

УДК 532.5.013.4

ВЛИЯНИЕ НЕМОНОТОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСПАД НАЧАЛЬНОГО СКАЧКА ПЛОТНОСТИ

В. И. Букреев

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

Экспериментально исследовано влияние немонотонной зависимости плотности воды от температуры на гравитационное течение после удаления щита, который разделял теплую и холодную воду. Если температура воды максимальной плотности находилась в промежутке между начальными температурами по разные стороны щита, то развивалась неустойчивость по механизму Рэлея — Тейлора наряду со сдвиговой неустойчивостью в обычных условиях.

Ключевые слова: температура воды максимальной плотности, плотностное течение, неустойчивость Рэлея — Тейлора.

Одно из аномальных свойств воды состоит в том, что ее плотность зависит от температуры немонотонно. Плотность воды максимальна при температуре 4 °С (при атмосферном давлении). Если в контакт вступают массы воды, температуры которых больше и меньше 4 °С, то образуется более тяжелый, чем окружающая жидкость, слой и развивается неустойчивость по механизму Рэлея — Тейлора. Такие условия создаются, например, весной при стоке речной воды и более интенсивном прогреве мелководных частей водоема, а осенью — при выпадении снега в более теплый открытый водоем или дождя в более холодный открытый водоем. Сезонному термобару посвящено достаточно много натуральных исследований и численных расчетов [1, 2]. В лабораторных условиях гидрофизические эффекты, обусловленные аномальной зависимостью плотности воды от температуры, изучались на примере распространения плоской [3, 4] и круглой [5] струй.

В данной работе приводятся некоторые результаты опытов, выполненных по следующей схеме. Прямоугольный бассейн с горизонтальным дном делился вертикальным щитом на две части. Левая часть заполнялась водой с температурой T_1 , а правая часть — водой с температурой T_2 . Глубина воды H в обеих частях одинакова. В момент времени $t = 0$ щит удалялся вертикально вверх. Возникающему при этом гравитационному течению посвящено много исследований. Отметим здесь монографию [6] и теоретическую работу [7]. В большей части ранее выполненных опытов начальная разность плотностей создавалась путем добавления соли. В данной работе плотность изменялась за счет температуры и наряду со случаем, когда значения T_1 и T_2 превышали значение температуры T_* воды максимальной плотности, изучался как основной случай, когда температура T_* находилась в промежутке между T_1 и T_2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-01-00040), фонда “Ведущие научные школы России” (грант № НШ-22-2003.5) и интеграционного проекта СО РАН “Гидродинамика вод Байкала”.

В англоязычной литературе для рассматриваемого течения используется термин “lock exchange flow” [6]. Его перевод на русский язык пространный. В аналогичных задачах газовой динамики и гидравлики открытых каналов применяется термин “распад начального разрыва” [8, 9]. В случае разрыва плотности принято использовать термин “скачок плотности” [10]. Далее гидрофизические эффекты, обусловленные аномальной зависимостью плотности воды от температуры, будут называться для краткости аномальными эффектами.

Опыты проводились в бассейне шириной 20 см и длиной 382 см с дном и стенками из оргстекла толщиной 0,8 см. Щит располагался несимметрично относительно торцов бассейна. Предварительные опыты показали, что такая асимметрия существенно влияет на описываемый далее эффект подъема жидкости против силы тяжести на больших промежутках времени. Длина отгороженной щитом левой части бассейна равнялась 158 см, правой — 224 см. Торцевые стенки бассейна вертикальные. Толщина щита из винипласта 1,5 см.

Скорость подъема щита существенно влияет на картину течения. Далее приводятся результаты только тех опытов, в которых время выхода нижней кромки щита из воды равнялось $1 \pm 0,2$ с от начала подъема. Поскольку опыты выполнялись при разности плотностей воды в левой и правой частях бассейна, составлявшей всего лишь десятые доли процента, сильное влияние мог оказывать перепад уровней свободных поверхностей в правой и левой частях. Для выравнивания этих уровней использовался байпас в виде трубки диаметром 0,8 см, соединяющей правую и левую части. Перед удалением щита байпас перекрывался.

