



[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-6)

EDN RKWJVA

УДК 551.465

© В. В. Герасимов*, А. Г. Зацепин, 2025

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

*gerasimov.vv@ocean.ru

О расслоении линейно стратифицированной жидкости под влиянием однородного по вертикали перемешивания (лабораторный эксперимент)

Статья поступила в редакцию 10.04.2025, после доработки 15.07.2025, принята в печать 03.09.2025

Аннотация

Выполнена серия опытов по перемешиванию водного слоя с изначально постоянным вертикальным градиентом солености (плотности) колеблющимися вертикальными стержнями, создающими однородное турбулентное воздействие по всей толщине водного слоя. В результате перемешивания в большинстве опытов происходило образование ступенчатой структуры, в виде последовательности квазиоднородных слоев, разделенных высоко градиентными прослойками. Ступенчатая структура в поле плотности наблюдалась с помощью теневого прибора (шлирен-метод). В некоторых опытах ступенчатая структура не образовывалась, и стратификация, несмотря на перемешивание, характеризовалась постоянным вертикальным градиентом плотности. В каждом опыте с расслоением производились измерения толщин квазиоднородных слоев. Установлена автомодельная зависимость безразмерной толщины слоя от числа Ричардсона. В размерном виде эта зависимость свидетельствует о том, что толщина квазиоднородного слоя пропорциональна произведению амплитуды колебания стержней на отношение кинетической энергии турбулентного воздействия к потенциальной энергии стратификации. Представлена диаграмма, позволяющая судить о закономерности образования слоев при различных значениях чисел Рейнольдса и Ричардсона. Проведенные опыты показали, что не только дифференциально-диффузионная конвекция, но и продолжительное механическое перемешивание при определенных условиях может приводить к ступенчатому расслоению устойчиво стратифицированной водной среды.

Ключевые слова: водный слой, линейная плотностная (соленостная) стратификация, однородное по вертикали турбулентное воздействие, условия формирования ступенчатой тонкой структуры, толщина квазиоднородных слоев

© V. V. Gerasimov*, A. G. Zatsepin, 2025

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia

*gerasimov.vv@ocean.ru

On the Stratification of a Linearly Stratified Liquid under the Influence of Uniform Vertical Mixing (Laboratory Experiment)

Received 10.04.2025, Revised 15.07.2025, Accepted 03.09.2025

Abstract

A series of experiments were carried out on mixing a water layer with an initially constant vertical salinity (density) gradient using oscillating vertical rods, creating a uniform turbulent effect throughout the entire thickness of the water layer. As a result of mixing, in most experiments a stepwise structure was formed, in the form of a sequence of quasi-homogeneous layers separated by highly gradient interlayers. The stepped structure in the density field was observed using a shadow device (schlieren method).

Ссылка для цитирования: Герасимов В.В., Зацепин А.Г. О расслоении линейно стратифицированной жидкости под влиянием однородного по вертикали перемешивания (лабораторный эксперимент) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025. Т. 18, № 3. С. 77–87. EDN RKWJVA. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-6)

For citation: Gerasimov V.V., Zatsepin A.G. On the Stratification of a Linearly Stratified Liquid under the Influence of Uniform Vertical Mixing (Laboratory Experiment). *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(3):77–87.

[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(3\)-6](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(3)-6)

In some experiments, the stepped structure was not formed, and stratification, despite mixing, was characterized by a constant vertical density gradient. In each experiment with stratification, measurements of the thicknesses of quasi-homogeneous layers were made. A self-similar dependence of the dimensionless layer thickness on the Richardson number was established. In dimensional form, this dependence indicates that the thickness of the quasi-homogeneous layer is proportional to the product of the amplitude of the oscillation of the rods by the ratio of the kinetic energy of the turbulent effect to the potential energy of stratification. A diagram is presented that allows one to judge the regularity of layer formation at different values of Reynolds and Richardson numbers. The experiments conducted have shown that not only differential-diffusion convection, but also prolonged mechanical mixing under certain conditions can lead to stepwise stratification of a stably stratified aqueous medium.

Keywords: water layer, linear density (salinity) stratification, vertically homogeneous turbulent effect, conditions for the formation of a stepped fine structure, thickness of quasi-homogeneous layers

1. Введение

Известно, что пикноклин Мирового океана и его морей, наряду со значительным вертикальным плотностным градиентом, характеризуется наличием тонкой структуры (ТС), выражающейся в чередовании слоев с различными значениями вертикальных градиентов температуры, солёности и других гидрофизических, гидрохимических и биологических параметров. Вертикальный масштаб ТС изменяется в определенных пределах и составляет от одного до нескольких десятков метров, а горизонтальный масштаб превышает его в сто и более раз [1]. ТС подразделяется, как минимум, на два типа: 1) ступенчатая ТС (характеризуется наличием слоев с пониженными вертикальными градиентами параметров, разделенных между собой высокоградиентными прослойками); 2) инверсионная, или интрузионная ТС, (характеризуется наличием слоев с инверсиями температуры и солёности, как правило, при отсутствии инверсий плотности) [2]. Инверсионным называется участок профиля параметра с измененным знаком его градиента, по сравнению со знаком градиента на участке профиля без инверсии. Следует отметить, что ступенчатая структура может образоваться из инверсионной вследствие работы двойной диффузии [3]. Однако можно предположить, что тип перемешивания — дифференциально-диффузионная конвекция или механически генерируемая турбулентность — не должен оказывать решающего влияния на конечный результат — трансформацию изначально «гладкого» профиля плотности в ступенчатую структуру. Действительно, данные лабораторного моделирования показывают, что продолжительное вертикально однородное турбулентное перемешивание при высоких числах Ричардсона (сильная стратификация) трансформирует изначально гладкие вертикальные профили плотности в ступенчатую форму [4–6]. Аналогичные результаты были получены также с помощью математического и численного моделирования [7, 8].

