

УДК 53.03, 001.891.5

© А. А. Родионов, Р. Е. Ванкевич*, А. А. Лобанов, О. В. Глитко, Н. Н. Шпилев, 2024

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

*rvankevich@mail.ru

ТЕРМОСТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ БАСЕЙН САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Статья поступила в редакцию 27.08.2024, после доработки 10.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

Лабораторное моделирование гидрофизических процессов является одним из методов решения научных и практических задач исследования океана. В Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук создан гидрофизический бассейн. Работы в бассейне сопровождаются цифровой копией, позволяющей оптимизировать программы и методики экспериментов. Конструкция бассейна и технологические характеристики позволяют моделировать многослойную стратификацию. В статье содержится описание бассейна, включающее геометрические размеры ($7 \times 2 \times 2,2$ м — длина, ширина, глубина), аппаратный измерительный комплекс, метрологическое обеспечение, технологию создания температурной стратификации. Приведены типовые профили 2-х и 3-слойной стратификации. На основе теории подобия оценены допустимые масштабы воспроизводимых натуральных гидрофизических процессов. Показано, что созданный гидрофизический бассейн занимает промежуточное место между лотками с солевой стратификацией и большим термостратифицированным бассейном Института прикладной физики РАН. При этом в совокупности с цифровой моделью бассейна появляется возможность воспроизводить гидрологические условия, охватывающие основные типы стратификации озёр, морей и океанов, при оптимизации временных и функциональных параметров проведения экспериментов.

Ключевые слова: опытовый бассейн, лабораторное моделирование, гидрофизика, температурная стратификация, измерительный комплекс

UDC 53.03, 001.891.5

© А. А. Rodionov, R. Ye. Vankevich*, A. A. Lobanov, O. V. Glitko, N. N. Shpilev, 2024

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

*rvankevich@mail.ru

THERMALLY STRATIFIED WATER TANK OF ST. PETERSBURG BRANCH OF SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES FOR MODELING HYDROPHYSICAL PROCESSES

Received 27.08.2024, Revised 10.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

Laboratory modeling of hydrophysical processes is one of the methods for solving scientific and practical ocean research tasks. A hydrophysical water tank has been created at the St. Petersburg Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. The work in the tank is supported by a digital model that optimizes experimental programs and methodologies. The design and technological characteristics of the water tank allow for modeling multilayer stratification. This paper describes the tank, including its geometric dimensions ($7 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ — length, width, depth), instrumentation and measurement system, metrological support, and the technology for creating thermal stratification. Typical profiles of two- and three-layer

Ссылка для цитирования: Родионов А.А., Ванкевич Р.Е., Лобанов А.А., Глитко О.В., Шпилев Н.Н. Термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН для моделирования гидрофизических процессов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 90–99. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7

For citation: Rodionov A.A., Vankevich R. Ye., Lobanov A.A., Glitko O.V., Shpilev N.N. Thermally Stratified Water Tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences for modeling hydrophysical processes. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):90–99. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-7

stratification are provided. Based on similarity theory, the permissible scales for reproducing natural hydrophysical processes are evaluated. It is shown that the created hydrophysical water tank occupies an intermediate position between salt-stratified tanks and the large thermally stratified tank at the Institute of Applied Physics, RAS. Together with the tank's digital model, it makes it possible to reproduce hydrological conditions covering the main types of stratification in lakes, seas, and oceans, while optimizing the temporal and functional parameters of the experiments.

Keywords: experimental tank, laboratory modeling, hydrophysics, temperature stratification, measuring complex

1. Введение

Исследование гидрофизических процессов в океанах, морях и пресных водоемах имеет научное познавательное значение и практическую важность для решения хозяйственных, экологических и оборонных задач. К настоящему времени сложилась триада методов исследований:

- теоретические, в т. ч. физико-математическое моделирование;
- физическое моделирование — лабораторный эксперимент различных пространственно-временных масштабов;
- натурные эксперименты.

Наиболее полная и достоверная информация о процессах и явлениях получается при рациональном применении совокупности методов, т. к. каждый из них обладает достоинствами и недостатками.

Теоретическое описание конвективных, волновых, вихревых и турбулентных процессов затруднено в связи с широким спектром движений и сложностью нелинейных взаимодействий. Вместе с тем достижения последних лет в области вычислительной гидродинамики и моделирования крупномасштабных течений связаны с расширением расчетных возможностей современных программных и вычислительных средств. Это позволило создать в последние десятилетия ряд моделей морских и пресных акваторий, представляющих научный и практический интерес. При этом значительный пласт мелкомасштабных процессов в математических моделях остается за пределами доступных вычислительных ресурсов и поэтому параметризуется эмпирическими зависимостями по данным наблюдений. Специальная работа по выполнению натурных измерений волн, вихрей и турбулентных течений для верификации используемых гидродинамических моделей требует ресурсов и времени, а также имеет очевидные ограничения. Получение данных лабораторных измерений для верификации и настройки математических моделей волн является более предпочтительной задачей, чем натурные измерения.

Физическое моделирование остается одним из основных методов решения практических (инженерных) и научных задач. Его высокая эффективность общепризнана как в нашей стране, так и за рубежом. Лабораторные эксперименты, поставленные в соответствии с теорией подобия, позволяют с высокой степенью достоверности получить не только качественные, но и количественные характеристики исследуемых гидрофизических процессов [1, 2].

