

УДК 532.529.2

© 2005 г. В. В. ЛЕВИЦКИЙ, Ю. Д. ЧАШЕЧКИН

## СТРУКТУРА БОКОВОЙ ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ В РЕЖИМЕ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПАДА

Оптическими и зондовыми методами исследована трансформация структур полей плотности, оптического показателя преломления, температуры и солёности в режимах формирования и распада конвективных течений при равномерном боковом охлаждении непрерывно стратифицированной жидкости. Хотя высота отдельных ячеек практически постоянна в различных фазах процесса, картины полей претерпевают значительные изменения. В фазе формирования вклады вариаций температуры и солёности в распределение плотности компенсируют взаимное влияние, профиль плотности является гладким, а профиль оптического показателя преломления – ступенчатым. В фазе разрушения профиль плотности также становится ступенчатым. На больших временах на внешних границах ячеек формируется новое конвективное течение за счет разности температур охлажденной внутренней и более теплой внешней (невозмущенной) жидкости, поддерживающее контрастность структуры при вырождении движения.

*Ключевые слова:* стратифицированная жидкость, многокомпонентная конвекция, теневые методы, формирование и распад структуры, профили температуры, солёности и плотности.

Изучению влияния стратификации на структуру и динамику установления конвективных течений посвящено большое число экспериментальных аналитических и численных исследований, результаты которых обобщены в [1, 2]. При подогреве однородной жидкости образуется конвективная струя, режим течения в которой зависит от величины перегрева и высоты, которая растет неограниченно. В температурно-стратифицированной среде формируется грибообразный факел, высота которого определяется условием баланса сил плавучести между нагретой струей и окружающей жидкостью. В стратифицированной по солёности жидкости, при термоконцентрационной конвекции образуется система конвективных ячеек, разделенных высокоградиентными прослойками. Высота ячеек  $h$  определяется из условия равенства компонент сил плавучести, вызванных нагревом жидкости, и изменением солёности  $h = k_a \alpha \Delta T \Lambda$ . Здесь  $\Lambda = |d \ln \rho(z)/dz|^{-1}$  – масштаб плавучести, характеризующий невозмущенную солевую стратификацию,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения,  $\Delta T$  – характерная разность температур,  $k_a$  – коэффициент адиабатичности. Его величина меняется от 0.2 до 0.9 в широком диапазоне изменчивости стратификации  $\Lambda$  и перегрева  $\Delta T$  [3]<sup>1</sup>.

Как ячейки, так и диссипативно-гравитационные волны, образующиеся при формировании ячеек [4], наблюдаются экспериментально [5] и рассчитываются методами прямого численного решения системы определяющих уравнений при умеренных значениях числа Рэлея  $Ra = g \alpha \Delta T h^3 / (\nu \chi) < 10^6$ , где  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\nu$ ,  $\chi$  – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности [6].

Большинство экспериментальных работ посвящено анализу механизма формирования структур при термоконцентрационной конвекции [1, 2, 4, 5]. Практический интерес представляет исследование процесса деградации структур, развивающегося в ес-

<sup>1</sup> См. также: Грязнов В.Л. Численное моделирование процесса образования ячейистой структуры при нагревании стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 5. С. 191 (Семинары ИПМ АН СССР).

тественных условиях (в океане и атмосфере) и в технологических аппаратах при прекращении нагрева. Цель данной работы – изучение полного цикла эволюции конвективных структур при боковом охлаждении стратифицированной жидкости и поиск признаков, отличающих формирующиеся структуры от деградирующих.

**1. Основные параметры задачи.** Рассматривается динамика устойчиво стратифицированной несжимаемой жидкости, плотность которой  $\rho(T, S)$  зависит от температуры  $T$  и концентрации растворенного вещества  $S$ .

Невозмущенная среда изотермична, распределение плотности  $\rho(S(z))$  задается профилем солёности и характеризуется масштабом  $\Lambda$ , частотой  $N = \sqrt{g/\Lambda}$  или периодом  $T_b = 2\pi/N$  плавучести. Значения входящих в уравнение состояния коэффициентов теплового расширения  $\alpha$  и солевого сжатия  $\beta$ , а также кинетических коэффициентов – кинематической вязкости  $\nu$ , температуропроводности  $\chi$  и коэффициента диффузии стратифицирующей компоненты  $\kappa$ , водного раствора поваренной соли, использующегося в экспериментах, приведены в [8]. Температурные условия определяются величиной охлаждения боковой поверхности  $\Delta T$ .

