

УДК: 629.12, 532.3

Моделирование формирований роботов, движущихся в водной среде

Е. П. Орлинский^а, П. С. Сорокоумов^б, Д. М. Павлов^с, М. В. Куземкин^д

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

E-mail: ^а Orlinsky_EP@nrcki.ru, ^б Sorokoumov_PS@nrcki.ru, ^с Pavlov_DM@nrcki.ru, ^д m.kuzemkin@mail.ru

Получено 17.04.2025, после доработки — 18.07.2025.

Принято к публикации 22.07.2025.

Групповое движение малоразмерных подводных аппаратов — важная прикладная задача. В работе приводятся результаты исследования влияния формации группы на характер ее движения. Оценка лобового сопротивления подводных аппаратов и обтекания потоков вокруг них — традиционная и хорошо известная область исследований. Однако выводы, сделанные для единичного робота, не всегда применимы к группе однотипных устройств из-за появляющихся при совместном движении физических эффектов, например волновой тени. Исходя из этого были исследованы гидродинамические характеристики определенных формаций роботов, движущихся как единое целое. В ходе работы изучались гидродинамические параметры систем с двумя основными типами движителей: локомоторными (аналогами рыбьих хвостов) и гребными винтами. Из соображений природоподобия рассматривались формации, аналогичные по структуре рыбьим косякам, затем оценивалась их применимость для роботов разных видов. Была определена связь между скоростью движения группировки и лобовым сопротивлением каждого из ее участников. Математическое моделирование обтекания группировки роботов проводилось при помощи метода конечных объемов двумя программными комплексами (FlowVision и OpenFoam). Показано, что роботы с винтовым движителем при размещении в тесных формациях мешают друг другу, а для локомоторного случая нахождение в зоне возмущения, наоборот, предпочтительно. Также при плохо обтекаемых корпусах отрывающиеся от поверхности потоки могут превращаться в узкие струи, сильно мешающие задним роботам. Установлено, что эффект водяной тени снижает затраты энергии только при малых скоростях движения — около 5 см/с; при больших скоростях движение в колоннах затрудняется для задних роботов. Кроме того, для рыбоподобного движителя не было выявлено большой разницы в лобовом сопротивлении между одиночным роботом и группой. Таким образом, программное моделирование позволило выработать и обосновать рекомендации по оптимизации построений роботов при групповом движении. Полученные результаты могут оказаться полезными для разработки подводных аппаратов, способных работать в группах, и средств управления ими.

Ключевые слова: групповая робототехника, подводная робототехника, FlowVision, OpenFoam, имитационное моделирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

UDC: 629.12, 532.3

Modeling formations of robots moving in an aquatic environment

E. P. Orlinsky^a, P. S. Sorokoumov^b, D. M. Pavlov^c, M. V. Kuzemkin^d

National Research Center “Kurchatov institute”,
1 Akademika Kurchatova sq., Moscow, 123182, Russia

E-mail: ^a Orilnsky_EP@nrcki.ru, ^b Sorokoumov_PS@nrcki.ru, ^c Pavlov_DM@nrcki.ru, ^d m.kuzemkin@mail.ru

Received 17.04.2025, after completion — 18.07.2025.

Accepted for publication 22.07.2025.

The objective of this study is to determine the best formations for the joint movement of a group of small robots in an aquatic environment. Estimation of drag of the flow is a traditional and well-known area of research, but it is not always valid to extend the conclusions made for a single robot to a group of similar devices due to the physical effects that appear during joint movement, such as a wave shadow. For these reasons, it is necessary to study the hydrodynamic characteristics of certain robot formations as a stable structure. The hydrodynamic parameters of systems with two main types of propulsion were studied: locomotive (fishtails) and propellers. Formations similar in structure to schools of fish were mainly considered, and then their applicability for robots of different types was assessed. The relationship between the speed of movement of the group and the drag of each of its participants was also studied. Mathematical modeling of the flow around a group of robots was performed using the finite volume method using two software packages (FlowVision and OpenFoam). Robots with a screw propeller interfere with each other when packed into tight formations, and for the locomotive case, being in the disturbance zone, on the contrary, is preferable. Also, with poorly streamlined bodies, flows separating from the surface can turn into narrow turbulent jets that greatly interfere with the rear robots. It has been established that wake effect reduces energy costs only at low speeds of movement — about 5 cm/s; at high speeds, movement in columns becomes difficult for the rear robots. No large difference in frontal resistance was found between a single robot and a group for a fish-like tail. The studies made it possible to develop and substantiate recommendations for optimizing robot designs for group movement.

Keywords: group robotics, aquatic robotics, FlowVision, OpenFoam, simulation modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2025, vol. 17, no. 4, pp. 601–620 (Russian).

The work was carried out within the state assignment of NRC “Kurchatov institute”.

1. Введение

Одним из перспективных направлений развития робототехники, в том числе подводной, является решение задач не единичным аппаратом, а группой автономных роботов. Это повышает надежность системы, например, делая ее малочувствительной к потере ряда членов группы. Типичными задачами групп автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) являются, например, скрытое наблюдение за прибрежной акваторией или исследование поведения подводных животных. Скрытый мониторинг подразумевает решение двух задач — совместного группового выдвижения в заданный район и реализации в нем поискового поведения. При этом предполагается, что аппараты должны перемещаться компактными группами, целостность которых поддерживается локальной связью, причем затраты энергии в процессе движения желательно минимизировать. При разработке стратегии групповых действий весьма важно правильно оценивать взаимовлияние роботов, указывать наилучшие пути объединения их в формацию. Понятно, что натурные испытания подобных систем весьма трудоемки из-за необходимости создания сразу нескольких идентичных роботов с полной измерительной аппаратурой в каждом из них; инфраструктура сбора и обработки данных также весьма сложна. Поэтому при разработке групп АНПА имитационное моделирование может существенно снизить затраты труда и времени.

В лаборатории робототехники НИЦ «Курчатовский институт» ведется разработка малогабаритных подводных биоподобных роботов, предназначенных для действий в составе групп. Один из них — ГНПА-1 (рис. 1), малый аппарат, предназначенный для отработки методов группового перемещения и отработки средств связи. Управляется он двумя гребными винтами в задней части корпуса.

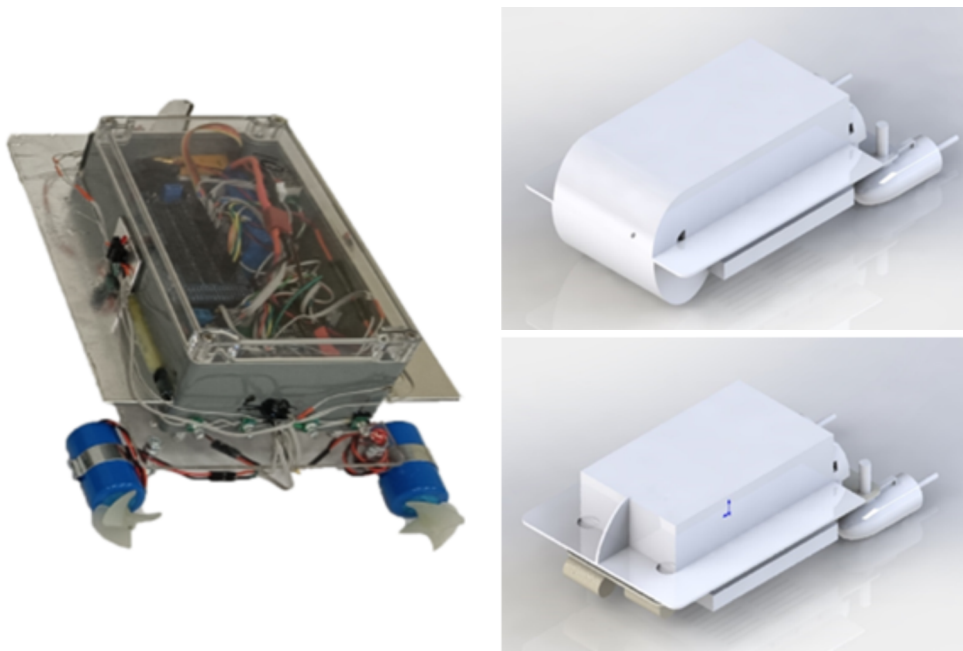


Рис. 1. Робот ГНПА-1 с гребными винтами: прототип и трехмерные модели с разными формами лобовой части корпуса

Другой тип исследуемого подводного робота, БПР-М-22 (рис. 2), использует биоподобный движитель в виде рыбьего хвоста.