Для снижения температуры воды вплоть до $0,2$ °С использовался снег. Температура выше комнатной получалась добавлением горячей воды. Вода в одной из частей бассейна окрашивалась чернилами. На 1 л чистой воды добавлялось менее 10^{-4} л стандартного водного раствора чернил. Коэффициент молекулярной диффузии чернил в воде был порядка 10^{-5} см²/с. Начальная глубина воды H измерялась с помощью мерной иглы с погрешностью не более $\pm 0,05$ см. Температура воды измерялась ртутным термометром и термисторными датчиками с абсолютной погрешностью не более $0,05$ °С. Плотность определялась по справочным данным при атмосферном давлении. Картина течения регистрировалась видеокамерами с частотой 25 кадр/с. При обработке на компьютере определялись скорость распространения переднего фронта возмущения, характерные глубины слоев и скорость подъема или опускания окрашенной жидкости. Для снижения погрешности, обусловленной влиянием скорости подъема щита, каждый опыт повторялся не менее трех раз. Результаты повторных опытов осреднялись.

Далее приводятся результаты двух опытов с одинаковыми значениями $H = 12,1$ см и разности плотностей воды в левой (ρ_1) и правой (ρ_2) частях бассейна $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 = 0,00206$ г/см³. В опыте 1 $T_1 = 15,1$ °С, $T_2 = 25,1$ °С. Оба эти значения больше T_* , так что условия для развития аномальных эффектов отсутствовали. В опыте 2 $T_1 = 0,4$ °С, $T_2 = 21,9$ °С, так что создавались условия для развития аномальных эффектов. Температура в лабораторном помещении равнялась $15,6$ °С в опыте 1 и $15,3$ °С в опыте 2.

Кроме указанных параметров на картину течения оказывают влияние коэффициенты молекулярной вязкости воды ν и молекулярной диффузии тепла χ . При интерпретации результатов данных опытов необходимо учитывать возможное влияние коэффициента молекулярной диффузии чернил χ_1 , а также потоков тепла через свободную поверхность, дно и стенки бассейна. Коэффициенты молекулярной вязкости и диффузии зависят от температуры.

В бассейнах ограниченных размеров наблюдается следующий малоизвестный эффект, связанный с поверхностным натяжением: молекулярная пленка на границе раздела воды

и воздуха сцепляется со стенками бассейна, причем тем прочнее, чем меньше размеры бассейна в плане. Этот эффект используется, в частности, в процессе выдувания мыльных пузырей или изделий из стекла. Требуется затратить определенное усилие, чтобы оторвать молекулярную пленку от стенок бассейна. В условиях обсуждаемых опытов при скоростях движения воды меньше 4 см/с пленка оставалась неподвижной и на ней, как и на дне бассейна, формировался вязкий ламинарный пограничный слой. Этот эффект влияет на форму переднего фронта поверхностного гравитационного течения. В разных по размеру бассейнах она может различаться в некоторых деталях.

Сравнение результатов опытов 1 и 2 показало, что на начальном этапе процесса продолжительностью около 10 мин влияние аномальной зависимости плотности воды от температуры преобладало над влиянием других упомянутых слабых факторов. При больших временах эта аномалия воды также играла существенную роль в процессах, зависящих от предыстории движения.

На рис. 1, 2 приведены некоторые иллюстрации процессов на начальном этапе движения. Время t отсчитывается от начала подъема щита. Назовем верхним бьефом ле-

