



О форме плотностной неустойчивости приповерхностной конвекции¹

Куприянова А.Е.^{*,**}, Гриценко В.А.^{**}

^{*}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

^{**}Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Введение

Как известно [1], возникающий при охлаждении воды с поверхности термический пограничный слой (до 5–8 мм при свободной конвекции), определяется молекулярными механизмами перемешивания. Возникновение гидростатически неустойчивого распределения плотности в этом слое является предпосылкой к развитию конвекции [2]. На нижней границе этого пограничного слоя случайным образом (по времени и пространству) происходит зарождение ансамбля отдельных конвективных элементов (термик), осуществляющих транспорт более холодных вод с поверхности в глубину.

Целью данной работы стало исследование процесса возникновения и погружения плотностного фронта совокупности термик в однородной среде на основе данных лабораторных экспериментов и модельных расчетов.

¹Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00150 (<https://rscf.ru/project/23-27-00150/>).

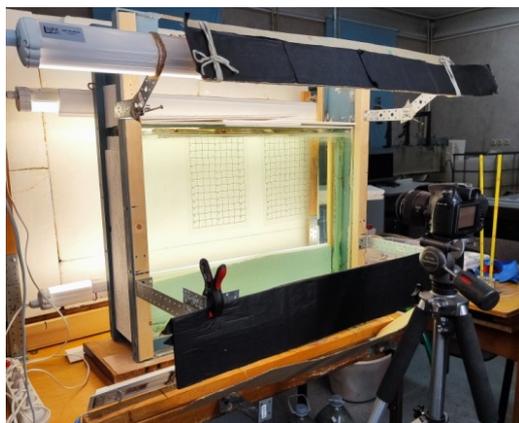
Материалы и методы

Лабораторные эксперименты были проведены в гидрлотке ЛФМ (АО ИО РАН, г. Калининград) (см. Рис. 1 (а)). Перед началом эксперимента рабочее пространство лотка (800 × 590 × 125 мм) заполнялось пресной водой (~ 14°C), на поверхности которой размещалось входное устройство типа «окно» (Рис. 1 (б)).

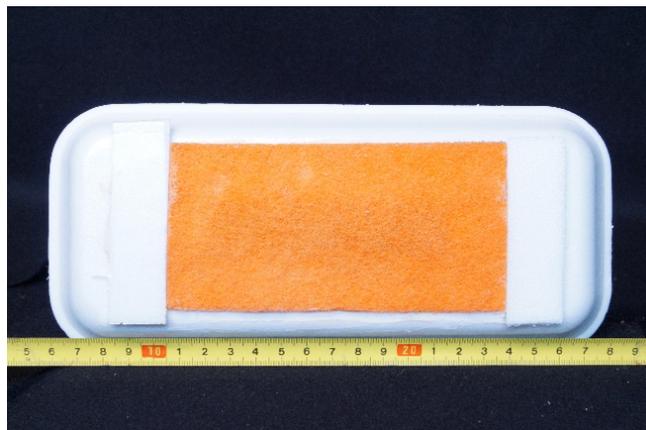
Конструкция устройства включала в себя пенополистирольный лоток, в дне которого прорезалась отверстие (900 × 20 мм), закрывавшееся снизу абразивной губкой (толщина 4–5 мм). Нижняя поверхность губки располагалась под поверхностью воды на 7–8 мм. На поверхность губки капельным образом сверху подавался малый объем (5 мл) подготовленного солевого раствора (18°C, NaCl, 10⁻⁴ г/см³). Видеозапись погружения термик в пресной воде выполнялась при помощи видеокамеры Vaumer (10 Гц), а также камеры Sony-58Alpha (~ 2 Гц). Более детально входное устройство и методика проведения эксперимента описана в статье авторов [3].