Более того, в последние десятилетия лабораторные эксперименты вступили в своеобразную эпоху «Возрождения» благодаря технологиям оцифровки, развитию лазеров и оборудования с компьютерным управлением с увеличенной производительностью, что привело к созданию новых инструментов анализа, таких как велосиметрия изображений частиц и лазерно-индуцированная флуоресценция. Это позволяет проводить «неинвазивные» или неконтактные измерения скорости и концентрации в двух и даже трех измерениях [3, 4].

Размеры экспериментальных установок существенно влияют на спектр воспроизводимых в масштабе природных явлений. Так, например, масштабируемые эксперименты с внутренними волнами (ВВ) проводятся в гидроволновых стратифицированных бассейнах (пространственная задача) и гидроволновых лотках (плоская задача) [5–11]. Чем длиннее бассейн, тем лучше он подходит для наблюдения за полностью развитыми внутренними волнами, которые явно отделены от других типов волн, возникающих из-за несовершенства механизма генерации и переотражения от стенок бассейна. Кроме того, увеличение ширины емкости минимизирует вязкостную диссипацию, возникающую из-за трения о боковые стенки. С другой стороны, чем меньше емкость, тем проще проводить эксперимент, поскольку в ней меньше жидкости для манипулирования в части подготовки стратификации, проведения опытов и эксплуатации установки.

В нашей стране в Институте прикладной физики Российской академии наук в 1990-е гг. создан уникальный большой термостратифицированный бассейн с зеркалом поверхности $20 \times 4 \text{ м}^2$ и глубиной 2 м, позволяющий проводить моделирование натурных процессов для случая двухслойной стратификации [9].

В СПбФ ИО РАН создан и в 2023 г. введен в эксплуатацию стратифицированный гидрофизический бассейн. Конструкция бассейна и технологические характеристики позволяют создавать многослой-

ную стратификацию, охватывающую основные типы гидрологических условий озёр, морей и океанов. В целях повышения эффективности исследований создана цифровая копия бассейна, на основе которой оптимизируются программы и методы экспериментов, а также могут быть получены данные для совершенствования гидрофизических численных моделей [12, 13]. Благодаря сочетанию вычислительных технологий, расширению диапазона создаваемой стратификации и наличию информационно-измерительного комплекса появляются дополнительные возможности для изучения в лабораторных условиях гидрофизических процессов. При корректной постановке эксперимента физическое моделирование может дать достаточно полную качественную картину явлений, а при соответствующем обосновании и известную количественную оценку.

2. Описание бассейна

Геометрические характеристики бассейна: длина — 7 м, ширина — 2 м, глубина — 2,2 м, расчетная площадь зеркала воды — 14 м², объем — 31 м³. Изображение бассейна приведено на рис. 1.

Создание и поддержание вертикального изменения температуры в объеме бассейна для моделирования натурной стратификации воды по плотности осуществляется системой тепло- и холодоснабжения. Система работает по типу теплового насоса: забирая тепло с нижнего контура (охлаждения), перебрасывает его на верхний контур (нагрев). С этой целью в его объеме размещены теплообменные поверхности, набираемые из гибкой гофрированной нержавеющей трубы. Объем бассейна разделяется на три равные зоны по высоте. В каждой зоне предусматривается установка теплообменников с возможностью их подключения к «горячему» или «холодному» контурам. Источником теплоснабжения и холодоснабжения для теплообменников бассейна является водоохлаждаемая холодильная машина, установленная в техническом помещении. Холодильная установка включает чиллер с водяным охлаждением конденсатора NED NBH 128-F и драйкулер, который имеет следующие характеристики: холодопроизводительность — 139 кВт, теплопроизводительность — 173 кВт, количество компрессоров — 4 шт., количество холодильных контуров — 2 шт., количество ступеней производительности — 4 шт. Греющие теплообменники подключаются к конденсаторному контуру холодильной машины, охлаждающие — к испарительному. Сброс избыточного тепла от конденсатора холодильной машины, не используемого для нагрева верхнего объема бассейна, осуществляется драйкулером.



Рис. 1. Гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН. Схема измерительной аппаратуры и вспомогательных средств изображена на рис. 2. Схема холодильной установки приведена на рис. 3

Fig. 1. Hydrophysical water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. The diagram of the measuring equipment and auxiliary tools is shown in Fig. 2. The diagram of the refrigeration system is shown in Fig. 3

