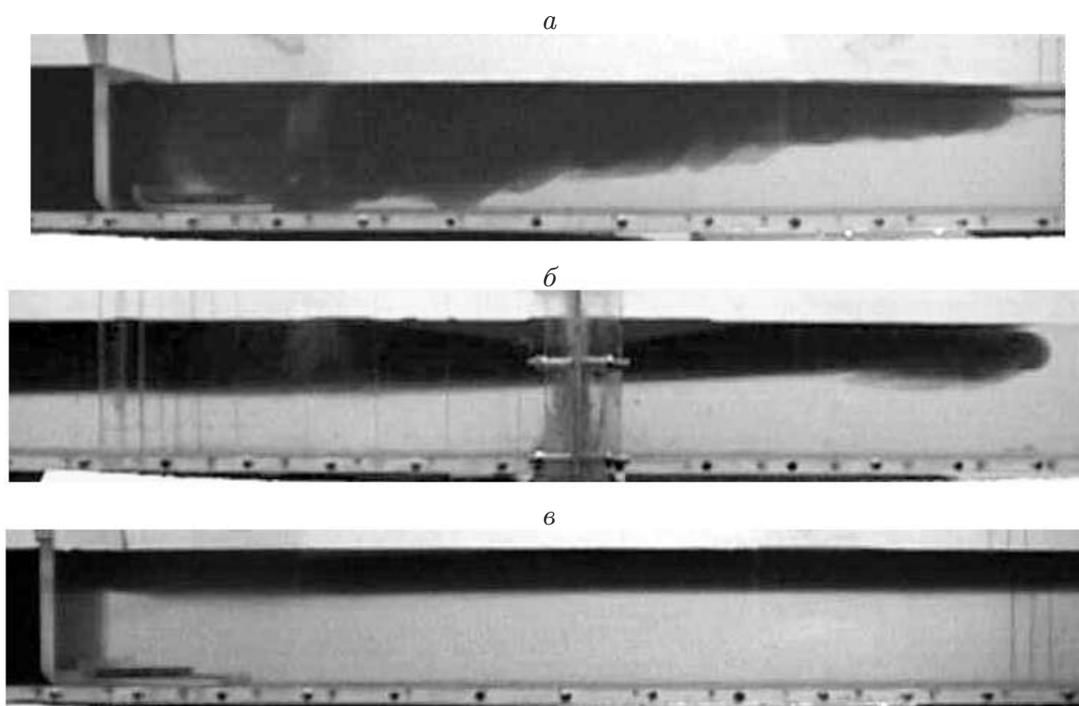


Рис. 1. Схема эксперимента (размеры даны в сантиметрах)

Рис. 2. Картина течения в опыте 1 в различные моменты времени:
а — $t = 38$ с; б — $t = 128$ с; в — $t = 325$ с

воды. Процессы регистрировались видеокамерой с частотой 25 кадр/с и анализировались на компьютере.

Между правой и левой частями бассейна создавался начальный перепад уровней, так что после подъема щита более легкая вода вытекала в более тяжелую в виде плоской струи. Вертикальным барьером (см. рис. 1) струя отклонялась вверх. Ее подъему способствовала также направленная вверх начальная сила плавучести (разность между силой тяжести и архимедовой силой). В обоих опытах примерно через 60–65 с уровни свободной поверхности слева и справа от перегородки практически выравнивались. После этого дополнительное поступление окрашенной жидкости в правую часть бассейна прекращалось и процессы протекали только по инерции и под влиянием сил плавучести.

На рис. 2 приведены три кадра видеосъемки опыта 1, полученные в различные моменты времени t от начала подъема щита. В этом опыте аномальные эффекты отсутствовали, так что окрашенная жидкость распространялась только вдоль свободной поверхности в виде плоской струи, как и в других ранее выполненных опытах (см., например, [7]). В те-

чение примерно 60 с происходило перемешивание теплой и холодной воды из-за сдвиговой неустойчивости Кельвина — Гельмгольца (рис. 2, *a*). В дальнейшем формировалось характерное утолщение головной части струи и слабое перемешивание сохранялось только на небольшом участке за этим утолщением (рис. 2, *b*). После отражения струи от торцевой стенки бассейна перемешивание полностью прекратилось и по границе раздела теплой и холодной воды распространялись только слабые гладкие волны (рис. 2, *в*).

