

## ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ БАССЕЙН

Гидрофизический бассейн предназначен для физического моделирования гидрофизических процессов, в глубине морской среды, на границах раздела «вода-воздух» и «вода-дно». В бассейне могут изучаться поверхностные и внутренние волны, взаимодействие волн между собой, взаимодействие внутренних волн с дном, а также различные аспекты турбулентности, возникающей в стратифицированной жидкости. В таблице приведены основные характеристики бассейна.



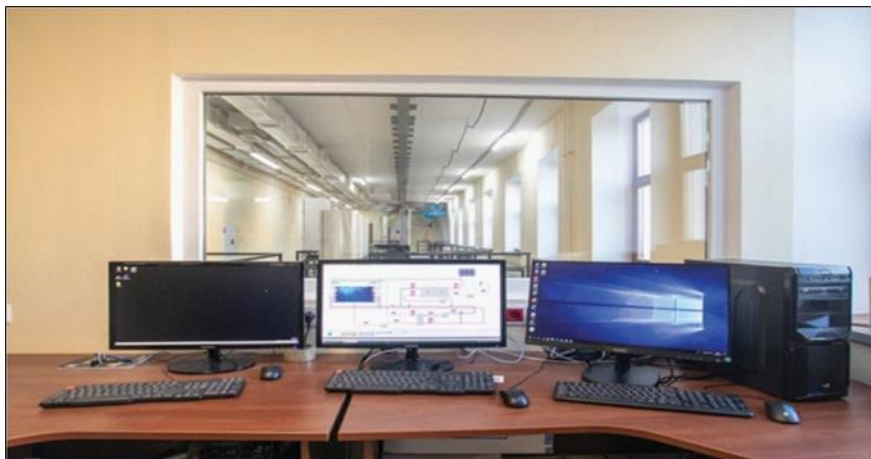
Гидрофизический бассейн.

### Характеристики бассейна

№	Технологические показатели бассейна	Количественная характеристика
1	Тип бассейна	Опытный
2	Длина, м (внутренний габарит ванны бассейна)	7,0
3	Ширина, м (внутренний габарит ванны бассейна)	2,0
4	Глубина, м (внутренний габарит ванны бассейна)	2,2
5	Расчетная площадь зеркала воды м <sup>2</sup>	13,32
6	Объем бассейн м <sup>3</sup>	29,3
7	Среда	вода
8	Рабочее давление	Под налив
9	Расчетное давление	Гидростатическое
10	Рабочая температура среды	От 4 до 30°C
11	Режим работы	Периодический
12	Расчетный срок службы, лет	20
13	Материал каркаса	Сталь нержавеющая

## Технология системы подготовки бассейна

Основной задачей систем тепло- и холодоснабжения, является создание и поддержание вертикального изменения температуры в объеме бассейна для масштабного моделирования натурной стратификации воды по плотности. 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. 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. Управление пуском/остановкой чиллера предусматривается дистанционно с пультовой лабораторного комплекса (см. рисунок \_\_\_), и в автоматическом по достижению целевых температур слоев воды бассейна.



Пультовая лабораторного комплекса.

Также предусмотрено устройство интенсивного проточного нагрева/охлаждения объема бассейна. Для этого реализовано устройство контура, включающего в себя пластинчатый теплообменник (ТО), подключаемый к испарительному контуру чиллера через узел регулирования.

Предусмотрено устройство комплекса водоподготовки для заполнения термостратифицированного бассейна в составе:

- фильтр грубой очистки;
- система удаления мутности и обезжелезивания;
- фильтр тонкой очистки;
- УФ-стерилизатор.

Подготовленная вода для термостратифицированного бассейна поступает непосредственно в его объем.

## Генерация искусственного волнения

Для генерации в бассейне искусственного поверхностного волнения, с заданной

амплитудой  $a$  и частотой  $f$ , предназначено специальное устройство – генератор искусственного волнения или волнопродуктор.