Предполагается, что эти роботы будут применяться в составе групп численностью до 5–7 участников для решения задач сбора данных и скрытого наблюдения. Биоподобие ро-

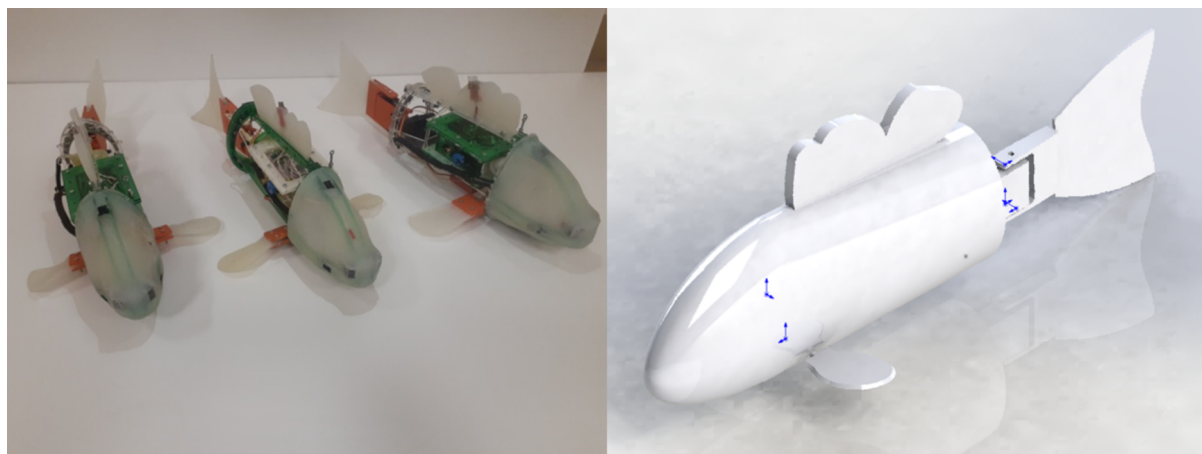


Рис. 2. Робот БПР-М-22 с локомоторным двигателем в форме рыбьего хвоста: прототипы и трехмерная модель

ботов БПР-М-22 может позволить им перемещаться под видом косяка рыб, не привлекая внимания, а в перспективе даже внедряться в состав групп рыб для сбора сведений из области морской биологии.

Фактором, определяющим эффективность совместного движения, является экономия энергии, повышающая автономность аппаратов. В настоящей работе приводятся результаты анализа сопротивления заданных строев АНПА, которые являются основой для решения задач синтеза оптимального строя, определения характеристик движения АНПА и т. д. с целью экономии энергии. Новизна использованного подхода заключается в явном измерении взаимовлияния аппаратов выстроенной определенным образом группы с применением гидродинамической модели среды для снижения сопротивления среды. Полученные результаты позволяют сознательно выбирать подходящее для поставленных задач устройство группы и требуемые для него сенсоры и средства связи. Для группы роботов, образующей устойчивую формацию заданной формы, требуется оценить:

- 1) лобовое сопротивление и характер обтекания потоков;
- 2) характер возмущений (ламинарное или турбулентное течение);
- 3) влияние скорости на лобовое сопротивление.

Эти параметры для реальных аппаратов можно измерить экспериментально, но на ранних стадиях разработки проще и быстрее оценить их аналитически или прибегнуть к имитационному моделированию, чтобы отбросить заведомо неоптимальные решения и проводить эксперименты только с наиболее перспективными вариантами.

Из литературы известны подходы, позволяющие получить требуемые параметры аналитически в некоторых частных случаях. Так, у одиночных подводных аппаратов для описания профиля тел можно использовать полиномы различных степеней [Granville, 1969; Landweber, Gertler, 1950; Lyon, 1932]. Например, в [Lyon, 1932] граница исследуемого объекта представляется отклонением от центральной линии, которое выражено полиномом второй степени. В [Granville, 1969] двумерные и осесимметричные обтекаемые формы выражаются в виде подходящих полиномов. Существуют работы и по аппаратам иных форм, позволяющих явно выразить лобовое сопротивление: в [Myring, 1981] исследуются торпедообразные корпуса, в [Suman et al., 2010] — эллипсоидные, а в [Xia et al., 2009] — рыбоподобные. В современных работах для уточнения границ обтекаемых объектов учитывается не только лобовое сопротивление как таковое, но

и, например, робастность его оценки [Alam et al., 2011], влияние фазовых переходов [Shereena et al., 2013], распределение давления на поверхности аппарата [Leifsson et al., 2013]. Так как для форм корпусов планируемых систем, обусловленных их задачами, получить аналитические оценки перечисленными способами весьма сложно, было решено прибегнуть к имитационному моделированию.

Несмотря на то что методы гидродинамики в приложении к одиночным роботам используются давно и хорошо себя зарекомендовали, их применение в групповой робототехнике остается ограниченным. Часто даже в широких обзорных работах [Ali et al., 2024; Shahzad et al., 2023; Zhou et al., 2022] важность соответствующих задач для водных роботов вовсе не отмечается: среди перечисляемых проблем наиболее насущными считаются вопросы восприятия, коммуникации и групповой иерархии, а гидродинамические эффекты предполагается компенсировать стандартными средствами управления. Иногда такой подход оправдывается предположением о сферичности используемых роботов [Bao et al., 2022; Kim, 2023], которое не всегда выполняется при экспериментах в реальной среде. Помимо этого, при разработке биоподобных систем зачастую делают акцент на воспроизведении движения реальных рыбьих стай для быстрого получения работоспособного прототипа системы. При этом многие стадии проектирования, в том числе моделирование, часто для ускорения разработки не проводятся. Обосновывается это возможностью точного переноса свойств рыб, которые успешно действуют вместе, на их технические аналоги [Connor et al., 2023; Duan et al., 2023]. Это обоснование не всегда можно считать оправданным. Например при организации кольцевого движения [Tarnini, 2024] гидродинамические эффекты слишком сильно зависят от движителей и геометрии роботов. Наконец, некоторые подходы при обучении с подкреплением позволяют неявно включить в систему управления роботов сведения об их гидродинамике [Chu et al., 2025]. При успешном обучении это может обеспечить нужное поведение, но постоянная проблема обучающих алгоритмов — зависимость результата от выборки — снижает надежность этих методов.

Тем не менее в последнее время появляется все больше работ, рассматривающих гидродинамическое моделирование как неотъемлемую часть разработки многоагентных водных систем. В статье [Ko et al., 2023] оно проводится для задач группового движения, а в [Chen et al., 2024] — для обеспечения безопасности коллаборативного робота, работающего вместе с человеком-рыбальщиком; обзор [Zhang et al., 2024] подчеркивает важность моделирования для подводных роботов в целом.

Исходя из рассмотренных работ, можно сделать вывод о том, что наиболее используемым подходом в данной области является снижение лобового сопротивления каждого отдельного элемента группировки; минимизация же сопротивления всей формации целиком изучена пока недостаточно.

Для моделирования подводных роботов применяются разнообразные программные средства, как платные, так и находящиеся в свободном доступе. Комплекс Solidworks обеспечивает все стадии процесса конструирования систем, в том числе моделирование готовых изделий [Mohanty et al., 2023], но отличается высокой стоимостью и сложностями с лицензированием. В отличие от него комплекс российской разработки FlowVision специально создан для численного моделирования стационарных и нестационарных трехмерных течений жидкости и газа при любых скоростях потока (от дозвуковых до гиперзвуковых). Если говорить о свободно распространяемых программах, то весьма популярным и мощным является комплекс OpenFoam, также обеспечивающий работу с широким диапазоном моделей из разных областей физики. В указанных средствах автоматизированы многие рутинные операции: после загрузки сделанных в сторонних программах 3D-моделей исследуемых аппаратов они автоматически генерируют расчетную сетку, обрабатывают ограничения, собирают результаты моделирования и представляют их в удобной форме.

Так как априорная оценка адекватности моделей, получаемых в разных программных средствах, затруднена, а их возможности в значительной степени различаются, было решено провести моделирование нескольких формаций таких подводных аппаратов в программных комплексах FlowVision и OpenFoam. Далее в работе сначала описаны математическая модель, примененная при моделировании, затем состав разработанных имитационных моделей и результаты экспериментов с ними.

2. Методы

В качестве биологического аналога, с которым сравнивается экспериментальная модель в данном исследовании, рассматривается группа рыб во время движения или находящаяся в течении — ходовая стая [Касумян, Павлов, 2018]. Такие формации используются многими видами рыб для перемещения, что показывает их применимость к поставленной задаче даже при весьма ограниченном наборе сенсоров. При наблюдении сверху стаи имеют вытянутую заостренную форму, строго параллельную ориентацию рыб в направлении движения стаи или потока и изотропное расположение рыб в стае. Под изотропностью понимается смещение рыб относительно друг друга в горизонтальной плоскости в шахматном или ромбовидном порядке. При таком положении наступает равновесие между сближающими и отталкивающими силами. Под воздействием этих сил в горизонтальном сечении у структуры возникает систематичность, которую можно описать двумя параметрами (рис. 3): Rl — линейная дистанция (длина отрезка между одинаковыми частями двух соседних рыб), α — курсовой угол (угол между направлением движения и вектором линейной дистанции Rl). Вместо Rl можно использовать Rg — горизонтальный зазор (проекция Rl на плоскость лобового сопротивления).

