

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДВОДНОГО БЕЗЭКИПАЖНОГО АППАРАТА

И. Н. Урваев¹, С. Н. Базыкин²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹iurvaev@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальной задачей современной робототехники является разработка и выпуск подводных безэкипажных аппаратов (ПБА). Современные ПБА позволяют проводить экологический и климатический мониторинг, океанологические исследования, обслуживание глубоководных систем и объектов, поиск подводных месторождений, охрану акваторий и др. Использование ПБА позволяет не только избавить человека от опасного труда, но и дает возможность проводить широкий спектр операций, принципиально недоступных человеку. Целью данной работы является исследование гидродинамики ПБА методами компьютерного моделирования для анализа его конструкции и уточнения режимов работы блоков системы управления движителем. *Материалы и методы.* Для решения поставленных задач в работе использовались методы трехмерного моделирования с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation. *Результаты.* Предложена методика моделирования обтекания подводного безэкипажного бионического аппарата водой и проведено исследование его гидродинамических параметров. *Вывод.* Предложенная методика моделирования позволяет в деталях оценивать и визуализировать характер взаимодействия подводного аппарата с водой и оптимизировать выбор конструктивных характеристик корпуса и блоков управления исполнительными механизмами, что существенно сокращает затраты времени и стоимость проведения работ на этапах осмысления, проектирования, внедрения и эксплуатации подводной техники.

Ключевые слова: безэкипажный подводный аппарат, бионические принципы движения, гидродинамические параметры, энергоэффективность, компьютерное моделирование

Для цитирования: Урваев И. Н., Базыкин С. Н. Имитационное моделирование гидродинамических параметров подводного безэкипажного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 58–67. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7

COMPUTER SIMULATION OF HYDRODYNAMICS OF AN UNMANNED UNDERWATER VEHICLE

I.N. Urvaev¹, S.N. Bazykin²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹iurvaev@mail.ru, ²cbazykin@yandex.ru

Abstract. *Background.* The current task of modern robotics is the development and production of unmanned underwater vehicles (UUV). Modern UUVs allow for environmental and climate monitoring, oceanographic research, servicing of deep-sea systems and objects, search for underwater deposits, protection of water areas, etc. The use of UUVs allows not only to relieve a person from dangerous work, but also makes it possible to carry out a wide range of operations that are fundamentally inaccessible to a person. The aim of the work is to study the hydrodynamics of an underwater vehicle to optimize its design and units of the propulsion control system at the early stages of its design. *Materials and methods.* To solve the tasks set in the work, three-dimensional modeling methods were used using the SolidWorks Flow Simulation software module. *Results.* A method for modeling the flow of water around an unmanned underwater bionic vehicle is proposed and its hydrodynamic parameters are studied. *Conclusion.* The proposed modeling method allows for a detailed assessment and visualization of the nature of the interaction of the underwater vehicle with water and optimization of the choice of design characteristics of the hull and control units of the actuators, which significantly reduces the time and cost of work at the stages of comprehension, design, implementation and operation of underwater equipment.

Keywords: unmanned underwater vehicle, bionic principles of motion, hydrodynamic parameters, energy efficiency, computer modeling

For citation: Urvaev I.N., Bazykin S.N. Computer simulation of hydrodynamics of an unmanned underwater vehicle. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):58–67. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-7

Введение

Актуальной задачей современной робототехники является разработка и выпуск подводных безэкипажных аппаратов (ПБА). ПБА – это устройства, предназначенные для работы под водой без привязки к внешней подводной технике или кабелю, подсоединенному к кораблю-носителю, ПБА обеспечивают выполнение возложенных на них задач без участия оператора [1, 2].

Современные ПБА позволяют проводить экологический и климатический мониторинг, океанологические исследования, обслуживание глубоководных систем и объектов, поиск подводных месторождений, охрану акваторий и др. Использование ПБА позволяет не только избавить человека от опасного труда, но и дает возможность проводить широкий спектр операций, принципиально недоступных человеку [1, 2].

На мореходные показатели качества ПБА большое влияние оказывают его гидродинамические параметры. В настоящее время основными способами их оценки являются натурные или стендовые испытания. Однако при этом возникает ряд сложностей как технического, так и фундаментального характера (трудоемкость изготовления аппаратов, проведения измерений, учета масштабного эффекта и т.п.). В связи с этим все большую популярность приобретают методы компьютерного моделирования, которые позволяют оценить гидродинамику и проработать целый ряд конструктивных решений уже на ранних стадиях создания ПБА [3, 4].

Целью данной работы является исследование гидродинамики ПБА методами компьютерного моделирования для анализа его конструкции и уточнения режимов работы блоков системы управления движителем.

Материалы и методы

Гидродинамику ПБА, влияющую на мореходные показатели качества ПБА, принято характеризовать следующими параметрами [5, 6]:

- гидродинамическое сопротивление, под которым понимают силу (F , H), противодействующую движению подводного аппарата в воде;
- скорость истечения потока, т.е. скорость, с которой вода покидает поверхность подводного объекта, что влияет на образование вихрей и, соответственно, сопротивление;
- гидростатическое давление, создаваемое водой на определенной глубине, которое влияет на структуру аппарата и его способность оставаться на поверхности или опускаться на дно;
- маневренность, под которой понимается способность аппарата изменять свою траекторию или скорость в ответ на управляющие действия;
- ходкость, под которой понимается способность осуществлять движение с максимальной скоростью хода при минимальных энергетических затратах.