Определяющие безразмерные параметры задачи – числа Рэлея: тепловое  $Ra_t = g\alpha\Delta T h^3/\nu\chi$  и солевое  $Ra_s = g\beta(-dS/dz)h^4/\nu\chi = gh^4/\nu\chi\Lambda$ , где  $h$  – экспериментально определяемая высота конвективной ячейки, а также чисел Прандтля  $Pr = \nu/\chi$  и Шмидта  $Sc = \nu/\kappa$ .

Многообразие параметров отражает сложную природу явления, в котором представлены крупномасштабные структурные элементы (протяженные ячейки, нестационарные и диссипативно-гравитационные волны с вертикальным масштабом  $h$ ), семейства пограничных слоев на ограничивающих поверхностях, тонкие высокоградиентные прослойки и солевые пальцы внутри ячеек [5].

Тонкоструктурные элементы в поле скорости характеризуются двумя линейными масштабами – толщинами скоростного пограничного слоя Прандтля  $\delta_u = \nu/U$  и внутреннего пограничного слоя  $\delta_N = \sqrt{\nu/N}$ . В аналогичные выражения для температурного и концентрационного пограничных слоев входят соответствующие кинетические коэффициенты (температуропроводности  $\chi$  и диффузии соли  $\kappa_s$ ).

Методика эксперимента разрабатывалась с учетом выполнения условия визуализации микро- и макроструктурных элементов нестационарного течения оптически и контактными методами, регистрирующими различные физические параметры.

**2. Экспериментальная установка.** Опыты выполнены в бассейне размерами  $220 \times 40 \times 60$  см<sup>3</sup> с боковыми иллюминаторами для наблюдения картин течения в вертикальной плоскости. Для создания стратификации бассейн заполнялся снизу водным раствором поваренной соли переменной концентрации методом непрерывного вытеснения. Равномерное боковое охлаждение осуществлялось теплообменником. В центре бассейна вертикально размещался плоский короб размером  $40 \times 60 \times 1.5$  см<sup>3</sup>, в который из ультракриостата МК-70 непрерывно поступал хладагент с температурой в начале опытов  $T = -1^\circ\text{C}$ .

Температура и электропроводность жидкости измерялись совмещенным контактным датчиком, состоящим из микротермистора МТ-54 и “одноэлектродного” датчика удельной электропроводности. Чувствительный элемент последнего представлял собой торец коаксиальной электролитической ячейки. Центральным электродом ячейки служила стеклянная оболочка термистора, на которую напылен слой платины, внешним электродом – никелевый капилляр диаметром 2 мм.

Перед началом опытов датчики тарировались с помощью термостата и солемера ГМ-65, погрешность измерения температуры и эквивалентной электропроводности не превышала  $0.05^\circ\text{C}$ . Данные тарировок и измерений вводились в ЭВМ и использовались для построения профилей температуры и удельной электропроводности и расчета профилей солёности и условной плотности по эмпирическим уравнениям состояния, составленным на основе таблиц [7], в режиме реального времени.

Бассейн оборудован механизмом перемещения датчиков для измерения вертикальных распределений (профилей) различных параметров. Скорость погружения или подъема датчиков составляла 0.12 см/с, что позволяло разрешать структуры с масштабами 0.1 см (постоянная времени датчика 0.7 с). Профили при подъеме и погружении совпадали в пределах точности опытов.

Визуализация картины течений в вертикальной плоскости проводилась теневым прибором ИАБ-458 методом “вертикальная щель – нить в фокусе”, вариации освещенности пропорциональны горизонтальной компоненте градиента показателя преломления.

После заполнения бассейна непрерывно стратифицированной жидкостью он выдерживался в течение суток для сглаживания возникших плотностных неоднородностей. Затем оптическими методами контролировалась однородность градиента плотности и с помощью датчика электропроводности определялся период собственных осцилляций, возбуждаемых следом позади тонущего кристалла соли. В опытах период плавучести составлял  $T_b = 9.4$  с ( $\Lambda = 22$  м).

