

УДК 532.51; 532.54

© Р. Е. Ванкевич*, А. А. Родионов, А. А. Лобанов, К. Б. Филин, Н. Н. Шпилев, 2024

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36
*rvankevich@mail.ru

ЦИФРОВАЯ КОПИЯ ТЕРМОСТРАТИФИЦИРОВАННОГО БАССЕЙНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ФИЛИАЛА ИНСТИТУТА ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН

Статья поступила в редакцию 06.10.2024, после доработки 10.11.2024, принята в печать 15.11.2024

Аннотация

Статья посвящена разработке цифровой модели большого термостратифицированного бассейна для гидрофизических исследований. При построении моделей использованы современные наработки в области вычислительной гидродинамики и высокопроизводительных вычислений для оптимизации и частичного замещения дорогостоящих физических экспериментов. Задание и поддержание термической стратификации в бассейне обеспечивается тонкой настройкой режимов работы теплового/холодильного оборудования на основе использования разработанной цифровой модели бассейна. Цифровая копия рассматривается в первую очередь как вспомогательный инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты. В качестве критериев оптимизации могут быть рассмотрены время либо минимизация затрат на установление заданной стратификации в бассейне. В то же время совершенствование численной модели по данным физических экспериментов позволит экстраполировать верифицированные лабораторным путем зависимости для описания режимов, характерных для природных процессов в океане, но сложно реализуемых при масштабном физическом моделировании. Цифровая копия служит конструктивным дополнением к термостратифицированному бассейну, поскольку позволяет рационально построить методику эксперимента, достичь желаемого результата при сокращении временных и материальных ресурсов.

Ключевые слова: опытовый бассейн, лабораторное моделирование, цифровая копия, численная модель, негидростатическая динамика

UDC 532.51; 532.54

© R. Ye. Vankevich*, A. A. Rodionov, A. A. Lobanov, K. B. Filin, N. N. Shpilev, 2024

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36
*rvankevich@mail.ru

DIGITAL COPY OF THE THERMALLY STRATIFIED WATER TANK OF ST. PETERSBURG BRANCH OF SHIRSHOV INSTITUTE OF OCEANOLOGY OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

Received 06.10.2024, Revised 10.11.2024, Accepted 15.11.2024

Abstract

This paper focuses on the development of a digital model for a large thermally stratified water tank intended for hydro-physical studies. The model construction incorporates modern advances in computational hydrodynamics and high-performance computing to optimize and partially replace costly physical experiments. The precise establishment and maintenance of thermal stratification within the tank are achieved through fine-tuning the operation of heating/cooling systems, based on the use of the developed digital model. The digital copy is primarily viewed as a supplementary tool aimed at optimizing serial experiments. Simultaneously, the refinement of the numerical model through physical experimental data enables the extrapolation of laboratory-verified rela-

Ссылка для цитирования: 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
For citation: 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

tionships to describe regimes characteristic of natural oceanic processes that are challenging to replicate in large-scale physical modeling. The digital copy serves as a constructive complement to the thermally stratified water tank, as it allows for a more efficient experimental methodology, achieving desired results while reducing both time and material costs.

Keywords: laboratory water tank, laboratory modeling, digital copy, numerical modeling, nonhydrostatic dynamics

1. Введение

Важным методом изучения процессов в океане является их физическое моделирование в бассейнах достаточно больших размеров с контролируемыми и воспроизводимыми гидрофизическими условиями [1, 2]. В литературе отмечается, что в таких системах сложно создавать резкие скачки плотности и точно воспроизводить вертикальный профиль температуры в масштабах 1:100 и более в меняющихся условиях эксперимента [2]. Ключевой фактор успешности экспериментальных исследований — контролируемость и воспроизводимость условий эксперимента в серии испытаний. Большой термостратифицированный бассейн Санкт-Петербургского филиала Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (СПбФ ИО РАН) отличается расширенными возможностями по созданию сложных термических стратификаций, приближенных к наблюдаемым в морях и океанах [1]. Вместе с тем эмпирический подбор режимов установления и поддержания заданной стратификации в бассейне трудоемок, затратен по времени и ресурсам, а также не всегда позволяет достичь требуемого результата. Для решения задачи точной подстройки режимов теплового оборудования и оптимизации эксперимента в СПбФ ИО РАН создается цифровая копия бассейна.

