

УДК 532.5.013.4

ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ТЕЧЕНИЕ

В. И. Букреев

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

Приведены результаты опытов с распространением плоской струи воды, температура которой больше температуры максимальной плотности ($4\text{ }^{\circ}\text{C}$), по поверхности первоначально покоящейся воды, температура которой около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для сравнения выполнены опыты, в которых при прочих равных условиях температура нижнего и верхнего слоев больше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продемонстрирован ряд новых гидродинамических эффектов, в том числе своеобразная неустойчивость движения и тонкая структура поля плотности при больших временах.

Ключевые слова: максимальная плотность воды, гидродинамическая неустойчивость, тонкая структура поля плотности.

Плотность воды зависит от температуры немонотонно. В нормальных условиях плотность максимальна при температуре около $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ она меньше на $0,07\%$ (в общем случае температура максимальной плотности T_m зависит от давления и содержания примесей). Такое аномальное свойство воды по сравнению с другими жидкостями обуславливает ряд эффектов, в том числе гидродинамических. Если в контакт вступают массы воды, температуры которых больше и меньше T_m , то в зоне контакта образуется слой большей плотности в окружении воды меньшей плотности. В поле силы тяжести на частицы воды в этом слое действует направленная вниз сила плавучести (разность между силой тяжести и архимедовой силой). Эта сила мала. Однако в определенных условиях, часто встречающихся в природе, она является существенной. В частности, аномальная зависимость плотности воды от температуры играет важную роль в тепло- и массообменных процессах озера Байкал, где стратификация по плотности сама по себе невелика [1].

Еще с 1880 г. известен эффект образования сезонного термобара в озерах и водохранилищах, когда в контакт вступают массы воды из прибрежной и глубоководной частей водоема. Обзор исследований термобара до 1992 г. содержится в [2–4]. Из более поздних работ можно отметить [5–9]. При этом основное внимание уделяется натурным и расчетно-теоретическим исследованиям. В случае термобара определяющую роль играет горизонтальный градиент температуры. Наличие вертикальных градиентов температуры, в том числе со слоем максимальной плотности, расположенным вблизи дна, — типичная ситуация для достаточно глубоких водоемов в любое время года.

В данной работе приводятся некоторые иллюстрации гидродинамических процессов при контакте масс воды, температуры которых больше и меньше T_m , для течения, схема-

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

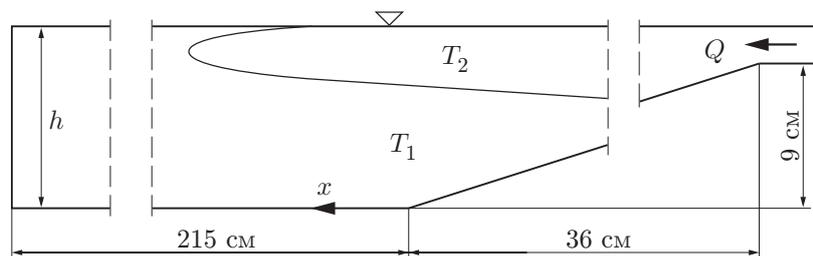


Рис. 1. Схема эксперимента

тически показанного на рис. 1. В покоящуюся воду, температура которой T_1 , выпускалась струя воды, температура которой T_2 . В сильно упрощенной постановке это моделирует распространение в пресном водоеме воды, стекающей по береговому склону, или распространение воды реки Селенги в озере Байкал. Выполнено сравнение с характером течения в отсутствие аномальных эффектов при прочих равных условиях.

Опыты проводились в непроточном канале шириной $B = 6$ см из оргстекла толщиной 0,6 см. Конфигурация дна канала и продольные размеры приведены на рис. 1. Канал заполнялся на глубину 7,6 см водой, температура которой T_1 . В этот первоначально покоящийся слой выпускалась струя воды, температура которой T_2 , с удельным (на единицу ширины канала) расходом $q = Q/B$. Расход подавался ограниченное время, так что в течение одного опыта в канал поступало дополнительно 10 л, а глубина h непрерывно возрастала до значения 14,4 см. Температура воздуха в помещении $T = 14,7$ °С. В опытах менялись температуры T_1 и T_2 , начальная разность плотностей $\Delta\rho$, а также удельный расход q . Температура измерялась с погрешностью $\pm 0,1$ °С, удельный расход — с погрешностью ± 5 %. Значения $\Delta\rho$ взяты по справочным данным.

