

## РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья

УДК 639.3; 53.072.23

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-68-12

EDN: WNTVLH

### Мультифизическое подобие в замкнутой системе «УЗВ – гидробионт»

Александр Алексеевич Недоступ<sup>1</sup>, Алексей Олегович Ражев<sup>2</sup>,  
Даниил Владимирович Суконнов<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

<sup>2,3</sup> Лаборатория цифровых технологий, Калининград, Россия

<sup>1</sup> nedostup@klgtu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3851-0984>

<sup>2</sup> root@digitechlab.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0983-834X>

<sup>3</sup> sdv@digitechlab.ru; <http://orcid.org/0009-0005-1795-7196>

**Аннотация.** Приводится реализация теории мультифизического подобия установок замкнутого водоснабжения (УЗВ) и гидробионтов. В УЗВ рыбы выращиваются в замкнутом пространстве, где все условия жизни контролируются и оптимизируются для достижения максимальной продуктивности. В таких системах рыбы получают пищу в автоматическом режиме, а качество воды регулируется специальными системами фильтрации и очистки. Это позволяет увеличить скорость роста рыб и получить высокое качество продукции. Однако для эффективного управления УЗВ необходимо иметь информацию о состоянии рыб и условиях их содержания. Для этого используются различные методы мониторинга, такие как измерение параметров воды, наблюдение за поведением рыб, анализ состава пищи и т.д. Одной из основных задач УЗВ является управление популяцией рыб. Это включает в себя контроль над ростом и размножением рыб, а также предотвращение возникновения болезней и других проблем. Для этого используются различные методы, включая генетические исследования, вакцинацию и применение антибиотиков. Важной частью работы в УЗВ является также разработка новых технологий и методов выращивания рыб. Это может включать в себя использование новых кормовых смесей, оптимизацию условий содержания рыб, а также внедрение новых технологий, таких как использование искусственного интеллекта и машинного обучения. В целом развитие рыбоводства и аквакультуры является важным направлением развития сельского хозяйства и пищевой промышленности. Оно позволяет удовлетворить растущий спрос на рыбные продукты, а также снизить негативное воздействие на природные ресурсы. В этом процессе ключевую роль играют научные исследования и технологические разработки, которые позволяют улучшать условия содержания рыб и повышать их продуктивность. Изучение параметров УЗВ и роста гидробионтов для управления ими возможно с помощью теории мультифизического подобия. В статье приводятся результаты мультифизического подобия установки замкнутого водоснабжения и карпа, выращенного в УЗВ-модели и в натуре.

**Ключевые слова:** мультифизическое подобие, УЗВ, установка замкнутого водоснабжения, гидробионт, карп

**Финансирование:** исследование выполнено в ООО «Лаборатория цифровых технологий» за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00010, <https://rscf.ru/project/23-21-00010/>.

**Для цитирования:** Недоступ А. А., Ражев А. О., Суконнов Д. В. Мультифизическое подобие в замкнутой системе «УЗВ – гидробионт» // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 68, № 2. С. 111–120.

## FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

### Multiphysical similarity in the closed system «RAS – hydrobiont»

Aleksandr A. Nedostup<sup>1</sup>, Alexey O. Razhev<sup>2</sup>, Daniil V. Sukonnov<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

<sup>2,3</sup> DigiTech Laboratory, Kaliningrad, Russia

<sup>1</sup> [nedostup@klgtu.ru](mailto:nedostup@klgtu.ru); <http://orcid.org/0000-0002-3851-0984>

<sup>2</sup> [root@digitechlab.ru](mailto:root@digitechlab.ru); <http://orcid.org/0000-0002-0983-834X>

<sup>3</sup> [sdv@digitechlab.ru](mailto:sdv@digitechlab.ru); <http://orcid.org/0009-0005-1795-7196>