Цифровая копия бассейна — модульная платформа для организации взаимодействия различных гидрофизических моделей для изучения волновихревых, турбулентных и конвективных процессов в стратифицированной среде бассейна.

Развитие технологий цифровых копий объекта часто рассматривают как альтернативу модельным или натурным испытаниям во многих областях. В данной работе цифровая копия рассматривается в первую очередь как инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты и, как рациональная опция, позволяющая экстраполировать верифицированные опытным путем зависимости для режимов, сложно поддающихся физическому моделированию (например, высокие числа Рейнольдса и т. п.).

В данной статье рассматривается задача установления различных типов стратификации в бассейне за счет бокового прогрева/охлаждения. После включения тепловой/холодильной машины в бассейне в результате свободной конвекции возникают вихревые движения с различным средним направлением циркуляции жидкости выше и ниже области температурного скачка. Точное установление заданного температурного режима требует детального моделирования конвективных процессов в бассейне [1].

Конвективные течения вязких несжимаемых жидкостей — классический раздел гидродинамики. Численное моделирование конвективных процессов является достаточно сложной задачей, решению которой на основе уравнений Навье-Стокса посвящено множество работ как в России, так и за ее пределами. В работах [3, 4] рассмотрены вопросы двумерного моделирования конвективных процессов, описаны разностные схемы интегрирования уравнений Навье-Стокса. Весьма популярным является в настоящее время метод расщепления по физическим процессам (Белоцерковский [5], Пейре, Тейлор [6]). Однако ограничение данного подхода — необходимость отыскания избыточного давления. При этом необходимо решать задачу Неймана для трехмерного уравнения Пуассона, что сопряжено с повышенными требованиями к производительности вычислительных систем. В итоге, в качестве наиболее популярного в литературе подхода к моделированию естественной термоконвекции рассматривается упрощенная плоская или двумерная задача. Вместе с тем протекающие физические процессы обуславливают необходимость адекватного воспроизведения вертикальной конвекции, а также горизонтальных градиентных течений. Анализ регистрируемых с помощью радиометра структур конвективных ячеек на поверхности позволяет сделать вывод о существенной трехмерности конвективных ячеек в бассейне (рис. 1).

Сформулированная ниже полная трехмерная (негидростатическая) модель бассейна призвана наиболее полно в явном виде с минимумом параметризации воспроизводить конвективные, турбулентные, вихревые и волновые процессы в лабораторном бассейне.

2. Математическая постановка задачи

В данной работе решается нестационарная трехмерная задача формирования вертикальной термической стратификации лабораторного опытового бассейна. В основе реализованной цифровой копии бассейна

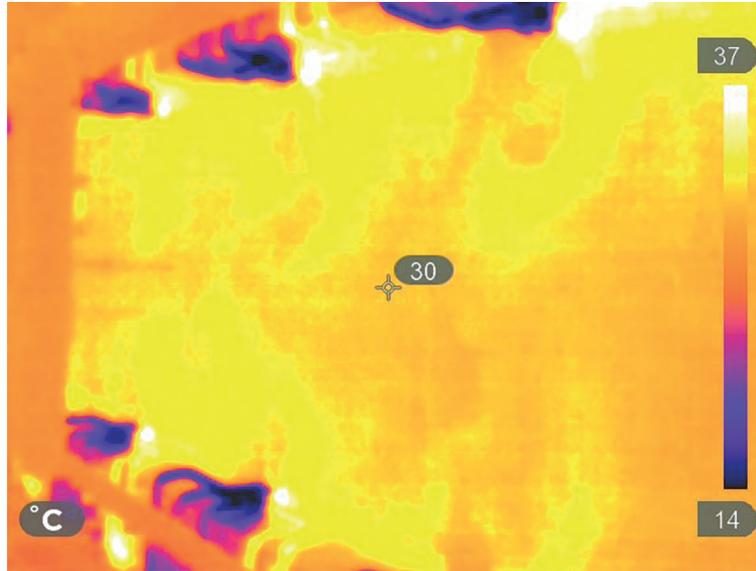


Рис. 1. Мгновенный снимок радиометром температуры поверхности бассейна в момент работы теплового оборудования

