

УДК 532.516.:536.412.5

© 2005 г. В. И. БУКРЕЕВ

## ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ КРУГЛОЙ СТРУИ

Экспериментально показано, что первоначально круглая струя воды с температурой больше  $4^{\circ}\text{C}$  при распространении в воде с температурой около  $0^{\circ}\text{C}$  превращается в тонкую пленку и погружается, а не всплывает. На больших временах обнаружена своеобразная тонкая структура гидрофизических полей, обусловленная различием коэффициентов молекулярной диффузии тепла и растворенных солей, а также распадом крупных вихрей на мелкие.

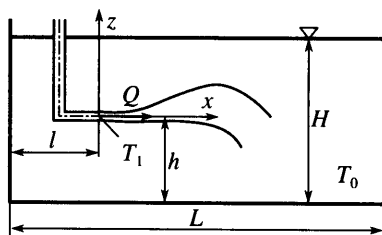
*Ключевые слова:* температура максимальной плотности воды, струя нейтральной плавучести, плавучая струя, тяжелая струя, тонкая структура гидрофизических полей.

При атмосферном давлении вода имеет максимальную плотность при температуре  $T_* = 4^{\circ}\text{C}$ . Этим аномальным свойством воды обусловлен ряд эффектов, в том числе гидродинамических (в дальнейшем тексте гидродинамические эффекты, обусловленные аномальной зависимостью плотности воды от температуры, будут называться аномальными эффектами). Если в контакт вступают массы воды с температурами, большей и меньшей  $T_*$ , 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 условиях, часто встречающихся в природе, она становится существенной.

Аномальные эффекты играют важную роль в образовании весеннего и осеннего термобара при контакте масс воды разной температуры из прибрежной и глубоководной частей пресного водоема. В другое время года они могут проявляться на больших глубинах пресных водоемов при слабой общей стратификации по плотности и малых скоростях движения, например в озере Байкал. Обзор работ по термобару, первое описание которого дано в 1880 г., содержится в [1]. Основное внимание уделялось натурным и расчетно-теоретическим исследованиям. В [2] приведены результаты лабораторных опытов, в которых плоская струя с температурой больше  $T_*$  распространялась в первоначально покоящейся воде с температурой меньше  $T_*$ . Показано, что аномальные эффекты сильно влияют на устойчивость и картину течения.

В данной работе приведены результаты лабораторных опытов, в которых в прямоугольный лоток с первоначально покоящейся водопроводной водой, имеющей температуру  $T_0$ , выпускалась круглая струя воды из сопла диаметром  $D$  с начальным расходом  $Q$  и начальной температурой  $T_1$ . Сравниваются картины течения при наличии и в отсутствие аномальных эффектов. Схема эксперимента и основные обозначения приведены на фиг. 1.

В общем случае кроме  $D$ ,  $Q$ ,  $T_*$ ,  $T_0$  и  $T_1$  в число основных параметров задачи следует включить плотность  $\rho$  и коэффициент кинематической вязкости воды  $\nu$ , коэффициент молекулярной диффузии тепла  $\chi$ , ускорение свободного падения  $g$ , начальную глубину воды в лотке  $H$ , длину  $L$  и ширину  $B$  лотка, а также параметры  $l$  и  $h$  (фиг. 1), определяющие положение сопла в продольной плоскости симметрии лотка.



Фиг. 1. Схема эксперимента

Визуализация картины течения осуществлялась чернилами и уранином. При этом в число параметров входит коэффициент молекулярной диффузии частиц красителя  $\chi_1$ . В гидродинамике двухфазных жидкостей влияние веса, формы и размеров взвешенных частиц интегрально характеризуется скоростью их осаждения. Опытами установлено, что для частиц чернил и уранина эта скорость была меньше  $10^{-5}$  см/с. На больших временах могут проявляться эффекты, обусловленные потоком тепла из лабораторного помещения в воду через свободную поверхность и твердые стенки лотка.

Поскольку зависимость плотности воды от температуры однозначная, достаточно задать только плотность  $\rho_0$ . В условиях данных опытов это утверждение справедливо также относительно параметров  $\nu$ ,  $\chi$  и  $\chi_1$ . Из-за сильно нелинейной зависимости плотности воды от температуры и неоднозначности обратной зависимости (температура от плотности) в диапазоне  $0 < T < 8^\circ\text{C}$  параметры  $\rho_0$ ,  $T_*$ ,  $T_0$  и  $T_1$  независимы. Струя выпускалась ограниченное время  $\Delta t$  (время  $t$  отсчитывается от начала выпуска струи). Существенно, что струя вносила в систему избыточный импульс и момент импульса.