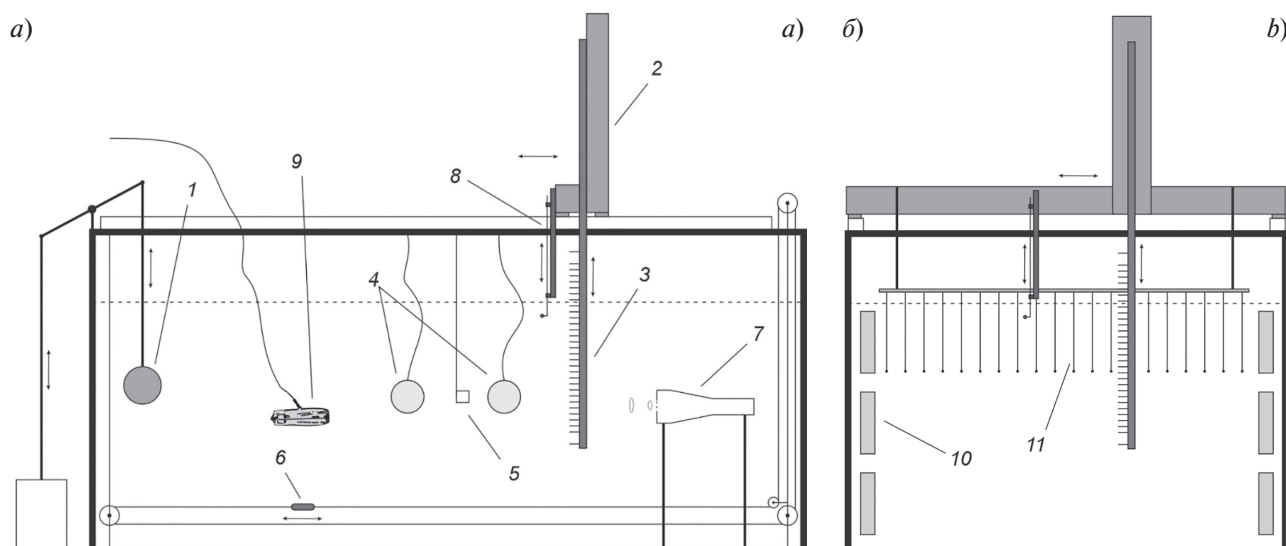


Рис. 2. Схема гидрофизического бассейна и его оборудования: *а* — вид с боковой стороны бассейна; *б* — вид с торцевой стороны: 1 — волнопродуктор плунжерного типа, 2 — тележка с 3-осевым координатным устройством, 3 — измерительная штанга координатного устройства, 4 — подводные прожекторы, 5 — подводная видеокамера, 6 — буксируемое тело на протяжном устройстве, 7 — генератор вихревых колец, 8 — вертикальное зондирующее устройство, 9 — подводный дрон, 10 — тепловой контур, 11 — горизонтальная температурная линия

Fig. 2. Diagram of the hydrophysical water tank and its equipment: *a* — Side view of the water tank; *b* — End view; 1 — Plunger-type wave generator, 2 — Cart with 3-axis coordinate device, 3 — Measuring rod of the coordinate device, 4 — Underwater spotlights, 5 — Underwater video camera, 6 — Towed body on the towing device, 7 — Vortex ring generator, 8 — Vertical probing device, 9 — Underwater drone, 10 — Thermal circuit, 11 — Horizontal temperature line

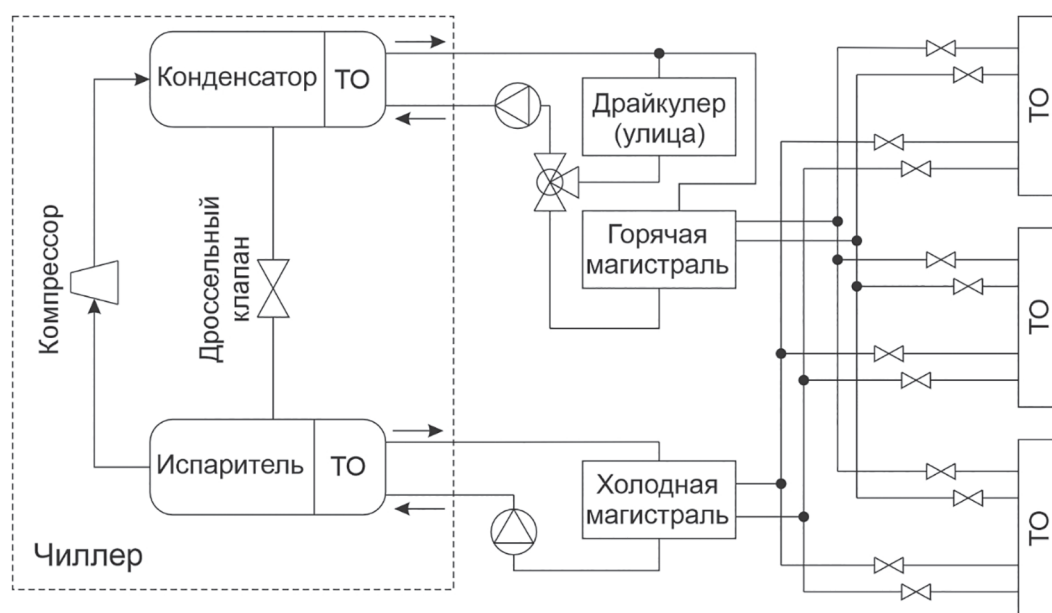


Рис. 3. Схема холодильной установки гидрофизического бассейна

Fig. 3. Diagram of the refrigeration system of the hydrophysical water tank

Управление пуском/остановкой чиллера предусматривается дистанционно с пультной лабораторного комплекса, и в автоматическом по достижению целевой температуры слоев воды бассейна. По сравнению с подходом, при котором различные растворы солей используется для создания стабильно стратифицированного слоя, применяемый метод имеет три основных преимущества. Во-первых, образовавшаяся

стратификация может быть ближе к таковой в океане, поскольку наибольшее влияние на изменение плотности в верхних слоях океана оказывает температура, а не соленость. Во-вторых, как только установится устойчивая стратификация, появляется возможность проводить серийные измерения волнового поля в любое время без необходимости заново воспроизводить стратификацию после каждого эксперимента. В-третьих, эксплуатация крупного бассейна с плотностной/соленостной стратификацией осложнена вопросами стойкости оборудования и невозможностью прямого сброса в общегородскую канализацию.