Использовались два способа визуализации: чернилами и алюминиевой пудрой микронных размеров. В первом способе информация о движении воды была получена по всей ширине канала, во втором — из более узкой области шириной около 1,5 см, выделенной продольным световым “ножом”. Процессы регистрировались цифровым фотоаппаратом и видеокамерой с частотой 25 кадр/с. Время t отсчитывалось с момента входа струи в покоящуюся воду с погрешностью ± 3 с. Далее приводятся результаты пяти опытов. Соответствующие им значения варьируемых параметров представлены в таблице. В опытах 1–4 струя распространялась вдоль свободной поверхности, в опыте 5 — по дну канала.

Во времени процессы протекали следующим образом. На начальном интервале длительностью около 8 с происходило перемешивание теплой и холодной воды по всему поперечному сечению канала. При наличии аномальных эффектов перемешивание было менее интенсивным. При указанных в таблице значениях q это различие было незначительным. Однако в опыте с расходом $q = 150$ см²/с аномальные эффекты приводили к тому, что даже на начальном интервале граница раздела теплой и холодной воды была очень резкой.

В дальнейшем в опытах 1–4 теплая вода всплывала и формировалось поверхностное гравитационное течение. В опыте 5 формировалось не поверхностное, а придонное

Номер опыта	T_1 , °С	T_2 , °С	q , см ² /с	$\Delta\rho$, г/см ³
1	0,5	11,5	11,1	0,0032
2	11,7	14,2	11,1	0,0031
3	0,2	13,9	23,8	0,0059
4	7,7	13,8	23,8	0,0059
5	11,0	4,0	11,1	0,0038