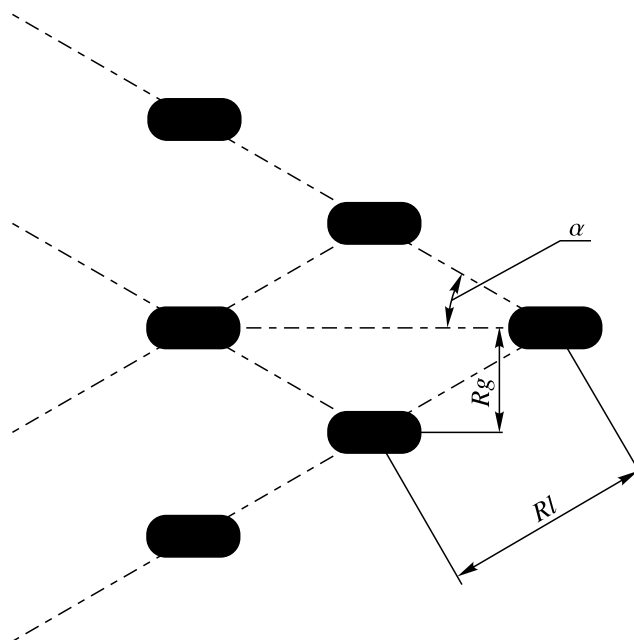


Рис. 3. Схема изотропной формации рыб в ходовой стае с геометрическими параметрами: Rl — линейная дистанция, α — курсовой угол, Rg — горизонтальный зазор

Ходовые стаи рыб, несмотря на изотропность, не являются абсолютно однородными и упорядоченными образованиями, а имеют своеобразную ячеистую структуру. Ячеистость стаи трудно выявить визуальными методами анализа, но она обнаруживается при математической обработке координат расположения отдельных особей в пространстве. Такие ячейки получили назва-

ние внутрискладных субгруппировок. Это позволяет предположить, что результаты исследований с небольшим количеством роботов можно будет перенести на более крупные формации.

Важным пунктом для дальнейшего исследования является определение характера течения, возникающего при движении платформ ГНПА-1 и БПР-М-22. Для этого необходимо оценить число Рейнольдса. Для ламинарного течения в водной среде данное значение должно быть меньше 2300, а при больших значениях поток становится турбулентным.

Для определения числа Рейнольдса будем использовать следующую формулу:

$$Re = \frac{\rho v D_r}{\eta},$$

где ρ — плотность жидкости, v — скорость движения платформы, D_r — гидравлический диаметр, η — динамическая вязкость среды. Учитывая тот факт, что роботы предполагается использовать в водоемах в составе плотной группы, в качестве гидравлического диаметра используется значение в 3 метра. Динамическая вязкость воды при комнатной температуре (при температуре 20 °C) составляет 1,002 мПа · с.

Для роботов ГНПА-1 и БПР-М-22 Re имеет величину порядка 10^5 – 10^6 , что соответствует высокотурбулентным значениям. В дальнейших математических экспериментах будут подбираться режимы, учитывающие данный факт.

Тип движения, используемый рыбами, называется локомоторным; выполняется такое движение ритмично повторяющимися циклическими движениями хвостового плавника. По разные стороны от него образуются области высокого и низкого давления, которые при смене направления отрываются от поверхности рыбы и постепенно затухают, образуя турбулизированный гидродинамический след. Этот след меняет распределение потоков воды вокруг движущихся объектов с формированием зоны волновой тени, которая характеризуется изменением структуры потока: уменьшением скорости воды и перераспределением давления. Эффект волновой тени оказывает значительное влияние на гидродинамическую среду и соседние объекты, что может осложнить работу многоагентных систем.

На краях волновой тени, окружающих область турбулентного потока, наблюдается повышение давления воды. Это явление связано с тем, что основному потоку жидкости, огибающему объект, приходится изменять свое направление. Такая зона границы называется зоной смещения, и именно здесь происходят наиболее заметные гидродинамические изменения.

Далее будут описаны две серии численных экспериментов с моделями роботов. Одна из них представляет собой исследование обтекания ранее описанной субгруппировки ходовой стаи ГНПА-1 (рис. 1), в том числе с дополнительным роботом позади формации. В другой серии исследовалось влияние линейной дистанции Rg и курсового угла α на лобовое сопротивление субгруппировки роботов БПР-М-22 (рис. 2). Задача заключалась в определении значений параметров, при которых будут наименьшими суммарное лобовое сопротивление и максимальное сопротивление самого нагруженного элемента формации.

3. Результаты

В экспериментальной части основное внимание уделено исследованию обтекающих потоков вокруг подводных аппаратов и влияния взаимного расположения подводных аппаратов на их лобовое сопротивление при движении.

Пространственное расположение рыб в стае, или структура стаи, изучается преимущественно на примере ходовых стай, где особи ориентированы параллельно друг другу, располагаясь на равном расстоянии и сохраняя почти горизонтальное положение тела. Например, у сайды средний угол наклона продольной оси тела составляет всего $0,9 \pm 5,4^\circ$ [Касумян, Павлов, 2018].

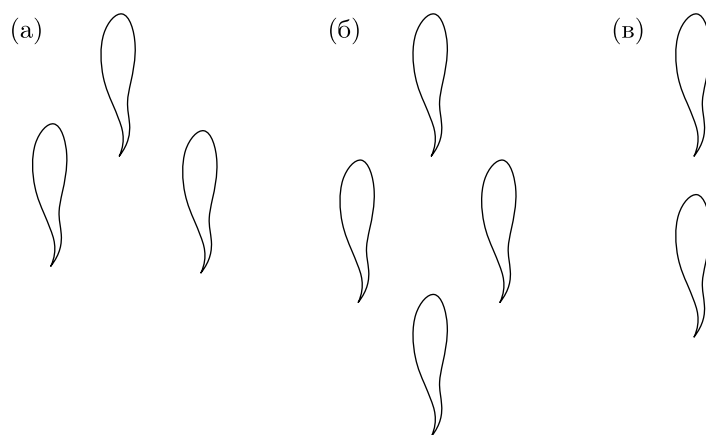


Рис. 4. Взаимное расположение рыб во внутрискладных субгруппировках: а) симметричный полный клин; б) заполненный клин из четырех рыб; в) линейное размещение рыб — колонна

В аналогичном ключе в ходе экспериментов все подводные аппараты также будут располагаться в одной горизонтальной плоскости, что позволит изучить их взаимодействие при параллельном движении.

Для исследования эффективности локомоторного движителя были выбраны формации, наблюдаемые у рыб в субгруппировках внутри стаи. В качестве наиболее распространенного построения был выбран симметричный клин [Касумян, Павлов, 2018], показанный на рис. 4, а. Проведение математических экспериментов на таких малых формациях позволяет масштабировать результаты на стаи с большим количеством элементов в группировке с небольшой погрешностью при затратах относительно небольших временных ресурсов. Это позволило провести несколько серий экспериментов.

Основной целью эксперимента является измерение значений лобового сопротивления в зависимости от линейной дистанции Rl между аппаратами, горизонтального зазора Rg и углов их расположения относительно друг друга [Касумян, Павлов, 2018].

Конкретные расстояния между роботами для модельных экспериментов с подводными аппаратами, работающими на гребном движителе, были выбраны на основании установленной биологами взаимозависимости расстояния между рыбами и их длины (рис. 5).

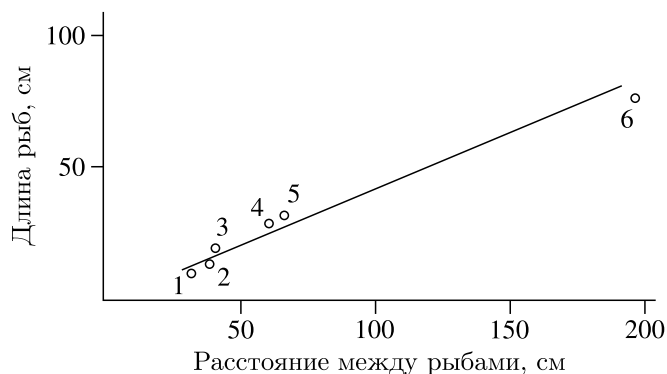


Рис. 5. График взаимозависимости типичного расстояния между особями в стае и их длины [Касумян, Павлов, 2018]

Далее описываются процесс моделирования, критерии выбора расстояний и углов расположения, а также полученные результаты для каждого из изучаемых типов формы корпуса и формаций.

3.1. Используемые программные комплексы

Для исследования обтекания жидкости вокруг роботов использовались два программных комплекса: FlowVision и OpenFoam. Использование первого было продиктовано легкостью моделирования подвижного рыбоподобного робота имеющимся функционалом «подвижное тело»; применение второго — широким распространением моделей на его основе в мировой практике, что облегчает сопоставление результатов с аналогами. Геометрические модели роботов были предварительно спроектированы в САПР SolidWorks, так как ни FlowVision, ни OpenFoam не позволяют строить трехмерные модели объектов, а импортируют их описания в распространенных форматах.

Моделируемая группа помещалась в параллелепипед с размерами $600 \times 300 \times 100$ см, чтобы уместить группу из пяти аппаратов, каждый из которых имел размер $36,55 \times 20 \times 12,65$ см, и область возмущения среды. Поверхность модели задавалась в граничных условиях как непроницаемая; передняя (лобовая) грань параллелепипеда — как вход потока, имеющего на ней постоянную скорость; задняя — как свободный выход воды. Гребной винт моделировался описанным вокруг него цилиндром, боковые грани которого непроницаемы, а через основания поток проходит с постоянной скоростью 5 см/с, которая обеспечивается применяемыми в работе моторами. Боковые поверхности параллелепипеда описаны как плоскости симметрии — твердые поверхности, на которых реализуются условия непротекания и проскальзывания для переменной «скорость»; для остальных переменных установлен нулевой градиент.