Исследование различных форм тонкой структуры и процессов ее генерации было одним из направлений научной деятельности Вадима Тимофеевича Паки [9–11].

Данная статья является логическим продолжением недавно опубликованной статьи [12], где описаны и проанализированы результаты лабораторного эксперимента, выполненного с целью проверки фундаментального механизма тонкоструктурного расслоения стратифицированной жидкости при ее турбулентном перемешивании. В работе была проведена серия опытов с перемешиванием водной среды с изначально постоянным вертикальным градиентом солёности колеблющимися вертикальными стержнями, создающими однородное турбулентное воздействие по всей толщине водного слоя.

Метод создания турбулентности в данной работе и в более ранних наших работах является оригинальным. В работах других авторов, в близких по постановке лабораторных экспериментах, для генерации турбулентного перемешивания использовалось не периодическое колебание стержней, с изменяемыми, от опыта к опыту, частотой и амплитудой колебания, а периодическое перемещение вертикального стержня сквозь слой жидкости от одной стенки бассейна до другой [4, 5]. Несмотря на различие метода генерации турбулентности, основной результат и в наших экспериментах, и в других, оказался схожим: при определенных условиях изначально «непрерывная» плотностная стратификация преобразовывалась в «ступенчатую».

В описываемой работе, в каждом опыте выполнялись регулярные измерения профилей электропроводности (солёности) и проводились расчеты вертикального потока соли (массы). Оказалось, что при достаточно большом градиенте плотности (солёности) поток массы является убывающей функцией градиента плотности, а это является основным условием формирования тонкой структуры, согласно механизму Филлипса и Посментьера [13, 14]. Результаты опытов подтвердили его реалистичность и реализуемость. Исследовалась также зависимость вертикального масштаба тонкой структуры от параметров стратификации и турбулентного воздействия, но в недостаточной степени для установления репрезентативной закономер-

ности. В настоящей статье данный вопрос исследуется весьма обстоятельно. Кроме этого, изучается область реализации режима расслоения изначально линейно стратифицированной жидкости в зависимости от значений двух определяющих безразмерных параметров: числа Ричардсона (Ri) и числа Рейнольдса (Re).

Описание экспериментальной установки и методики проведения опытов приводится в следующем разделе статьи. Затем следует раздел с описанием полученных результатов. Завершают статью обсуждение и краткие выводы.

2. Материалы и методы — описание экспериментальной установки и методики проведения опытов

Опыты проводились на лабораторной установке, ранее использовавшейся в [12, 15], однако, в новом бассейне с теми же внутренними размерами. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Здесь (1) — прозрачный бассейн с внутренними размерами $36 \times 13,5 \times 25$ см³, выполненный из органического стекла толщиной 1,0 см. Над бассейном, на горизонтально колеблющемся штоке (3), с шагом 3,5 см закреплена система из 6-ти решеток (2), состоящих из вертикальных стеклянных стержней диаметром равным 0,6 см с расстоянием 2,8 см друг относительно друга. Стеклянные стержни погружены в жидкость на 23 см, от поверхности воды и практически до дна бассейна. Горизонтальный шток, на котором закреплены решетки, подсоединен к электродвигателю постоянного тока с эксцентриком (4), который обеспечивает горизонтальные колебания закрепленных на нем решеток с вертикальными стеклянными стержнями. Изменяя напряжение питания на двигателе, можно изменять период T колебаний решеток в диапазоне от 1,3 до 6,7 с. Изменение точки крепления штока на эксцентрик позволяет изменять амплитуду колебаний решетки в диапазоне от 0,5 до 1,8 см.

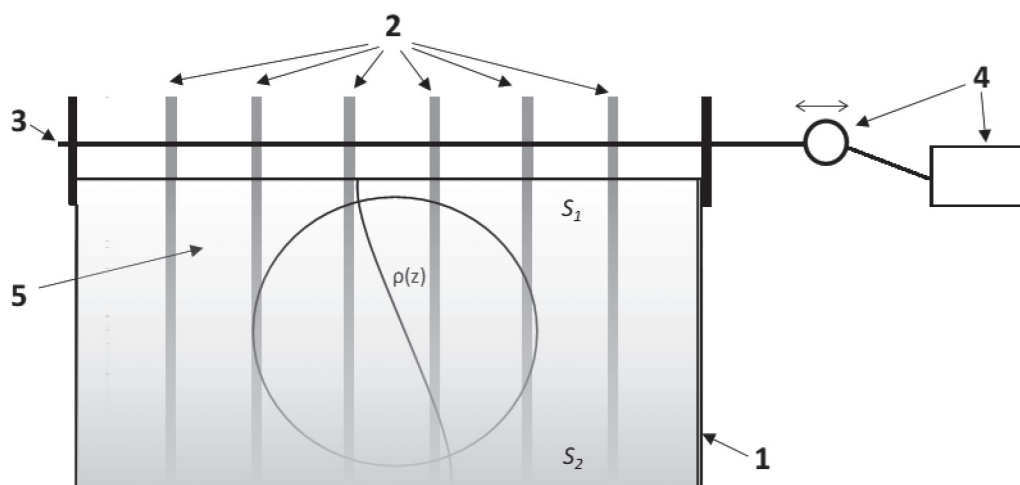


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — прозрачный бассейн с внутренними размерами $36 \times 13,5 \times 25$ см; 2 — решетки с вертикальными стеклянными стержнями; 3 — горизонтальный шток, на котором закреплены решетки со стержнями; 4 — электродвигатель с эксцентриком, обеспечивающий горизонтальные колебательные движения системы решеток; 5 — линейно стратифицированный по солености водный слой. Окружность диаметром 20 см символизирует плоскопараллельный поток света теневого прибора, основанном на шлирен-методе (не показан)