Лабораторные эксперименты

В описываемом исследовании возникновения и погружения термик было выполнено 13 экспериментов (7 серий от 1 до 3 запусков) с перепадами



(а)



(б)

Рис. 1. Общий вид гидрлотка ЛФМ (а), заполненного пресной водой и снабженного системой светодиодных ламп. Конструкция входного устройства типа «окно»: вид снизу (б)

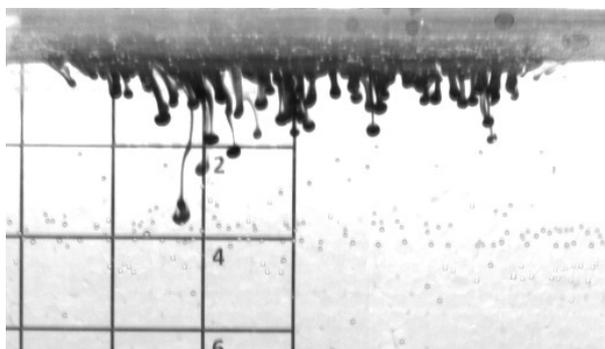
плотности между пресной водой и солевым раствором $\Delta\rho = 10^{-4} \text{ г/см}^3$. В ходе выполнения экспериментов (Рис. 2) наблюдались различные формы возникновения и типичные трансформации объемов отрицательной плавучести [4], погружающихся в окружении пресной воды.

Наблюдаемая картина динамики ансамбля термиков позволила выделить несколько этапов их погружения. На начальном этапе запуска солевого раствора в устройство под поверхностью губки, из-за перепада температуры между раствором и окружающей водой, формировалось «облако» на всем протяжении отверстия «окна». Благодаря начальной разности температуры, «облако» на некоторое время (до 5 секунд) «зависало» под поверхностью устройства. Как только раствор в слое остывал, на нижней границе «облака» формировались малые выпуклости («капли»), возникающие из-за плотностной неустойчивости в этом слое.

Получение оценок вертикальной скорости погружения для плотностного фронта ансамбля термиков проводилось с помощью пакета обработки изображений ImageJ. Прямые эмпирические оценки показали: средняя скорость погружения плотностного фронта составляет около 0.3 мм/с, минимальная и максимальная скорости были 0.1 мм/с и 0.5 мм/с, соответственно. Предварительный анализ количественных характеристик скорости погружения фронта для наблюдаемого течения показал, что изменение вертикальной скорости погружения плотностного фронта изменяется по линейному закону.

Модельные расчеты

Численные эксперименты проводились на нелинейной 2d-модели динамики неоднородной по плотности жидкости, включавшей в себя тради-



(а)



(б)

Рис. 2. Примеры наблюдаемых в лотке движений: отрыв ансамбля объемов от нижней границы входного устройства на фотографии камеры Vaio (а), на фотографии – Sony (б). Отчетливо заметна грибовидная форма погружающихся объемов отрицательной плавучести ($\Delta\rho = 10^{-4} \text{ г/см}^3$)