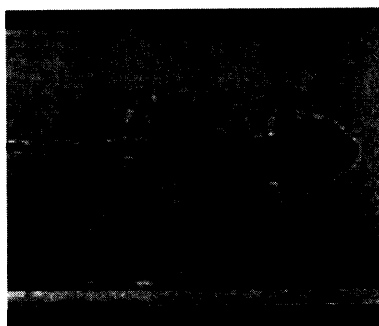
Из-за быстрого увеличения скорости на выходе из сопла от нуля до постоянного значения (за 0.2 с), а также из-за непрерывного обмена струи и окружающей жидкости массой, импульсом и теплом рассматриваемые процессы были нестационарными. В данных опытах изменялись только безразмерные параметры

$$\varepsilon = (\rho_0 - \rho_1)/\rho_*, \quad T_0^0 = T_0/T_*, \quad T_1^0 = T_1/T_*, \quad \text{и} \quad h^0 = h/H$$

Здесь  $\rho_0$ ,  $\rho_1$  и  $\rho_*$  – плотности воды при температурах  $T_0$ ,  $T_1$  и  $T_*$  соответственно. Их значения приведены в таблице. Параметры  $D = 0.26$  см,  $H = 26$  см,  $L = 100$  см,  $B = 15$  см,  $l = 18$  см,  $U = 4Q/\pi D^2 = 6.3$  см/с не менялись. Значения  $\nu$  и  $\chi$  принимались по справочнику при температуре  $15^\circ\text{C}$ . Существенно, что на выходе из сопла параметр Рейнольдса был небольшим:  $Re = UD/\nu = 164$ .

В опыте 1 изучалось распространение струи нейтральной плавучести. В опытах 2 и 3 струя была сначала легче окружающей жидкости, причем значения  $\varepsilon$  в этих опытах были одинаковыми. Принципиальное различие заключалось в том, что в дальнейшем при теплообмене с окружающей водой в опыте 2 струя оставалась более легкой и продолжала всплывать, тогда как в опыте 3 струя приобретала максимальную плотность и погружалась. Опыт 4 отличался от опыта 3 только большей температурой окружающей воды. В нем аномальные эффекты проявились особенно ярко. В опыте 5 струя изначально была тяжелее окружающей жидкости, и аномальные эффекты отсутствовали.

При интерпретации картины расслоения красителя на больших временах привлекаются некоторые результаты опытов при двух других постановках. В одной из них более плотная вода выпускалась в виде плоской струи по дну канала [2]. В другой задаче изучались процессы после удаления вертикальной перегородки, разделяющей

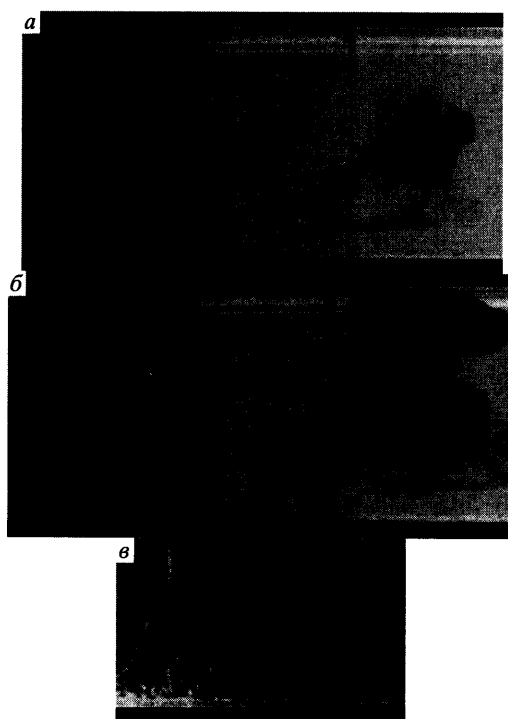
Фиг. 2 Головная часть струи нейтральной плавучести при  $t = 124$  с (опыт 1)

первоначально покоящиеся массы воды различной плотности. В третьем случае струя нейтральной плавучести выпускалась вертикально вниз.