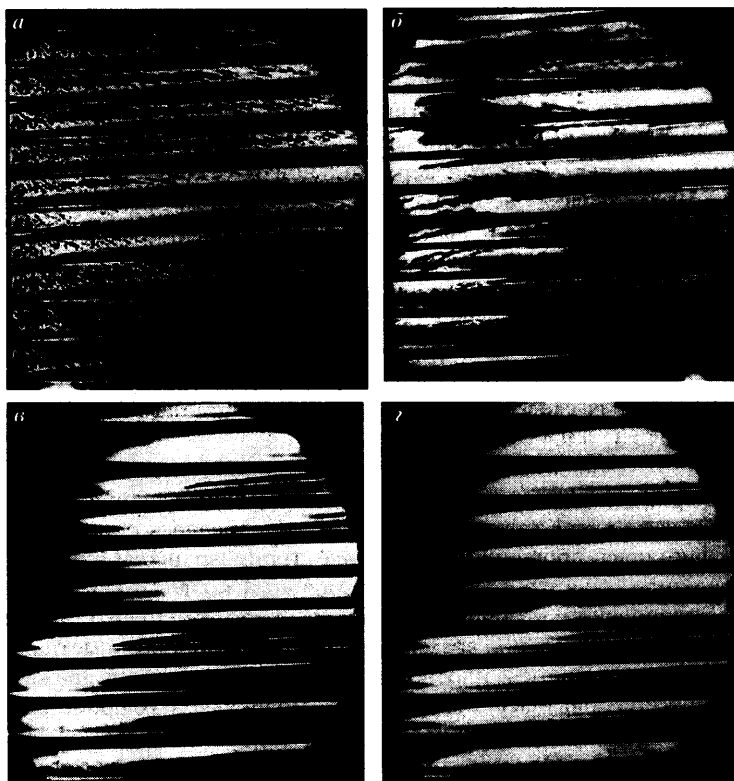
При включении холодильника под действием термоконцентрационной конвекции исходный гладкий профиль плотности разбивался на отдельные ячейки, высота которых в среднем составляла 1.9 см. Картина течения регистрировалась с интервалом 30 мин и одновременно снимались профили удельной электропроводности и температуры. После выключения холодильника и затухания первичных конвективных течений и одновременного формирования вторичных течений около теплового фронта ячейчатая структура сохранялась длительное время. При этом происходила заметная деформация полей температуры, солёности и плотности. С вырождением всех движений ячейчатая структура медленно размывалась под действием молекулярных процессов. Опыт прекращался спустя 6 ч от его начала.

**3. Основные результаты.** Последовательность фотограмм картины течения представлена на фиг. 1. При однородном боковом охлаждении жидкости, как и при нагреве [5], формировалась система конвективных ячеек, разделенных высокоградиентными прослойками. Различие в структурах при нагреве и охлаждении обусловлено знаком сил плавучести, определяющих наклон границ (восходящих у нагревателя и погружающихся внутрь невозмущенной жидкости при боковом нагреве и, наоборот, погружающихся у холодильника и всплывающих с нагревом при удалении, что согласуется с [3]).

В данных опытах стабилизация картины конвективного течения происходила в течение 60 мин после запуска холодильника. При этом конвективные ячейки выравнивались по высоте, их границы становились четкими на всем протяжении, число и положение ячеек практически не изменялись, не происходило их слияния и разделения. Картина установившегося течения приведена на фиг. 1, а. Наклон границ ячеек к горизонту составлял около  $3^\circ$ . Возле нижних границ некоторых ячеек наблюдались дополнительные поверхности раздела, угол наклона которых к горизонту нарастал с удалением от холодильника. Внутри ячеек наблюдались тонкие нитевидные структуры – солевые пальцы, наклон которых отражал направление циркуляционного течения.

Через 107 мин после начала эксперимента прекращена подача хладагента. Теневая картина, иллюстрирующая основные особенности процесса распада конвективных течений, представлена на фиг. 1, б (через 28 мин после прекращения охлаждения). Разрушение конвективных структур начиналось с распада солевых пальцев внутри ячеек (их остатки, прорисовывающие профиль течений, сохранились только в двух нижних ячейках, примыкающих к нижней части теплообменника, где аккумулировался холодный теплоноситель). Границы ячеек утолщались и выполаживались. Внутри ячеек вблизи втекающую теплую жидкость и отходящую холодную с остатками солевых пальцев.