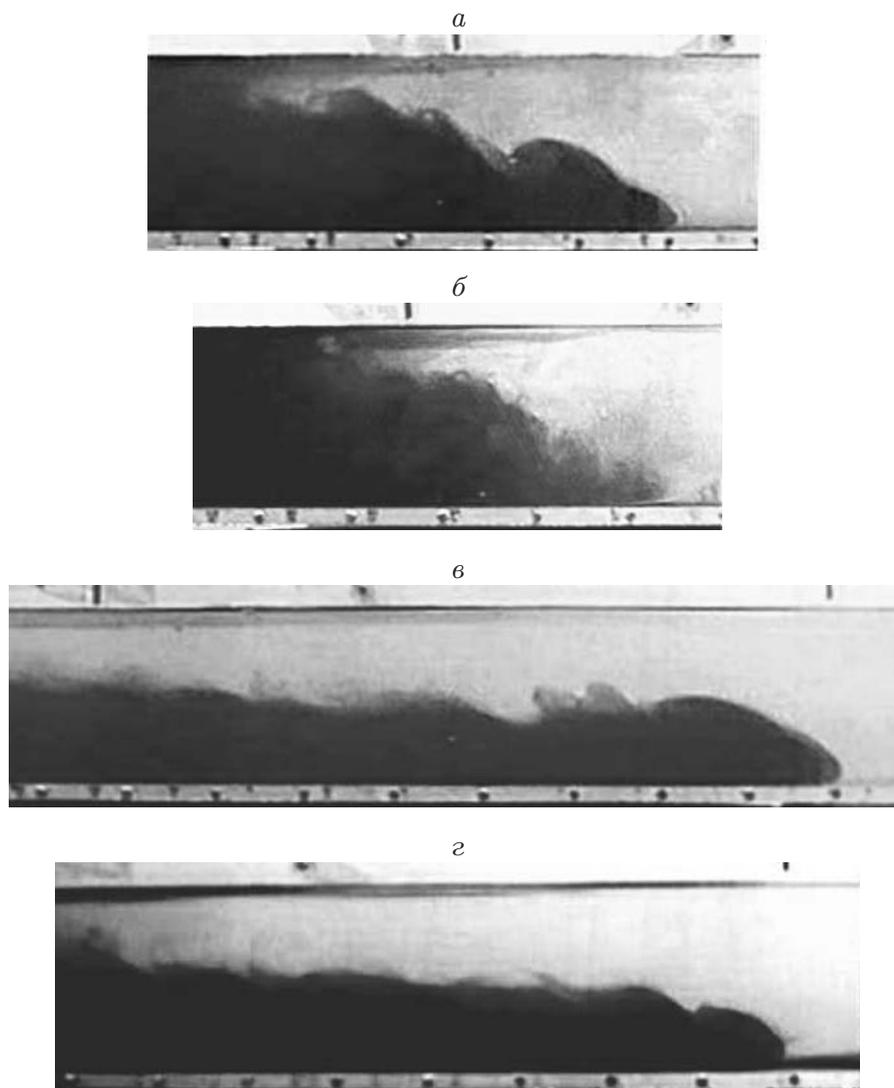


Рис. 1. Гравитационное течение в нижнем бьефе:

a — опыт 1, $t = 7$ с; *б* — опыт 2, $t = 8$ с; *в* — опыт 1, $t = 25$ с; *г* — опыт 2, $t = 24$ с

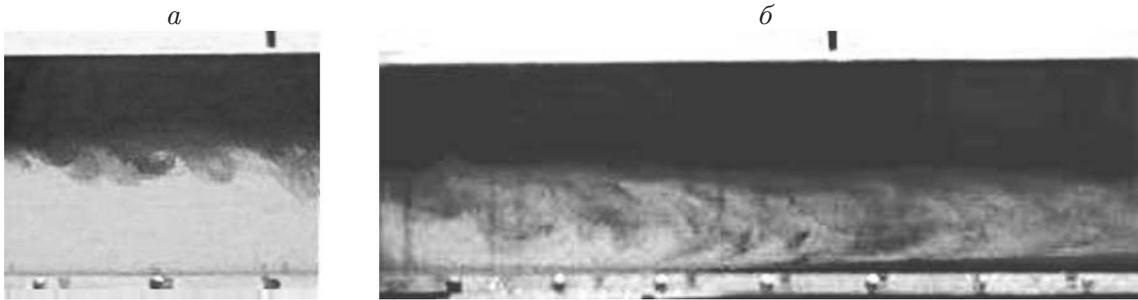


Рис. 2. Неустойчивость движения в опыте 2 (верхний бьеф, $t = 36$ с):
 а — в окрестности $x = -70$ см; б — в окрестности $x = -3$ см

вую от щита часть бассейна, где в начальном состоянии плотность воды была больше ее плотности в правой части. После удаления щита в верхний бьеф распространялась поверхностная, а в нижний бьеф придонная плоская струя. В отсутствие аномальных эффектов (рис. 1, а, в) процессы протекали так, как описано в [6]. Через 3–4 с после начала движения щита появлялась сдвиговая неустойчивость (см. рис. 1, а). В дальнейшем на переднем фронте струи формировалась “голова”, характерная для гравитационных течений различного происхождения (рис. 1, в). Форма “головы” изменялась со временем из-за трения и процесса перемешивания между слоями. Ее размеры периодически то возрастали, то уменьшались. После отражения от торцевых стенок бассейна по границе раздела слоев распространялись волны типа ондулярного бора. Волны были гладкими и полностью затухали примерно через 10 мин.