**Abstract.** The article presents the implementation of the theory of the multiphysical similarity of recirculating aquaculture system (RAS) and hydrobionts. In the RAS, fish are grown in a confined space where all living conditions are controlled and optimized to achieve maximum productivity. In such systems, fish receive food automatically, and the water quality is regulated by special filtration and purification systems. This allows you to increase the growth rate of fish and get high quality products. However, for effective management of the RAS, it is necessary to have information about the condition of fish and their conditions of detention. To do this, various monitoring methods are used, such as measuring water parameters, observing fish behavior, analyzing the composition of food, etc. One of the main tasks of the RAS is to manage the fish population. This includes controlling the growth and reproduction of fish, as well as preventing the occurrence of diseases and other problems. Various methods are used for this, including genetic research, vaccination and the use of antibiotics. The development of new technologies and methods of fish cultivation is also an important part of the work in the RAS. This may include the use of new feed mixtures, optimization of fish keeping conditions, as well as the introduction of new technologies, such as the use of artificial intelligence and machine learning. In general, the development of fish farming and aquaculture is an important direction for the development of agriculture and the food industry. It allows meeting the growing demand for fish products, as well as reducing the negative impact on natural resources. Scientific research and technological developments play a key role in this process, which make it possible to improve the conditions of fish keeping and increase their productivity. The study of the parameters of ultrasound and the growth of hydrobionts to control them is possible using the theory of multiphysical similarity. The article presents the results of the multiphysical similarity of the recirculating aquaculture system and carp grown in RAS model and in kind.

**Keywords:** multiphysical similarity, RAS, recirculating aquaculture system, hydrobiont, carp

**Funding:** the research was carried out in DigiTech Laboratory at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-21-00010), <https://rscf.ru/project/23-21-00010/>.

**For citation:** Nedostup A. A., Razhev A. O., Sukonov D. V. Multiphysical similarity in the closed system «RAS – hydrobiont». *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2024; 68(2):111–120. (in Russ.).

## Введение

Показателем эффективности, который отражает количество мощности  $W$ , выделяемой или поглощаемой для производства единицы продукции (в нашем случае гидробионта) или выполнения определенной работы (в нашем случае протекание процессов в установке замкнутого водоснабжения) за единицу времени [1]. Этот показатель может быть использован для сравнения производительности различных процессов или оборудования в аквакультуре. Назовем данный показатель «производительность сил» и обозначим его  $H$ . Мощность есть скорость выполнения работы, т.е. количество работы, которое совершается за единицу времени. Произведение силы на ускорение имеет физический смысл производительности сил.

Физическое моделирование [2] установок замкнутого водоснабжения [3] и гидробионтов представляет собой создание масштабных моделей систем водоснабжения и гидробиологических объектов с использованием физических принципов и законов. Эти модели позволяют проводить различные экспериментальные исследования, определять эффективность работы системы, выявлять возможные проблемы и разрабатывать методы их решения. Физическое моделирование позволяет проверять различные гипотезы и теории, а также определять оптимальные параметры системы для достижения максимальной производительности и эффективности. Мультифизическое подобие гидробионта – это создание масштабной его модели, которая может двигаться и взаимодействовать с окружающей средой с использованием физических принципов и законов. Эта модель позволяет изучать различные аспекты поведения гидробионта, такие как ее скорость, маневренность, способность к плаванию в различных условиях и др. Также мультифизическое подобие гидробионтов может использоваться для тестирования различных гипотез и теорий, связанных с поведением рыб, а также для определения оптимальных параметров для улучшения ее производительности и выживаемости.

## Объекты и методы исследований

При выполнении правил мультифизического подобия установок замкнутого водоснабжения (далее – УЗВ) и гидробионта, который выращивается в УЗВ, необходимо воспользоваться натурными данными по УЗВ и гидробионта. Рассмотрим УЗВ, в которой выращивается карп (*Cyprinus carpio L.*) (рис. 1), схема которой представлена на рис. 2.

На рис. 1 и 2 изображены: бассейн; механический фильтр; биофильтр; ультрафиолетовый обеззараживатель (УФ-обеззараживание); дегазатор воды (удаление углекислого газа  $CO_2$ ); насос; дезинфектор; термостат; механический фильтр; устройство рН контроля; обогатитель кислорода  $O_2$ ; кормораздатчик. Соединяющими элементами вышеприведенных устройств является трубопровод.

На рис. 3 изображены сеголетка и взрослая особь карпа (*Cyprinus carpio L.*).

В теории мультифизического подобия сооружений, конструкций и живых объектов нужно учитывать необходимые и достаточные условия моделирования, а также автомодельность по числам подобия.