С увеличением времени все тонкоструктурные элементы исчезали, клин холодной жидкости в каждой из ячеек все дальше удалялся от холодильника. Невозму-



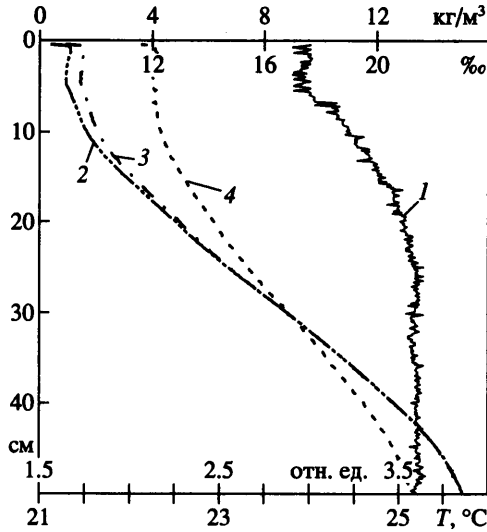
Фиг. 1. Теневые изображения картины боковой термоконцентрационной конвекции в фазе стабилизации ( $a - t = 62$  мин) и распада структур после выключения охлаждения ( $b - z: t = 135; 356; 435$  мин,  $T_b = 9.2$  C)

ценная жидкость в бассейне, находящаяся в тепловом равновесии с окружающей средой, играла роль источника тепла по отношению к структурированной области возле холодильника. Сохраняющиеся горизонтальные градиенты температуры поддерживали конвективный теплообмен между охлажденной жидкостью в ячейках и невозмущенной средой.

В последующем (фиг. 1,  $b$ ) продолжалось постепенное сглаживание высокоградиентных прослоек, формирующих ячеистую структуру течения. Однако высокоградиентные границы между ячейками и наклонные прослойки внутри них визуализировались даже через 6 ч после начала эксперимента и соответственно через 4 ч после прекращения подачи хладагента.

Границы между ячейками толщиной около 3 мм видны не только в теневой прибор, но и на просвет невооруженным глазом (скорость диффузии в солевом растворе 0.5 мм/ч, однако размытие границ ячеек не происходило). В данной серии опытов границы ячеек выделялись спустя пять часов тридцать минут после выключения холодильника (фиг. 1,  $z$ ).

Данные оптической визуализации горизонтальной компоненты градиента показателя преломления дополнялись картинками полей температуры, удельной электропроводности, солёности и условной плотности, построенных по результатам измерений вертикальных распределений температуры и удельной электропроводности.



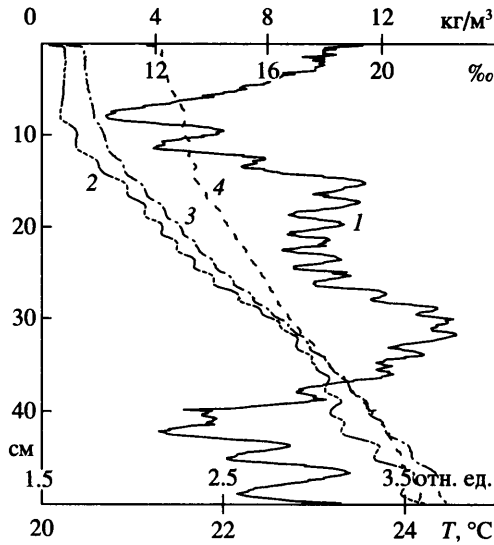
Фиг. 2. Распределения температуры (кривая 1), удельной электропроводности (2), солености (3) и условной плотности (4) в бассейне перед началом опытов

Распределения физических параметров перед началом опытов по глубине, отсчитываемой от поверхности жидкости, представлены на фиг. 2. В профиле температуры выделялась холодная приповерхностная пленка, вызванная испарительным охлаждением жидкости в бассейне. Далее температура плавно возрастала с глубиной от 24 в приповерхностном слое до  $25.2^{\circ}\text{C}$  в центре и сохраняла постоянное значение в нижней части бассейна. Вследствие малой изменчивости температуры распределение условной плотности ( $\sigma = (\rho - 1) \times 10^3 \text{ г/см}^3$ ) определялось соленостью, т.е. в данном случае характеризовалось удельной электропроводностью, и графики этих величин повторяли друг друга. Свидетельство однородности исходного градиента плотности – равномерность освещенности теневой картины по всему полю зрения.

Через час после включения холодильника формировались профили, типичные для развитой термоконцентрационной конвекции (фиг. 3). В них выражены периодические вариации температуры по глубине с размахом от  $0.5$  до  $1^{\circ}\text{C}$ , воспроизводящие ячеистую структуру конвективного течения, представленного на фиг. 1, а. Свидетельством крупномасштабной циркуляции являлось общее понижение температуры в верхней и нижней частях бассейна.