Fig. 1. Instantaneous radiometric snapshot of the water tank surface temperature during the heating equipment operation

лежит классическая система уравнений сохранения массы и импульса (1, 2), дополненная уравнением для переноса трассера c (3) (в рассматриваемом случае — температуры T). Уравнения записаны для движения вязкой несжимаемой жидкости в поле силы тяжести:

$$\nabla \cdot \mathfrak{G} = \partial_x u + \partial_y v + \partial_z \omega = 0, \quad (1)$$

$$\partial_t v = -(v \cdot \nabla)v - \nabla_p + b\hat{g} - \nabla \cdot \tau + F_v, \quad (2)$$

$$\partial_t c = -v \cdot \nabla c - \nabla \cdot q_c + F_c, \quad (3)$$

где $\mathfrak{G}(u, v, \omega)$ — скорость среды; $(v \cdot \nabla)v$ — адвекция момента; ∇_p — кинематический градиент давления; $\nabla \cdot \tau$ — молекулярное или турбулентное вязкое напряжение; F_v, F_c — произвольные внутренние источники импульса и трассера; $v \cdot \nabla c$ — адвекция трассера (температуры); $\nabla \cdot q_c$ — молекулярная или турбулентная диффузия; $b = -\frac{g\rho'}{\rho_0}$ — редуцированное гравитационное ускорение (плавучесть); $\rho = \rho_0 + \rho$ — плотность среды;

Вычисление плотности по температуре проводилось с использованием международного уравнения состояния TEOS-10.

Моделирование нестационарных турбулентных ограниченных течений осуществляется с использованием классического метода моделирования больших вихрей. Для этого представленная система уравнений (1–3) решается для осредненных по времени пульсаций скорости и давления \tilde{u}, \tilde{p} . А подсеточный тензор напряжений представляется как $\tilde{\tau} = \overline{u^*u} - \overline{u}^* \overline{u}$ в данном случае он характеризует влияние мелкомасштабной турбулентности на разрешенное (отфильтрованное) поле скорости. В большинстве статей в литературе рассматривается так называемый неявный LES подход, при котором фильтрующая функция не используется, а осреднение по пространству получается «автоматически» за счет сетки. Уравнения решаются численно для \tilde{u}, \tilde{p} , а флуктуационная компонента определяется с помощью подсеточной модели (по Смагоринскому). Роль фильтра играет размер ячейки сетки [6].

В данной постановке реализована идеализированная модель процесса формирования термической стратификации за счет внутренних объемных источников тепла и холода, представленных на рис. 2. При этом, неравномерностью температуры теплоносителя по длине греющего/охлаждающего контуров пренебрегаем.

Были приняты следующие граничные условия и допущения:

- адиабатические стенки бассейна;
- свободный теплообмен с воздухом помещения (нагрев + испарение);