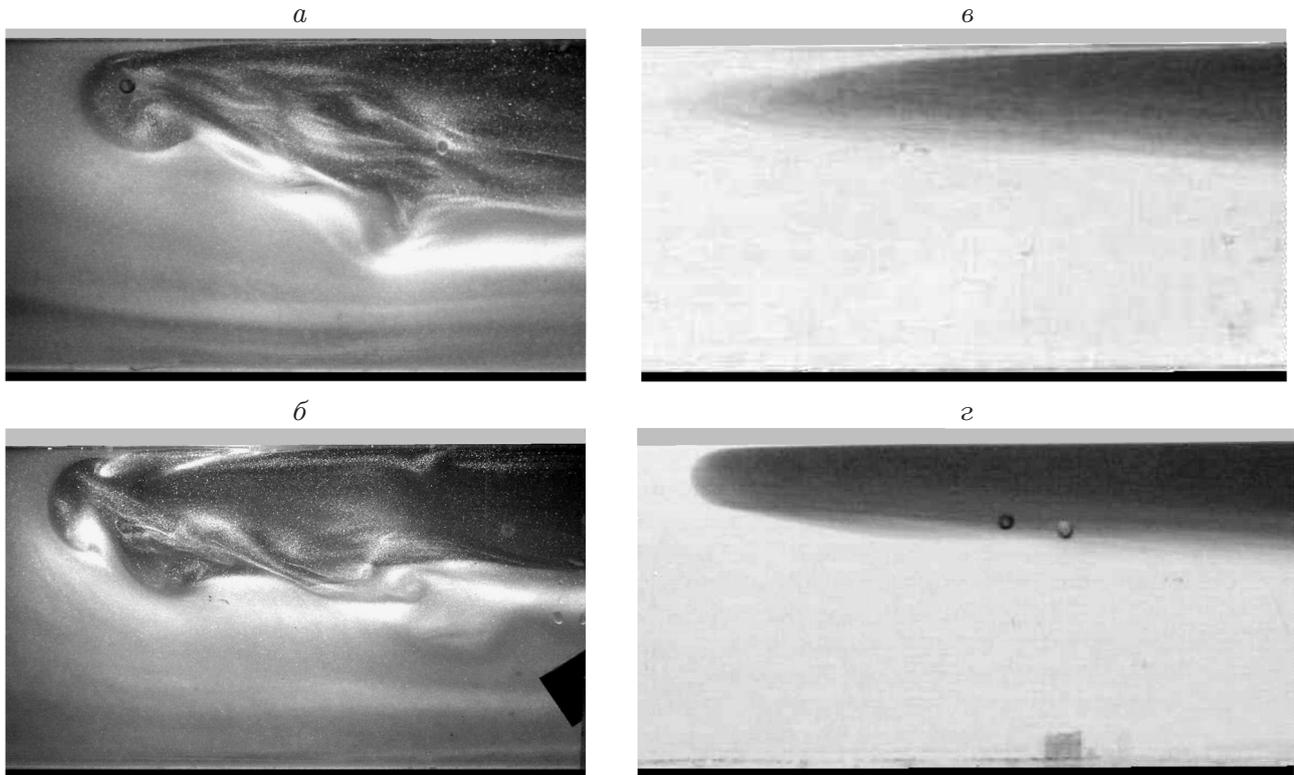


Рис. 2. Головная часть поверхностной струи при меньшем расходе:
a — опыт 1, $t = 117$ с; *б* — опыт 1, $t = 165$ с; *в* — опыт 2, $t = 89$ с; *г* — опыт 2, $t = 146$ с

гравитационное течение. Переход от T_1 к T_2 происходил в относительно тонком промежуточном слое толщиной δ . Из-за сдвига скорости между основными слоями Δu создавались предпосылки для развития неустойчивости по механизму Кельвина — Гельмгольца [10]. В идеальной жидкости эта неустойчивость проявляется при числе Ричардсона $Ri = \varepsilon g \delta / \Delta u^2 < 1/4$ [10], где $\varepsilon = \rho_1 / \rho_2 - 1$; g — ускорение свободного падения. При наличии аномальных эффектов и прочих равных условиях значение δ уменьшается, так что эта неустойчивость появляется при меньшем сдвиге скорости. Кроме того, создаются предпосылки для развития неустойчивости по механизму Рэля — Тейлора [11, 12].

На рис. 2 приведены кадры, полученные в опытах 1 и 2 в различные моменты времени до прекращения подачи расхода. В опыте 1 в покоящуюся воду добавлялась алюминиевая пудра, а дополнительно поступающая вода была прозрачной. В опыте 2 прозрачной была покоящаяся вода, а поступающая вода окрашивалась чернилами. В опыте 1 (рис. 2, *a, б*) движение было неустойчивым. При этом до прекращения подачи расхода наряду с механизмом неустойчивости Рэля — Тейлора проявлялся и механизм Кельвина — Гельмгольца. После прекращения подачи расхода действовал только механизм неустойчивости Рэля — Тейлора. В отсутствие аномальных эффектов (рис. 2, *в, г*) движение было устойчивым (за исключением начального интервала времени).

На кадрах прослеживается тонкая структура поля плотности внутри поверхностного слоя. Термин “тонкая структура” взят из работы [13], где он введен для описания структуры с тонкими горизонтальными слоями постоянной плотности внутри глобальной устойчивой вертикальной плотностной стратификации. Причины образования тонкой структуры различны. В данных опытах важную роль играла “память” о предшествующих этапах эволюции процесса. В отсутствие аномальных эффектов (рис. 2, *в, г*) тонкая