В качестве колеблющегося рабочего тела волнопродуктора использовано погруженное (полупогруженное) тело цилиндрической формы, колеблющееся у торцевой стенки бассейна в вертикальной плоскости. Амплитуда и частота волнения задается глубиной периодического вертикального погружения объема рабочего тела и соответственно величиной объема вытесненной жидкости, а также частотой самих погружений.

Частота (периодичность) вертикального погружения (всплытия) и соответственно частота волнопродуктора задается частотой вращения вала электродвигателя. Переход от вращательного движения вала электродвигателя к возвратно-поступательному движению тяги, связанной с колеблющимся на поверхности воды рабочим телом, осуществляется с помощью эксцентриситета кривошипно-шатунного механизма и подвижной шарнирной рамы качельного типа. Эксцентриситет — диск на валу двигателя со смещенной от основной продольной оси вала шарнирной точкой крепления тяги. Крепление тяги тела погружения возможно с переменной длиной тяги, с дискретными отверстиями. Величина смещения точки крепления тяги задает амплитуду колебаний рабочего тела и пропорционально амплитуде волнения.

#### Волногаситель

Для полного гашения или уменьшения отражения от набегающего на противоположную от волнопродуктора стенку бассейна волнения применено специальное устройство пассивного типа, моделирующее природные условия, аналогичные пологим береговым линиям. Набегающая волна по мере движения по наклонной плоскости постепенно уменьшает свою длину и увеличивает амплитуду вплоть до обрушения. Для повторения таких природных условий в бассейне искусственная пологая береговая линия изготовлена в виде наклонной под углом к поверхности воды металлической рамы по всей ширине бассейна. Заполнение рамы — нержавеющая сетка. Рама имеет возможность изменения угла наклона и погружения относительно поверхности воды на случай существования крупного волнения или изменения уровня заполнения чаши бассейна. Своей твердой поверхностью волногаситель обеспечивает обрушение набегающего волнения, а «прозрачная» структура создает условие для «сквозного» протекания, индуцированного волнением приповерхностного течения.

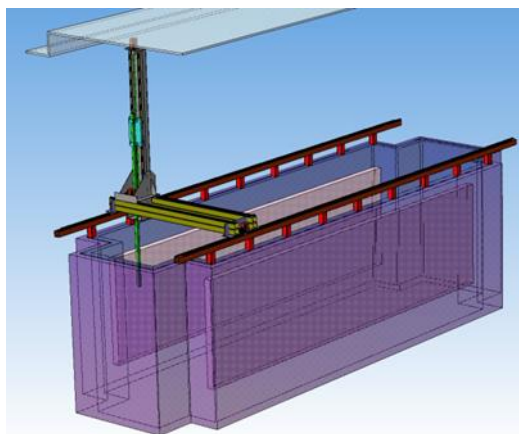
#### Автоматизированная система линейного перемещения

Назначение — перемещение стойки с датчиками в бассейне, заполненном водой по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Технические характеристики бассейна приведены в таблице.

Технические характеристики

Материал	Сталь
Количество систем перемещения	1

Пределы перемещения по осям	
перемещение по X, мм	6500
перемещение по Y, мм	1600
перемещение по Z, мм	1900
Вращение стойки с нагрузкой вокруг оси Z	Отсутствует
Тип и размер направляющих по X, Y	Профильный рельс 20 мм
Тип передачи по X, Y/Z	Зубчатая рейка/ШВП
Тип привода	Шаговый двигатель NEMA34
Максимальная скорость перемещения в водной среде, мм/мин	до 10 000
Скорость перемещения в водной среде, мм/мин	3 000
Точность позиционирования, мм	±5
Максимальный вес полезной нагрузки, кг	50



Датчики температуры.

Для контроля за изменчивостью температуры стратификации применяются три набора цифровых датчиков температуры. Они реализованы в виде термокос. Две из них закреплены стационарно на противоположных торцах бассейна, а третья производит измерения в произвольно заданной точке, в которую перемещается с использованием автоматической системы перемещения. Диапазон измерения температуры от 0 до 100 °С, пределы допускаемой погрешности —  $\pm 0,05$  °С; цена единицы наименьшего разряда выходного кода — не более 0,015 °С.