В опыте 2 после удаления щита формировался неустойчивый слой максимальной плотности. Сначала его ориентация была преимущественно вертикальной. Это задерживало процесс развития гравитационного течения примерно на 2 с по сравнению с опытом 1. Изменялась также картина потери устойчивости движения на следующих этапах из-за комбинированного влияния механизмов Кельвина — Гельмгольца и Рэлея — Тейлора. Сначала процесс потери устойчивости был более хаотичным, чем в опыте 1 (рис. 1, б). Затем начинала преобладать неустойчивость по механизму Рэлея — Тейлора (рис. 1, з). В опыте 2 четко выраженная “голова” сформировалась примерно на 15 с позже, чем в опыте 1.

Иллюстрации на рис. 1 получены при окраске чернилами более тяжелой жидкости. Процесс потери устойчивости лучше прослеживается при окраске более легкой жидкости. Соответствующие иллюстрации из опыта 2 приведены на рис. 2. Структура, показанная на рис. 2, а, сформировалась в верхнем бьефе на расстоянии порядка $2H$ от переднего фронта возмущения. На этом расстоянии преобладала неустойчивость Кельвина — Гельмгольца. По мере удаления от переднего фронта влияние неустойчивости по механизму Рэлея — Тейлора быстро увеличивалось (рис. 2, б).

На рис. 3 приведены результаты измерения глубины более плотной нижней жидкости $h_0^0(t^0)$ в поперечном сечении канала, где располагался щит. Верхний индекс 0 означает, что глубина нормирована на H , а время — на величину $(H/\varepsilon g)^{0,5}$, где $\varepsilon = \Delta\rho/\rho_*$, ρ_* — плотность при температуре T_* , g — ускорение свободного падения. Из физических соображений можно ожидать, что при малой разности плотностей $h_0^0 \rightarrow 0,5$ с увеличением t . Это подтвердилось в обоих обсуждаемых опытах. Влияние аномальных эффектов проявилось в том, что в опыте 2 такое асимптотическое значение достигнуто заметно позже, чем в опыте 1.

На рис. 4 приведены зависимости скоростей перемещения передних фронтов возмущений в нижнем (c_+^0) и верхнем (c_-^0) бьефах от продольной координаты $x^0 = x/H$, от-

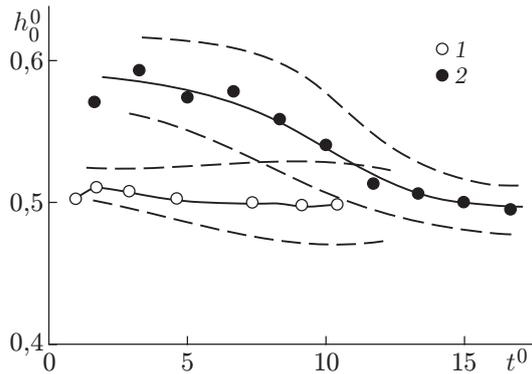


Рис. 3

Рис. 3. Глубина нижнего слоя в створе щита:

1 — опыт 1; 2 — опыт 2; сплошные линии — условная граница раздела основных слоев; штриховые линии — верхняя и нижняя границы перемешанного слоя

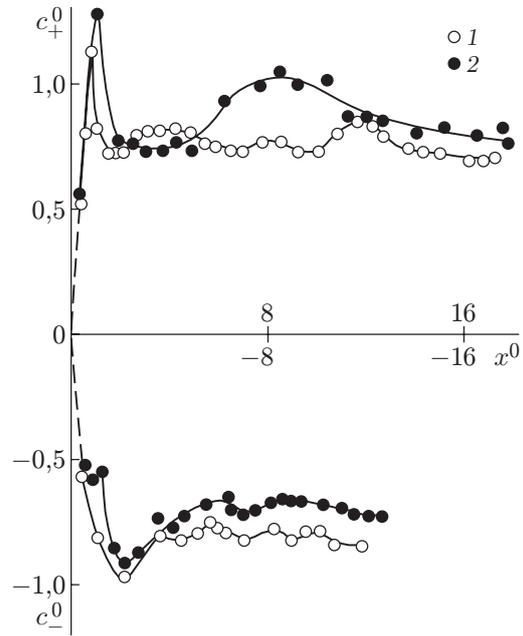


Рис. 4

Рис. 4. Скорость перемещения переднего фронта возмущения в нижнем и верхнем бьефах:

1 — опыт 1; 2 — опыт 2

считываемой от начального положения щита. Положительный знак принят для нижнего бьефа. Скорость нормирована на величину $(\varepsilon g H)^{0,5}$. Зависимость скорости перемещения от времени носит сложный характер. Это обусловлено не только нестационарностью процесса на начальном этапе, но и тем, что из-за перемешивания “голова” гравитационного течения то накапливает, то теряет часть поступающей в нее массы жидкости.