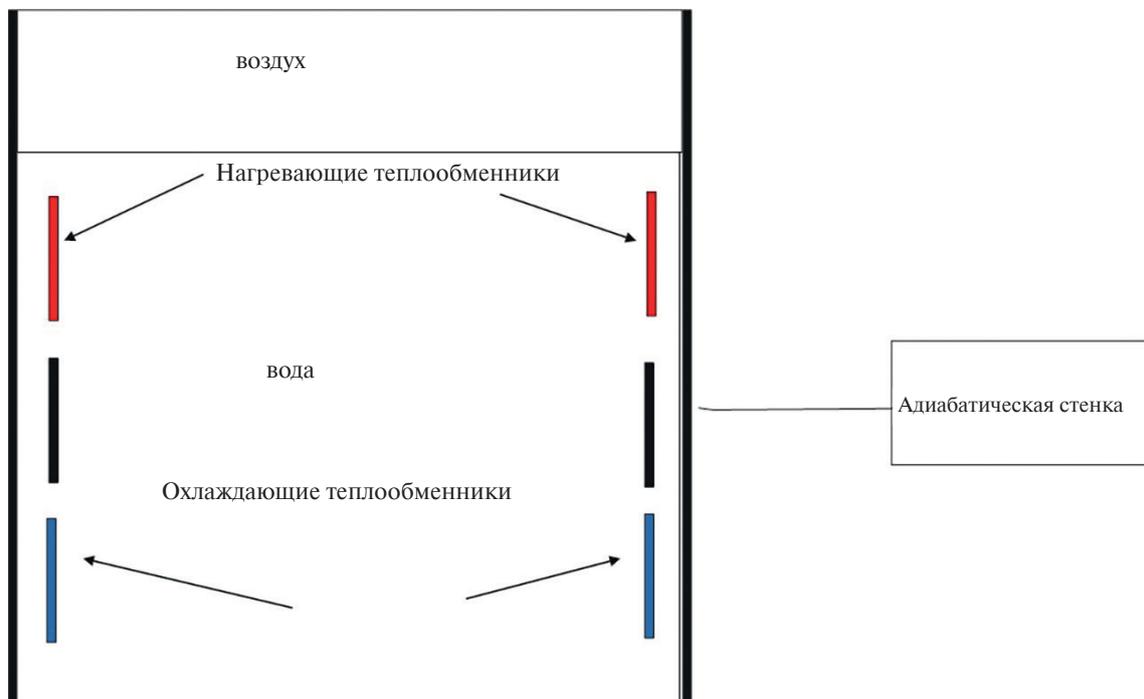


Рис. 2. Схема граничных условий и внутренних источников тепла, использованных в модели формирования термической стратификации

Fig. 2. Diagram of boundary conditions and internal heat sources used in the thermal stratification formation model

- ньютоновская жидкость с постоянными теплофизическими свойствами;
- тепловые потоки от теплообменников задаются как объемные источники и стоки в уравнении сохранения тепловой энергии.

В качестве начальных условий задавались измеренный начальный профиль температуры и нулевые скорости.

Поверочный расчет для верификации модели произведен по оценочным значениям теплового потока, определенным по данным измерения расходов и температуры теплоносителя в чиллере [1] и в бассейне для подачи и обратного потока (рис. 3). С учетом постоянной времени kt , вычисленной как сдвиг по времени между пиками кривых, из теплового баланса определен суммарный поток теплоотдачи контуров в бассейн:

$$Q = C_p \cdot \rho_{\text{теплоносителя}} \cdot \text{Расход} \cdot (T_{\text{подачи}}(t) - T_{\text{обратка}}(t+kt)), \text{ Ватт (4)}$$

Для прогностических оптимизационных расчетов температура теплоносителя при подаче являлась управляемым параметром, расход теплоносителя принимался постоянным. Отмечается импульсный режим работы теплового оборудования, связанный с конструктивными особенностями тепловых агрегатов.

3. Численное моделирование

Дискретизация систем уравнений (1–3) осуществляется на равномерной сетке с шагом 1 см по всем направлениям методом контрольных объемов [7]. Данное разрешение позволяет уверенно моделировать вихревые движения масштаба порядка 10 см и больше. При необходимости предусмотрена возможность дополнительного сгущения сетки в зоне волнового интерфейса (термоклина). Размер расчетной области соответствует размерам бассейна — $6 \times 2 \times 1,8$ м, количество расчетных узлов — 21,600,000.

В полной нелинейной постановке решение поставленной задачи строится численно с использованием метода конечных объемов в рамках открытого пакета OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD Tool Box) [8]. Как известно, большинство вычислительных пакетов являются проприетарными программными продуктами и требуют крупных финансовых вложений на этапе их приобретения. Но более важно то, что они содержат закрытый программный код и, как следствие, представляют собой «черный ящик» для исследователя. Это ограничивает возможности по созданию, модификации и верификации новых численных моделей, мешает при оценке точности полученных результатов и т. д. Появление свободного про-