Для определения масштабов подобия и критериев подобия воспользуемся разработанными авторами статьи Ражевым А. О. и Недоступом А. А. программами для ЭВМ «Масштабы мультифизического подобия процессов рыбоводства» (рис. 4) и «Критерии подобия процессов рыбоводства» (рис. 5).



а) бассейны с лампой



б) биофильтр



в) насос



г) УФ-обеззараживание



д) механический фильтр



е) система трубопроводов и УФ обеззараживание

Рис. 1. УЗВ для выращивания карпа (*Cyprinus carpio L.*)  
 Fig. 1. RAS for growing carp (*Cyprinus carpio L.*)

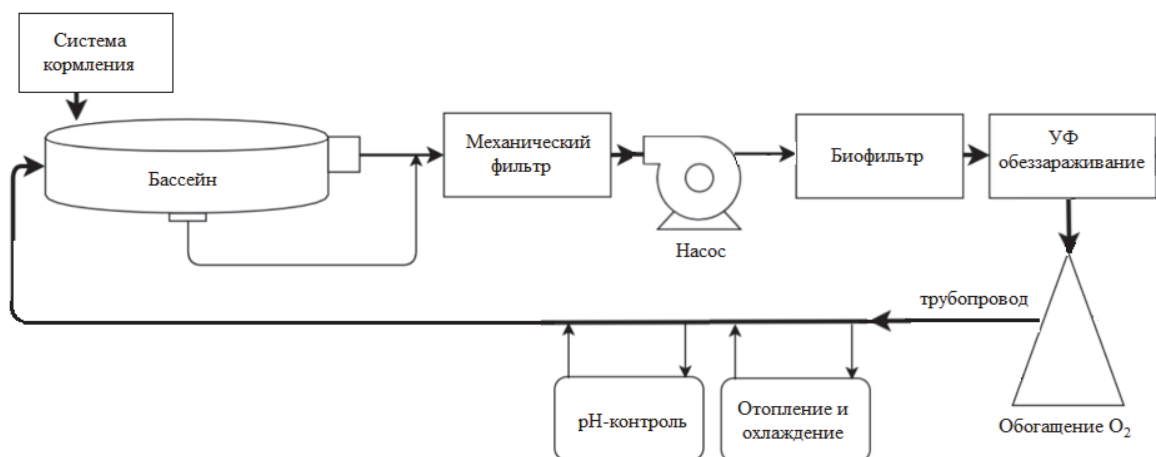


Рис. 2. Схема УЗВ  
 Fig. 2. RAS diagram



сеголетка

взрослая особь карпа

Рис. 3. Сеголетка и взрослая особь карпа (*Cyprinus carpio L.*)  
Fig. 3. Juvenile and adult carp (*Cyprinus carpio L.*)

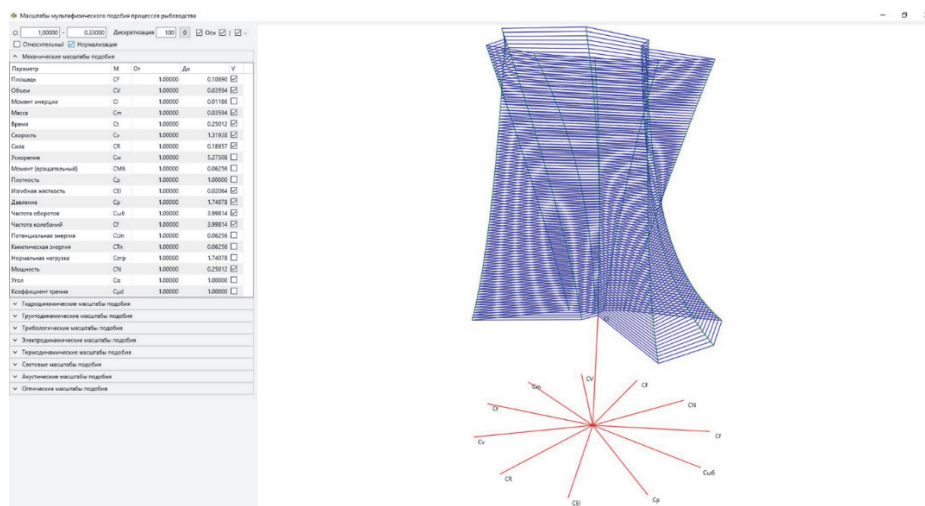


Рис. 4. Программа для ЭВМ «Масштабы мультифизического подобия процессов рыбоводства»  
Fig. 4. Computer program «Scales of multiphysical similarity of fish farming processes»