При оборудовании бассейна особое внимание уделено измерительным средствам, включающим штатную вертикальную измерительную штангу, вертикальное зондирующее устройство и горизонтальную температурную линию.

Вертикальная измерительная штанга с датчиками температуры закреплена на вертикальной каретке координатного устройства. Координатное устройство позволяет измерять температурный профиль в любой точке бассейна путем перемещения измерительной штанги в трех ортогональных направлениях за исключением слепых зон, обусловленных ограничением его конструкции. В качестве датчиков температуры на штатной измерительной вертикальной штанге используются 30 термометров сопротивления Pt1000 класса точности В, заключенных в защитные гильзы длиной 50 мм и диаметром 6 мм и выполненных по стандарту IP68. Их аналоговый сигнал преобразуется в интерфейс токовой петли с помощью нормирующего преобразователя в диапазоне от 0 до +50 °С. Далее сигнал оцифровывается с помощью промышленного модуля ввода-вывода Segnetics FMR — 1021—10—4.

Вертикальное зондирующее устройство представляет собой станину из алюминиевого конструкционного профиля и закрепленной на ней рельсовой направляющей. На каретке рельсовой направляющей установлен измерительный щуп длиной 900 мм, который способен перемещаться вдоль вертикальной оси с помощью ременного привода, управляемого шаговым двигателем. В качестве чувствительного элемента измерительного щупа используется термистор в SMD исполнении NCP03XH103F05RL (Murata) номиналом 10 кОм и размерами 0,6 × 0,3 мм. Для исключения влияния паразитных эффектов, связанных с обтеканием тела щупа, термистор вынесен ортогонально его оси на 15 мм. Старение датчика не исследовалось, поскольку данный тип датчика имеет малый температурный дрейф [13].

Горизонтальная температурная линия представляет собой набор из 20 измерительных щупов длиной 500 мм, которые вертикально закреплены на алюминиевом профиле с шагом в 89,5 мм. В качестве чувствительного элемента используется термистор в выводном исполнении, покрытый эпоксидной смолой номиналом 10 кОм и размерами 4 × 1,5 мм.

Метрологическое обеспечение измерительной аппаратуры было выполнено на основе эталонного термометра 3-го разряда LTA-Э и калибровочной ванны. Термометр LTA — Э имеет диапазон измерений от –50 до +200 °С и основную погрешность измерений в ±0,02 °С. Калибровочная ванна имеет диапазон измерений от 0 до +40 °С, объем — 15 л, скорость циркуляции — 12 л/мин и стабильность поддержания температуры в течение 30 мин ±0,0055 °С.

Калибровка выполнялась методом сличения. После выполнения калибровки для всех средств измерений, погрешности составляют:

- для вертикальной измерительной штанги ± 0,5 °С,
- для вертикального зондирующего устройства ± 0,02 °С,
- для горизонтальной температурной линии ± 0,5 °С.

Для каждого средства измерения была измерена постоянная времени путём создания резкого скачкообразного изменения температуры. Постоянная времени вычисляется по формуле:

$$\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (1)$$

где θ_1 — температура в первой среде, θ_2 — температура во второй среде, t — текущее время, τ — постоянная времени, θ — текущие показания датчика.

После выполнения расчётов для всех средств измерений постоянные времени составили:

- для вертикальной измерительной штанги — 8 с;
- для вертикального зондирующего устройства — 137 мс;
- для горизонтальной температурной линии — 1 с.

Кроме измерительного оборудования бассейн оснащён вспомогательным оборудованием. Для генерации волн (как поверхностных, так и внутренних) бассейн оснащён волнопродуктором плунжерного типа с возможностью изменения глубины погружения, амплитуды и скорости перемещения и заменой ос-

циллирующего тела (рис. 2). В дополнение к координатному устройству бассейн оборудован протяжным устройством для протаскивания моделей с возможностью изменять глубину и скорость протяжки. Для видеофиксации динамических процессов используются экшн-камеры в гермобоксах в паре с подводными прожекторами. Для имитации самодвижущейся модели может быть использован подводный дрон. Также имеется генератор тороидальных вихревых структур.

Точное задание и поддержание термической стратификации в бассейне обеспечивается тонкой настройкой режимов работы холодильного оборудования с использованием цифровой модели бассейна.

На рис. 4 и 5 приведены примеры воспроизведенных опытным путем типовых профилей температуры двух- и трехслойной стратификации.

Для сравнения на рис. 4 (оранжевая линия) приведен типовой профиль температуры большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН [9]. Преимуществом бассейна СПбФ ИО РАН по сравнению с бассейном ИПФ РАН является более тонкая настройка стратификации, а также более высокая скорость ее установки и относительная простота поддержания.

3. Допустимые масштабы воспроизводимых процессов

Под физическим моделированием в бассейне понимается воспроизведение на экспериментальной установке параметров исследуемых физических процессов как природных, так и антропогенных (техногенных). Сложность при проведении модельного эксперимента в бассейне заключается в создании таких условий, при которых полученные результаты можно было бы перенести на натурные акватории, используя масштабные коэффициенты. Масштабные коэффициенты определяются на основании теории подобия.