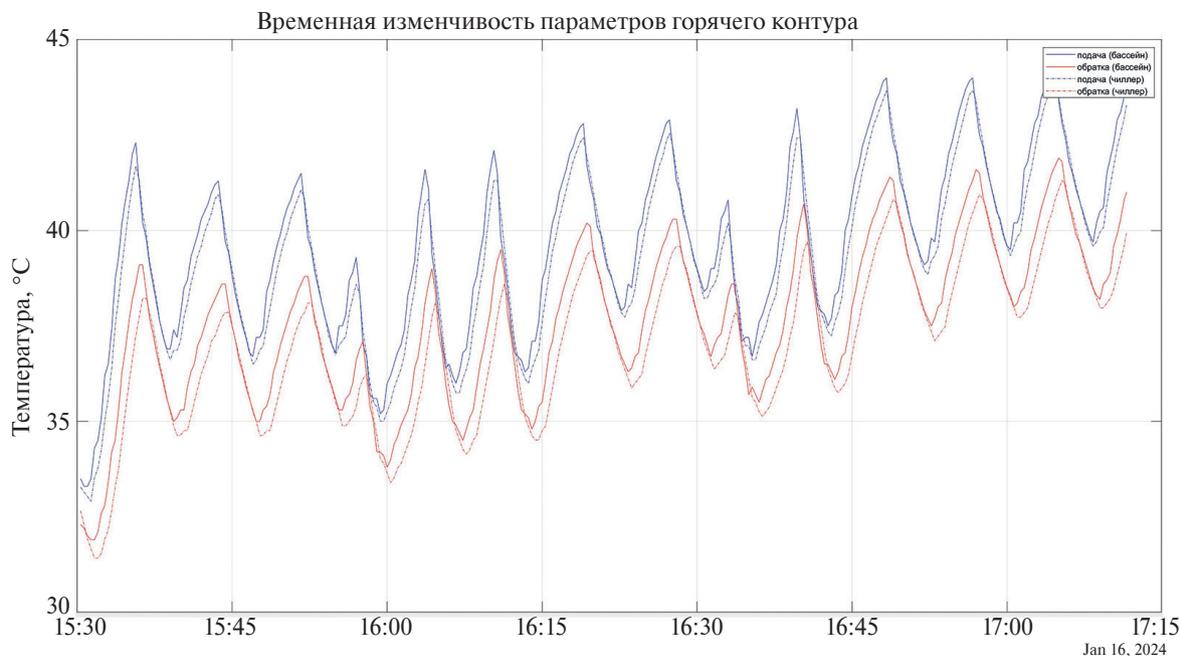


Рис. 3. Особенности работы греющего контура теплового потока по данным измерений температуры теплоносителя

Fig. 3. Characteristics of the heating circuit's thermal flow operation based on heat carrier temperature measurements

граммного пакета OpenFOAM в последние несколько лет позволило изменить данную ситуацию. Широкий инструментарий для формализации задачи, высокая эффективность реализации, а также хорошая масштабируемость под архитектуру вычислительной системы позволяют легко сконструировать численную модель в пакете. Открытый исходный код в свою очередь дает возможность в деталях контролировать ход решения, начиная от построения сетки до выбора схем аппроксимации слагаемых управляющей системы и методов численного решения. В составе Open FOAM входят базовые модели термодинамических свойств веществ, реализующие, к примеру, модель постоянной теплоемкости или рассчитывающие теплоемкости по таблицам JANAF, а также различные модели турбулентности, модели поверхностных пленок пассивной примеси и т. д. Более детальную информацию о методах дискретизации основных уравнений, решения систем линейных уравнений, граничных и постановки начальных условий можно получить из руководства пользователя пакета OpenFOAM [8]. Для расчетов использовалась 64 ядра однопроцессорной система на базе AMD EPYC9554.

4. Результаты

Структура конвективных ячеек на вертикальном поперечном разрезе в различные моменты времени после начала формирования стратификации приведена на рис. 4. Отмечаются зоны интенсивного взаимодействия конвективных потоков ближе к центру бассейна. Интенсивность перемешивания в результате взаимодействия вихревых структур, а также их дальнейшее инерционное продвижение в направлении против действия сил плавучести определяет остроту получаемого термоклина. Данное положение накладывает существенные ограничения на интенсивность нагрева/охлаждения управляющих контуров, что может быть преодолено за счет оптимизированного с использованием цифровой копии комбинированного режима работы оборудования с переменными по времени управляющими параметрами.