Fig. 1. Scheme of the experimental setup: 1 — transparent pool with internal dimensions of $36 \times 13.5 \times 25$ cm; 2 — gratings with vertical glass rods; 3 — horizontal rod on which gratings with rods are fixed; 4 — electric motor with eccentric providing horizontal oscillatory movements of the grating system; 5 — water layer linearly stratified by salinity. The circle with a diameter of 20 cm symbolizes the plane-parallel light flow of the shadow device based on the schlieren method (not shown)

Для проведения опытов, бассейн заполнялся водным раствором NaCl, линейно стратифицированным по солености с помощью системы из двух сообщающихся баков (см. рис. 2). На рис. 2 в левом баке (2) находится водный раствор заданной солености S_{20} , в правом (1) — очищенная путем обратного осмоса пресная вода ($S_{10} = 0$). В обоих баках температура жидкости близка к комнатной. Баки представляют собой сообщающиеся сосуды, соединенные между собой снизу трубками с краном (5). В правом баке расположена мешалка с тремя многолопастными винтами на штоке, укрепленном на оси электродвигателя (3).

Это устройство (мешалка) обеспечивает быстрое перемешивание соленой воды, поступающей из левого бака, с более пресной водой в правом баке. В дне правого бака, ближе к правой боковой стенке, имеется выход с краном и трубкой (6), соединенной с входом в рабочий бассейн, расположенным в центре его дна. Оба бака располагаются на одном уровне и значительно выше бассейна. Высота столба пресной воды в правом баке рассчитывается таким образом, чтобы уравнивать высоту столба водного раствора NaCl в левом баке при открытом кране между баками и закрытом выпускном кране в рабочий бассейн.

Начало заполнения рабочего бассейна линейно стратифицированным водным раствором NaCl определялось моментом открытия выпускного крана. Одновременно с этим включалась мешалка, и пресная вода из правого бака начинала поступать снизу в бассейн, а соленая вода из левого бака самотеком поступала в правый бак, где интенсивно перемешивалась с изначально пресной водой, которая становилась все более и более соленой со временем. Таким образом, рабочий бассейн заполнялся все более соленой водой. При небольшом расходе воды, поступающей в рабочий бассейн, и благодаря тонкому диску, расположенному на небольшом расстоянии (менее 1 см) над зоной притока и подавляющему вертикальную скорость струи, заполнение рабочего бассейна происходило квазиламинарным образом. С целью обеспечения равномерного расхода воды, втекающей в рабочий бассейн, в систему включен дозирующий насос (7) с постоянной скоростью перекачки жидкости. В результате в рабочем бассейне создавалась квазилинейная соленостная стратификация с близкой к нулю соленостью S_{10} воды сверху и с близкой к солености S_{20} воды снизу.

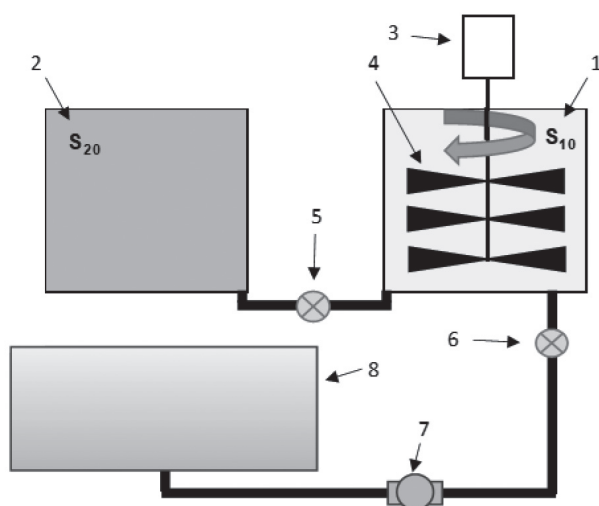


Рис. 2. Схема системы создания линейно стратифицированного слоя жидкости в рабочем бассейне: 1 — правый бак с соленостью воды $S_{10} = 0$; 2 — левый бак с начальной соленостью воды S_{20} ; 3 — электродвигатель; 4 — мешалка; 5 — кран с трубками, соединяющими баки; 6 — кран с трубками, соединяющими правый бак с рабочим бассейном; 7 — дозирующий электронасос; 8 — рабочий бассейн

Fig. 2. Scheme of the system for creating a linearly stratified liquid layer in the working pool: 1 — right tank with water salinity $S_{10} = 0$; 2 — left tank with initial water salinity S_{20} ; 3 — electric motor; 4 — mixer; 5 — tap with tubes connecting the tanks; 6 — tap with tubes connecting the right tank with the working pool; 7 — dosing electric pump; 8 — working pool

Через некоторое время (спустя 1–2 ч) после создания квазилинейной соленостной стратификации в рабочем бассейне, в течение которого все движения воды в нем затихали, а мелкомасштабная неоднородность структуры поля солености сглаживалась за счет молекулярной диффузии, начиналось проведение опыта. За его начало принимался момент включения электродвигателя, обеспечивающего горизонтальные колебания вертикальных стержней с заданной амплитудой и периодом.

Процесс перемешивания и образования ступенчатой структуры визуализировался и фиксировался с помощью теневого прибора (шлирен-метод). Распределение неоднородностей показателя преломления

света (градиента плотности) наблюдалось и фотографировалось в круге света диаметром 20 см в центре бассейна. Области увеличения градиента плотности (высокоградиентные прослойки) идентифицировались со светлыми полосами света, более темные промежутки между ними соответствовали квазиоднородным слоям. Таким образом, удавалось проследить за образованием и эволюцией квазиоднородных слоев и высокоградиентных прослоек, составлявших в совокупности ступенчатую структуру.