Данные рис. 4 показывают, что немонотонная зависимость плотности воды от температуры заметно влияет на скорость перемещения “головы” гравитационного течения. В опыте 2 по сравнению с опытом 1 абсолютное значение этой скорости больше в нижнем и меньше в верхнем бьефе. Это объясняется тем, что формирование слоя максимальной плотности сопровождается ростом потенциальной энергии жидкости, движущейся в нижний бьеф. Данный пример интересен как оригинальный способ преобразования тепловой энергии в механическую.

На рис. 5 приведены профили температуры в различные моменты времени от начала подъема щита, когда видимое движение уже прекратилось. Вертикальная координата z^0 нормирована на H . Обращает на себя внимание то, что профили температуры долгое время пересекаются практически в одной и той же точке. Расстояние от дна бассейна до этой точки в опыте 2 значительно больше, чем в опыте 1. На рассмотренном интервале времени разность температур в верхнем и нижнем слоях также была значительно больше в опыте 2, чем в опыте 1. Это означает, что аномальные эффекты снижают интенсивность теплообмена воды в бассейне с лабораторным помещением. Локальное понижение температуры вблизи свободной поверхности на рис. 5 обусловлено фазовым переходом воды в пар.

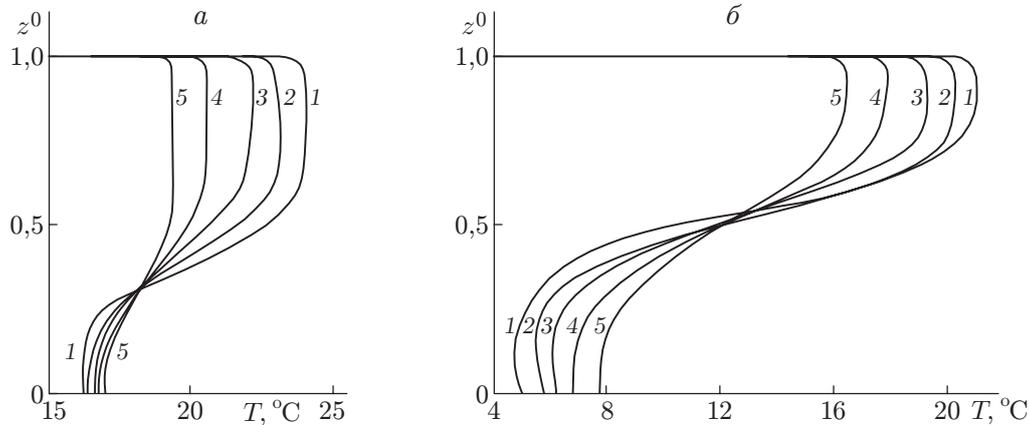


Рис. 5. Профили температуры:
a — опыт 1, $t = 10$ (1), 20 (2), 40 (3), 70 (4), 105 мин (5); *б* — опыт 2, $t = 10$ (1), 20 (2), 30 (3), 40 (4), 70 мин (5)

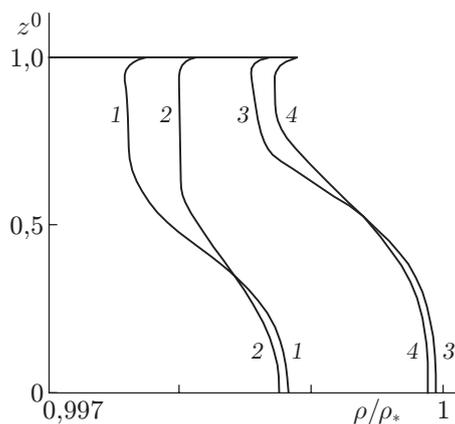


Рис. 6. Профили плотности:
 1, 2 — опыт 1, $t = 40$ и 105 мин;
 3, 4 — опыт 2, $t = 40$ и 75 мин