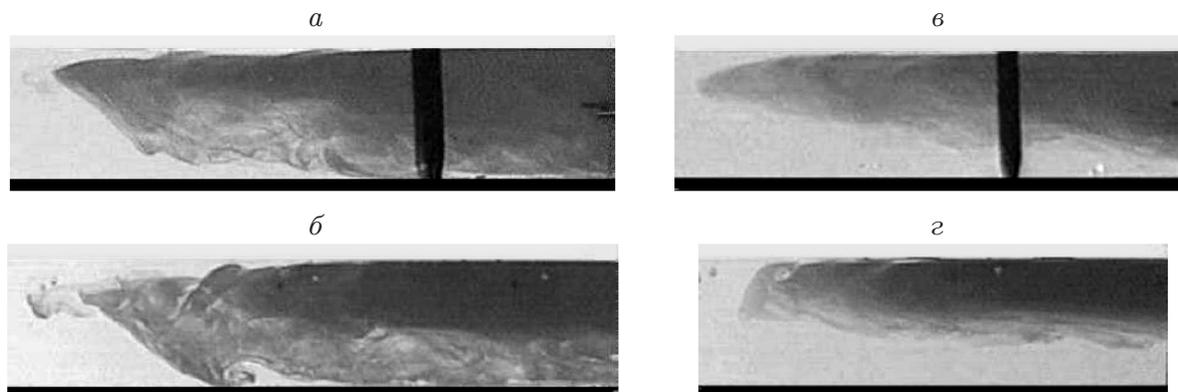


Рис. 3. Головная часть поверхностной струи при большом расходе:
a — опыт 3, $t = 30$ с; *б* — опыт 3, $t = 64$ с; *в* — опыт 4, $t = 29$ с; *г* — опыт 4, $t = 60$ с

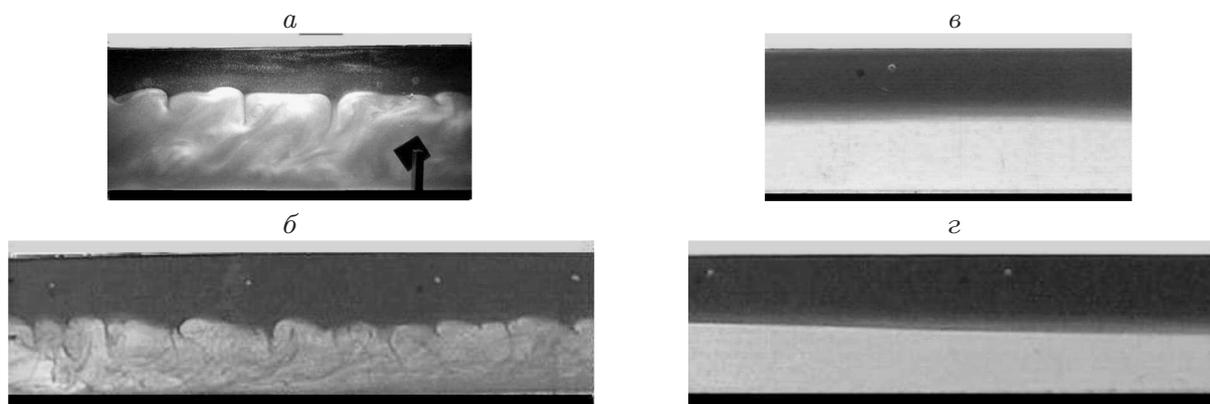


Рис. 4. Картина течения после прекращения подачи расхода:
a — опыт 1, $t = 345$ с; *б* — опыт 3, $t = 164$ с; *в* — опыт 2, $t = 347$ с; *г* — опыт 4, $t = 165$ с

структура близка к классической [13] и границы слоев постоянной плотности непрерывны. При наличии аномальных эффектов (рис. 2, *a, б*) тонкая структура в головной части струи весьма специфична и непрерывно изменяется во времени.

На рис. 3 приведены аналогичные кадры, полученные в опытах 3 и 4. В этих опытах чернилами окрашивалась поступающая вода. При наличии аномальных эффектов часть более теплой воды опускалась почти до дна канала (рис. 3, *a, б*). Из-за большего значения Δu неустойчивость Кельвина — Гельмгольца проявлялась и в отсутствие аномальных эффектов (рис. 3, *в, г*). После прекращения подачи расхода она быстро подавлялась в обоих опытах.

Кадры на рис. 4 относятся к интервалу времени после прекращения подачи расхода. Кадр на рис. 4, *a* получен при визуализации алюминиевой пудрой, на рис. 4, *б–г* — чернилами. На этом интервале времени сдвиг скорости пренебрежимо мал и сохранилась только неустойчивость, обусловленная аномальной зависимостью плотности воды от температуры (рис. 4, *a, б*). В отсутствие аномальных эффектов (рис. 4, *в, г*) стратификация устойчива и тонкая структура имеет классический вид.