На фиг. 2 приведен снимок через боковую стенку канала головной части струи нейтральной плавучести (опыт 1). Струя распространялась горизонтально. Грибовидная форма ее головной части существует в относительно узком диапазоне параметров и на ограниченном интервале времени. Как правило, струя нейтральной плавучести менее устойчива, чем плавучая или тяжелая струя. Сильное влияние на устойчивость оказывает неконтролируемая завихренность в начальном сечении. Средняя траектория струи нейтральной плавучести в вертикальной плоскости весьма чувствительна к углу наклона сопла к горизонту и разности температур в струе и окружающей жидкости. Даже при разности температур порядка  $0.1^\circ\text{C}$  струя либо всплывает, либо погружается.

На фиг. 3 приведен снимок плавучей струи в отсутствие аномальных эффектов (опыт 2). Головная часть струи имела грибовидную форму. С течением времени кривизна траектории струи возрастала. На определенном этапе эволюции грибовидная структура отделилась от основной траектории, ее скорость сильно снизилась, а в головной части струи сформировалась новая грибовидная структура. В момент времени  $t = 135$  с струя достигла свободной поверхности. При этом направление вектора импульса изменилось. В дальнейшем более легкая вода распространялась вдоль свободной поверхности с очень малой скоростью, так что после отражения от свободной поверхности импульс струи был направлен в основном вниз. Окрашенная вода справа от основной траектории струи на фиг. 3 – результат “памяти” о предыстории движения. На предшествующих этапах эволюции струя поднималась по более пологой траектории.

№ опыта	$\epsilon$	$T_0^0$	$T_1^0$	$h^0$
1	$0 \pm 10^{-5}$	$4.30 \pm 0.025$	$4.30 \pm 0.025$	0.58
2	$(0.98 \pm 0.01) \cdot 10^{-3}$	$4.62 \pm 0.025$	$5.17 \pm 0.025$	0.18
3	$(0.98 \pm 0.01) \cdot 10^{-3}$	$0.12 \pm 0.025$	$4.10 \pm 0.025$	0.76
4	$(1.29 \pm 0.01) \cdot 10^{-3}$	$0.12 \pm 0.025$	$4.65 \pm 0.025$	0.06
5	$(-1.5 \pm 0.01) \cdot 10^{-3}$	$3.70 \pm 0.025$	$2.05 \pm 0.025$	0.80



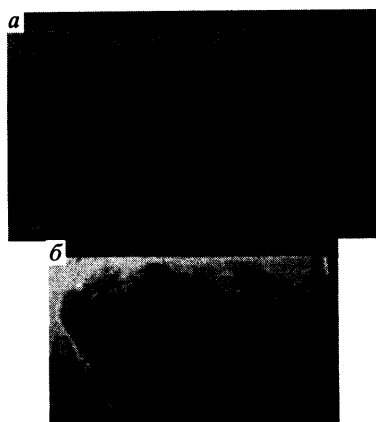
Фиг. 3. Плавающая струя в отсутствие аномальных эффектов при  $t = 74, 144, 200$  с (а–в) (опыт 2)

В этом опыте выпуск струи прекратился через 3 мин. В дальнейшем окрашенная жидкость стала медленно (со скоростью порядка  $0.05$  мм/с) опускаться против силы плавучести под действием направленной вниз компоненты импульса. Снимок при  $t = 200$  с (фиг. 3, в) получен в условиях опыта 2, но с окраской струи не чернилами, а уранином. При такой визуализации более теплая вода выглядит светлой. Опускание более теплой жидкости происходило не сплошным фронтом, а в виде множества мелких струй с грибовидной формой головной части. Образование струй не связано с аномальными эффектами, поскольку в опыте 2 они отсутствовали.

Проверялась гипотеза, что образование мелких струй связано с наличием красителя. Она опровергается снимком на фиг. 4, а. Этот снимок получен в опытах с распространением по дну канала более тяжелой плоской струи через 40 мин после прекращения выпуска струи. Вода в плоской струе окрашивалась чернилами. Более детально методика проведения опыта описана в [2]. После прекращения выпуска струи сначала произошло гладкое устойчивое расслоение теплой и холодной воды, а затем окрашенная вода стала медленно подниматься против силы тяжести мелкими струями.

Картина опускания или подъема жидкости мелкими струями против силы плавучести наблюдалась также в других опытах: на больших временах после удаления перегородки, разделяющей массы воды различной температуры, после притока более теплой воды через полынью в покрытый льдом бассейн и после прекращения дождя, выпавшего на поверхность более холодной воды.

В картине расслоения воды на больших временах принципиально важную роль играла та или иная асимметрия при внесении в систему начального возмущения. В этом случае в систему наряду с избыточным импульсом вносится момент импульса.