На рис. 6 приведены профили плотности, построенные по профилям температуры. Для них также существует не изменяющаяся во времени точка пересечения, расположенная в опыте 2 выше, чем в опыте 1. Кроме того, профили в опыте 2 смещены в сторону большей плотности. Поскольку начальная потенциальная энергия в обоих опытах была одинакова, такое смещение профилей означает, что потенциальная энергия системы в опыте 2 увеличилась по сравнению с ее значением в опыте 1. Более детальный анализ показывает, что потенциальная энергия в опыте 2 увеличилась даже по сравнению с ее начальным значением приблизительно на 0,1 % (в системе отсчета, начало которой расположено на дне бассейна). Это еще один эффект немонотонной зависимости плотности воды от температуры.

Примерно через 10 мин видимое движение прекращалось во всем бассейне и устанавливалась устойчивая стратификация по плотности. Снимок, полученный на этом этапе процесса в опыте 2 при окраске чернилами более тяжелой жидкости, приведен на рис. 7, *a*. В дальнейшем приблизительно через 5 мин снова начиналось своеобразное вторичное движение, “память” о котором сохранилась в картине распределения чернил, приведенной на рис. 7, *б*. Сначала вдоль боковых стенок, а затем и по всей ширине бассейна происходил подъем окрашенной жидкости против силы тяжести дискретными струями с грибовидными структурами в головной части. Аналогичный процесс наблюдался и в опыте 1. В этом опыте по сравнению с опытом 2 процесс подъема начался раньше, дискретные струи были

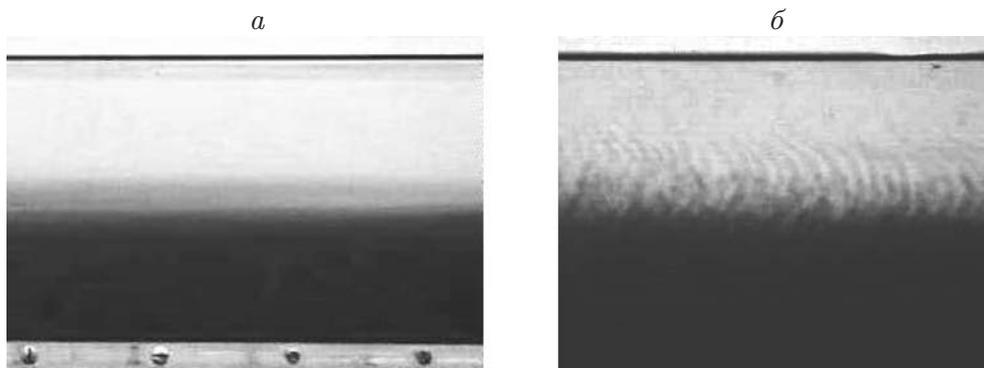


Рис. 7. Картина расслоения в опыте 2 при $t = 12$ (а) и 60 мин (б)

более широкими в направлении поперек бассейна и более частыми в продольном направлении x .

В работе [11] детально проанализированы возможные причины образования так называемой тонкой структуры гидрофизических полей в океане. Картина на рис. 7, б интересна тем, что она содержит “память” о процессе формирования тонкой структуры в результате подъема более плотной жидкости против силы тяжести. Известен механизм подъема, связанный с тем, что коэффициенты молекулярной диффузии тепла χ и растворенной примеси χ_1 (в данных опытах — чернил) значительно различаются по величине (χ_1 на два порядка меньше χ). При описании этого эффекта используется термин “двойная диффузия” [10, 12]. Расслоение прозрачной и окрашенной воды, видимое на рис. 7, б, может быть также результатом “памяти” о вихревом характере движения на предшествующих этапах [5].

Обсуждаемое расслоение может быть обусловлено теплообменом воды с лабораторным помещением через свободную поверхность, боковые стенки и дно бассейна. Если температуры воды и воздуха различны, происходит локальное изменение плотности вблизи свободной поверхности, связанное с испарением и конденсацией. Это нашло отражение на приведенных выше распределениях температуры и плотности по глубине. В стратифицированной по плотности жидкости поток тепла через боковые стенки порождает своеобразное конвективное течение в виде так называемых “пальцев” [13]. Сначала эти “пальцы” вытянуты в горизонтальном направлении. Затем из-за эффекта блокировки [10] может начаться их вертикальный подъем [4].