Результаты верификации модели по данным контрольного эксперимента по установлению стратификации в бассейне приведены на рис. 5 (среднеквадратичное значение разности измеренных и рассчитанных данных составило около $0,1$ °C). Поэтому в целом модель адекватно воспроизводит процесс установления термической стратификации в бассейне.

Преимуществом бассейна СПбФ ИО РАН [1] является возможность более тонкой настройки сложной многослойной стратификации за счет дополнительных контуров, работающих в зависимости от режима на обогрев или охлаждение. В силу наличия развитого конвективного движения внутри бассейна необходим очень тщательный подбор динамических режимов оборудования. Эмпирический подбор необходимых режи-

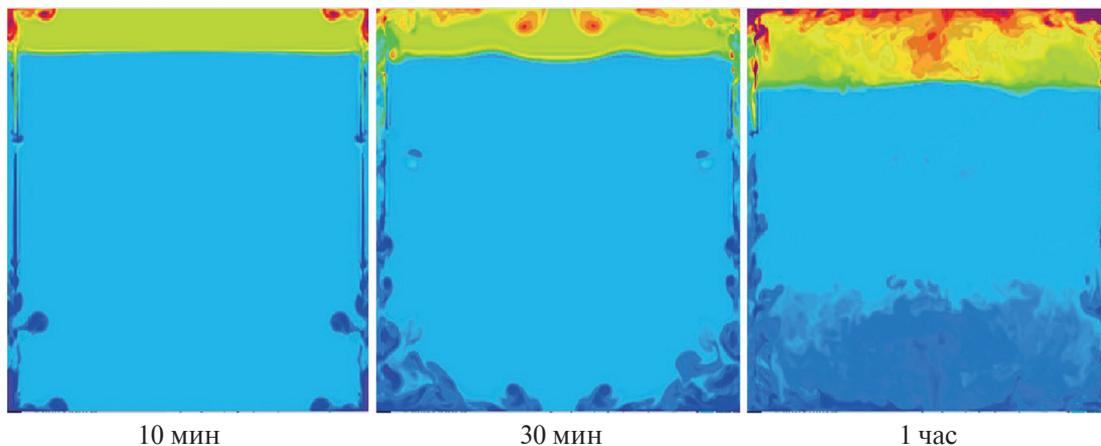


Рис. 4. Вертикальная структура конвективных ячеек

Fig. 4. Vertical structure of convective cells

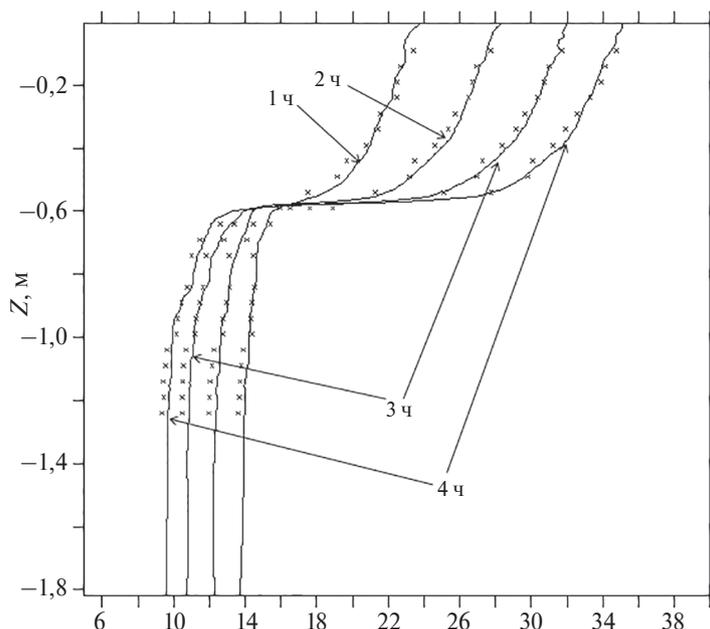


Рис. 5. Расчетные (сплошные кривые) и измеренные (символы) значения распределения температуры в центре бассейна для 1–4 часов работы оборудования (указаны цифрами)