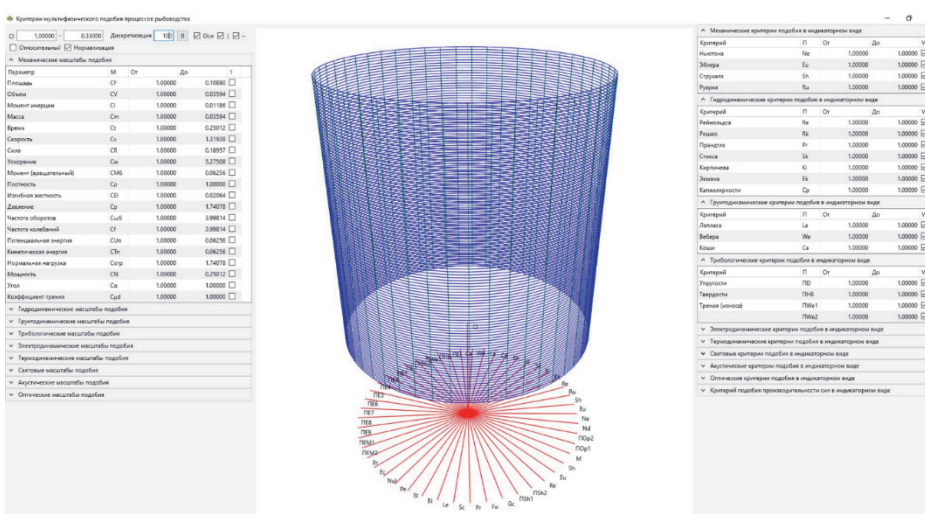


Рис. 5. Программа для ЭВМ «Критерии подобия процессов рыбоводства»  
Fig. 5. Computer program «Criteria for similarity of fish farming processes»

Программы для ЭВМ предназначены для расчета масштабов и критериев подобия процессов рыбоводства, а также их анализа зависимостей между масштабами подобия, степени подобия по масштабным эффектам, в том числе визуального в трехмерном представлении, выполнимости критериев подобия в мультифизических областях (биомеханика, механика, гидродинамика и др.) применительно к УЗВ и объектам выращивания.

В табл. 1 приведены основные масштабы подобия УЗВ и их диапазоны.

Таблица 1

**Масштабы подобия УЗВ**

Table 1

**The scale of similarity closed water supply installations**

Наименование	Обозначение	Диапазон
Масштаб геометрических характеристик	$C_l$	0,33 ÷ 1,0
Масштаб скорости	$C_v$	1,32 ÷ 1,0
Масштаб частоты водооборотов	$C_f$	4 ÷ 1
Масштаб сил	$C_R$	0,19 ÷ 1,0
Масштаб массы	$C_m$	0,036 ÷ 1,0
Масштаб разницы температур	$C_{\Delta T}$	0,19 ÷ 1,0
Масштаб теплопроводности	$C_\alpha$	0,435 ÷ 1,0
Масштаб освещенности	$C_{Ev}$	2,3 ÷ 1,0
Масштаб светимости	$C_{Mv}$	2,3 ÷ 1,0
Масштаб мощности	$C_N$	0,25 ÷ 1

В табл. 2 приведены основные масштабы подобия видовых и поведенческих параметров гидробионта.