На рис. 3 приведено несколько кадров, полученных в опыте 2. Из-за аномальных эффектов картина течения в этом опыте принципиально отличалась от представленной на рис. 2 начиная с самой ранней стадии процесса внедрения окрашенной воды в прозрачную. В течение первых 10–12 с окрашенная и прозрачная жидкости разделялись вертикальным фронтом, как это имеет место при формировании термобара. Затем из-за турбулентного перемешивания часть воды в окрестности термобара приобрела плотность, близкую к максимальной, и опустилась на дно, а основная масса вновь поступающей более теплой воды распространялась в виде поверхностной струи с почти вертикальным передним фронтом (рис. 3, *a, б*). В дальнейшем вода из верхней струи интенсивно опускалась в нижнюю вследствие неустойчивости слоя максимальной плотности, образующегося из-за перемешивания и теплообмена на нижней границе верхней струи (рис. 3, *в, г*).

На определенном этапе развития процесса передний фронт поверхностной струи в опыте 2 стал смещаться в обратном направлении, а вся окрашенная жидкость оказалась у дна бассейна (рис. 3, *д, е*). Примерно через 15 мин различимое невооруженным глазом движение прекратилось. Еще в течение примерно 20 мин сохранялось устойчивое расслоение с температурами: 4,5–5,0 °С — в окрашенном придонном слое и 0,4–0,5 °С — в поверхностном слое. Затем начались опускание менее плотной прозрачной воды и подъем более тяжелой окрашенной воды против сил плавучести (рис. 3, *ж*).

Существуют различные причины движения первоначально покоящейся устойчиво стратифицированной по плотности жидкости против сил плавучести. Достаточно много внимания уделялось гидрофизическим эффектам, обусловленным значительным различием количественных значений коэффициентов молекулярной диффузии тепла и растворенной соли. При описании этих эффектов используется термин “двойная диффузия” [8, 9]. В обсуждаемых опытах роль растворенной соли играли чернила, коэффициент молекулярной диффузии которых примерно в 100 раз меньше коэффициента молекулярной диффузии тепла. Эффекты двойной диффузии проявляются особенно четко, если знаки градиентов температуры и концентрации соли противоположны [8]. В обсуждаемых опытах эти знаки были одинаковыми.

Еще одна возможная причина движения против сил плавучести — “память” о начальной завихренности [6]. С течением времени крупные вихри, обусловленные начальной завихренностью, распадаются на множество мелких. В устойчиво стратифицированной жидкости ось мелких вихрей ориентирована преимущественно вертикально. В центре вихрей создается зона пониженного давления. В эту зону жидкость может вовлекаться даже против весьма значительной силы плавучести. Ярким примером служит образование воздушной воронки при опораживании ванны, когда в воду вовлекается воздух, плотность которого примерно в 800 раз меньше, чем плотность воды.

Наиболее вероятная причина обсуждаемого эффекта в данных опытах — теплообмен с лабораторным помещением. Опыты проводились при температуре воздуха в помещении 14,2 °С. Бассейн был изготовлен из оргстекла толщиной 18 мм, поэтому теплообмен через дно и стенки бассейна был незначительным. Основную роль играл теплообмен через свободную поверхность. Поскольку в опыте 2 температура воды в верхнем слое была меньше T_* , а в помещении больше T_* , у свободной поверхности формировался слой максимальной плотности, погружение которого сопровождалось вытеснением окрашенной жидкости