Моделируемая область первоначально разделялась на кубические ячейки со стороной 8 см, которая в дальнейшем детализировалась и подгонялась под форму модели автоматическими процедурами соответствующих программных комплексов. Для трех слоев ячеек вокруг поверхности роботов была задана адаптация третьего уровня. Во время расчета сетка дополнительно адаптировалась по таким параметрам: давление, градиент давления, скорость потока и градиент скорости потока. Для оптимизации расчета в динамический процесс формирования сетки был добавлен механизм объединения ячеек, при условии, что до этого ячейка была адаптирована ранее описанными другими механизмами, но необходимость в этом в данный момент отпала. Особо полезным данный механизм был у рыбоподобных роботов при исследовании хвоста. Поскольку для моделирования подвижного хвоста аппарата БПР-М-22 использовалось условие «подвижное тело», в расчетах были учтены пристеночные функции. Максимальный расчетный шаг для исследования обтекания роботов с гребными движителями составил 0,02 с, с локомоторными — 0,0025 с из-за более высоких требований к детализации при моделировании подвижных тел. Необходимое время моделирования оценивалась по приближению наблюдаемых величин к асимптотам.

Все расчеты проводились при нормальных условиях. Влияние силы тяжести и прочих внешних сил ввиду условного равновесия не учитывалось. Нагрузка на отдельный аппарат создается исключительно набегающим потоком с учетом его неоднородности, если это не лидер.

3.2. Предварительные эксперименты

При планировании первых экспериментов группы роботов с гребными винтами наметилась неопределенность с предполагаемыми результатами для роботов, не стоящих в первом ряду ходовой стаи. С одной стороны, первые ряды рассекают поток и создают за собой зону низкого давления, что обеспечивает более слабое лобовое сопротивление для задних рядов. С другой стороны, движение вперед вызвано работой гребных винтов, которые создают поток, направленный на задние ряды. Исходя из этой неопределенности, было решено провести серию экспериментов на группировке «заполненный клин». Данная формация была выбрана в качестве первой исследуемой формации из-за ее схожести с передней частью реальных ходовых стай.

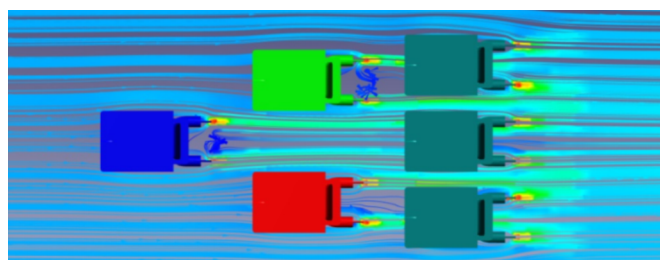
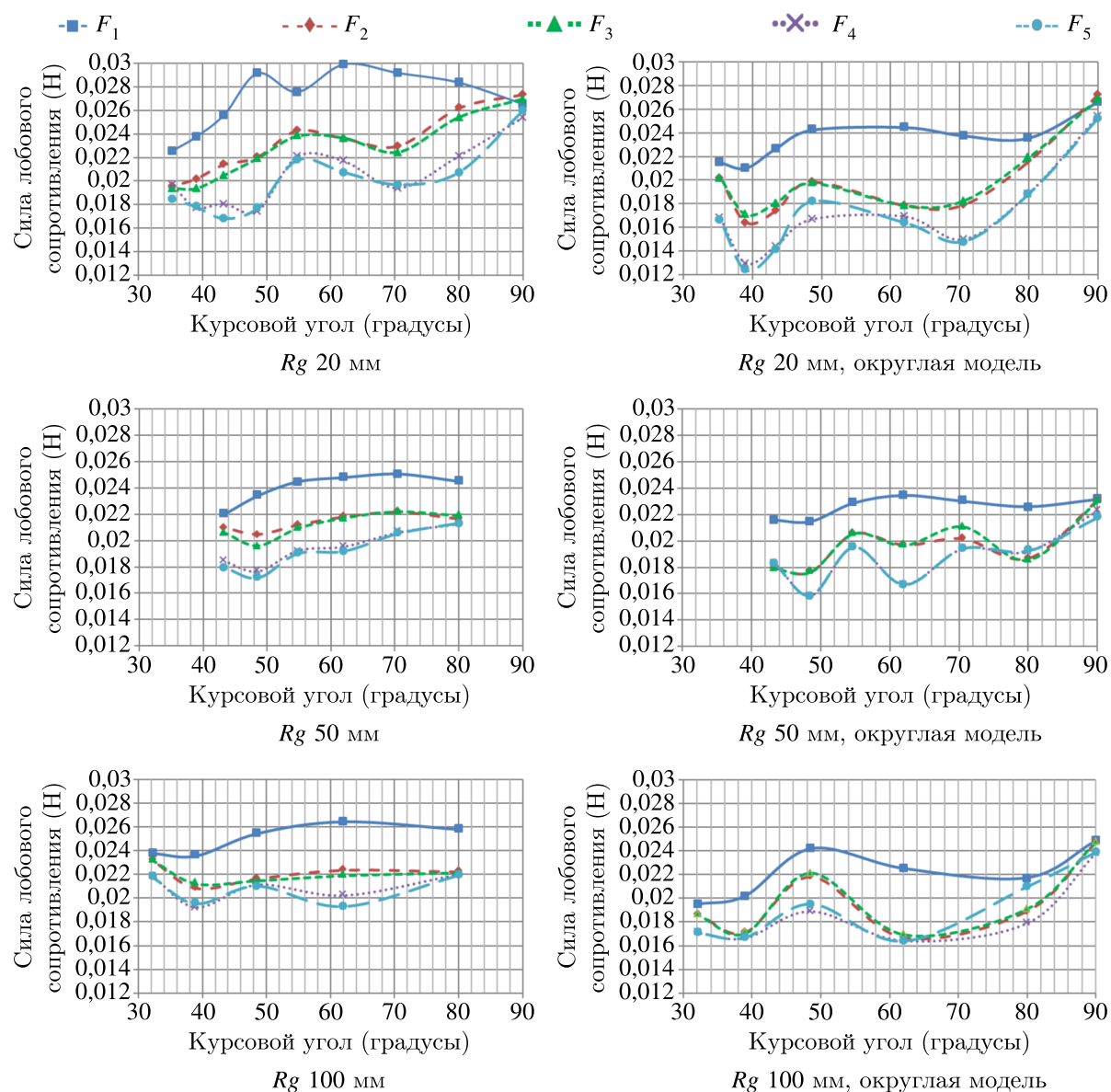


Рис. 6. Эпюра скоростей с линиями тока для построения «заполненный клин» в FlowVision

Рис. 7. Зависимость силы лобового сопротивления от курсового угла и горизонтального зазора для ГНПА-1 с разными формами лобовой части: прямолинейной (слева) и с округлением (справа), полученная в программном комплексе FlowVision. Формация «полый клин» состоит из пяти роботов; передний обозначен как F_1 , его соседи слева и справа — как F_2 и F_3 , а замыкающие роботы слева и справа — как F_4 и F_5

Для изучения данного случая в среде FlowVision было проведено математическое моделирование формации «заполненный клин» (рис. 6). Во время проведения математического эксперимента использовалась модель турбулентности типа KEFV (k-ε FlowVision). Данную модель можно использовать как в низкорейнольдсовых, так и в высокорейнольдсовых расчетах.

Оказалось, что силы лобового сопротивления для роботов в первом и втором рядах имеют почти одинаковые значения в 0,018 Н. Эпюра скоростей показывает, что завихрения от передних гребных винтов упираются в третий ряд, что увеличивает действующую на него силу в 2–2,5 раза. Исходя из этого, было решено исключить внутренних агентов из основных серий экспериментов формации роботов с малым курсовым углом α .

После этого была проведена серия экспериментов в формации «полый клин» с курсовым углом α от 35 до 90° при постоянных горизонтальных зазорах R_g в 20, 50 и 100 мм (рис. 7).

На данных графиках можно наблюдать, как меняются силы в зависимости от курсового угла α . При движении в шеренге, что соответствует курсовому углу $\alpha = 90^\circ$, лобовое сопротивление роботов было примерно одинаковым и составляло 0,025–0,027 Н, то есть больше, чем для одиночной модели (0,018 Н). Это может быть связано с тем, что при обтекании одиночной модели поток может смещаться вбок, а в шеренге такая возможность затруднена, что приводит к снижению ходовых свойств.

С понижением курсового угла α ситуация начинает меняться. На модели с округленным корпусом происходит уменьшение всех сил вплоть до 50°, когда как на обычной происходит сначала повышение сопротивления, затем падение. Данное явление можно объяснить тем, что из-за резких изгибов поверхности при возрастающей нагрузке на ведущего робота зона воздействия модели увеличивается, что усложняет обтекание. После 60° наблюдаются локальные повышения сопротивлений.

При увеличении горизонтального зазора R_g между моделями влияние их друг на друга ослабевает. Это приводит к уменьшению значений лобового сопротивления в целом, а также темпов их убывания при изменении курсового угла α во время перехода от шеренги к колонне.

3.3. Выбор расположения роботов для основной части экспериментов

На основании предварительных экспериментов произошло разделение исследуемых формаций для различных видов движителей. Для локомоторных движителей исследования будут проводиться на основании субгруппировок (рис. 4). В случае гребных движителей изменение формаций будет идти в сторону изымания центральных элементов из клина (рис. 6).

Оптимальные положения при различных значениях линейного расстояния для БПР-М-22

Для анализа взаимодействия между аппаратами в различных конфигурациях были выбраны следующие расположения:

- заполненный клин из четырех аппаратов (т. е. ромб),
- несимметричный клин,
- линейное размещение аппаратов в одну колонну.