Рис. 4. Типовые двухслойные профили температуры (по оси X — температура, °C; по оси Y — глубина, м): синий — гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН, время установления стратификации 7,5 ч. Максимальный градиент: 32,5 °C/см; оранжевый — большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН, время установления стратификации 12 ч. Максимальный градиент: 17,5 °C/см

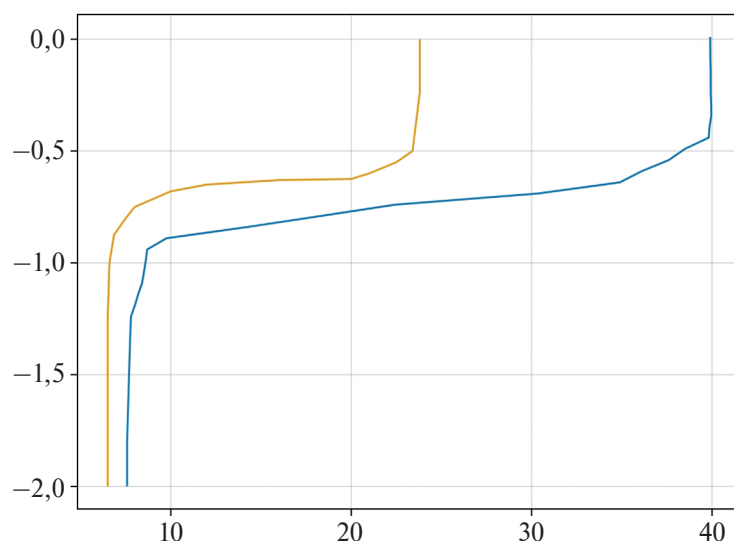


Fig. 4. Typical two-layer temperature profiles (X-axis — temperature in degrees Celsius, Y-axis — depth in meters): blue — hydrophysical water tank of the St. Petersburg Branch of the Institute of Oceanology RAS, stratification establishment time 7.5 hours. Maximum gradient: 32.5 °C/cm; orange — large thermally stratified water tank of the Institute of Applied Physics RAS, stratification establishment time 12 hours. Maximum gradient: 17.5 °C/cm

Рис. 5. Примеры трехслойной стратификации (гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН): по оси X — температура, °C; по оси Y — глубина, м

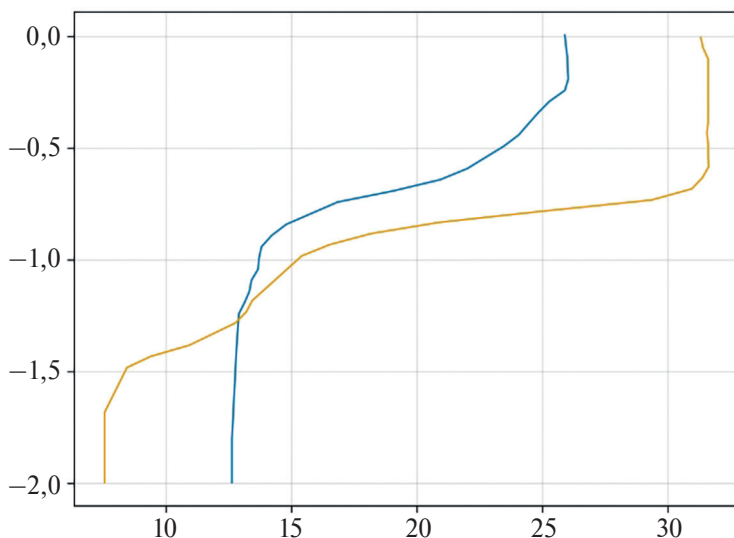


Fig. 5. Examples of three-layer stratification (hydrophysical water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology RAS), X-axis — temperature in degrees Celsius, Y-axis — depth in meters

Согласно общим положениям теории подобия при экспериментальных исследованиях требуется соблюдение динамического подобия (по силам) модели и натурального объекта, а также геометрического (по размерам) и кинематического (по скоростям) подобий. Считается, что эти три условия подобия являются необходимыми и достаточными [14]. Чаще всего при лабораторном моделировании удается в определенной степени соблюсти динамическое подобие без соблюдения геометрического и кинематического подобия.

Из уравнения сохранения количества движения (уравнения Новье-Стокса для неустановившихся течений вязкой однородной несжимаемой жидкости) следует, что для модели и натуры должны сохраняться числа Струхала (Sh), Фруда (Fr), Эйлера (Eu), Рейнольдса (Re) [15]:

$$\begin{aligned} Sh_H &= Sh_M \text{ или } \frac{L_H}{v_H \cdot T_H} = \frac{L_M}{v_M \cdot T_M}; \\ Fr_H &= Fr_M \text{ или } \frac{v_H}{\sqrt{g \cdot L_H}} = \frac{v_M}{\sqrt{g \cdot L_M}}; \\ Eu_H &= Eu_M \text{ или } \frac{2 \cdot P_H}{\rho_H \cdot v_H^2} = \frac{2 \cdot P_M}{\rho_M \cdot v_M^2}; \\ Re_H &= Re_M \text{ или } \frac{v_H \cdot L_H}{\nu_H} = \frac{v_M \cdot L_M}{\nu_M}, \end{aligned} \quad (2)$$

где L , v , T , P , ρ — характерные значения геометрических размеров, скорости, периода нестационарности, давления, плотности среды; g , ν — ускорение свободного падения и кинематическая вязкость; индексы m и n относятся к модели и натурным условиям.