Полученные экспериментальные данные анализировались в зависимости от внешних безразмерных параметров — чисел Рейнольдса и Ричардсона. Числа Рейнольдса и Ричардсона определялись следующим образом: $Re = Ud/\nu$, $Ri = (Nd/U)^2$, где ν — кинематическая вязкость воды, считавшаяся постоянной и равной $0,01 \text{ см}^2/\text{с}$, d — диаметр стержней равный $0,6 \text{ см}$, $U = 4A/T$ — средняя скорость их колебаний, A — амплитуда колебания, T — период колебания, $N = ((g/\rho_0)(d\rho/dz))^{1/2}$ — частота Вайсала-Брента, g — ускорение свободного падения, $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность пресной воды при температуре 4°C (рис. 2). При расчете Ri — числа Ричардсона и N — частоты Вайсала-Брента предполагалось, что они определяются начальным постоянным градиентом плотности $(d\rho/dz)_0 = \beta\Delta S_0/H$, где β — коэффициент солёностного сжатия, ΔS_0 — начальный перепад солёности между приповерхностным и придонным горизонтами, H — высота стратифицированного слоя воды, равная толщине водного слоя. Данное предположение является оправданным, поскольку тонкое расслоение проявляется (или, не проявляется) еще на начальной стадии опыта, когда текущие значения ΔS и H имеют значения близкие к начальным.

Следует отметить, что в качестве масштаба длины в определении как числа Рейнольдса, Re , так и числа Ричардсона, Ri , использовался диаметр стержней d , так как предполагается, что масштаб изменения скорости в области перемешивания сопоставим с диаметром стержня [15]. Таким образом, именно диаметр стержней, амплитуда и период их колебаний, а также частота Вайсала-Брента являются размерными параметрами, определяющими процесс перемешивания изначально линейно стратифицированной по солёности водной среды.

При подготовке опытов значения амплитуды, периода колебаний решеток и начальной солёности S_{20} задавались таким образом, чтобы в большинстве опытов происходило формирование ступенчатой структуры, а в некоторых опытах расслоения не происходило и высокоградиентные прослойки не проявлялись. При этом значения безразмерных параметров изменялись в следующих диапазонах: $Re = 40 - 120$; $Ri = 0,1 - 1,4$.

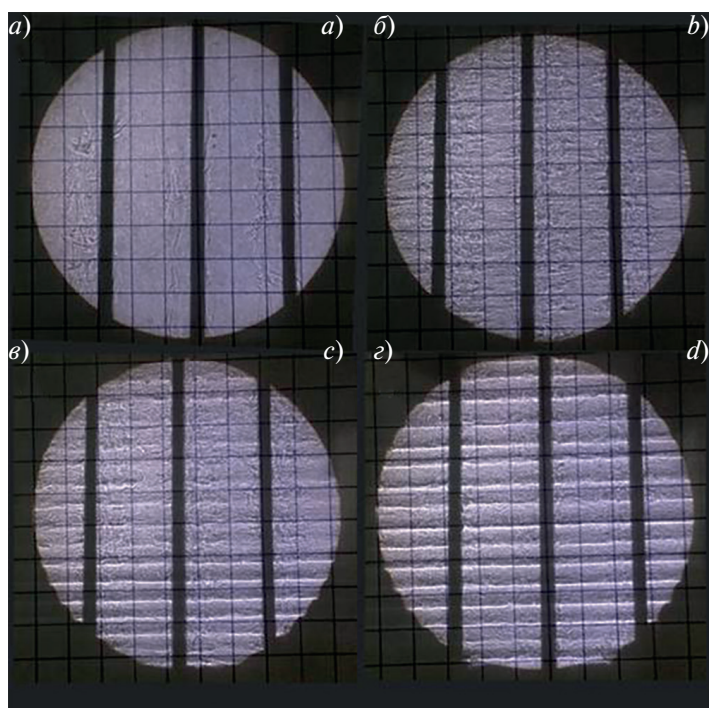
3. Результаты опытов

Было проведено 47 опытов при различных значениях чисел Re и Ri диапазон изменения которых указывался выше. Часть опытов проводилась без измерения толщины образующихся слоев, только для фиксации факта либо образования, либо не образования слоев.

С целью определения толщины слоев было проведено 3 серии опытов с фиксированной амплитудой $A = 0,75 \text{ см}$ и периодами $T = 1,5 \text{ с}$; $1,8 \text{ с}$; $2,1 \text{ с}$; и одна серия — с амплитудой $A = 1,2 \text{ см}$, и периодом $T = 2,5 \text{ с}$, что соответствовало значениям чисел $Re = 86$; 100 ; 115 ; 120 . В каждой серии, путем изменения солёности S_{20} изменялось число Ri . На рис. 3 приведены фотографии возникновения ступенчатой структуры при $Re = 120$; $Ri_0 = 0,58$. Также были проведены дополнительные опыты с целью выяснения границ возникновения слоистой тонкой структуры на диаграмме Re , Ri , при неизменной амплитуде колебаний стержней $A = 0,75 \text{ см}$.

Рис. 3. Теневые фотографии опыта с тонким расслоением стратифицированной жидкости. $S_{20} = 215 \text{ ppm}$; $2A = 1,5 \text{ см}$; $T = 1,5 \text{ с}$; $Re = 120$; $Ri_0 = 0,58$. *a* — начало перемешивания; *б* — через 10 мин; *в* — через 20 мин; *г* — через 35 мин

Fig. 3. Shadow photographs of an experiment with thin layering of a stratified liquid. $S_{20} = 215 \text{ ppm}$; $2A = 1.5 \text{ cm}$; $T = 1.5 \text{ s}$; $Re = 120$; $Ri_0 = 0.58$. *a* — start of mixing; *b* — after 10 minutes; *c* — after 20 minutes; *d* — after 35 minutes



При определенных комбинациях чисел Рейнольдса и Ричардсона слои не образовывались. Например, на рис. 4 приведены фотографии с турбулентным воздействием колеблющихся стержней, не приводящим к образованию ступенчатой структуры ($Re = 120$; $Ri_0 = 0,16$). Проявления турбулентности выражены в виде мелкомасштабной структуры теневого изображения.