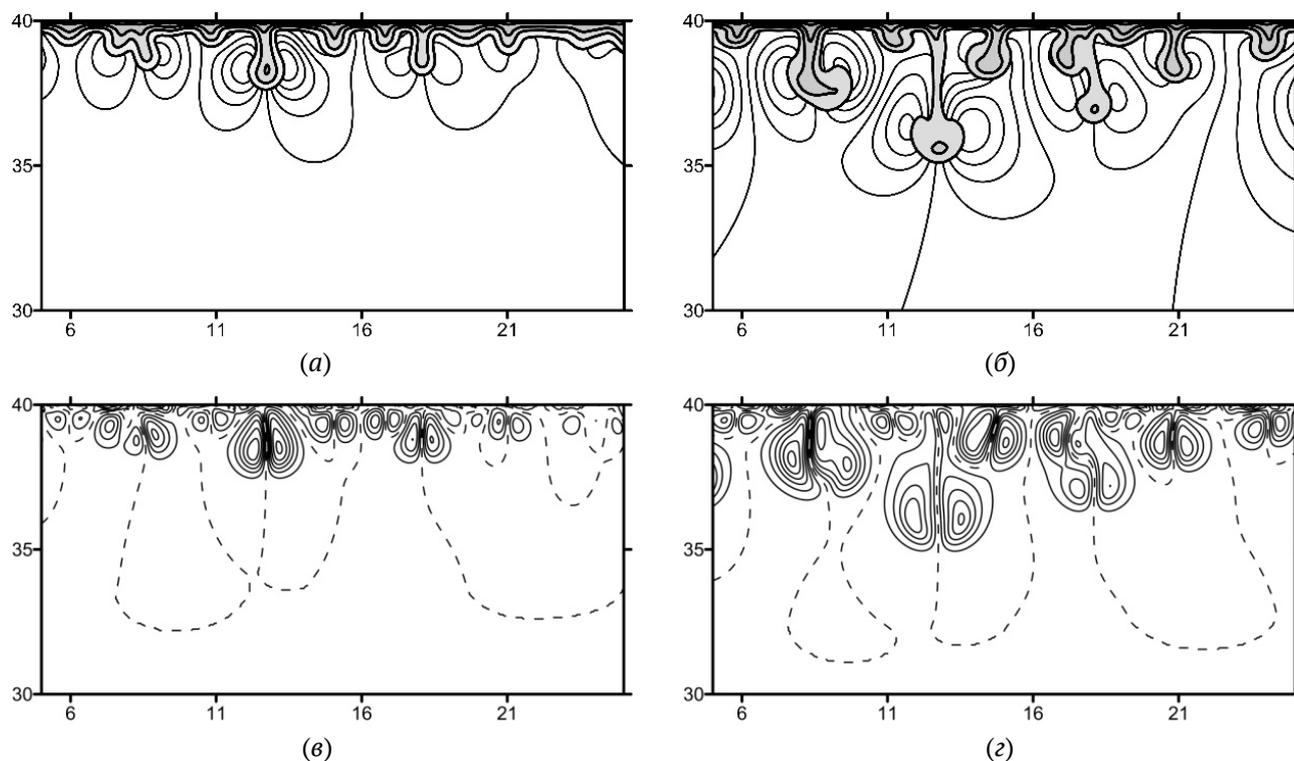


Рис. 3. Распределения плотности, функции тока (а), (б) и завихренности (в), (г) для двух последовательных фаз эволюции ансамбля термиков. Характерные масштабы расчетного течения: $h_0 = 0.5$ см, $\Delta\rho_0 = 0.0001$ г/см³, $u_0 \sim 0.6$ см/с. Изолинии плотности проведены в диапазоне $\Sigma = \sigma/\Delta\rho_0 = [0.1, 0.85, 0.25]$, функции тока $\psi \in [-0.1, 0.1, 0.02]$, и изолиний завихренности $\omega = [-0.4, 0.4, 0.15]$

ционные уравнения переноса завихренности и массы, а также трассеров для идентификации объемов воды [3]. Расчеты проводились на сетках 601×801 , $\Delta x = \Delta z = 0.05$. Малые скорости заглубления термиков позволили предполагать ламинарный характер течений. Характерные масштабы течений были выбраны исходя из экспериментально полученных оценок толщины термического пограничного слоя ($h = 0.5$ см) и скорости погружения отдельных термиков ($u = 0.7$ см/с). Процесс выхолаживания воды с поверхности имитировался случайными аддитивными добавками плотности в 5–6 знаке текущего значения плотности для каждого из узлов верхних пяти слоев расчетной сетки.

На Рис. 3 приведены две фазы развития приповерхностной конвекции, на которых хорошо видна динамика погружения отдельных термиков и их фронта.

Сравнение с лабораторными экспериментами (Рис. 2 и 3) показало, что модель качественно верно воспроизводит случайный характер процесса зарождения термиков. Распределения расчетных полей плотности, функции тока и завихренности свидетельствуют о вихревом характере неоднородного по плотности течения.

Результаты

Анализ полученных снимков экспериментов, а также проведенные модельные расчеты показали, что скорость погружения плотностного фронта ансамбля термиков при избыточной плотности 10^{-4} г/см³ может составлять: средняя скорость около 0.3 мм/с, максимальная скорость до 0.5 мм/с. Выполненные эксперименты показали вихревой характер движения термиков с самого их зарождения.

Список литературы

- [1] Гинзбург А.И., Дикарев С.Н., Зацепин А.Г., Федоров К.Н. Феноменологические особенности конвекции в жидкости со свободной поверхностью // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т. 17. № 4. С. 400–407.
- [2] Гинзбург А. И., Федоров К. Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. № 1. С. 79–87.
- [3] Куприянова А.Е., Гриценко В.А. Падение пятен солёной воды на наклонное дно в окружении пресной: динамика и структурные особенности распространения плотностного фронта вверх по склону. // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. № 2. С. 106–124. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).5.
- [4] Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М.: Мир, 1977. 431 с.