Данные эксперименты выявили ключевые аспекты, касающиеся как эффективности передвижения, так и устойчивости аппаратов в различных формах расположения, что имеет практическое значение для разработки более эффективных подводных систем. Для движения хвоста в ходе экспериментов был задан период, равный 1 секунде, что позволило обеспечить выполнение всех ключевых требований:

- 1) плавность движения: отсутствие резких изменений в траектории или скорости перемещения аппаратов;

- 2) отсутствие импульсной нагрузки: движение остается равномерным, исключая скачки нагрузки;
- 3) соответствие граничным условиям: все перемещения и взаимодействия аппаратов учитывали заранее заданные параметры среды и технические ограничения;
- 4) соответствие естественным аналогам: эмпирически задан угол наклона хвоста в каждую сторону равным 45° , что позволило воспроизвести естественные движения, характерные для живых организмов, и повысить реалистичность перемещения аппаратов.

Исходя из требований, был подобран синусоидальный закон изменения скорости вращения хвоста:

$$w = \frac{\pi^2}{2} \cos 2\pi t.$$

Оптимальные положения при различных значениях линейного расстояния для ГНПА-1

Для исследования взаимного влияния расположения подводных аппаратов на лобовое сопротивление были выбраны несколько базовых конфигураций, имитирующих переднюю часть ходовой стаи рыб. В рамках экспериментов с гребным движителем рассматривались три варианта: заполненный клин, колонна и полый клин (рис. 4). Каждый из этих вариантов моделирует разные сценарии расстановки, которые могут существенно повлиять на гидродинамическое сопротивление, создавая различные потоки и зоны низкого давления вокруг аппаратов.

В частности, для полого клина была проведена серия модельных экспериментов, в ходе которых варьировались горизонтальный зазор и линейная дистанция при прочих равных условиях. Эксперименты по Rg включали значения 20, 50 и 100 мм с курсовыми углами от 30° до 90° . Для Rl использовались расстояния 400, 500, 600, 750 и 900 мм при курсовых углах от 10° до 50° . Данные параметры позволят провести детальный анализ влияния Rg и Rl на лобовое сопротивление при различных угловых конфигурациях.

При исследовании обтекания группировки роботов в формации «полый клин» моделирование проводилось в OpenFoam с параметрами, максимально приближенными к использованным во FlowVision. Для этого понадобилось дополнительное внесение адаптаций в сетку: были добавлены адаптация по поверхности сходная FlowVision и дополнительная ручная адаптация сетки позади гребневых двигателей. Параметры поверхностей роботов и граней были описаны теми же моделями, что и ранее. Благодаря симметрии группы моделирование оказалось возможным провести для половины клина, после чего результаты были дополнительно скорректированы.

3.4. Результаты для роботов с гребными движителями

Для каждого значения линейного расстояния были определены оптимальные углы расположения подводных аппаратов, при которых достигается минимальное лобовое сопротивление (табл. 1).

Таблица 1. Оптимальные курсовые углы для различных форм обтекателя и формаций

Линейная дистанция Rl (м)	Оптимальный угол для закругленной формы α ($^\circ$)	Лобовое сопротивление F_x для закругленной формы (Н)	Оптимальный угол для плоской формы α ($^\circ$)	Лобовое сопротивление F_x для плоской формы (Н)
0,4	45	0,082	50	0,097
0,5	35	0,081	25	0,092
0,6	35	0,080	40	0,093
0,75	40	0,080	40	0,093
0,9	20	0,080	20	0,093

Из таблицы 1 следует, что наилучший результат для робота с закругленным обтекателем достигается на диапазоне Rl от 0,6 до 0,75 м, а для плоского — 0,5 м. Это может происходить из-за того, что воздействие впереди стоящих роботов на задние ряды снижается по мере увеличения линейной дистанции (см. файл с дополнительной информацией).

Влияние угла на лобовое сопротивление при больших значениях: при уменьшении углов между подводными аппаратами наблюдается резкое возрастание лобового сопротивления, что объясняется направлением потоков от гребных винтов одного аппарата прямо на следующий (рис. 8). При малых курсовых углах α корпуса задних роботов оказываются под влиянием набегающих потоков от винтов, что значительно увеличивает лобовое сопротивление. Это особенно важно при исследовании групповой динамики, когда происходит подбор оптимальной формации для снижения сил сопротивления.

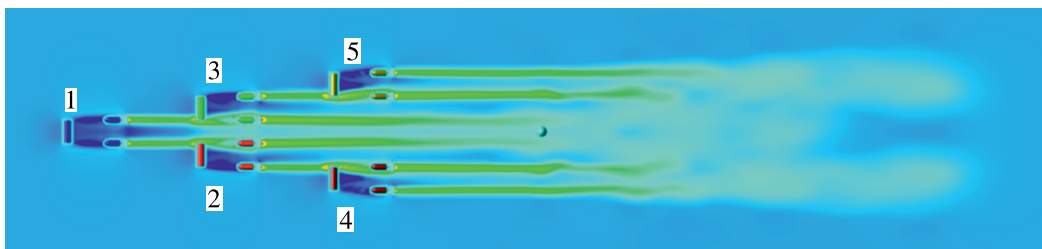


Рис. 8. Пример воздействия гребных винтов лидера на следующие за ним аппараты в программном комплексе FlowVision

Влияние расстояния и курсового угла α на силу лобового сопротивления на первый подводный аппарат (лидер). В экспериментах наибольшее лобовое сопротивление испытывает первый аппарат в группе, что отражается в собранных данных. С увеличением линейного расстояния и уменьшением курсового угла α сила сопротивления на первый аппарат возрастает. Это позволяет предположить, что увеличение расстояния Rl и уменьшение угла α способствуют улучшению гидродинамической обтекаемости и уменьшению лобового сопротивления, создаваемого следующими аппаратами, но с ростом линейного расстояния влияние угла α падает.

Сравнение силы лобового сопротивления для симметричных роботов. Для симметрично расположенных роботов (2 и 3, а также 4 и 5, рис. 8) значения лобового сопротивления совпадают, что обусловлено идентичностью их положения в группе относительно друг друга и направления потока. Это симметричное расположение позволяет достичь равномерного распределения лобового сопротивления и минимизировать асимметричные турбулентные потоки, обеспечивая более эффективное движение.

Рассматриваемые пары аппаратов показывают отчетливую противофазную зависимость, которая становится слабее при увеличении линейной дистанции Rl между ними (рис. 9). С увеличением линейного расстояния между роботами колебания системы в целом становятся слабее, что указывает на снижение силы их взаимодействия.

Этот эффект можно объяснить тем, что на малых расстояниях элементы системы сильнее действуют друг на друга, вызывая более выраженную противофазу. При изменении курсового угла α на малых линейных дистанциях Rl , если основной обтекающий поток упирается в робота во втором ряду, на третий ряд воздействие ослабляется, и наоборот. С увеличением расстояния влияние уменьшается, и колебания постепенно затухают.

В целом подводные аппараты с угловатой и закругленной формой демонстрируют схожее поведение в ходе экспериментов. Оба типа аппаратов показывают аналогичные тенденции в изменении лобового сопротивления при различных условиях. Исследование показало, что лобовое сопротивление у аппаратов с угловатой формой в среднем на 14 % выше, чем у закругленных.

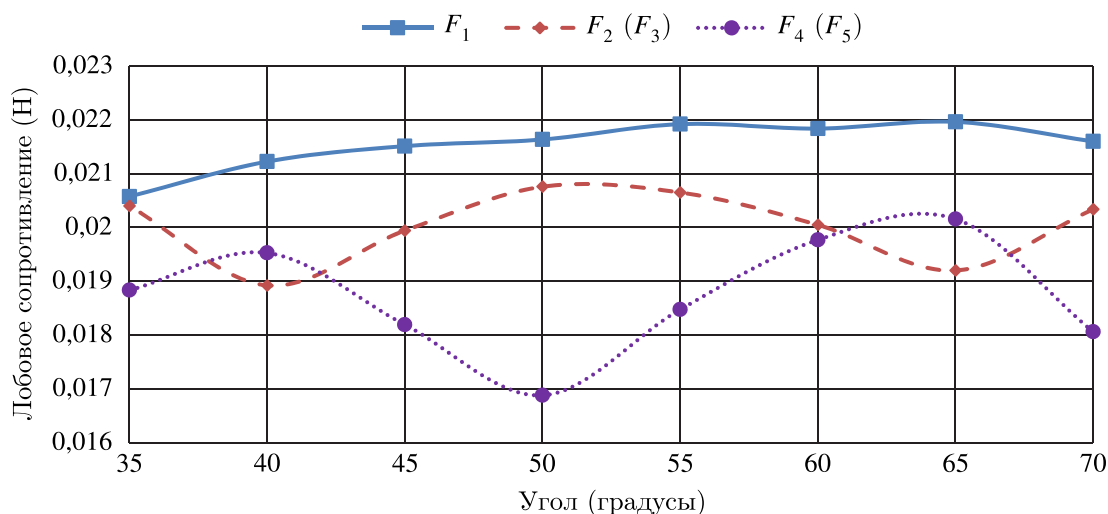


Рис. 9. Зависимость силы лобового сопротивления от курсового угла при линейной дистанции 0,4 м для ГНПА-1 с округленной формой, полученная в программном комплексе FlowVision

Это указывает на определенные отличия в их взаимодействии с водной средой и позволяет сделать вывод о влиянии формы корпуса на общее сопротивление движению.