Таблица 2

**Масштабы подобия видовых и поведенческих параметров гидробионта**

Table 2

**The scale of similarity of species and behavioral parameters of a hydrobiont**

Параметр	Масштаб подобия
1	2
Количество особей в бассейне $n$	1
Длина $L$ , м	$C_l$
Ширина $Z$ , м	$C_l$
Высота $H$ , м	$C_l$
Масса $m_i$ , кг	$C_m$
Коэффициент демпфирования $a_{i1}$ , кг·с/м <sup>2</sup>	$C_m/C_w$
Номинальная скорость $a_{i2}$ , м/с	$C_v$
Максимальная скорость $a_{i3}$ , м/с	$C_v$
Реакция особи при отходе от препятствия $k_{wi}^+$ , кг/м	$C_m/C_l$
Реакция особи при подходе к препятствию $k_{wi}^-$ , кг/м	$C_m/C_l$
Видимость при отходе от препятствия $d^-$ , м	$C_l$
Видимость при подходе к препятствию $d^+$ , м	$C_l$
Реакция на ближнее присутствие карпа $k_{bi1}$ , кг·м/(с <sup>2</sup> ·10 <sup>-5</sup> )	$C_R$
Реакция на дальнее присутствие карпа $k_{bi2}$ , кг·м/(с <sup>2</sup> ·10 <sup>-5</sup> )	$C_R$
Реакция на движение $k_{ci}$ , кг/с·10 <sup>-3</sup>	$C_m/C_t$

Окончание табл. 2

1	2
Средняя видимость карпа $\alpha_{i1}$ , м · 10 <sup>-2</sup>	$C_l$
Предельная видимость карпа $\alpha_{i2}$ , м	$C_l$
Видимость движения карпа $\delta_i$ , м	$C_l$
Степень взаимодействия карпов в бассейне $M_i$	1
Активность карпа $r_i$ , Н	$C_R$
Начальная скорость карпа $v_{0i}$ , м/с	$C_v$

В табл. 2 применены следующие обозначения:  $C_l$  – масштаб геометрических характеристик;  $C_m$  – масштаб массы;  $C_w$  – масштаб ускорения;  $C_v$  – масштаб скорости;  $C_R$  – масштаб сил;  $C_t$  – масштаб времени.

Поведенческие параметры, указанные в табл. 2, выведены авторами статьи при разработке поведенческой модели гидробионтов в УЗВ [4]. На рис. 6 показана разработанная на основе указанной поведенческой модели программа для ЭВМ.

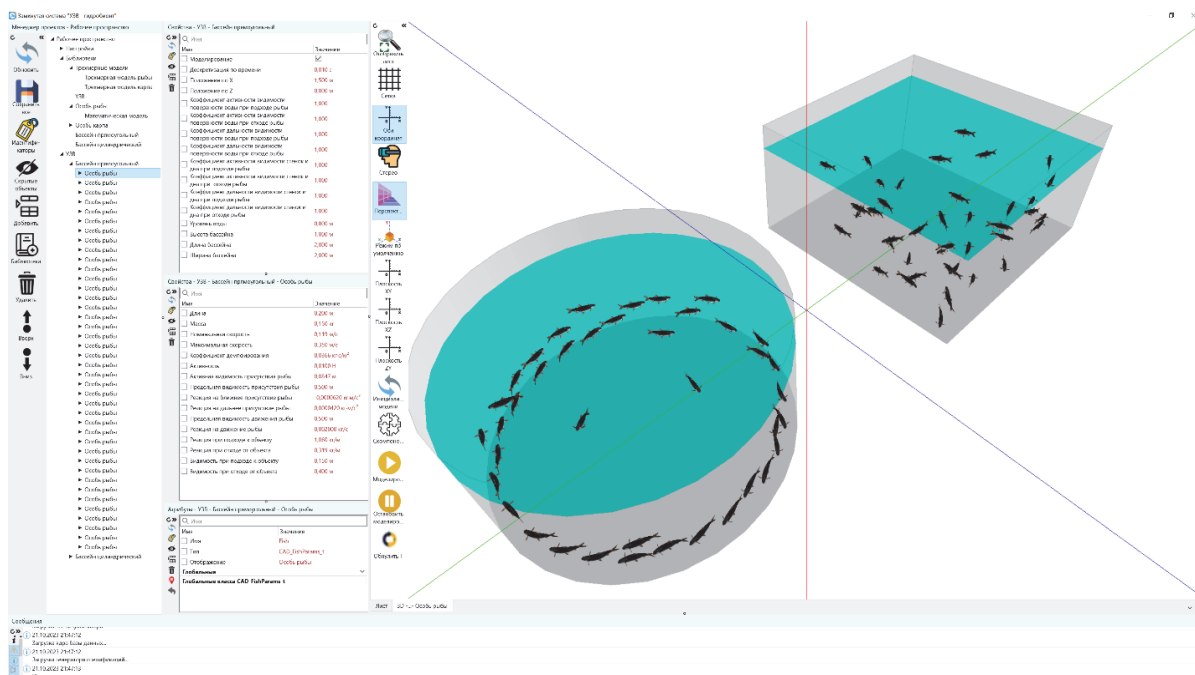


Рис. 6. Компьютерное моделирование замкнутой системы «УЗВ – гидробионт»