Fig. 5. Calculated (solid curves) and measured (symbols) temperature distribution values at the center of the water tank for 1–4 hours of equipment operation (times indicated by numbers)

мов очень трудоемок. Использование цифровой модели позволяет достаточно точно подобрать режимы работы оборудования и сократить количество экспериментальных работ. В частности, опытным путем на основе серии вычислительных экспериментов, определены оптимальные температуры теплоносителя на каждом временном отрезке работы оборудования, существенное превышение которых приводит к интенсификации вертикальных конвективных движений и, как следствие, размытию промежуточного термоклина.

Таким образом был разработан следующий 2-фазный алгоритм установления 3-слойной стратификации:

1-я фаза: интенсивное охлаждение бассейна с задействованием всех контуров на холод — 2 часа работы оборудования с t подачи 2°C . Линейность получаемого профиля обусловлена тем, что интенсивная вынужденная конвекция захватывает и верхние слои бассейна;

2-я фаза: постепенный нагрев верхнего и одновременное охлаждение нижнего контуров бассейна — 3 часа работы оборудования с t подачи 1°C на нижний контур, при этом T подающей воды во внешний контур является зависимой величиной и определяется остаточным теплозапасом нижней трети бассейна. В результате в бассейне устанавливается профиль с резко выраженным скачком температур на глубине 0,6 м, линейным промежуточным слоем и дополнительным слоем скачка плотности на глубине 1,3 м.

Характер полученного профиля соответствует вертикальной структуре вод океана, где присутствуют разнесенные по глубинам главный и сезонные термоклины. Пример результатов совместной работы объекта — бассейна и его цифровой копии приведен на рис. 6.

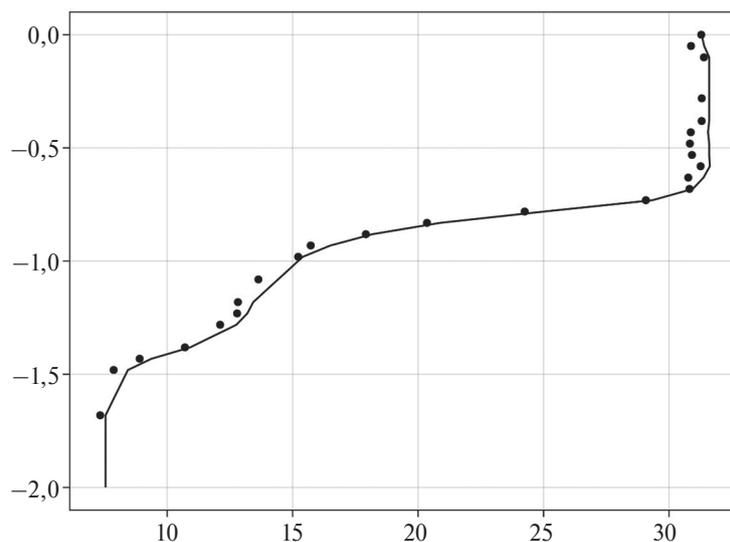


Рис. 6. Пример 3-слойной стратификации, изначально полученной на цифровой модели (сплошная линия) и подтвержденной опытным путем (точки)

Fig. 6. Example of a three-layer stratification, initially obtained from the digital model (solid line) and experimentally verified (dots)

5. Заключение

Использованы современные наработки в области вычислительной гидродинамики и высокопроизводительных вычислений для оптимизации и частичного замещения дорогостоящих физических экспериментов.

Точное задание и поддержание термической стратификации в бассейне обеспечивается тонкой настройкой режимов работы теплового/холодильного оборудования на основе использования цифровой модели бассейна. В данной работе цифровая копия рассматривается в первую очередь как вспомогательный инструмент, призванный оптимизировать серийные эксперименты и, уже как опция, экстраполировать верифицированные опытным путем зависимости для режимов, сложно поддающихся физическому моделированию (высокие числа Рейнольдса и т. п.).