Следует отметить, что неустойчивость, наблюдаемая в кадрах на рис. 4, *a, б*, существенно отличается от неустойчивости Рэлея — Тейлора в случае бесконечно глубоких слоев с инверсией плотности. В этом случае избыточная потенциальная энергия верхнего

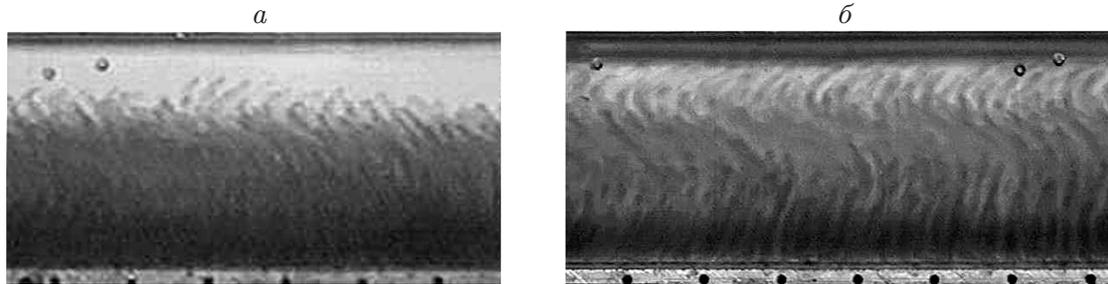


Рис. 5. Тонкая структура поля плотности при больших временах в опыте 5:
a — $t = 2100$ с; *б* — $t = 3600$ с

слоя безгранична и со временем картина течения становится хаотической. При неустойчивости, обусловленной аномальной зависимостью плотности воды от температуры, избыточной потенциальной энергией обладает только тонкий слой в окрестности температуры максимальной плотности. Вода из этого слоя опускается в виде относительно редких, в значительной степени детерминированных струек.

В дальнейшем формировалась тонкая структура поля плотности, представленная на рис. 5 (опыт 5), которая принципиально отличается от классической тем, что регулярно чередующиеся тонкие слои теплой и холодной воды имеют не горизонтальную, а преимущественно вертикальную ориентацию. Открытие в океанологии классической тонкой структуры получило в научных кругах большой резонанс. Она формируется на определенных этапах эволюции различных течений стратифицированной по плотности жидкости, например при конвекции, обусловленной нагревом жидкости сбоку [14] (см. также рис. 2, в, г, рис. 4, в, г).

Проведены дополнительные опыты для проверки различных гипотез относительно механизма образования тонкой структуры с вертикальной ориентацией слоев. В одной серии опытов после удаления разделяющей вертикальной перегородки в контакт вступали массы воды, температуры которых различны. В другой серии моделировался процесс таяния льда. И в основных, и в дополнительных опытах на определенном этапе наблюдалась структура поля плотности, аналогичная приведенной на рис. 5.

Приведенные на рис. 5 кадры опровергают две из проверившихся гипотез. Одна из них заключалась в том, что обсуждаемая структура обусловлена наличием чернил в нижнем слое. Однако частицы чернил тяжелее воды, и в отсутствие течений окрашенная ими жидкость не может всплывать сосредоточенными струями, как это имеет место в кадре на рис. 5, *a*. Оценки показывают, что скорость подъема этих струй существенно больше скорости молекулярной диффузии чернил. Другая гипотеза заключалась в том, что тонкая структура, наблюдаемая в кадрах на рис. 5, обусловлена аномальными эффектами: опускаясь, прозрачная вода с максимальной плотностью выдавливает вверх окрашенную жидкость. Однако картина, приведенная на рис. 5, получена в отсутствие аномальных эффектов (см. таблицу). При наличии аномальных эффектов также формируется аналогичная тонкая структура. При прочих равных условиях этот процесс начинался немного позже. Еще одна гипотеза о влиянии на образование тонкой структуры потока тепла из лабораторного помещения в воду не получила подтверждения при проведении опытов в более крупном канале шириной 20 см. На основании выполненных опытов наиболее правдоподобной представляется следующая гипотеза.