**Цифровая модель бассейна – модульная платформа для организации взаимодействия различных моделей (термогидродинамических, турбулентности и т.п.) для изучения волновых и конвективных процессов в стратифицированной среде.**

Модульная платформа организована на основе вычислительного пакета Open FOAM, (Open Source Field Operation And Manipulation CFD Tool

Вох).

В настоящее время прикладные вычислительные пакеты представляют собой мощный и хорошо развитый аппарат для решения широкого класса физических задач. Не секрет, что они активно используются ведущими мировыми инженерными компаниями при создании и испытании разнообразной высокотехнологичной продукции. 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 на рынке свободного программного 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. Причем все эти модели реализованы в полноценных традициях объектно-ориентированного программирования: все классы для разных моделей одного физического процесса имеют общий интерфейс, и код, использующий эти классы, не должен знать о том, какая именно модель используется. Более того, выбор конкретной модели определяется на этапе выполнения — пользователь может сам в файле настроек выбрать нужную модель.

В основе реализованной цифровой модели бассейна заложены три закона сохранения: массы, импульса и энергии .

сохранение массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 ,$$

где  $\vec{u}$  – скорость потока,  $\rho$ - плотность

сохранение момента:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = - \nabla \cdot p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \cdot \vec{g} ,$$

где  $p$ - давление;

$\tau$ -тензор девиаторных напряжений, для ньютоновской жидкости это:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

сохранение энергии

$$\rho \frac{Dh}{Dt} + \rho \frac{De_c}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \rho q_v + \nabla \cdot (\vec{\tau} \cdot \vec{u}) + \rho \vec{g} \cdot \vec{u} ,$$

где  $h$ - удельная энтальпия,

$q_v$  – внутренний тепловой источник,

$e_c$  - удельная кинематическая энергия:

$$e_c = \frac{1}{2} |\vec{u}|^2$$

В данной постановке реализована идеализированная модель процесса формирования термической стратификации за счет внутренних источников тепла и холода (рисунок).

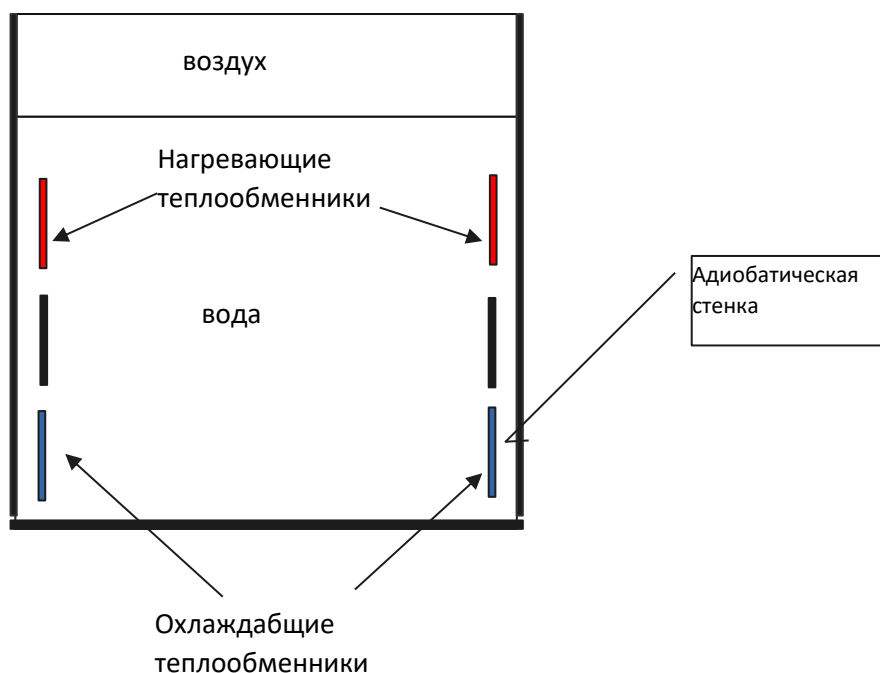


Рисунок 1. Идеализированная модель процесса формирования термической стратификации бассейна.