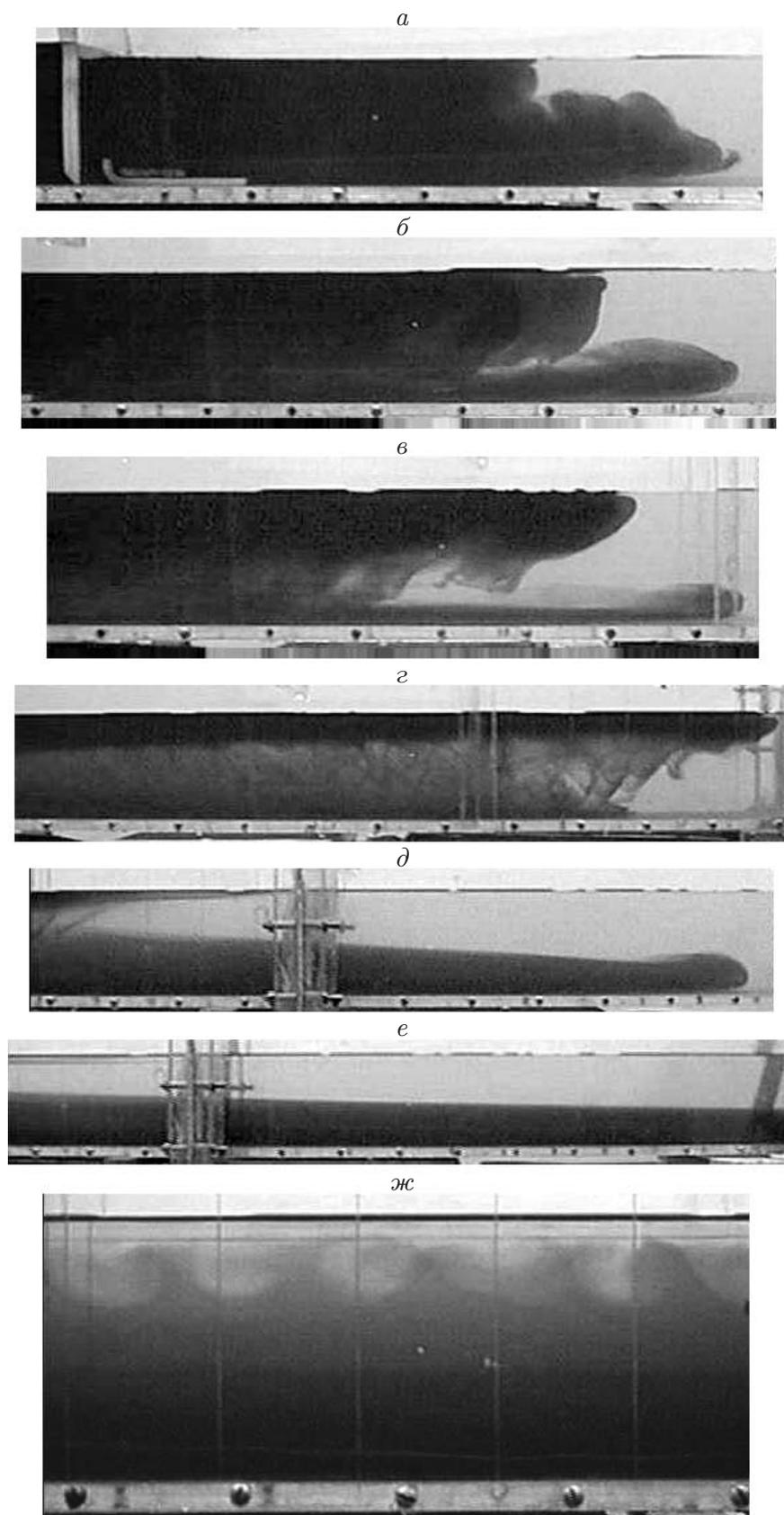


Рис. 3. Картина течения в опыте 2 в различные моменты времени:

$a - t = 42$ с; $б - t = 70$ с; $в - t = 100$ с; $г - t = 199$ с; $д - t = 368$ с; $е - t = 756$ с; $ж - t = 3900$ с