Fig. 6. Computer simulation of the closed system «RAS – hydrobiont»

Разработанная программа для ЭВМ позволяет моделировать поведение гидробионтов в бассейне прямоугольного или цилиндрического типа с детализацией до особи в трехмерной области. Основные функции программы: конструктор и компоновщик бассейнов УЗВ с гидробионтами; конструктор гидробионта, редактор поведенческих характеристик каждой особи; симулятор реального времени замкнутой системы «УЗВ – гидробионт»; 3D-визуализатор. В программе предусмотрена загрузка и выгрузка проекта УЗВ (параметры бассейнов и гидробионтов) и результатов моделирования.

### Результаты и их обсуждение

На основании полученных масштабов подобия на разработанной программе для ЭВМ, показанной на рис. 6, проведем численный эксперимент. Результаты эксперимента сопоста-

вимы с натурными данными, полученными в ходе замеров длины, массы и возраста сеголетки и взрослой особи карпа (*Cyprinus carpio L.*) при выборочных обловах в УЗВ.

В табл. 3 приведены основные характеристики сеголетки и взрослой особи карпа (*Cyprinus carpio L.*). В табл. 4 приведены основные характеристики экспериментальной УЗВ.

Сопоставим данные по росту карпа, полученные в результате численного эксперимента, с данными натурального эксперимента из табл. 3. Темпы роста отображены на графиках (рис. 7 и 8). На рис. 7 и 8 приводятся зависимости  $C_f=f(C_t)$ , где  $C_t$  – масштаб времени роста карпа, и  $C_f/C_t=f(C_t)$ , где  $C_f/C_t$  – масштаб приращения длины карпа.

На рис. 9 приведена имитация разработанной программой для ЭВМ взрослой особи карпа и сеголетки.

Таблица 3

**Характеристики сеголетки и взрослой особи карпа (*Cyprinus carpio L.*)**

Table 3

**Characteristics of juvenile and adult carp (*Cyprinus carpio L.*)**

Длина тела без хвостового плавника, промысловая длина $l$ , $\times 10^{-3}$ м	Масса $M$ , $\times 10^{-3}$ кг	Возраст $t$ , сут
Сеголетка (16.12.2022 г.)		
100,2	29,8	179
Сеголетка (07.04.2023 г.)		
125,1	63,4	291
Взрослая особь карпа (16.12.2022 г.)		
251,6	396	570
Взрослая особь карпа (07.04.2022 г.)		
281,8	669,5	682

Таблица 4

**Характеристики УЗВ**

Table 4

**Specifications closed water supply installations**

Диаметр $D$ , м	Высота $H$ , м	Объем воды $V$ , $\text{м}^3$	Плотность воды $\rho_w$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	Температура воды $T$ , $^{\circ}\text{C}$	Насыщение кислорода во- ды, $\text{мг}/\text{л } \text{O}_2$
Для выращивания сеголеток					
1,2 x 1,0	0,75	700	1000	22–24	7,0–8,2 (100–110 %)
Для выращивания взрослой особи карпа					
1,2 x 1,0	0,75	700	1000	22–24	7,0–8,2 (100–110 %)