3.5. Исследование зависимости лобового сопротивления от скорости движения

Моделирование показало, что в некоторых построениях ведомые аппараты испытывали меньшее лобовое сопротивление, чем ведущий. Была выдвинута гипотеза, что причиной данной аномалии является волновая тень (Wake effect). Были проведены дополнительные исследования, чтобы оценить возможность применения этого эффекта для формаций на более высоких скоростях.

В описанных ранее исследованиях набегающий поток во всех вариациях построений имел скорость 5 см/с. Натуральные эксперименты в бассейне показали, что роботы могут разгоняться до скорости 15 см/с. Поэтому для новой серии моделей были выбраны стандартные значения скоростей, равные 10, 15 и 20 см/с. После этого были проведены уточняющие расчеты по наиболее перспективному промежутку скоростей с шагом в 1 см/с. Испытания на скоростях меньше 5 см/с не проводились, так как такой низкой скорости не хватит для решения стоящих перед роботами задач.

В качестве значений для сравнения выбраны отношения лобового сопротивления второго аппарата к первому и третьего к первому. Во всех случаях процесс можно считать устоявшимся с десятой секунды расчета. Поэтому в качестве параметра для сравнения используются средние значения с 10-й по 40-ю секунду расчетов.

Для семи вариантов построения «полый клин» было проведено 27 дополнительных экспериментов. В данной статье показаны результаты одного основного и четырех дополнительных исследований для клина с $Rl = 0,5$ м и $\alpha = 45^\circ$. В таблице 2 приведены все исходные данные и результаты. При скорости в 5 см/с видно, что ведомым плыть легче, чем ведущему, а с увеличением скорости ведомые начинают испытывать большее лобовое сопротивление, чем ведущий. Это наглядно видно на рис. 10.

Во всех экспериментах проглядывается одна и та же тенденция: при увеличении скорости движения формации растет коэффициент отношений лобовых сопротивлений. Это значит, что использование эффекта волновой тени для снижения лобовых сопротивлений ведомых аппаратов эффективно только на малых скоростях, около 5 см/с.

Таблица 2. Сводная таблица результатов

Скорость, см/с	Лобовое сопротивление первого аппарата, Н	Отношение лобовых сопротивлений роботов 2-го ряда к лидеру	Отношение лобовых сопротивлений роботов 3-го ряда к лидеру
5	0,014	0,976	0,908
7	0,026	0,998	0,956
10	0,051	1,012	1,004
15	0,113	1,023	1,017
20	0,200	1,037	1,028

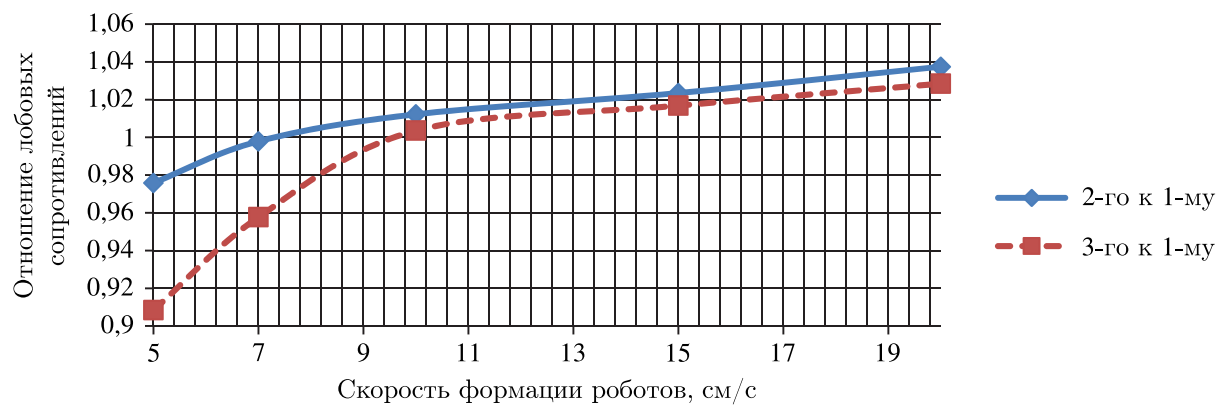


Рис. 10. График изменения коэффициентов отношений лобовых сопротивлений в зависимости от скорости формации роботов, полученный в программном комплексе OpenFoam

3.6. Результаты для роботов с локомоторными движителями

На графиках (рис. 11–13) представлены лобовые сопротивления, полученные при моделировании различных конфигураций БПР-М-22 в программном комплексе FlowVision: несимметричный клин из трех роботов (рис. 11), симметричный клин из четырех роботов (ромб, рис. 12) и колонна из двух роботов (рис. 13).

Можно выделить следующие очевидные особенности результатов:

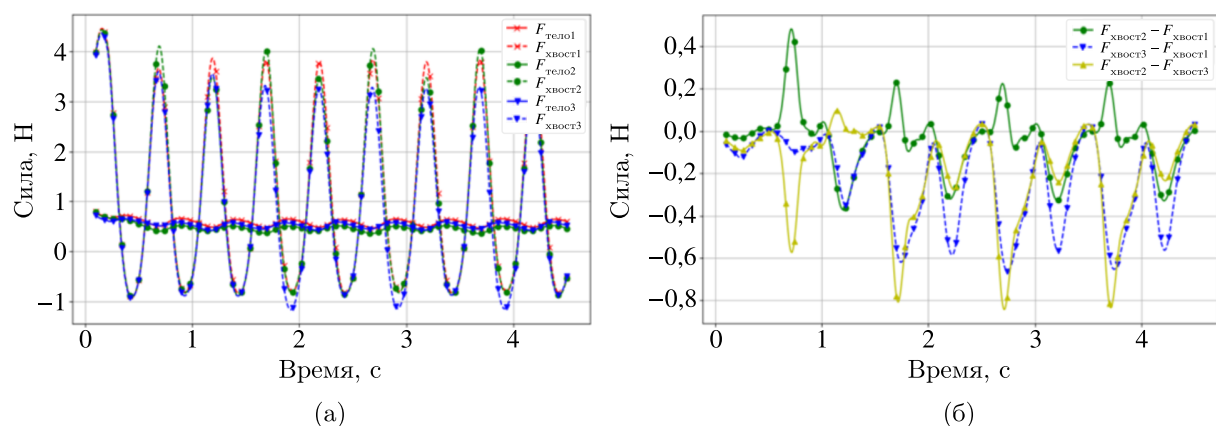


Рис. 11. (а) График зависимости лобовых сопротивлений для конфигурации из трех аппаратов БПР-М-22; (б) график разницы между лобовыми сопротивлениями аппаратов

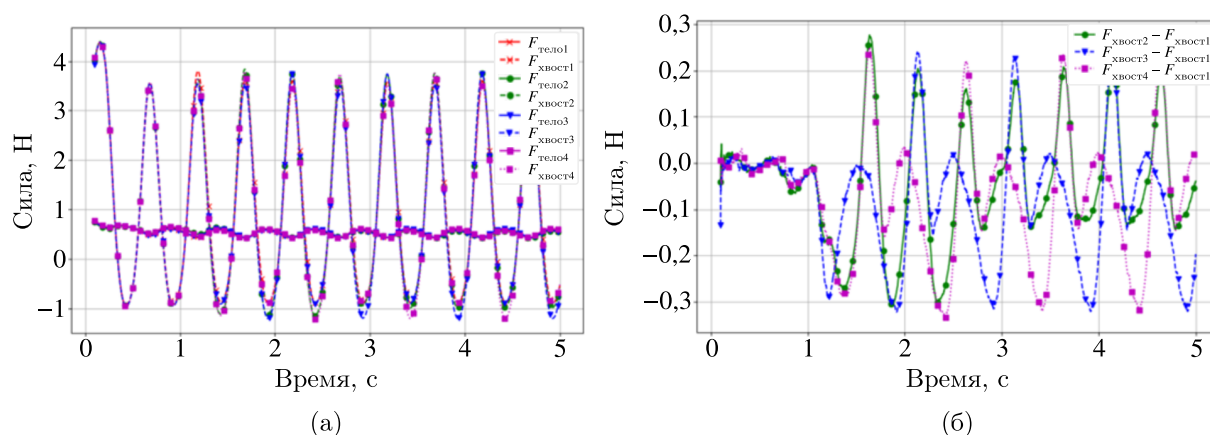


Рис. 12. (а) График зависимости лобовых сопротивлений для конфигурации из четырех аппаратов БПР-М-22; (б) график разницы между лобовыми сопротивлениями аппаратов