При контакте холодной воды с более теплым дном бассейна создаются условия для образования вертикальных струй из-за неустойчивости Рэля — Тейлора [14]. Аномальная зависимость плотности воды от температуры существенно влияет на этот процесс, ограничивая высоту подъема струй. Вода с максимальной плотностью нагревается на дне, становится легче и начинает подниматься в виде струй. Затем в результате теплообмена с окружающей водой струи снова приобретают максимальную плотность и их подъем прекращается. Такой процесс может играть важную роль в глубоких водоемах типа озера Байкал.

В данных опытах расслоение окрашенной и прозрачной воды (см. рис. 7, б) обусловлено комбинированным влиянием всех упомянутых факторов, за исключением влияния “двойной диффузии”. Подъем тяжелой жидкости из-за этого фактора может происходить, если температурная стратификация играет стабилизирующую роль, а стратификация по примеси — дестабилизирующую (или наоборот) [11].

Картина, представленная на рис. 7, б, наблюдалась не всегда. Если при прочих равных условиях щит располагался посередине бассейна или удалялся слишком быстро (менее чем

за 0,4 с), то вплоть до полного выравнивания температуры во всем бассейне сохранялось расслоение, аналогичное приведенному на рис. 7,а. Это свидетельствует о существенном влиянии характера начальной завихренности. При быстром подъеме щита происходило интенсивное турбулентное перемешивание, так что начальный размер вихрей и время их вырождения были меньше, чем при медленном подъеме. Смещение щита от середины бассейна приводит к тому, что отражение гравитационных струй от правой и левой торцевых стенок происходит не одновременно, что также изменяет характер завихренности.

В заключение можно отметить, что при теоретическом анализе рассматриваемого течения на основе модели потенциального движения жидкости используется предположение о постоянстве скорости распространения возмущения [6, 7]. Данные рис. 5 показывают, что эта скорость непостоянна. Изменение скорости распространения гравитационного течения обусловлено не только потерями энергии на трение, но и обменом массой и количеством движения между основными слоями в процессе перемешивания. Теоретический анализ гравитационного течения с учетом перемешивания между слоями, но без учета аномальных эффектов выполнен в [15].

Автор выражает благодарность Е. М. Романову и Н. В. Гаврилову за помощь при проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zilitinkevich S. S., Reiman K. D., Terzhevik A. Yu.** The thermal bar // *J. Fluid Mech.* 1992. V. 236. P. 27–42.
2. **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.
3. **Букреев В. И.** Гидродинамическая неустойчивость, обусловленная аномальной зависимостью плотности воды от температуры // *Докл. РАН.* 2004. Т. 396, № 6. С. 770–772.
4. **Букреев В. И.** Влияние аномальной зависимости плотности воды от температуры на поверхностное гравитационное течение // *ПМТФ.* 2005. Т. 46, № 1. С. 63–79.
5. **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.
6. **Simpson J. E.** Gravity currents in the environment and the laboratory. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997.
7. **Benjamin T. V.** Gravity currents and related phenomena // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 31, Pt 2. P. 209–243.
8. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Механика сплошных сред. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1954.
9. **Атавин А. А., Гладышев М. Т., Шугрин С. М.** О разрывных течениях в открытых руслах // *Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики.* 1975. Вып. 22. С. 37–64.
10. **Тернер Дж.** Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
11. **Федоров К. Н.** Тонкая структура гидрофизических полей в океане // *Океанология. Физика океана.* Т. 1. Гидрофизика океана. М.: Наука, 1978. С. 113–147.
12. **Law A. W.-K., Ho W. F., Monismith S. G.** Double diffusive effect on desalination discharges // *J. Hydraul. Engng.* 2004. V. 130, N 5. P. 450–457.
13. **Левицкий В. В., Чашечкин Ю. Д.** Термоконцентрационная конвекция при однородном боковом нагреве // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 1995. № 5. С. 112–124.
14. **Elder J. W.** The unstable thermal interface // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 32, Pt 1. P. 69–96.
15. **Ляпидевский В. Ю., Тешуков В. М.** Математические модели распространения длинных волн в неоднородной жидкости. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.

*Поступила в редакцию 21/I 2005 г.,
в окончательном варианте — 8/IV 2005 г.*