Число Струхала характеризует инерционные гидродинамические силы при нестационарном движении жидкости; число Фруда характеризует отношение сил инерции к силе тяжести; число Эйлера — отношение сил гидродинамического давления к силе инерции, а число Рейнольдса — отношение силы инерции к силе вязкости.

Критерий Эйлера играет большую роль при моделировании явлений, связанных с кавитацией, например, при изучении кавитации у гребных винтов. Если движение тела не сопровождается возникновением кавитации, то при соблюдении критериев подобия Fr , Re равенство чисел Eu для модели и натуры обеспечивается автоматически.

Влияние числа Струхала при установившемся течении будет несущественным, однако при рассмотрении представляющих большой интерес нестационарных движений в жидкости данный критерий обязателен, в том числе при изучении на модели сопротивления воды неустановившемуся движению тела с ускорением при разгоне или торможении.

Моделирование по числу Рейнольдса в большинстве случаев является технически неосуществимым, т. к. требует, чтобы скорость модели оказалась значительно больше скорости в натурных условиях.

Для рассматриваемого гидрофизического бассейна, основное назначение которого состоит в моделировании внутренних волн, вихрей и турбулентных течений, вызванных природными и техногенными причинами, в том числе движением/обтеканием препятствий в стратифицированной жидкости, естественно, рассматривать пространственно-временные стадии процессов, на которых влияние чисел Рейнольдса не существенно. К примеру, в работах Спеддинга и др. [16] было показано, что уже в диапазоне 5000–33000 число Рейнольдса оказывает лишь слабое влияние на дальний след в стратифицированной среде.

При рассмотрении внутренних течений в стратифицированной по плотности жидкости к уравнению сохранения количества движения добавляется уравнение неразрывности и выводится так называемое денситометрическое или внутреннее число Фруда.

В случае непрерывной стратификации оно определяется как

$$Fr_i = \frac{U}{NL}, \quad (3)$$

где $N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$ — частота Брента-Вайсяля, z — вертикальная координата, U — средняя скорость потока.

При моделировании стратификации [9] сохраняются неизменными абсолютные перепады плотности и температуры, свойственные натурным движениям. Для верхнего слоя океана, где стратификация плотности обусловлена в основном изменением температуры, масштабное моделирование означает вертикальное сжатие распределения температуры в K_0 раз при сохранении полного перепада температуры $\Delta\theta$, свойствен-

ного океану с поправкой на изменение солёности. В частности, сохраняются в сопоставимых условиях амплитуды колебаний плотности во внутренних волнах, хотя сами волны переносятся в более высокочастотную область временных и пространственных масштабов. Чтобы обеспечить на модели и в натурных условиях равенство чисел Фруда масштаб периода волны будет равен:

$$K_T = \frac{T_M}{T_H} \sqrt{K_\theta} \quad (K_\theta — \text{геометрический масштаб}).$$

При наличии в потоке сдвига скорости по вертикали в дополнение к (2) вводится также градиентное число Ричардсона:

$$R_i = \frac{-g \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)}{\rho \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2}.$$

Исходя из теории подобия в гидрофизическом бассейне могут моделироваться натурные процессы и явления с коэффициентом геометрического подобия K_L порядка 100, и коэффициентами подобия по скорости течений (движения объектов), сжатия стратификации порядка 10. Соответственно в бассейне могут моделироваться натурные тонкоструктурные, вихревые и волновые процессы с вертикальными масштабами от сантиметров до десятков метров со скоростями до единиц метров в секунду и вертикальными градиентами плотности, характерными для сезонного и основного пикноклина, а также эффекты обтекания тел стратифицированной жидкостью с диаметром до 10 м в диапазоне скоростей до 10 м/с.

4. Заключение

Гидрофизический бассейн СПбФ ИО РАН занимает промежуточное место между стратифицированными лотками с солевой стратификацией и большим термостратифицированным бассейном ИПФ РАН. Геометрические и физико-технические характеристики бассейна, а также его цифровая копия [13] в совокупности позволяют оптимально подходить к подготовке и проведению эксперимента, моделировать основные типы стратификации морских и пресных акваторий.

Известные из научной литературы результаты лабораторных экспериментов связаны в основном с исследованием внутренних волн в жидкости с линейной или двухслойной стратификацией, изучением течений около плохообтекаемых тел — сфер, цилиндров, полусфер [18], плоских пластин [19] и тонких вертикальных барьеров [20]. В нескольких работах рассматривается движение тел в термоклине, по характеристикам приближенном к океану [10, 11]. При этом чаще изучается волновая система вокруг тел, движущихся стационарно в термоклине. Недостаточно внимания уделяется исследованиям волновых систем при нестационарном движении тел.

В гидрофизическом бассейне предполагается проведение исследований в области гидродинамики природных процессов и воздействия техногенных факторов на среду морских и пресных водоемов с моделированием реальной стратификации и приоритетностью изучения эффектов нестационарности, вихревых движений, волновихревых взаимодействий. Большой интерес представляет лабораторное моделирование взаимодействия различных видов течений (внутренних волн и регулярных слоистых структур конвективных течений, вихрей и волн, которое может быть выполнено с использованием современных зондовых и дистанционных оптических и акустических методов исследования.

Финансирование

Работа выполнена в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0029.

Funding

The work was performed under the State assignment FMWE-2024-0029.