Дополнительным результатом численного моделирования является четкая, объемная, динамическая картина нестационарных процессов внутри бассейна, дающая информацию как для проектирования измерительных систем бассейна, так и состава будущих физических экспериментов. В частности, отмечаемые значительные горизонтальные скорости конвективных потоков могут быть использованы вместо отдельного индуктора течений для создания сдвиговых течений по границе термоклина и исследования их взаимодействия с фронтом возбуждаемых движущимся источником внутренних волн.

Дальнейшее развитие цифровой копии будет вестись в направлении обеспечения динамических экспериментов в стратифицированной среде:

- генерации внутренних волн волнопродуктором и движущимся погруженным телом за счет добавления сопряженной с описанной расчетной областью динамической расчетной сетки;
- эволюции струйных и сдвиговых течений;
- взаимодействия поверхностных и внутренних волн, а также волн и вихрей.

Для контроля пространственных характеристик сложных тонкоструктурных гидрофизических процессов, таких как турбулентные течения, нелинейные волновые процессы рассматривается возможность доукомплектования бассейна системой PIV (Particle Image Velocimetry — анемометрия по изображениям частиц) как метода визуализации двумерных векторных полей.

Цифровая копия бассейна служит существенным дополнением к физическому моделированию, поскольку обеспечивает дополнительное средство проверки в контролируемой среде, оптимизирует методику лабораторного эксперимента, когда объем и состав испытаний определяется на основе моделирования. В результате повышается точность, надежность и репрезентативность физического эксперимента.

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. 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
2. Арабаджи В.В., Богатырев С.Д., Баханов В.В. и др. Лабораторное моделирование гидрофизических процессов в верхнем слое океана (большой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН) // *Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование: сборник научных трудов / под ред. Е.Н. Пелиновского, В.И. Таланова*. Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. Т. 2. С. 231–251.
3. Грязнов В.Л., Полежаев В.И. Исследование некоторых разностных схем и аппроксимаций граничных условий для численного решения уравнений тепловой конвекции: препринт N40. М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1974. 71 с.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 288 с.
5. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
6. Пейре Р., Тейлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 352 с.
7. OpenFOAM: User Guide v1912. The open source CFD toolbox. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v1912/doc/guide-turbulence-les-smagorinsky.html> (дата обращения: 30.08.2024).
8. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow, hemisphere public corporation, New York, 1980. <https://doi.org/10.1002/cite.330530323>.
9. OpenFOAM Foundation. 2024. URL: <https://openfoam.org/> (дата обращения: 30.08.2024).

References

1. 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 (in Russian)
2. Arabadzhi 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). *Pripoverkhnostnyy Sloy Okeana: Fizicheskiye Protsessy i Distantionnoye Zondirovaniye*. IPF RAN: N. Novgorod; 1999. Vol. 2. P. 231–251 (in Russian).
3. Gryaznov V.L., Polezhaev V.I. Study of some difference schemes and approximations of boundary conditions for the numerical solution of thermal convection equations: preprint No. 40. M.: In-t problem mekhaniki AN SSSR; 1974. 71 p. (in Russian).
4. Paskonov V.M., Polezhaev V.I., Chudov L.A. Numerical modeling of heat and mass transfer processes. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury; 1984. 288 p. (in Russian).
5. Belotserkovsky O.M. Numerical modeling in continuum mechanics. M.: Nauka; 1984. 520 p. (in Russian).
6. Peire R., Taylor T.D. Computational methods in fluid mechanics problems. Leningrad: Hydrometeoizdat; 1986. 352 p. (in Russian).

7. OpenFOAM: User Guide v1912. The open source CFD toolbox. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/v1912/doc/guide-turbulence-les-smagorinsky.html> (date of access: 30.08.2024).
8. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere Publ. Corp.; 1980. doi:10.1002/cite.330530323
9. OpenFOAM Foundation. 2024. URL: <https://openfoam.org/> (date of access: 30.08.2024).

Об авторах

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

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

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

ФИЛИН Константин Борисович, Начальник Лабораторного комплекса СПбФ ИО РАН, e-mail: filinkb@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