Фиг. 4. Тонкая структура на больших временах: *a* – в опыте с плоской струей [2] при  $t = 2700$  с, *б* – в опыте с вертикальной струей нейтральной плавучести при  $t = 240$  с

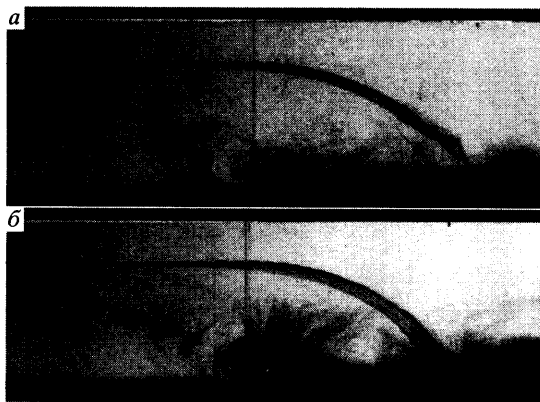
При симметричном распределении избыточного импульса и момента импульса подъем мелкими струями против сил плавучести не наблюдался. В этом отношении показательны результаты следующих опытов.

Лоток длиной 3 м и шириной 15 см из оргстекла толщиной 0.8 см симметрично разделялся непроницаемой пластиной на две части. Одна часть заполнялась окрашенной чернилами водой с температурой  $15.7^{\circ}\text{C}$ , другая часть – прозрачной водой с температурой  $1^{\circ}\text{C}$ . Затем пластина удалялась, теплая вода распространялась поверху, холодная – понизу. Некоторое время происходил достаточно быстрый теплообмен между слоями за счет обсуждаемых далее аномальных эффектов, и температура нижнего слоя повысилась до  $4.5^{\circ}\text{C}$ . Затем установилось устойчивое распределение плотности. В этом опыте картина с подъемом струй не наблюдалась. Окрашенная жидкость опускалась ровным горизонтальным фронтом со скоростью порядка  $10^{-5}$  см/с. В аналогичном опыте, отличающемся только тем, что у одной из торцевых стенок располагалась нарушающая симметрию наклонная пластина, достаточно быстро сформировалась структура с вертикальными струями. Первый из этих опытов опровергает также гипотезу о том, что образование струй было обусловлено теплообменом с лабораторным помещением через свободную поверхность, дно и боковые стенки канала.

В океанологии при описании мелкомасштабного расслоения гидрофизических величин используется термин “тонкая структура” [3]. Обнаружение тонкой структуры породило крупное направление научных исследований не только в океанологии. Она наблюдалась, например, в опытах с боковым нагревом воды [4]. Наибольшее внимание уделялось структуре, в которой толщина слоев с постоянными значениями гидрофизических величин мала по сравнению с их протяженностью в горизонтальных направлениях.

Известна также тонкая структура с так называемыми “пальцами” [5]. В [5] механизм образования структуры с “пальцами” объясняется влиянием “двойной диффузии”. Этот термин используется при описании эффектов, обусловленных различием коэффициентов молекулярной диффузии  $\chi$  и  $\chi_1 \ll \chi$ . При этом существенное значение имеют направления градиентов температуры и примеси.

Опыты показывают, что расслоение полей скорости и концентрации примеси может происходить и в однородной по плотности жидкости. В качестве примера на фиг. 4, б приведен снимок из опыта со струей нейтральной плавучести, выпущенной верти-



Фиг. 5. Струя с аномальными эффектами при  $t = 155, 289$  с (а, б) (опыт 3)