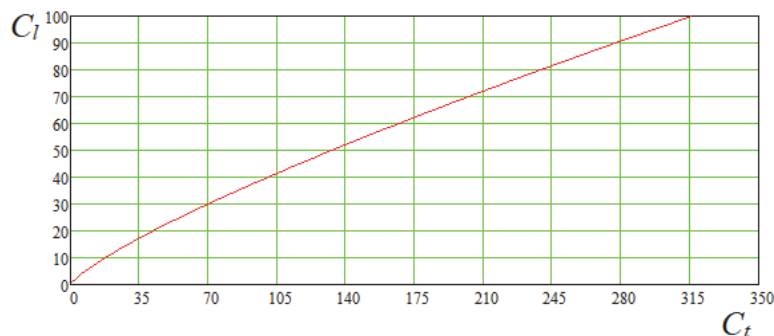


Рис. 7. Зависимость  $C_f=f(C_t)$   
Fig. 7.  $C_f=f(C_t)$  dependence



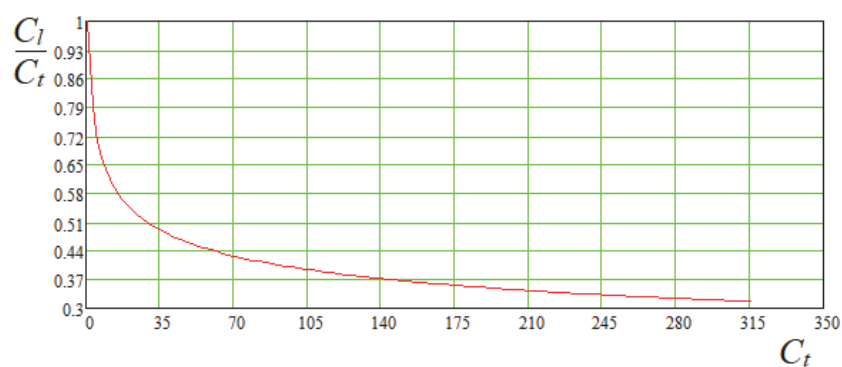


Рис. 8. Зависимость  $C_l/C_r=f(C_t)$   
Fig. 8.  $C_l/C_r=f(C_t)$  dependence

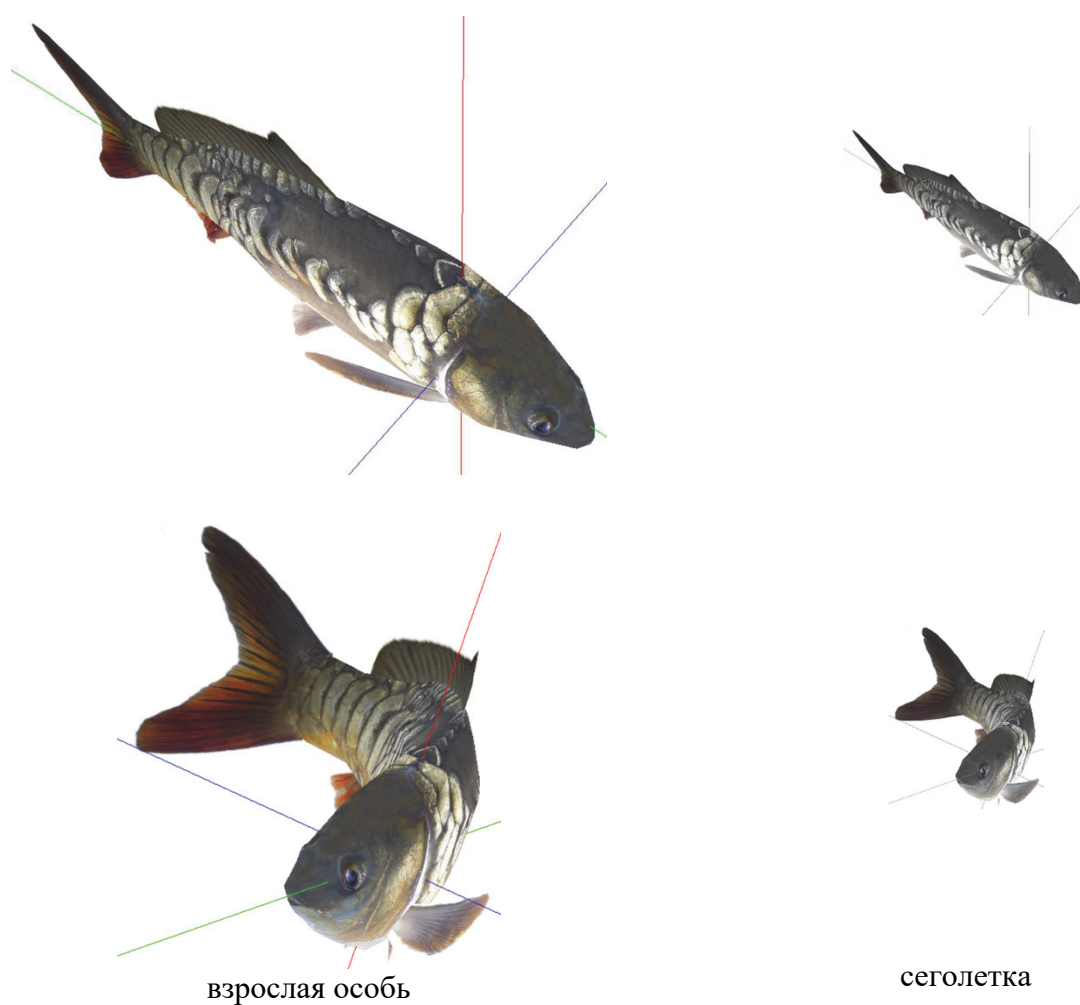


Рис. 9. Компьютерная имитация карпа  
Fig. 9. Computer simulation of a carp

При сравнительном анализе результатов погрешность расчетных характеристик не превышает 20 %, что приемлемо для рыбоводства.

### Заключение

По результатам сравнительного анализа численного (с использованием теории мультифизического подобия) и натурного экспериментов можно сделать вывод о возможности

применения теории мультифизического подобия при компьютерном моделировании гидробионтов в установке замкнутого водоснабжения с целью пересчета параметров поведенческой модели гидробионтов.

Описанный метод мультифизического подобия карпа и УЗВ является простым и отвечает всем предъявляемым к нему требованиям. Он основывается на сокращении размерностей физических величин. При этом обеспечивает выполнение главных условий – отношений параметров. Главное свойство такого метода заключается в том, что в некоторых случаях невозможно математически описать процессы, протекающие в УЗВ, но известно преобразование физической величины через масштаб геометрических характеристик  $Cl$ .

Результаты исследования можно применять при решении задач описания биомеханики гидробионтов в установках замкнутого водоснабжения с целью повышения рыбопродуктивности и экологичности рыбоводства, а также автоматизации процесса выращивания. Разработанные программы для ЭВМ предназначены для проведения научных исследований, проектирования и эксплуатации УЗВ, а также для поддержки процесса обучения.