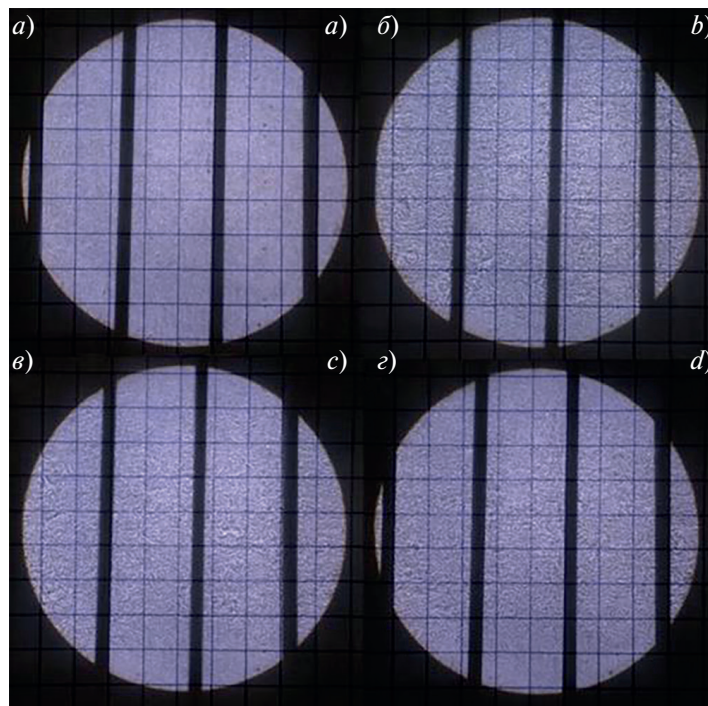


Рис. 4. Теневые фотографии опыта без формирования тонкого расслоения стратифицированной жидкости. $S_{20} = 60$ ppm; $2A = 1,5$ см; $T = 1,5$ с; $Re = 120$; $Ri_0 = 0,16$. *a* — начало опыта; *б* — через 15 мин; *в* — через 30 мин; *г* — через 60 мин

Fig. 4. Shadow photographs of the experiment without the formation of thin stratification of the stratified liquid. $S_{20} = 60$ ppm; $2A = 1.5$ cm; $T = 1.5$ s; $Re = 120$; $Ri_0 = 0.16$. *a* — beginning of the experiment; *b* — after 15 minutes; *c* — after 30 minutes; *d* — after 60 minutes

На рис. 5 в координатах Re , Ri показана область возникновения ступенчатой структуры (синие точки — область 3) и области, где структура не возникает (оранжевые точки). Данная диаграмма построена по результатам 47 опытов, проводившихся при различных значениях чисел Рейнольдса и Ричардсона. Подавляющее большинство опытов относилось к диапазону изменения этих двух параметров, при которых наблюдалось образование слоев. Однако при небольших значениях числа Рейнольдса ($Re = 40$; $Ri_0 = 0,24$ и $Re = 50$; $Ri_0 = 0,96$), в области левее пунктирной прямой 1, образования слоев не наблюдалось: движение стержней не вызывало турбулентных возмущений/пульсаций в среде и видимого вертикального перемешивания не происходило. В области под пунктирной прямой 2 (прямая проходящая через точки $Re = 50$; $Ri = 0,1$ и $Re = 120$; $Ri = 0,16$), создаваемые стержнями возмущения были настолько интенсивны, что не подавлялись стратификацией в достаточной степени, механизм Филлипса—Посментьера не реализовывался и образования слоев тоже не происходило. Тенденция увеличения критического значения числа Ричардсона (с которого начинается тонкое расслоение стратифицированной водной среды), с ростом числа Рейнольдса, обнаруженная в [5, 16], прослеживается и в данном эксперименте.

Следует ответить, что в данной работе не производится проверка условий реализации механизма Филлипса—Посментьера. Суть этого механизма заключается в том, что при турбулентном перемешивании вертикальный поток массы описывается убывающей функцией от вертикального градиента плотности при превышении числом Ричардсона некоторого критического значения. В таком случае флуктуация градиента плотности имеет тенденцию роста со временем и из-за этого изначально линейная стратификация пре-

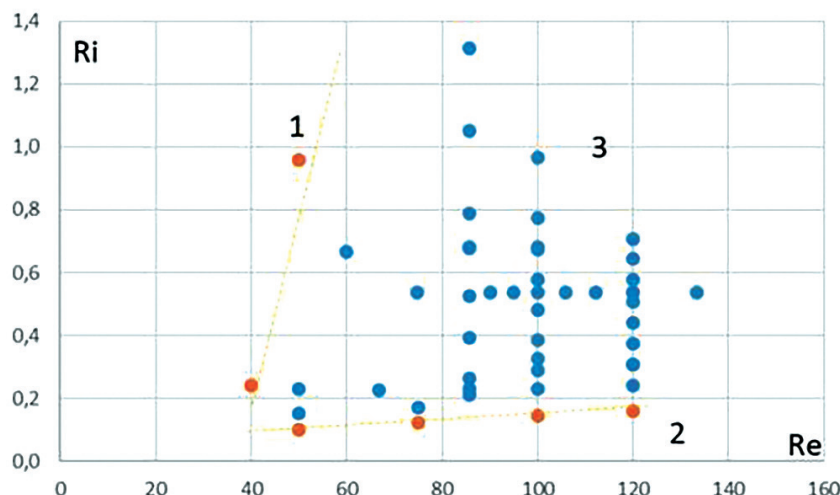


Рис. 5. Опыты с тонким расслоением (синие кружки) и без тонкого расслоения (красные кружки) стратифицированной жидкости в зависимости от Re и Ri (пояснения в тексте) для опытов с амплитудой колебания стержней $A = 0,75$ см. Области 1 и 2 — слои не образуются, область 3 — возникновения ступенчатой структуры