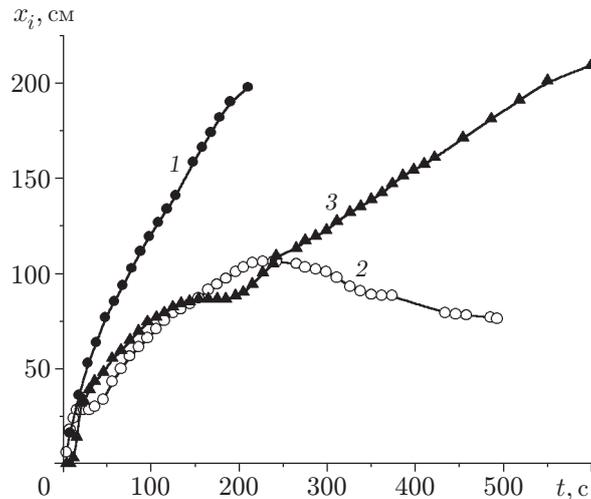


Рис. 4. Зависимости продольных координат передних фронтов струй от времени:
1 — x_0 ; 2 — x_1 ; 3 — x_2

против сил плавучести (рис. 3, ж). Данный механизм действовал на всех этапах процесса. Однако особенно четко обусловленные им эффекты наблюдались после прекращения сдвигового течения.

Аналогичный механизм действовал также в опыте 1. В этом опыте увеличение плотности в тонком слое вблизи свободной поверхности было обусловлено главным образом испарением воды, а не аномальной зависимостью ее плотности от температуры и интенсивность движения против силы плавучести была значительно слабее, чем в опыте 2.

На рис. 4 приведены зависимости x_i ($i = 0, 1, 2$) от времени t , имеющие следующий физический смысл: x_0 — продольная координата переднего фронта поверхностной струи в опыте 1, x_1 и x_2 — продольные координаты передних фронтов поверхностной и придонной струй (соответственно) в опыте 2. При отсутствии аномальных эффектов координата переднего фронта струи растет монотонно (график 1 на рис. 4). При наличии аномальных эффектов на графиках 2 и 3 имеются “полочки”, свидетельствующие о том, что передние фронты струй на некоторое время останавливались, а затем снова начинали движение в положительном направлении оси x . Кроме того, на графике 2 имеется максимум. В момент времени, соответствующий этому максимуму, передний фронт поверхностной струи снова остановился и стал смещаться в обратном направлении.

Первая остановка переднего фронта поверхностной струи в опыте 2 произошла еще на том этапе процесса, когда продолжалась подпитка энергии струи за счет перепада уровней слева и справа от перегородки. Вместе с тем распространению струи противодействовал механизм формирования фронта максимальной плотности. Сначала ориентация этого фронта была преимущественно вертикальной. Затем протяженность фронта максимальной плотности в вертикальном направлении стала быстро сокращаться, поверхностная струя приобрела положительное ускорение. Однако из-за неустойчивости Рэлея — Тейлора поверхностная струя продолжала терять массу и энергию, что повлекло вторичную остановку и попятное движение окрашенной жидкости в верхнем слое.

Движение окрашенной воды в положительном направлении оси x порождало встречное течение прозрачной воды. Это также противодействовало распространению поверхностной и придонной струй и сопровождалось, в частности, характерным утолщением их головных частей (см. рис. 3). На определенном этапе развития процесса этот механизм противодействия привел к тому, что передний фронт нижнего слоя также остановился,

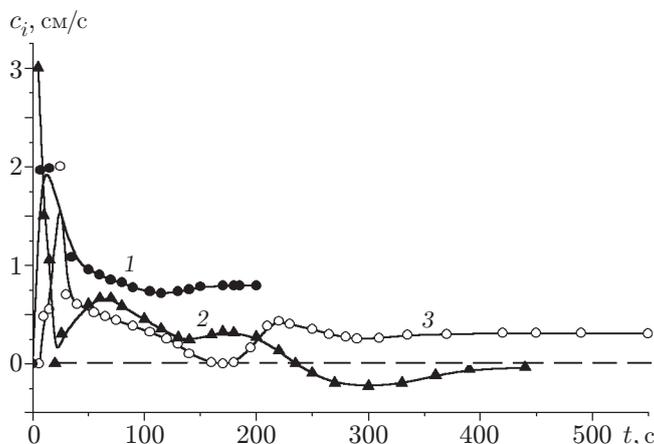


Рис. 5. Зависимости скоростей распространения передних фронтов струй от времени:

1 — c_0 ; 2 — c_1 ; 3 — c_2

и на графике 3 (см. рис. 4) появилась “полочка”, причем значительно позже, чем на графике 2. Однако в дальнейшем масса и потенциальная энергия нижнего слоя увеличились настолько, что его передний фронт стал снова двигаться в положительном направлении оси x .

На рис. 5 приведены зависимости скоростей распространения передних фронтов струй c_i ($i = 0, 1, 2$) от времени t . Индекс 0 соответствует поверхностной струе в опыте 1, индекс 1 — поверхностной струе в опыте 2, индекс 2 — придонной струе в опыте 2. Рассматривается только интервал времени до отражения струй от торцевой стенки бассейна. На рис. 5 видно, что за исключением короткого начального интервала времени скорость c_0 существенно превышает скорости c_1 и c_2 . После того как уровни свободной поверхности в левой и правой частях бассейна стали одинаковыми, величина c_0 достаточно быстро вышла на постоянное значение: $c_0 \approx 0,79$ см/с при $t > 150$ с.

При $t \approx 230$ с скорость распространения переднего фронта поверхностной струи c_1 в опыте 2 вышла в область отрицательных значений и стала асимптотически стремиться к нулю. Скорость распространения переднего фронта придонной струи при $t > 350$ с приняла постоянное значение $c_2 \approx 0,31$ см/с.

В заключение отметим, что рассмотренные эффекты могут иметь существенное значение при сбросе воды тепловой или атомной электростанцией в водоем весной и осенью, а также в процессах конвекции в глубоких водоемах типа озера Байкал. В первом случае сбрасываемая вода, вместо того чтобы распространяться вдоль свободной поверхности, может опуститься на дно. В озерах на глубинах больше нескольких сотен метров от свободной поверхности в течение всего года сохраняется температура максимальной плотности. Вместе с тем на дне происходит постоянный нагрев и образуется неустойчивый слой более легкой воды. Аномальная зависимость плотности от температуры приводит к тому, что нагретая вода может подняться только на ограниченную высоту. При этом тепловая энергия, поступающая со дна озера, переходит в потенциальную, что служит своеобразным примером работы “тепловой машины” в природе. Следует отметить, что температура максимальной плотности воды зависит от давления и уменьшается с глубиной.

Автор выражает благодарность В. Ю. Ляпидевскому за полезное обсуждение результатов экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихомиров А. И.** Термика крупных озер. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1982.
2. **Zilitinkevich S. S., Reiman K. D., Terzhevik A. Yu.** The thermal bar // J. Fluid Mech. 1992. V. 236. P. 27–42.
3. **Holland P. R., Kay A. A.** Review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation // Limnologica. 2003. V. 33, N 3. P. 153–162.
4. **Букреев В. И.** Гидродинамическая неустойчивость, обусловленная аномальной зависимостью плотности воды от температуры // Докл. РАН. 2004. Т. 396, № 6. С. 770–772.
5. **Букреев В. И.** Влияние аномальной зависимости плотности воды от температуры на поверхностное гравитационное течение // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 1. С. 63–79.
6. **Букреев В. И.** Влияние аномальной зависимости плотности воды от температуры на распространение круглой струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 2. С. 39–47.
7. **Simpson J. E.** Gravity currents in the environment and the laboratory. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997.
8. **Тернер Дж.** Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
9. **Левицкий В. В., Чашечкин Ю. Д.** Термоконтрационная конвекция при однородном боковом нагреве // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 5. С. 112–124.

Поступила в редакцию 14/VI 2005 г.