Литература

1. Тлявлиева Г.В. Лабораторные и натурные исследования в обеспечение развития нормативной базы и безопасности транспортных сооружений в условиях волнового воздействия // Транспортные сооружения. 2022. Т. 9, № 4. doi:10.15862/10SATS422

2. Чашечкин Ю.Д. Лабораторное моделирование свободных стратифицированных течений // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: Сборник научных трудов / Под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Том 2. 220 с. (с. 225–444).
3. Арройо М.П., Хинш К.Д. Последние разработки PIV в области 3D-измерений. Springer, 2008. С. 127–154.
4. Либерзон А., Гурка Р., Хецрони Г. ХРIV—Многоплоскостная стереоскопическая велосиметрия изображений частиц // Experiments in Fluids. 2004. Vol. 36. P. 355–362. doi:10.1007/s00348-003-0731-9
5. Schooley A.H., Stewart R.W. Experiments with selfpropelled body submerged in a fluid with a vertical density gradient // Journal of Fluid Mechanics. 1963. Vol. 15, Iss. 1. P. 83–96. doi:10.1017/S0022112063000070
6. Barr D.I.H., Hassan A.M.M. Densimetric exchange flow in rectangular channels — II. — Some observations of the structure of lock exchange flow Courants de densité en Canal Rectangulaire // La Houille Blanche. 1963. Vol. 49(7). P. 757–766. doi:10.1051/lhb/1963053
7. Maxworthy T. On the formation of nonlinear internal waves from the gravitational collapse of mixed regions in two and three dimensions // Journal of Fluid Mechanics. 1980. Vol. 96. P. 47–64. doi:10.1017/S0022112080002017
8. Stockhausen P.J., Clark C.B. et al. Three-dimensional wakes in density-stratified liquids. MIT, USA, Hydrodynamic Lab. Rept. 1966, T66–6. N 93. 105 p.
9. Арабаджи В.В., Богатырев С.Д., Баханов В.В., Казаков В.И., Коротков Д.П., Серин Б.В., Таланов В.И., Шишкина О.Д. Установка для моделирования гидрофизических процессов в верхнем слое океана (большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // Приповерхностный слой океана: физические процессы и дистанционное зондирование. ИПФ РАН: Н. Новгород, 1999. Т. 2. С. 231–251.
10. Шишкина О.Д. Экспериментальное исследование генерации внутренних волн вертикальным цилиндром в приповерхностном пикноклине // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2002. №6. С. 94–99.
11. Баханов В.В., Власов С.Н., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Копосова Е.В., Шишкина О.Д. Моделирование внутренних и поверхностных волн реального океана в Большом термостратифицированном опытовом бассейне ИПФ РАН // Известия ВУЗОВ. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 7. С. 537–554.
12. Чашечкин Ю.Д. Дифференциальная механика жидкостей: согласованные аналитические, численные и лабораторные модели стратифицированных течений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: естественные науки. 2014. № 6(57). С. 67–95.
13. Ванкевич Р.Е., Родионов А.А., Лобанов А.А., Филин К.Б., Шпилев Н.Н. Цифровая копия термостратифицированного бассейна Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 100–108. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8.
14. Kulkarni A., Patrascu M., van de Vijver Y. et al, Investigation of Long-Term Drift of NTC Temperature Sensors with less than 1 mK Uncertainty // IEEE24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Brazil, 2015. P. 150–155. doi:10.1109/ISIE.2015.7281460
15. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. 10-е изд., доп. Москва: Наука, 1987. 430 с.
16. Терлецкая Е.В., Мадерич В.С., Бровченко И.А., Талипова Т.Г. Неполная автомодельность внутренних волн второй моды в слое раздела // Прикладна гідромеханіка. 2013. Т. 9 (82), № 3. С. 1–11.
17. Spedding G. Wake Signature Detection // Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. Vol. 46. P. 273–302. doi:10.1146/annurev-fluid-011212-140747
18. Brown S.N. Slow viscous flow of a stratified fluid past a finite flat plate // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. 1968. Vol. 306, Iss. 1485. P. 239–256. doi:10.1098/rspa.1968.0148
19. Sutherland B.R., Linden P.F. Internal wave excitation from stratified flow over a thin barrier // Journal of Fluid Mechanics. 1998. Vol. 377. P. 223–252. doi:10.1017/S0022112098003048
20. Chashechkin Y.D., Mitkin V.V. Experimental study of a fine structure of 2D wakes and mixing past an obstacle in a continuously stratified fluid // Dynamics of Atmosphere and Oceans 2001. Vol. 34. P. 165–187. doi:10.1016/S0377-0265(01)00066-5

References

1. Tlyavlina G.V. Laboratory and field studies to ensure the regulatory framework development and the transport facilities' safety in the wave effect conditions. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2022;9:4. doi:10.15862/10SATS422 (in Russian).
2. Chashechkin Yu.D. Laboratory modeling of free stratified currents. *Pripoverkhnostnyy Sloy Okeana. Fizicheskiye Protssy i Distantionnoye Zondirovaniye: Sbornik nauchnykh trudov* / Ed. Ye.N. Pelinovsky, V.I. Talanov. N. Novgorod: IPF RAN; 1999. Vol. 2. 220 p. (p. 225–444) (in Russian).
3. Arroyo M.P., Hinsch, K.D. Recent Developments of PIV towards 3D Measurements. *Particle Image Velocimetry. Topics in Applied Physics*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2007. Vol. 112. doi:10.1007/978-3-540-73528-1_7