Пример расчетного эксперимента по установлению двухслойной стратификации в бассейне приведен на рисунке 2. Данный тип стратификации достигается за счет одновременного нагрева верхних и охлаждения нижних теплообменников.

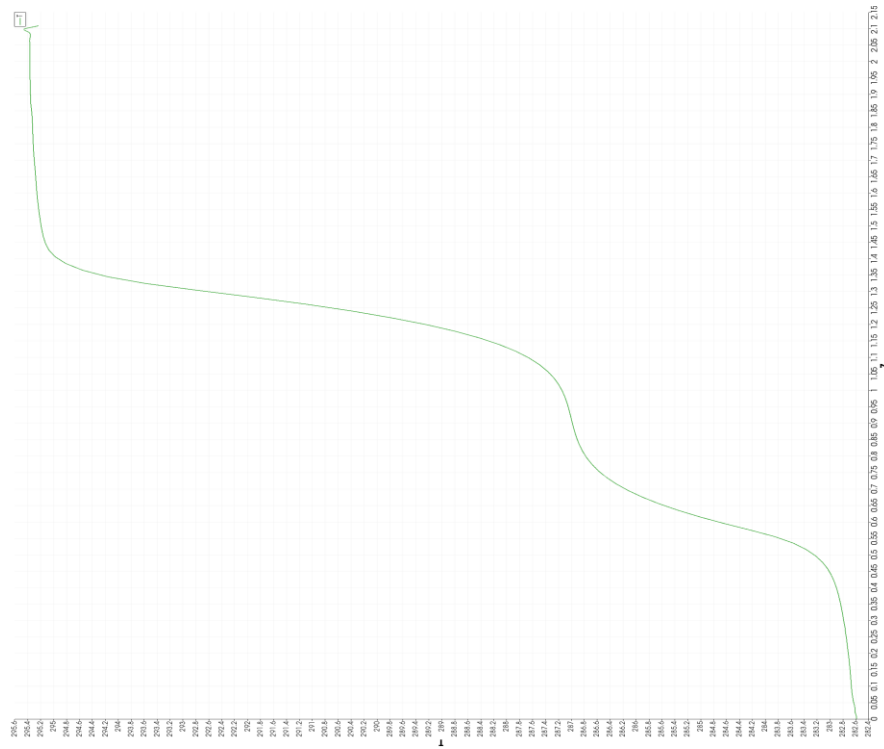
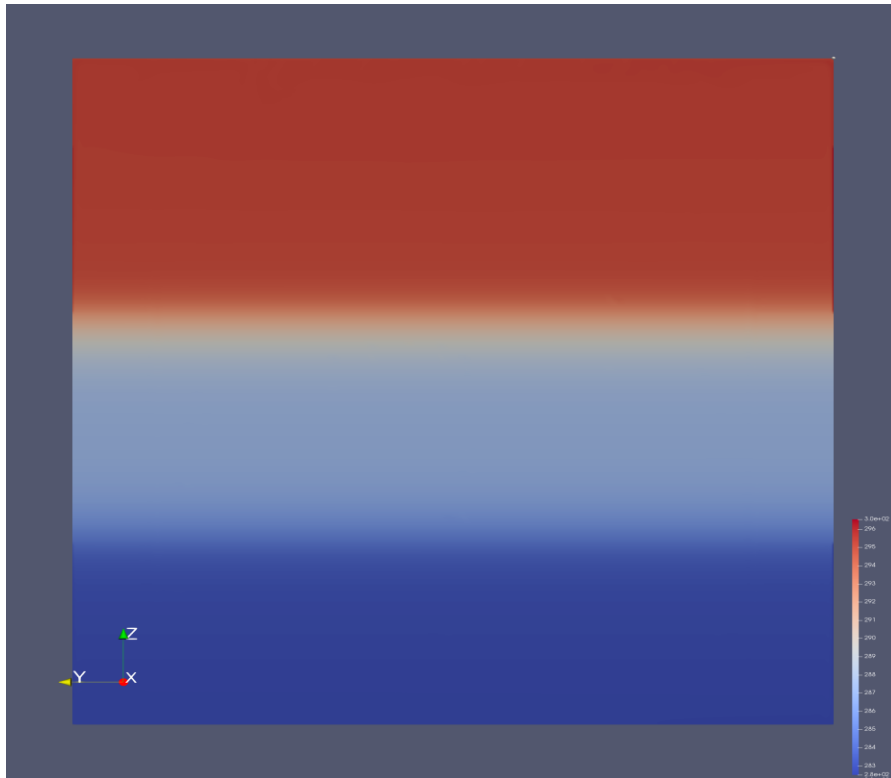