### Список источников

1. Аси А. А., Релве П. Ф., Херем Х-Я. Э. Определение оптимальной производительности рыбоводной установки с замкнутым циклом водоснабжения // Индустриальное рыбоводство в замкнутых системах. Москва : ВНИИПРХ, 1985. С. 10–14.
2. Недоступ А. А. Правила физического моделирования динамических процессов рыбоводства // Рыбное хозяйство. 2011. № 4. С. 97–98.
3. Хрусталева Е. И., Молчанова К. А. Технические средства аквакультуры. Лососевые хозяйства : учебник. Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2021. 136 с.
4. Ражев А. О., Недоступ А. А. Компьютерная имитация поведения рыб в замкнутой системе водоснабжения // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4, ч. 1. С. 277–284. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.033.

### Сведения об авторах

А. А. Недоступ – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства, SPIN-код: 7035-5279, AuthorID: 393895.

А. О. Ражев – кандидат технических наук, генеральный директор, главный инженер Лаборатории цифровых технологий, ведущий научный сотрудник Калининградского государственного технического университета, SPIN-код: 4535-5888, AuthorID: 723215.

Д. В. Суконнов – инженер Лаборатории цифровых технологий.

### Information about the authors

A. A. Nedostup – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Commercial Fisheries, SPIN-code: 7035-5279, AuthorID: 393895.

A. O. Razhev – PhD, General Director, Chief Engineer of DigiTech Laboratory, Leading Researcher of Kaliningrad State Technical University, SPIN-code: 4535-5888, AuthorID: 723215.

D. V. Sukonnov – Engineer of DigiTech Laboratory.

Статья поступила в редакцию 06.03.2024; одобрена после рецензирования 24.05.2024; принята к публикации 10.06.2024.

The article was submitted 06.03.2024; approved after reviewing 24.05.2024; accepted for publication 10.06.2024.