Fig. 5. Experiments with thin stratification — and without thin stratification — of a stratified liquid depending on Re and Ri (explanations in the text) for experiments with an amplitude of rod oscillations $A = 0.75$ cm. Regions 1 and 2 — layers are not formed, region 3 — the emergence of a stepped structure

образуется к ступенчатому виду. Данное рассуждение подробно изложено в [12], где приведены результаты экспериментального исследования зависимости вертикального потока массы от градиента плотности и показано, что ступенчатое расслоение изначально линейной стратификации происходит в соответствии с механизмом Филлипса—Посментьера. Целью настоящего исследования является уточнение области преобразования постоянного градиента плотности в ступенчатый на диаграмме параметров «число Ричардсона — число Рейнольдса», а также выявления зависимости безразмерной толщины квазиоднородных слоев от числа Ричардсона при различных значениях числа Рейнольдса.

На рис. 6 (*a* — классические координаты, *б* — логарифмические координаты) приведены полученные в 32 опытах значения толщины слоев в виде безразмерного параметра h/A в зависимости от Ri . Выбор амплитуды колебания стержней в качестве масштаба приведения к безразмерной величине толщины слоев был связан с тем, что этот масштаб длины был единственным, который варьировался в опытах и от него явным образом зависит энергетика турбулентного перемешивания.

Зависимость значений толщин слоев, нормированных на амплитуду колебаний решетки, от Ri при различных значениях Re представлена на рис. 6, *a*. Степенная аппроксимация линии тренда методом наименьших квадратов дает зависимость: $h/A = 1,00 Ri^{-1,04}$ с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,97$. На рис. 6, *б* данная зависимость представлена в логарифмических координатах.

Попытки привести h к безразмерному виду делением на другие размерные параметры задачи, например, на диаметр стержней d , или комбинацию $(dA)^{1/2}$, а также на общую толщину H водного слоя, привели к значительно худшим результатам.

4. Заключение

В данной работе, являющейся продолжением лабораторных исследований авторов, описанных в [12, 15, 17], уточнены условия возникновения ступенчатой структуры в линейно стратифицированной по солености водной среде при ее продолжительном перемешивании вертикальными стержнями. Получена автомодельная зависимость безразмерной толщины слоев в ступенчатой структуре от числа Ричардсона при различных значениях числа Рейнольдса. Следует отметить, что поскольку диапазон изменения числа Рейнольдса в данных опытах был весьма невелик, то, скорее всего, выявленная автомодельность является промежуточной асимптотикой при небольших значениях этого параметра [18].

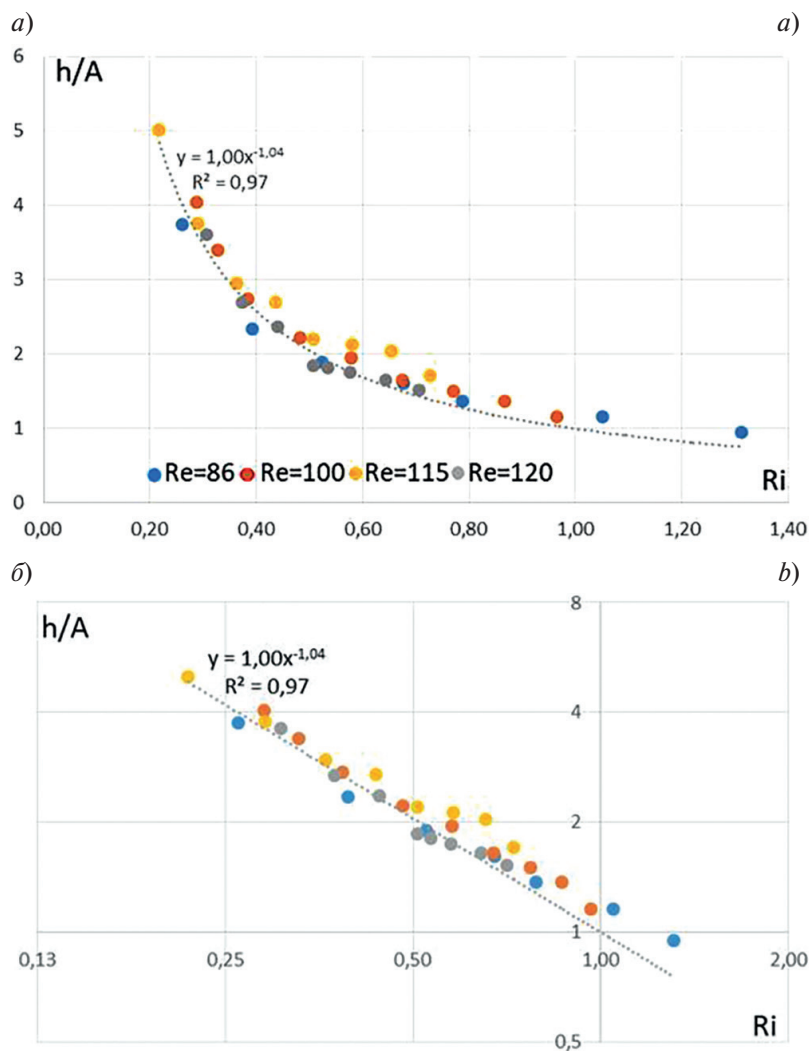


Рис. 6. Зависимость значений толщин слоев, нормированных на амплитуду колебаний решетки, от Ri при различных значениях Re : *a* — классические координаты, *б* — логарифмические координаты

Fig. 6. Dependence of the values of layer thicknesses, normalized to the amplitude of rods oscillations, on Ri for different values of Re : *a* — in classic coordinates, *b* — in logarithmic coordinates

Оказалось, что безразмерная толщина слоев $h/A \approx Ri^{-1} = U^2/N^2d^2$. В размерном виде эта зависимость свидетельствует о том, что толщина квазиоднородного слоя пропорциональна произведению амплитуды колебания стержней на отношение кинетической энергии турбулентного воздействия к потенциальной энергии стратификации. Ранее в [16, 17] делались не вполне удачные попытки параметризовать толщину слоев следующим образом: $h = C*U/N = 4C*[A/(TN)]$, где $C \approx 2$. Параметризация, предложенная в данной работе и получившая достаточно надежное подтверждение (см. рис. 6), выражается в виде следующей зависимости толщины слоев от определяющих размерных параметров задачи: $h \approx 16A^3/(TNd)^2$. Кубическая зависимость толщины слоев от амплитуды колебания стержней требует дальнейшей экспериментальной проверки.