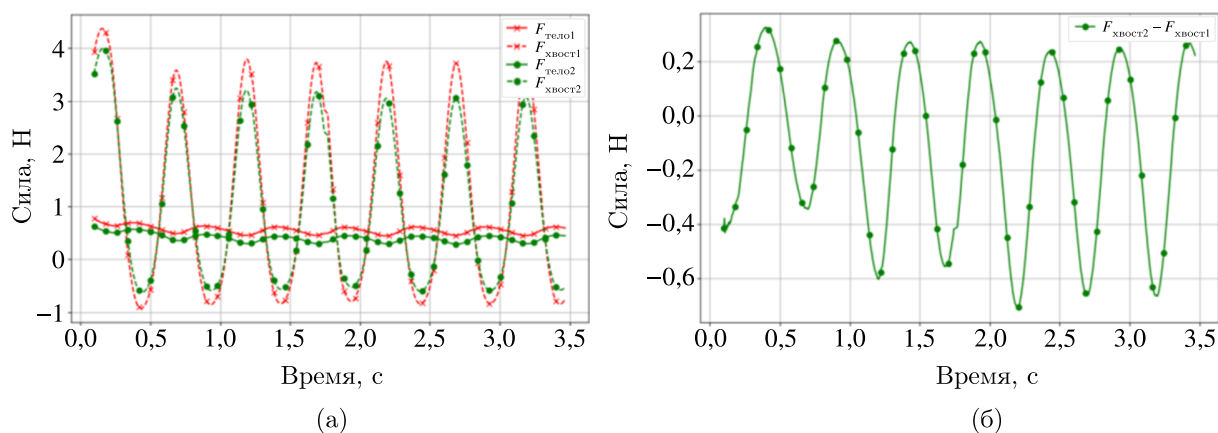


Рис. 13. (а) График зависимости лобовых сопротивлений для конфигурации из двух аппаратов БПР-М-22; б) график разницы между лобовыми сопротивлениями аппаратов

1. Периодичность изменений лобового сопротивления: на всех графиках отчетливо видна синусоидальная форма кривых, что указывает на периодические колебания сопротивления. Эти колебания вызваны движением хвоста.

2. Влияние локомоторных движителей: наблюдается, что некоторые из сопротивлений значительно различаются по величине. Отчетливее всего это выражается для конфигурации из двух роботов, когда они находятся друг за другом. В данном случае разница в пиковых значениях лобового сопротивления для хвостов может отличаться до 20 %, а суммарная — на 30–40 %. Примерно такую же закономерность можно обнаружить и на конфигурации с тремя роботами, расположенными в субгруппе.

3.7. Анализ каждой конфигурации БПР-М-22

При движении роботов в колонне всегда присутствует выраженный гидродинамический эффект водяной тени, который влияет на распределение лобового сопротивления между элементами группы.

Лидер группы, находящийся на передней позиции, сталкивается с наибольшим гидродинамическим сопротивлением (рис. 14). Он полностью взаимодействует с нерассеянным водным

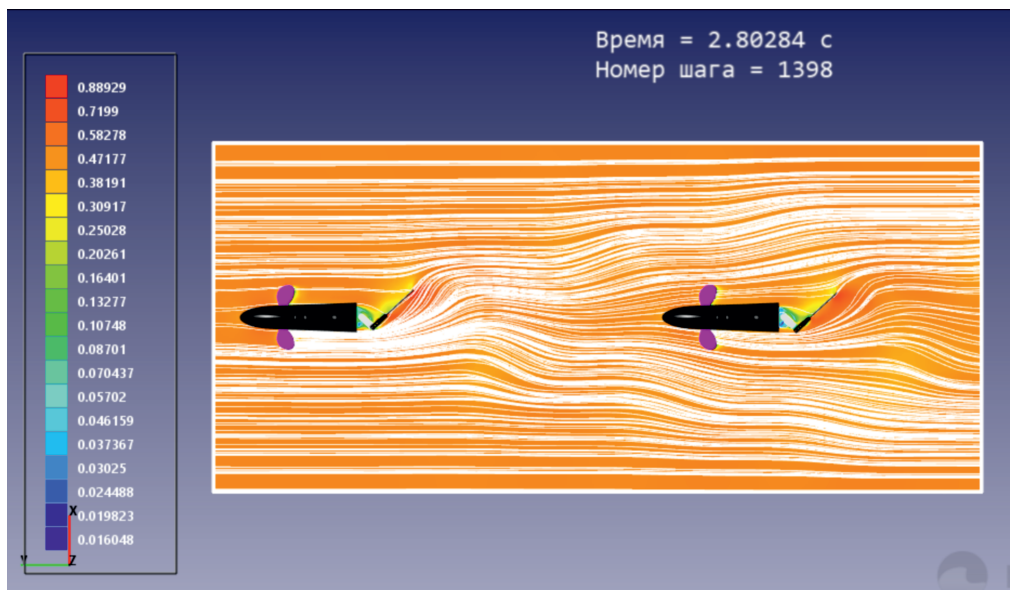


Рис. 14. Вид линий потока для конфигурации из двух аппаратов в программном комплексе FlowVision

поток, формируя за собой след. Амплитуда колебаний лобового сопротивления у лидера наиболее выражена, поскольку его движение непосредственно воздействует на окружающую среду.

Для второго робота, движущегося сразу за лидером, сопротивление существенно уменьшается. Это связано с тем, что он находится в зоне потока, где давление на его переднюю часть значительно ниже. В результате амплитуда колебаний сопротивления у второго робота также снижается, что дает заметное преимущество с точки зрения экономии энергии.

Для конфигурации из четырех роботов (рис. 15) оказалось, что лобовые сопротивления у всех роботов практически одинаковы. Это указывает на равномерное распределение гидродинамической нагрузки между участниками группы, что отличает эту конфигурацию от линейного построения.

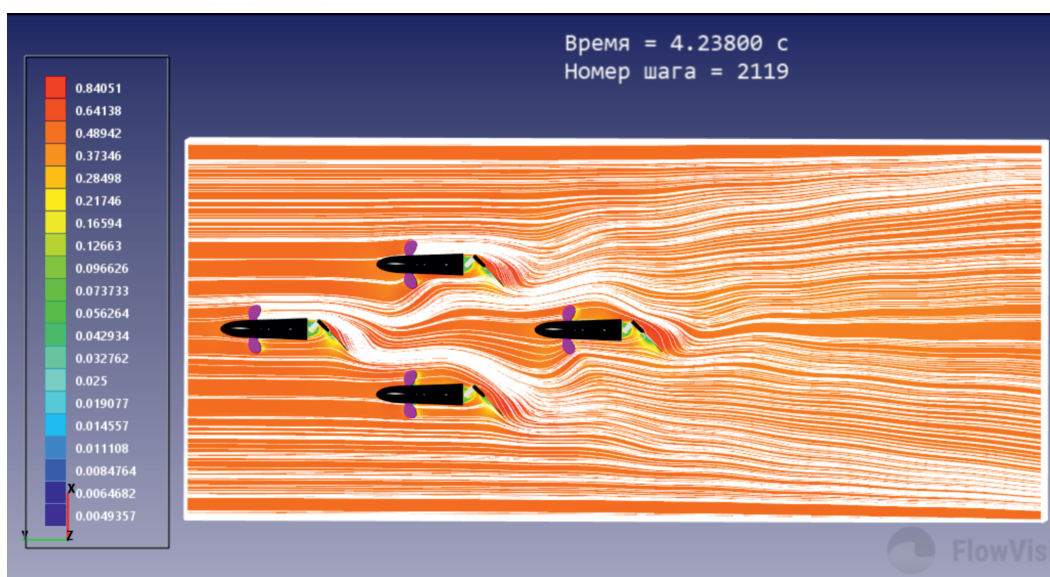


Рис. 15. Вид линий потока для конфигурации из четырех аппаратов в программном комплексе FlowVision

Равенство сопротивлений в данной конфигурации объясняется тем, что каждый робот находится в условиях частичного воздействия основного потока воды и турбулентных зон, создаваемых другими участниками группы. В отличие от других построений, где некоторые позиции оказываются более выгодными с точки зрения уменьшения сопротивления, в ромбовидной структуре наблюдается баланс сил. Турбулентные следы, формируемые каждым роботом, взаимно перекрывают друг друга, создавая относительно однородную среду для всех участников.

Для данной конфигурации (см. рис. 16) распределение лобового сопротивления между роботами имеет асимметричный характер. Эта конфигурация сочетает элементы линейного построения и групповой формации, что приводит к возникновению сложных гидродинамических взаимодействий между участниками.

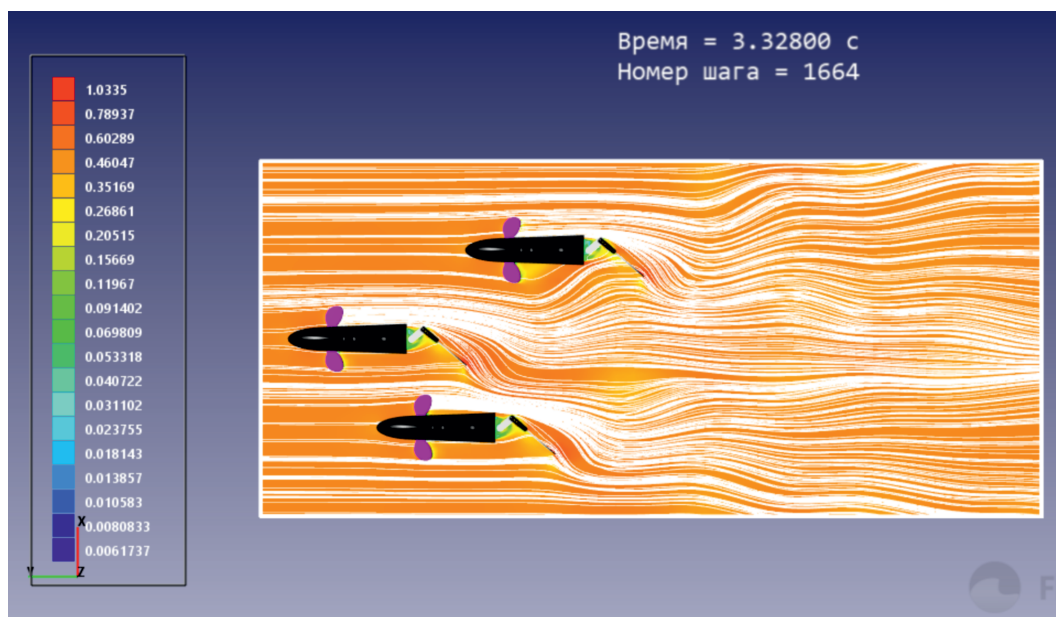


Рис. 16. Вид линий потока для конфигурации из трех аппаратов в программном комплексе FlowVision

Лидер группы, находящийся на передней позиции, как и в других построениях, испытывает наибольшее сопротивление. Он взаимодействует с нерассеянным основным потоком воды, создавая турбулентный след позади себя.