В профилях удельной электропроводности и солености ярко выражены ступеньки, отражающие усиление градиента солености на границах ячеек.

На границах ячеек в областях повышенного значения градиента солености в зонах контакта подтекающей теплой и вышележащей оттекающей холодной жидкости наблюдались прослойки с отрицательным градиентом температуры, усиливающие крутизну ступенек в профиле удельной электропроводности. Плотность при этом плавно увеличивалась с глубиной, в приводимом профиле условной плотности практически не наблюдалось усиления градиентов на границах ячеек. Взаимная компенсация вкладов вариаций солености и температуры в распределение плотности – весьма важное предположение, широко используемое при теоретическом и численном анализе боковой термоконцентрационной конвекции в фазе формирования структур [1, 2].



Фиг. 3. То же, что на фиг. 2, спустя  $t = 60$  мин после начала охлаждения

Для интерпретации результатов измерений использовалось уравнение состояния для условной плотности раствора NaCl, полученное интерполяцией табулированных зависимостей [7] методом наименьших квадратов

$$\sigma = -1.748 - 0.2054T_r - 4.64 \cdot 10^{-3}T_r^2 + 0.7071S - 1.85 \cdot 10^{-3}T_rS + 3.5 \cdot 10^{-5}T_r^2S + 1.64 \cdot 10^{-4}S^2 \text{ кг/м}^3$$

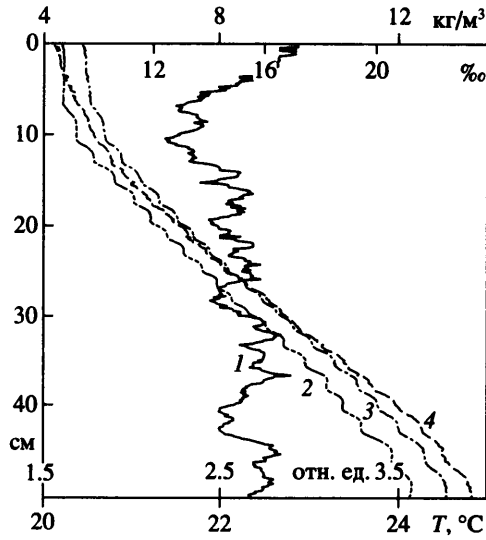
где  $T_r = (T - 20)^\circ\text{C}$ . Из уравнения следует, что увеличение солёности на одно промилле может быть скомпенсировано повышением температуры на  $3.36^\circ\text{C}$ , что приблизительно выполнялось в данной фазе течения.

Зависимость показателя преломления от солёности и температуры в окрестности  $0^\circ\text{C}$ , также рассчитанная на основании таблиц [7], имеет несколько другой вид

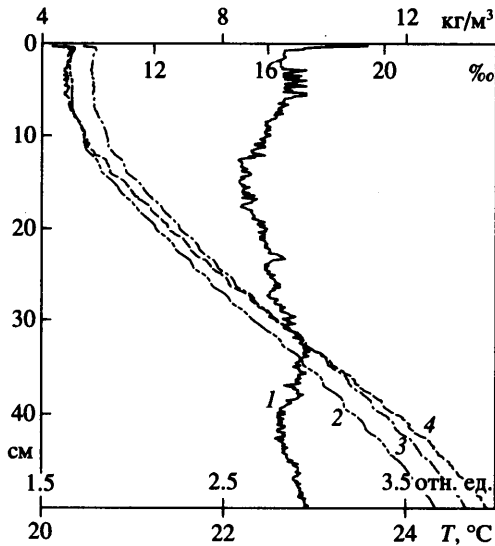
$$n = 1.335 - 8.211 \cdot 10^{-5}T + 1.899 \cdot 10^{-4}S - 8.618 \cdot 10^{-7}TS - 1.788 \cdot 10^{-8}S^2 + 1.993 \cdot 10^{-9}TS^2$$

Из приведенных выражений следует, что вариации температуры и солёности не обеспечивают компенсации их взаимного влияния на распределение показателя преломления, что объясняет контрастность оптической картины течения (фиг. 1, а) на фоне гладкого распределения плотности (фиг. 3) в фазе формирования структуры. Этим процесс многокомпонентной конвекции отличается от внутренних волн и других изотермических процессов, в которых выполняется условие подобия профилей плотности и показателя оптического преломления [8].