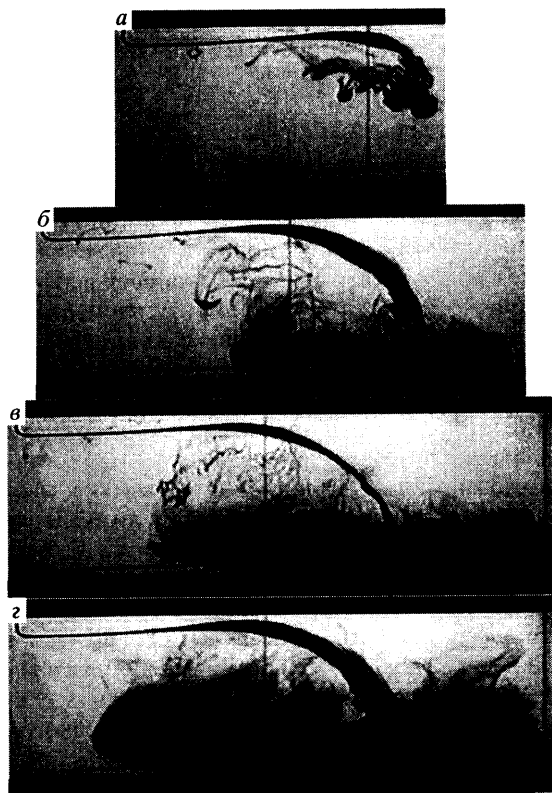
кально вниз. Для этого снимка  $T_0 = T_1 = 18.8^\circ\text{C}$ ,  $Re = 2040$ ,  $h^0 = 0.85$ ,  $l^0 = 2.8$ ,  $\Delta t = 130$  с. Значения других параметров указаны выше. Выпущенная со струей вода окрашена чернилами. Образование тонкой структуры в этом опыте можно объяснить только на основе законов сохранения импульса и момента импульса.

В открытой системе импульс и момент импульса сохраняются бесконечно. В реальных условиях они теряются, но только за счет вязкости. В обсуждаемых опытах скорости движения были малы, так что импульс и момент импульса сохранялись долго. Обусловленные избыточным моментом импульса крупные вихри с течением времени распадаются на множество мелких вихрей, в центре которых образуется зона пониженного давления. Приток окружающей жидкости в эту зону приводит к образованию струй. Представление о каскадном механизме распада крупных вихрей на мелкие широко используется при математическом моделировании турбулентности [6]. Малые дискретные вихри, спонтанно образующиеся на поверхности земли, можно наблюдать при слабом ветре.

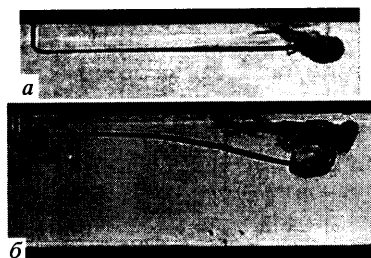
Тонкая структура с мелкими струями наблюдалась при подогреве жидкости снизу [7]. В этом случае в ее формировании определяющую роль играет неустойчивость Релея–Тейлора, когда струи поднимаются под действием силы плавучести. В опытах, результаты которых приведены на фиг. 3 и 4, условия для развития такой неустойчивости отсутствовали.

На фиг. 5 приведен снимок, полученный в опыте 3. Отличие от условий опыта 2 заключалось только в том, что создавались предпосылки для развития аномальных эффектов: температура воды на выходе из сопла больше, а окружающей воды – меньше  $T_*$ . В результате теплообмена на некотором расстоянии от сопла струя приобретает плотность, превышающую плотность окружающей среды, и быстро опускается. Струя растягивается в тонкую вертикальную пелену. Пелена неустойчива. В ее нижней части периодически образуются волны и разрывы. Эти эффекты проявляются тем сильнее, чем больше начальная разность температур.

На фиг. 6 приведены иллюстрации, полученные в опыте 4. Сначала струя имела положительную плавучесть и поднималась к свободной поверхности. Затем начала резко опускаться. В ее головной части последовательно формировались подковообразные и грибовидные структуры. От основной траектории струи отделялись также небольшие кольцевые вихри. С течением времени струя вытягивалась в широкую пелену. Пелена медленно поворачивалась по часовой стрелке из плоскости  $(x, z)$  в плоскость  $(x, y)$ , затем противоположным направлением вращения возвращалась в плос-



Фиг. 6. Струя с аномальными эффектами при  $t = 44, 135, 212, 400$  с (а-г) (опыт 4)



Фиг. 7. Тяжелая струя в отсутствие аномальных эффектов при  $t = 59, 171$  с (а, б) (опыт 5)

кость ( $x, z$ ). За время наблюдения (примерно 7 мин) такой цикл повторился два раза. После отражения от дна лотка в головной части пелены периодически зарождались волны с двумя-тремя гребнями и впадинами, задние из которых догоняли передние.

Необычная форма головной части струи наблюдалась в опыте 5, когда плотность воды на выходе из сопла была больше плотности воды в лотке, и условия для проявления аномальных эффектов отсутствовали (фиг. 7). Траектория струи долго была горизонтальной. Ее головная часть свернулась (на снимке – по часовой стрелке) в кольцо, расположенное в вертикальной плоскости. Затем кольцо повернулось в плос-

кость, перпендикулярную траектории струи, и начала формироваться грибовидная структура. В дальнейшем струя стала быстро искривляться ко дну лотка, грибовидная структура оторвалась от основной траектории и в головной части струи сформировалось новое кольцо.