Роботы частично попадают под воздействие лидера. Это приводит к уменьшению их сопротивлений по сравнению с лидером, поскольку их передняя часть подвергается меньшему давлению. Однако из-за смещения роботы испытывают асимметричные гидродинамические силы: при повороте хвоста лидера к одному из роботов огибающий поток направляется на него. Данное явление можно наблюдать на рис. 16, где поток от хвоста лидера упирается в нижнего АНПА, а на рис. 12 четко видна периодичность на пиках графиков лобовых сопротивлений. Это может вызывать небольшие колебания или изменение направленности движения, что требует активного управления для поддержания устойчивости.

4. Заключение

В ходе проведения численных экспериментов было выяснено, что разные роботы, движущиеся в одной формации, испытывают существенно разное лобовое сопротивление. Это вызвано разным характером набегания воды. На ведомых роботов попадают потоки от движителей и огибающий от впереди идущих. Исходя из этого, стандартный подход, описанный в литературе по

данной тематике и направленный на оптимизацию формы одного конкретного робота, может не приводить к желаемым результатам. Исследование позволило получить некоторые новые результаты: оценить влияние среды сразу на всю группу роботов, выстроенную в используемую формацию, а не только на отдельных участников группы, и описать закономерности этого влияния на основании серии численных экспериментов с различными перспективными формациями. Этот комплексный подход позволяет приблизиться к оптимальной формации с точки зрения минимизации лобового сопротивления с учетом формы каждого конкретного обтекаемого объекта.

В ходе работы были получены следующие основные закономерности:

- обнаружена существенная разница в характере возмущений от локомоторных и гребных движителей;
- для аппаратов с гребными движителями-винтами типа ГНПА-1 предпочтительными являются формация «полый клин» при малых скоростях и «одиночное плавание» при больших;
- для аппаратов с локомоторным движителем типа БПР-М-22 самой выгодной формацией является колонна;
- при увеличении скорости формации ГНПА-1 эффект волновой тени начинает уменьшаться.

Была показана существенная разница в создаваемых возмущениях между локомоторным и гребным движителем. Так, в субгруппировке роботов с гребным винтом (ГНПА-1) расположение роботов в формации с малым курсовым углом приводит к повышенным нагрузкам для задних рядов. Были выявлены некоторые варианты построений, при которых за счет эффекта волновой тени снижалось лобовое сопротивление ведомых аппаратов. Проведенные эксперименты с изменением скорости показали, что данный эффект можно использовать только на низких скоростях (5 см/с).

Также было обнаружено, что если форма корпуса робота плохо обтекаема, то отрывающийся от ее поверхностей поток может преобразоваться в узкую турбулентную струю. Попадание в такую струю рядом с обтекаемым телом было замечено в виде локальных экстремумов на графиках (рис. 7) лобовых сопротивлений. Локальное исследование по добавлению простейшего обтекателя, закрывающего плохо обтекаемые конструктивные компоненты, улучшило показатели примерно на 14 %.

Для локомоторного случая (БПР-М-22) нахождение в зоне возмущения, наоборот, предпочтительно. При сравнении лобовых сопротивлений для рыбоподобного робота большой разницы между одиночным роботом и группой не отмечено. Это может означать, что для формирования их в группы основными причинами могут являться внешние факторы, определяемые спецификой решаемых задач: разведка, безопасность и т. д.

Список литературы (References)

- Касумян А. О., Павлов Д. С. Стайное поведение рыб. — М.: КМК, 2018. — 274 с.
Kasumyan A. O., Pavlov D. S. Stajnoe povedenie ryb [Schooling behavior of fish]. — Moscow: KMK, 2018. — 274 p. (in Russian).
- Alam K., Ray T., Anavatti S. G. Design of a toy submarine using underwater vehicle design optimization framework // IEEE SSCI 2011 Symp. Ser. Comput. Intell. — CIVTS 2011 IEEE Symp. Comput. Intell. Veh. Transp. Syst. — 2011. — P. 23–29.
- Ali Z. A., Alkhamash E. H., Hasan R. State-of-the-art flocking strategies for the collective motion of multi-robots // Machines. — 2024. — Vol. 12, No. 10. — P. 739.

- Bao P., Shi L., Chen Zh., Guo Sh.* A vision-based underwater formation control system design and implementation on small underwater spherical robots // *Machines*. — 2022. — Vol. 10, No. 10. — P. 877.
- Chen Y., Liu F., Shao J., Miao Y., Cao Y.* Analysis of hydrodynamic performance of underwater accompanying robot based on CFD // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2024. — Vol. 2808, No. 1. — P. 12013.
- Chu S., Huang Z., Li Y., Lin M., Carlucho I., Petillot Y.R., Yang C.* MarineGym: A high-performance reinforcement learning platform for underwater robotics // 2025. — <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09203>
- Connor J., Joordens M., Champion B.* Fish-inspired robotic algorithm: mimicking behaviour and communication of schooling fish // *Bioinspir. Biomim.* — 2023. — Vol. 18. — 066007.
- Duan H., Huo M., Fan Y.* From animal collective behaviors to swarm robotic cooperation // *Natl. Sci. Rev.* — 2023. — Vol. 10, No. 5. — nwad040.
- Granville P.S.* Geometrical characteristics of streamlined shapes. — Bethesda, MD, 1969. — 93 p.
- Kim J.* Leader-based flocking of multiple swarm robots in underwater environments // *Sensors*. — 2023. — Vol. 23, No. 11. — P. 5305.
- Ko H., Lauder G., Nagpal R.* The role of hydrodynamics in collective motions of fish schools and bioinspired underwater robots // *J. R. Soc. Interface*. — 2023. — Vol. 20. — 20230357.
- Landweber L., Gertler M.* Mathematical formulation of bodies of revolution. — Washington, D.C., 1950. — 76 p.
- Leifsson L., Koziel S., Ogurtsov S.* Hydrodynamic shape optimization of axisymmetric bodies using multi-fidelity modeling BT // *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications: International Conference, SIMULTECH 2011 Noordwijkerhout, The Netherlands, July 29–31, 2011* / eds. N. Pina, J. Kacprzyk, J. Filipe. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. — P. 209–223.
- Lyon H.M.* The effect of turbulence on the drag of airship models. — Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Aeronautical Engineering, 1932.
- Mohanty R., Patnaik S., Kumar Behera R., Kumar Sahoo A., Kumar Muduli R., Kumar Pradhan S., Sarangi M.* A novel technique for modelling of an Underwater Robotic Vehicle // *Mater. Today Proc.* — 2023. — Vol. 80. — P. 202–206.
- Myring D.F.* A theoretical study of the effects of body shape and mach number on the drag of bodies of revolution in subcritical axisymmetric flow. — Farnborough, UK, 1981. — 34 p.
- Shahzad M.M., Saeed Z., Akhtar A., Munawar H., Yousaf M.H., Baloach N.K., Hussain F.* A review of swarm robotics in a NutShell // *Drones*. — 2023. — Vol. 7, No. 4. — P. 269.
- Shereena S.G., Vengadesan S., Idichandy V.G., Bhattacharyya S.K.* CFD study of drag reduction in axisymmetric underwater vehicles using air jets // *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* — 2013. — Vol. 7, No. 2. — P. 193–209.
- Suman K., Nageswara Rao D., Das H., Bhanu Kiran G.* Hydrodynamic performance evaluation of an ellipsoidal nose for a high speed under water vehicle // *Jordan J. Mech. Ind. Eng.* — 2010. — Vol. 4. — P. 641–652.
- Tarnini M.* Behavior-based formation control of H-SURF robot swarm through relative states. — Khalifa University, UAE, Mechanical & Nuclear Engineering dept., 2024.
- Xia D., Liu J., Chen W.* Shape selection on the flow drag characteristic passing a streamline fishlike body // *3rd Int. Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. — 2009. — P. 1–4.
- Zhang Z., Wang Q., Zhang S.* Review of computational fluid dynamics analysis in biomimetic applications for underwater vehicles // *Biomimetics*. — 2024. — Vol. 9, No. 2. — P. 79.
- Zhou Z., Liu J., Yu J.* A survey of underwater multi-robot systems // *IEEE/CAA J. Autom. Sin.* — 2022. — Vol. 9, No. 1. — P. 1–18.