Распад конвективных структур, наступавший после прекращения подачи хладагента, приводил к заметному изменению распределений всех физических параметров среды. Через 28 мин после выключения холодильника размах пространственных осцилляций в профиле температуры уменьшился с  $0.5-1^\circ\text{C}$  до  $0.3-0.5^\circ\text{C}$  (фиг. 4). Весь диапазон изменчивости температуры также стал более узким за счет выравнивания температуры по глубине бассейна. В профиле удельной электропроводности ступень-



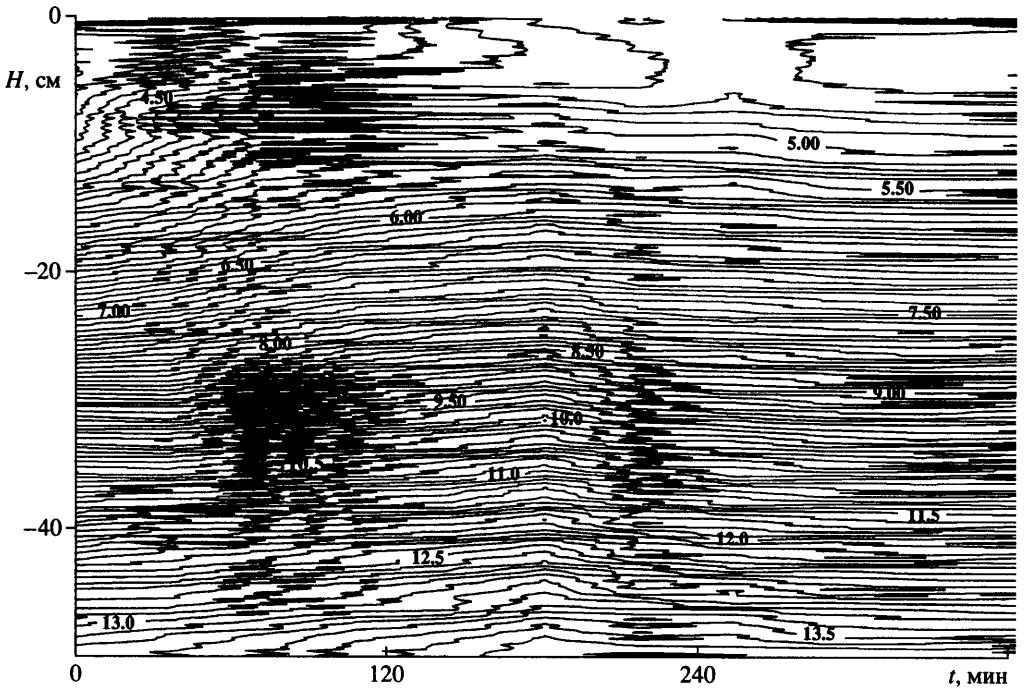
Фиг. 4. То же, что на фиг. 2, спустя  $t = 28$  мин после выключения холодильника



Фиг. 5. То же, что на фиг. 2, спустя  $t = 4$  ч 9 мин после выключения холодильника

ки выражены заметно, однако величины максимальных градиентов также уменьшились вследствие убывания вариаций температуры. В то же время ступеньки в профиле плотности стали более контрастными вследствие снижения вклада компенсирующего влияния температуры.

Через 4 ч после выключения холодильника (профили, соответствующие по времени теневой картине на фиг. 2, б, приведены на фиг. 5) распределение температуры сгладилось и стало практически однородным (в сравнении с фиг. 4). Размах отдельных флуктуаций (которые с большой натяжкой можно идентифицировать как ячейки) не превышал  $0.15^{\circ}\text{C}$  в общем диапазоне изменения температуры  $0.7^{\circ}\text{C}$ . Про-



Фиг. 6. Временная эволюция профиля плотности (по вертикали – глубина в см, по горизонтали – время  $t$  в мин, показано положение изолиний условной плотности, значения которой приведены в поле рисунка)

фили удельной электропроводности, солёности и условной плотности практически повторяли друг друга. Ступеньки в них, хотя и сгладились, остаются хорошо выраженными. Однородные слои на них стали более узкими, вертикальные градиенты – более пологими, однако характер распределений позволяет идентифицировать конвективные ячейки, отчетливо выделенные и на теневых изображениях.