При интерпретации приведенных иллюстраций следует обратить внимание на следующий эффект “двойной диффузии”. Частицы чернил и уранина с высокой точностью отслеживают движение окрашенной воды, но только при скоростях, существенно превышающих скорости переноса импульса, тепла и примеси за счет молекулярного хаоса. В общем случае из-за различия количественных значений параметров  $\nu$ ,  $\chi$  и  $\chi_1$  поле примеси может не совпадать с полями скорости и температуры. В частности, снимок на фиг. 4, а относится к такому моменту времени, когда упорядоченное движение прекратилось. В пределах размера снимка температура в горизонтальных направлениях также постоянна. Параметр  $\chi_1$  значительно меньше  $\nu$  и  $\chi$ , поэтому на больших временах термин “тонкая структура” применим только к полю примеси. Однако на снимках долго сохраняется информация о тонкой структуре полей плотности и температуры в предшествующие моменты времени, когда частицы красителя отслеживали движение воды. Снимок на фиг. 4, б относится к моменту времени, когда под действием вертикальной компоненты импульса частицы воды еще перемещались с заметной скоростью (порядка 1 мм/с). Тем не менее и в этом случае формируется тонкая структура с преимущественно вертикальной ориентацией слоев.

**Заключение.** Опыты выполнялись при малых значениях  $Re$  и  $\epsilon$ , когда процессы протекают медленно и легко прослеживаются. Такой диапазон параметров представляет самостоятельный интерес для интенсивно развивающейся в настоящее время гидродинамики малых скоростей, в частности для экологии глубоких водоемов типа озера Байкал. Вместе с тем особенностью этих процессов, основанные на законах сохранения массы, импульса и момента импульса, действуют и при больших скоростях, когда роль малых параметров завуалирована силами инерции. Например, при визуализации перехода от ламинарного режима движения к турбулентному [8] и развитого турбулентного течения [9] наблюдается тонкая структура, обусловленная вихревым характером течения. При измерениях термоанемометром это проявляется в так называемой перемежаемости турбулентного и потенциального движения на внешней границе пограничного слоя [6].

При расчетно-теоретическом анализе рассмотренных эффектов необходимо использовать математические модели, в которых учитывается сильное количественное различие параметров  $\nu$ ,  $\chi$ , и  $\chi_1$ , например [10, 11]. В окрестности 4°C необходимо учитывать немонотонность зависимости плотности воды от температуры.

Автор благодарит Е.М. Романова и А.В. Гусева за помощь при проведении опытов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционных программ № 3.13.1 РАН и СО РАН и “Гидродинамика вод Байкала” СО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holland P. R., Kay A. A. Review of the physics and ecological implications of the thermal bar circulation // *Limnologica*. 2003. V. 33. № 3. P. 153–162.
2. Букреев В. И. Гидродинамическая неустойчивость, обусловленная аномальной зависимостью плотности воды от температуры // Докл. РАН. 2004. Т. 396. № 6. С. 770–772.
3. Федоров К.Н. Тонкая структура гидрофизических полей в океане. В кн.: Океанология. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. М.: Наука, 1978. С. 113–147.
4. Левицкий В.В., Чашечкин Ю.Д. Термоконцентрационная конвекция при однородном боковом нагреве // Изв. АН. МЖГ. 1995. № 5. С. 112–124.
5. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
6. Хинце И.О. Турбулентность. Ее механизм и теория. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. 680 с.



7. *Elder J.W.* The unstable thermal interface // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 32. Pt 1. P. 69–96.
8. *Букреев В. И.* Экспериментальное изучение диапазона применимости решения второй задачи Стокса // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1988. № 4. С. 26–31.
9. *Fiedler H., Head M. R.* Intermittency measurements in the turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* 1966. V. 25. Pt 4. P. 719–735.
10. *Каменкович В. М., Монин А. С.* Основные положения термогидромеханики океана // *Океанология. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. М.: Наука, 1978. С. 85–112.*
11. *Кистович А. В., Чашечкин Ю. Д.* Групповой анализ частично симметризованной формы системы уравнений термоконцентрационной конвекции // *ПМТФ.* 1996. Т. 37. № 2. С. 14–26.

Новосибирск

Поступила в редакцию  
8.VI.2004