Рисунок 2 Пример расчета установления двухслойной стратификации в бассейне.



Расчет произведен со следующими допущениями:

- адиабатические стенки бассейна
- свободный теплообмен с атмосферой (нагрев + испарение)
- ньютоновская жидкость с постоянными теплофизическими свойствами
- тепловые потоки от теплообменников приняты равными измеренным.

Основная задача расчета - подбор необходимых режимов работы оборудования (температура теплоносителя, время нагрева) для установления стратификации с заданными параметрами для изучения конвективных или волновых процессов и верификации/калибрации соответствующих математических моделей (рисунок 3).

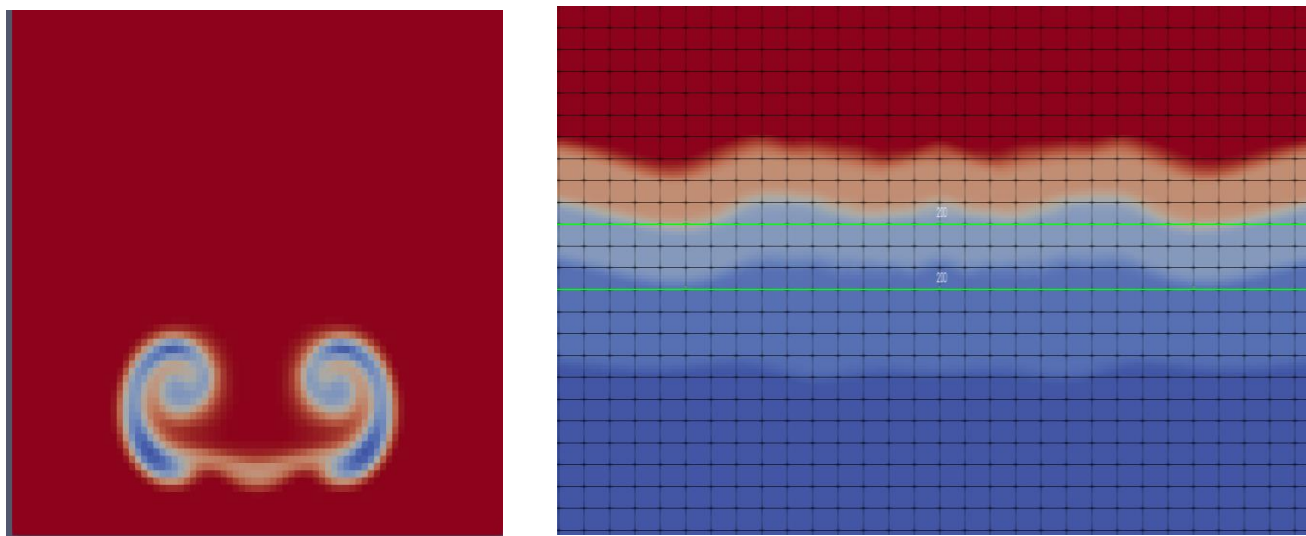


Рисунок 3. Возможные модельные процессы. Левый фрагмент – свободная конвекция как результат сброса холодного объема на поверхность. Правый - искусственно возбужденные внутренние волны с источником в центре бассейна.