Основную роль в формировании тонкой структуры с вертикальной ориентацией однородных слоев играет течение после того, как образовалась классическая структура с горизонтальной ориентацией тонких слоев. Скорости этого течения должны быть достаточно

малыми, чтобы создавались условия для развития известного “эффекта блокировки” [10]. В этом случае наряду с горизонтальными компонентами скорости существует и сравнимая по величине вертикальная компонента. По-видимому, при слабой глобальной стратификации это и вызывало подъем более тяжелой и опускание более легкой жидкости сначала в виде круглых, затем в виде плоских вертикальных струй (рис. 5). Известен также эффект образования так называемых “пальцев”, обусловленный различием коэффициентов молекулярной диффузии тепла и соли [10, 14, 15].

В глубоких водоемах типа озера Байкал всегда существуют условия для развития рассматриваемой структуры. Соответствующие течения могут вызвать, в частности, горизонтальные неоднородности температуры. В данных опытах основную роль играла слабая неоднородность температуры по длине канала (порядка 1 °С на метр длины), обусловленная предысторией движения.

Скорость вертикального переноса тепла и чернил в опыте 5 (рис. 5) значительно меньше, чем при турбулентном перемешивании, но существенно больше, чем при молекулярной диффузии. Наряду с другими факторами данный механизм переноса может иметь значение при описании массообмена в озере Байкал, где концентрации кислорода в придонном и поверхностном слоях различаются мало [1]. При описании процессов в озере Байкал заслуживает также внимания рассмотренная выше неустойчивость, обусловленная аномальной зависимостью плотности воды от температуры. При очень слабой плотностной стратификации в озере Байкал имеет значение даже то, что температура максимальной плотности зависит от давления.

Автор выражает благодарность А. В. Гусеву и Е. М. Романову за помощь при проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Shimaraev M. N., Verbolov V. I., Granin N. G., Sherstyankin P. P.** Physical limnology of lake Baikal: Review. Irkutsk — Orayama: Baikal Intern. Center for Ecol. Res., 1994.
2. **Тихомиров А. И.** Термика крупных озер. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1982.
3. **Зилитинкевич С. С.** Проникающая турбулентная конвекция. Таллин: Валгус, 1989.
4. **Zilitinkevich S. S., Reiman K. D., Terzhevnik A. Yu.** The thermal bar // *J. Fluid Mech.* 1992. V. 236. P. 27–42.
5. **Shimaraev M. N., Granin N. G.** Deep ventilation of lake Baikal due to spring thermal bar // *Limnology and Oceanography.* 1993. V. 38, N 5. P. 1068–1072.
6. **Цветова Е. А.** Численное моделирование гидродинамических процессов, ответственных за распространение загрязняющих примесей в глубоком водоеме // *Вычисл. технологии.* 1997. Т. 2, № 2. С. 102–108.
7. **Квон В. И., Квон Д. В.** Численный анализ механизма глубокого проникновения поверхностных вод озера в период весенне-летнего термобара // *Вычисл. технологии.* 1997. Т. 2, № 5. С. 46–56.
8. **Блохина Н. С., Орданович А. Е., Савельева О. С.** Модель возникновения и развития весеннего термобара // *Водн. ресурсы.* 2001. Т. 28, № 2. С. 224–228.
9. **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.
10. **Тернер Дж.** Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
11. **Lord Rayleigh.** On convection current in a horizontal layer of fluid when higher temperature is on the upper side // *Philos. Mag.* 1916. V. 32, N 6. P. 529–546.

12. **Taylor G. I.** Effect of variation of density on the stability of superposed streams of fluid // Proc. Roy. Soc. Ser. A. 1931. V. 132. P. 499–523.
13. **Федоров К. Н.** Тонкая структура гидрофизических полей в океане // Океанология. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. М.: Наука, 1978. С. 113–147.
14. **Левицкий В. В., Чашечкин Ю. Д.** Термоконцентрационная конвекция при однородном боковом нагреве // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1995. № 5. С. 112–124.
15. **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.

Поступила в редакцию 7/IV 2004 г.