4. Liberzon A., Gurka R., Hetsroni G. XPIV—Multi-plane stereoscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*. 2004;36:355–362. doi:10.1007/s00348-003-0731-9
5. Schooley A.H., Stewart R.W. Experiments with selfpropelled body submerged in a fluid with a vertical density gradient. *Journal of Fluid Mechanics*. 1963;15(1):83–96. doi:10.1017/S0022112063000070
6. Barr D.I.N., Hassan A.M.M. Densimetric exchange flow in rectangular channels. *La Hoille Blanche*. 1963;49(7):757–766. doi:10.1051/lhb/1963053
7. Maxworthy T. On the formation of nonlinear internal waves from the gravitational collapse of mixed regions in two and three dimensions. *Journal of Fluid Mechanics*. 1980;96:47. doi:10.1017/S0022112080002017
8. Stockhausen P.J., Clark C.B. et al. Three-dimensional wakes in density-stratified liquids. MIT, USA, *Hydrodynamic Lab. Rept.* 1966, T66–6. N 93. 105 p.
9. Arabadzhii V.V., Bogatyrev S.D., Bakhanov V.V., Kazakov V.I., Korotkov D.P., Serin B.V., Talanov V.I., Shishkina O.D. Installation for modeling hydrophysical processes in the upper layer of the ocean (large thermostratified water tank of the Institute of Applied Physics RAS). *Priboverkhnyy Sloy Okeana: Fizicheskiye Protsessy i Distantionnoye Zondirovaniye*. N. Novgorod: IPF RAN; 1999. Vol. 2. P. 231–251. (in Russian)
10. Shishkina O.D. Experimental investigation of the generation of internal waves by a vertical cylinder in a near-surface pycnocline. *Fluid Dynamics*. 2002;37(6):931–938. doi:10.1023/a:1022356531179
11. Bakhanov V.V., Vlasov S.N., Kazakov V.I. et al. Modelling of Internal and Surface Waves of the Real Ocean in the Large Thermostratified Experimental Tank at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2003;46:486–501. doi:10.1023/B: RAQE.0000019865.97760.2c
12. Chashechkin Yu.D. Fluid mechanics: consistent analytical, numerical and laboratory models of stratified flows. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*. 2014;6:67–95 (in Russian).
13. Vankevich R. Ye., Rodionov A.A., Lobanov A.A., Filin K.B., Shpilev N.N. Digital copy of the thermally stratified water tank of St. Petersburg Branch of Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):100–108. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(4)-8
14. Kulkarni A., Patrascu M., van de Vijver Y. et al. Investigation of Long-Term Drift of NTC Temperature Sensors with less than 1 mK Uncertainty. IEEE24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Brazil;2015. P. 150–155. doi:10.1109/ISIE.2015.7281460
15. Sedov L.I. Methods of similarity and dimension in mechanics. 10th ed., add. Moskva: Nauka; 1987. 430 p. (in Russian).
16. Terletskaia E.V., Maderich V.S., Brovchenko I.A., Talipova T.G. Incomplete self-similarity of internal waves of the second mode in the interface layer. *Applied Hydromechanics*. 2013;9(82)3:1–11 (In Russian).
17. Spedding G. Wake Signature Detection. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2014;46:273–302. doi:10.1146/annurev-fluid-011212-140747
18. Brown S.N. Slow viscous flow of a stratified fluid past a finite flat plate. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*. 1968;306(1485):239–256. doi:10.1098/rspa.1968.0148
19. Sutherland B.R., Linden P.F. Internal wave excitation from stratified flow over a thin barrier. *Journal of FluidMechanics*. 1998;377:223–252. doi:10.1017/S0022112098003048
20. Chashechkin Y.D., Mitkin V.V. Experimental study of a fine structure of 2D wakes and mixing past an obstacle in a continuously stratified fluid. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*. 2001;34:165–187. doi:10.1016/S0377-0265(01)00066-5

Об авторах

РОДИОНОВ Анатолий Александрович, руководитель научного направления «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» СПбФ ИО РАН, член-корреспондент РАН, профессор,
ORCID: 0000-0002-2377-5621, Scopus AuthorID: 56223713100, WoS ResearcherID: AAT-6466-2021,
SPIN-код (РИНЦ): 5277-4598, e-mail: rodionov.aa@spb.ocean.ru

ВАНКЕВИЧ Роман Евгеньевич, старший научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат технических наук,
ORCID: 0000-0002-3891-3396, Scopus AuthorID: 25642198100, WoS ResearcherID: M-3215-2013,
SPIN-код: 2295-6136, e-mail: rvankevich@mail.ru

ЛОБАНОВ Андрей Александрович, директор СПбФ ИО РАН, доктор технических наук,
ORCID: 0009-0006-9064-1849, SPIN-код (РИНЦ): 1030-8262, e-mail: lobanov.aa@spb.ocean.ru

ГЛИТКО Олег Викторович, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, ORCID: 0009-0005-2313-2326.
e-mail: glitko_kisin@mail.ru

ШПИЛЕВ Николай Николаевич, научный сотрудник СПбФ ИО РАН, SPIN-код (РИНЦ): 9945-2125,
ORCID: 0000-0003-3638-3253, e-mail: nn.shpilev@gmail.com