Поскольку в физической океанологии широко используются пространственно-временные карты различных физических величин [9], на фиг. 6 представлены результаты расчетов условной плотности. Построенное для удобства анализа цветное изображение здесь приведено в черно-белом варианте.

Наиболее выраженные возмущения на карте изолинии появляются сразу же после начала охлаждения на горизонтах подвода и отбора хладагента. В остальных областях изолинии смещаются довольно равномерно, их сгущения практически не выделяются, несмотря на выраженную структуризацию течения (фиг. 1, а, б). Слабость вариаций градиента плотности указывает на взаимную компенсацию вкладов вариаций солёности и температуры и поддержания распределения плотности во всей области конвективного течения. Предположение о сохранении распределения плотности в фазе формирования ячеек при численном моделировании термоконцентрационной конвекции [1, 2] подтверждается результатами данных опытов.

После выключения холодильника начался распад конвективных структур, разность температур в ячейках уменьшилась до  $0.2^\circ\text{C}$ . На карте изолинии (фиг. 6) на границах ячеек наблюдается сгущение изолиний, отражающее усиление градиента плотности, и внутри ячеек – разрежение. Вклады в плотность от вариаций температуры и солёности перестают компенсировать друг друга, поскольку вследствие бо-



ле быстрого рассеяния тепла происходит ослабление температурных градиентов при сохранении концентрационных.

Одновременно различие средней температуры в охлажденной жидкости области ячейстой конвекции и невозмущенной среды формирует медленные адвективные течения, компенсирующие диффузионное размывание границ (скорость диффузии соли составляет 1см/день). Толщины прослоек за все время эксперимента практически не меняются. Области сгущений и разрежений изолиний плотности прослеживаются спустя 4 ч после выключения холодильника.

**Заключение.** Формирующаяся при включении холодильника (или нагревателя) конвективная структура образует ступенчатое поле солёности с высокими градиентами на границах и более однородным распределением внутри ячеек. Поле температуры имеет почти синусоидальную структуру с периодом, равным высоте ячейки. Поле плотности, определяемое как солёностью, так и температурой, остается гладким вследствие компенсации вкладов температурной и солевой компоненты, его структура не соответствует контрастности теневой картины. Указанная особенность отражает различие в видах уравнений состояния для плотности и оптического показателя преломления для раствора поваренной соли.

При выключении источника тепла температура выравнивается довольно быстро (в течение часа), и профиль плотности, определяемый теперь только солёностью, также становится ступенчатым уже после прекращения действия холодильника, что, на первый взгляд, выглядит парадоксально. Ступеньки солёности существуют довольно долгое время после выключения источника тепла. Их распад длится несколько часов, и столько же сохраняется ступенчатый профиль плотности. Различие степени контрастности профилей температуры и плотности позволяет отличать формирующиеся структуры от распадающихся по однократным зондированиям в натуральных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской академии наук (Межсекционная программа ОЭМПУ РАН ОЭ-15 "Динамика и акустика неоднородных жидкостей, газожидкостных смесей и суспензий"), РФФИ (№ 02-05-65383, 05-05-64090).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 432 с.
2. Ruddick B. Laboratory studies of interleaving // Progr. Oceanogr. 2003. V. 56. № 3–4. P. 529–547.
3. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Групповой анализ частично симметризованной формы системы уравнений свободной термоконцентрационной конвекции // ПМТФ. 1996. Т. 37. № 2. С. 14–26.
4. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Диссипативно-гравитационные волны в докритических режимах многокомпонентной конвекции // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 4. С. 513–519.
5. Левицкий В.В., Чашечкин Ю.Д. Термоконцентрационная конвекция при однородном боковом нагреве // Изв. РАН. МЖГ. 1995. № 5. С. 112–124.
6. Sabbah C., Pasquetti R., Peyret R., Levitsky V., Chashechkin Y.D. Numerical and laboratory experiments of sidewall heating thermohaline convection // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2001. V. 44. № 14. P. 2681–2697.
7. Kaufmann D.W. Sodium Chloride. N.Y.: Reinhold, 1960. 743 p.
8. Mowbray D. E. The use of schlieren and shadowgraph techniques in the study of flow patterns in density stratified liquids // J. Fluid Mech. 1967. V. 27. P. 595–608.
9. Морозов Е.Г. Океанские внутренние волны. М.: Наука, 1985. 151 с.

Москва

Поступила в редакцию  
2.И.2005