Область возникновения тонкой структуры на диаграмме в координатах Re , Ri ограничена двумя прямыми и представляет собой сектор. Первая, квазивертикальная прямая, является границей области практического отсутствия турбулентных возмущений при движении стержней. Вторая, квазигоризонтальная прямая, является границей области, в которой порождаемые стержнями возмущения достаточно интенсивны и создают вертикальный поток массы, не способствующий реализации механизма Филлипса–Посментьера. В этой ситуации интенсивность турбулентных пульсаций не позволяет образоваться тонким горизонтальным слоям со скачком плотности, и тонкого расслоения стратифицированной водной среды не происходит.

Следует кратко обсудить влияния, обусловленные небольшими геометрическими размерами установки и «агентов» перемешивания — решетками стержней и параметров их колебания на результаты исследования. В первую очередь это влияние сказывается на значениях числа Рейнольдса, которые ограничиваются первыми двумя-тремя сотнями. В силу этого турбулентные возмущения, порождаемые колеблющимися стержнями, даже в однородной жидкости являются не вполне развитыми и далекими от характеристик однородной и изотропной турбулентности. В близком по постановке экспериментальном исследовании [5] авторам удалось достичь существенно больших значений числа Рейнольдса, однако результаты работы оказались весьма похожими на изложенные выше: наблюдался слабый рост критических значений числа Ричардсона, при которых происходило ступенчатое расслоение стратифицированного водного столба с увеличением значений числа Рейнольдса. Другим ограничением является предельная толщина образующихся слоев, которая не может превышать 7–8 см, поскольку говорить о формировании тонкого расслоения изначально линейной стратификации можно только тогда, когда образуется не менее трех слоев по вертикали. Очевидно, что представляет интерес проведение аналогичных опытов на установке существенно большего размера, но это сопряжено с определенными техническими сложностями.

Благодарности

Авторы выражают благодарность д. ф. - м. н. Н.П. Кузьминой за подробное обсуждение результатов работы и полезные рекомендации.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to Dr. N.P. Kuzmina for fruitful discussion of the results of the work and useful advices.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы госзадания № FMWE-2024-0016.

Funding

The work was carried out within the framework of the state assignment topic № FMWE-2024-0016.

Литература

1. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 184 с.
2. Журбас В.М., Озмидов Р.В. (ред.). Формы тонкой термохалинной структуры океана. Каталог // Материалы океанографических исследований. Вып. 1. М.: Межведомственный геофизический комитет при Президиуме Академии Наук СССР, 1987. 134 с.
3. Журбас В.М., Кузьмина Н.П., Кульша О.Б. Ступенчатое расслоение океанского термоклина при трансформации термохалинных интрузий солевыми пальцами (численный эксперимент) // Океанология, 1987, Т. 27, вып. 3. С. 377–383.
4. Ruddick B.R., McDougall T.J., Turner J.S. The formation of layers in a uniformly stirred density gradient // Deep-Sea Research. 1989. Vol. 36. P. 597–609. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(89\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90009-5)
5. Park Y.-G., Whitehead J.A., Gnanadesikan A. Turbulent mixing in stratified fluids: layer formation and energetics // Journal of Fluid Mechanics. 1994. Vol. 279, P. 279–311. <https://doi.org/10.1017/S0022112094003915>
6. Dmitrenko I., Golovin P., Dehn J. et al. Influence of sea ice on under-ice mixing under stratified conditions: potential impacts on particle distribution // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 1998. Vol. 46, N 4. P. 523–529. EDN LENYDJ. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0293>
7. Barenblatt G.I., Bertsch M., Dal Passo R. et al. A mathematical model of turbulent heat and mass transfer in stably stratified shear flow // Journal of Fluid Mechanics. 1993. Vol. 253. P. 341–358. EDN XOPOGY. <https://doi.org/10.1017/S002211209300182X>
8. Balmforth N.J., Llewellyn Smith S.G., Young W.R. Dynamics of interfaces and layers in a stratified turbulent fluid // Journal of Fluid Mechanics. 1997. Vol. 355. P. 329–358. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007970>
9. Пака В.Т. Тонкая структура термоклина на центральном участке течения Кромвелла // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. 1984. Т. 20, № 1. С. 86.
10. Golenko N.N., Paka V.T., Shchuka S.A. Finestructure and mesoscale structure of thermohaline and hydrochemical fields in the White Sea // Oceanology. 2003. Vol. 43. Suppl. EDN LIDDEP

11. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О. и др. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 3. С. 327–339. EDN IAFSJJ
12. Gerasimov V.V., Zatsepin A.G. Relationship between Fine Layering of Stratified Water Environment and Vertical Turbulent Mass Transport // *Oceanology*. 2024. Vol. 64, N 5. P. 647–657. EDN CNWESN. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700334>
13. Phillips O.M. Turbulence in a strongly stratified fluid: Is it unstable? // *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1972. Vol. 19. P. 7–81. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(72\)90074-5](https://doi.org/10.1016/0011-7471(72)90074-5)
14. Posmentier E.S. The generation of salinity fine structure by vertical diffusion // *Journal of Physical Oceanography*. 1977. Vol. 7. P. 298–300. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0298: TGOSFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0298: TGOSFB>2.0.CO;2)
15. Герасимов В.В., Зацепин А.Г., Кандауров А. и др. Лабораторное исследование параметров мелкомасштабной турбулентности генерируемой колеблющимися решетками в водной среде методом PIV // *Волны и вихри в сложных средах: 15-я международная конференция — школа молодых ученых; 19–22 ноября 2024 г., Москва: Сборник материалов школы*, С. 62–65. М.: ООО «ИСПОпринт», 2024. 273 с.
16. Zatsepin A.G. On peculiarities and similarities of the coherent structure formation in stratified and rotating fluid // *Turbulent mixing in geophysical flows* (P.F. Linden and J.M. Redondo — Eds.). 2001. P. 211–299. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona.
17. Zatsepin A.G., Gerasimov V.V., Ostrovskii A.G. Laboratory study of turbulent mass exchange in a stratified fluid // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. P. 756–774. EDN CHBHBZ. <https://doi.org/10.3390/jmse10060756>
18. Баренблатт Г.И. Автомодельные явления — анализ размерностей и скейлинг. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009. 216 с.

References

1. Fedorov KN. Fine thermohaline structure of ocean waters. L.: Gidrometeoizdat; 1976. 184 p.
2. Zhurbas VM, Ozmidov RV, editors. Forms of fine thermohaline structure of the ocean. Catalog. Materials of oceanological research. Issue 1. Moscow: Interdepartmental Geophysical Committee under the Presidium of the USSR Academy of Sciences; 1987. 134 p.
3. Zhurbas VM, Kuzmina NP, Kulsha OB. Stepwise stratification of the ocean thermocline during transformation of thermohaline intrusions by salt fingers (numerical experiment). *Okeanologiya*. 1987;27(3):377–383.
4. Ruddick BR, McDougall TJ, Turner JS. The formation of layers in a uniformly stirred density gradient. *Deep-Sea Research*. 1989;36:597–609. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(89\)90009-5](https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90009-5)
5. Park Y-G, Whitehead JA, Gnanadesikan A. Turbulent mixing in stratified fluids: layer formation and energetics. *Journal of Fluid Mechanics*. 1994;279:279–311. <https://doi.org/10.1017/S0022112094003915>
6. Dmitrenko I, Golovin P, Dehn J, et al. Influence of sea ice on under-ice mixing under stratified conditions: potential impacts on particle distribution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1998;46(4):523–529. <https://doi.org/10.1006/ecss.1997.0293>
7. Barenblatt GI, Bertsch M, Dal Passo R, et al. A mathematical model of turbulent heat and mass transfer in stably stratified shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1993;253:341–358. <https://doi.org/10.1017/S002211209300182X>
8. Balmforth NJ, Llewellyn Smith SG, Young WR. Dynamics of interfaces and layers in a stratified turbulent fluid. *Journal of Fluid Mechanics*. 1997;355:329–358. <https://doi.org/10.1017/S0022112097007970>
9. Paka VT. Fine structure of the thermocline in the central section of the Cromwell Current. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1984;20(1):86.
10. Golenko NN, Paka VT, Shchuka SA. Finestructure and mesoscale structure of thermohaline and hydrochemical fields in the White Sea. *Okeanologiya*. 2003;43 Suppl 1.
11. Zatsepin AG, Kremenetskii VV, Poyarkov SG, et al. Influence of the dynamics of currents on the hydrophysical structure of the waters and the vertical exchange in the active layer of the Black Sea. *Okeanologiya*. 2007;47(3):301–312. <https://doi.org/10.1134/S0001437007030022>
12. Gerasimov VV, Zatsepin AG. Relationship between Fine Layering of Stratified Water Environment and Vertical Turbulent Mass Transport. *Okeanologiya*. 2024;64(5):647–657. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700334>
13. Phillips OM. Turbulence in a strongly stratified fluid: Is it unstable? *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 1972;19:7–81. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(72\)90074-5](https://doi.org/10.1016/0011-7471(72)90074-5)
14. Posmentier ES. The generation of salinity fine structure by vertical diffusion. *Journal of Physical Oceanography*. 1977;7:298–300. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007<0298: TGOSFB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007<0298: TGOSFB>2.0.CO;2)
15. Gerasimov VV, Zatsepin AG, Kandaurov A, et al. Laboratory study of parameters of small-scale turbulence generated by oscillating lattices in an aquatic environment using the PIV method. *Waves and vortices in complex environments: 15th international conference — school for young scientists; 2024 Nov 19–22; Moscow. M.: ISPOprint LLC; 2024. p. 62–65.*

16. Zatsepin AG. On peculiarities and similarities of the coherent structure formation in stratified and rotating fluid. In: Linden PF, Redondo JM, editors. Turbulent mixing in geophysical flows. Barcelona: International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE); 2001. p. 211–299.
17. Zatsepin AG, Gerasimov VV, Ostrovskii AG. Laboratory study of turbulent mass exchange in a stratified fluid. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;10:756–774. <https://doi.org/10.3390/jmse10060756>
18. Barenblatt GI. Self-similar phenomena — dimensional analysis and scaling. Dolgoprudny: Publishing house “Intellect”; 2009. 216 p.

Об авторах

ГЕРАСИМОВ Валерий Валериевич, младший научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0009-0002-2773-5261, e-mail: gerasimov.vv@ocean.ru

ЗАЦЕПИН Андрей Георгиевич, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории экспериментальной физики океана ИО РАН, доктор физико-математических наук, ORCID: 0000-0002-5527-5234, Scopus AuthorID: 7004260979, WoS ResearcherID: E-4999-2014, SPIN-код (РИНЦ): 1707-3104, e-mail: zatsepin@ocean.ru