Оптимизация гидродинамических параметров помогает достичь лучшей производительности ПБА и повысить его энергоэффективность. Для оценивания гидродинамических параметров исследуемый подводный аппарат можно представить как некоторое тело, совершающее перемещения в подводном пространстве, а оценивание его свойств осуществляется с помощью законов гидромеханики, описывающих движение тела в вязкой среде, как сопротивляющейся движению тела, так и активно воздействующей на него.

Однако на гидродинамические параметры ПБА оказывают влияние множество факторов, к основным из которых относятся следующие [7, 8]:

- форма аппарата: гидродинамика зависит от того, как аппарат спроектирован (например, более обтекаемые формы способствуют снижению гидродинамического сопротивления);
- геометрические размеры аппарата: большие объекты обычно вызывают большее сопротивление из-за увеличенной площади контактной поверхности;
- скорость движения аппарата: сопротивление увеличивается с ростом скорости;
- температура и плотность воды: эти параметры влияют на вязкость воды, что, в свою очередь, сказывается на сопротивлении.
- турбулентность потока: если вода вокруг объекта движется неравномерно, это может привести к увеличению сопротивления.

Наличие большого числа факторов, влияющих на гидродинамические параметры, усложняет расчет мореходных показателей качества ПБА, поэтому для их определения целесообразно использовать методы имитационного моделирования. В настоящее время существует достаточное количество компьютерных программ имитационного моделирования, таких как Siam Well Test, ANSYS fluent, COMSOL Multiphysics®, SolidWorks Flow Simulation и многие другие. Наиболее полно условиям моделирования для данной задачи отвечает программный модуль SolidWorks Flow Simulation. Выбор данного модуля объясняется такими его достоинствами, как дружелюбный к пользователю интерфейс; сокращение времени на задание каждого проекта; стабильность работы программы; возможность создавать геометрию и производить расчеты в одном программном комплексе; хорошее качество поверхностей, что крайне важно для гидродинамических расчетов [9].

Программа сама подбирает уровень адаптации области расчета вблизи поверхности твердого тела (в нашем случае корпуса ПБА) и в областях заметного изменения давления и скорости без участия пользователя; возможность отслеживания изменения величин сил и моментов в графическом и численном видах в процессе расчета; распараллеливание процесса расчета; широкие возможности постпроцессора для визуализации результатов расчета. Кроме того, программный модуль SolidWorks Flow Simulation позволяет выполнять все расчеты и анализы «в одном окне», что значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта данных [9].

Результаты

Естественный отбор обеспечил оптимальную конструкцию тела рыбы, приспособленность к ареалу обитания, условиям окружающей среды, повышенную эффективность перемещения, поэтому в работе отдано предпочтение ПБА с бионической формой корпуса. Такие ПБА имеют гибкую конструкцию, производят значительно меньше шума в процессе движения, обладают большей маневренностью и меньшим воздействием на окружающую обстановку (не поднимают ил со дна, тихо работают, оставляют менее заметный след на воде) [10].

Авторами предлагается конструкция ПБА бионического типа (рис. 1).

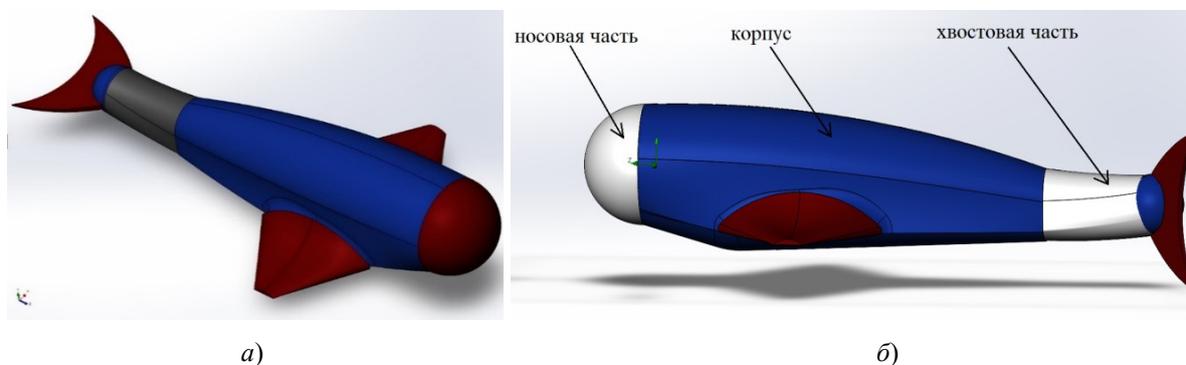


Рис. 1. ПБА бионического типа:
а – вид сбоку; б – вид сверху

Условно предложенную конструкцию подводного аппарата можно разбить на три части (рис. 1,б). Передняя часть – носовая, в ней располагают блоки, предназначенные для мониторинга и навигации. Средняя часть представляет корпус аппарата, в нем располагаются элементы питания и системы управления. Хвостовая часть разработанного аппарата состоит из симметричного хвоста и движителей, прикрепленных к основанию корпуса аппарата, которые за счет линейного перемещения позволяют совершать разные виды движения в воде, например, вертикальное, как у тунца, и горизонтальное, как у дельфина.

Выбранный тип движителя позволяет обеспечить шесть степеней свободы: параметры x, y, z представляют поступательные скорости, а q, r, p представляют собой угловые скорости, измеренные относительно x_b, y_b, z_b координат (рис. 2).

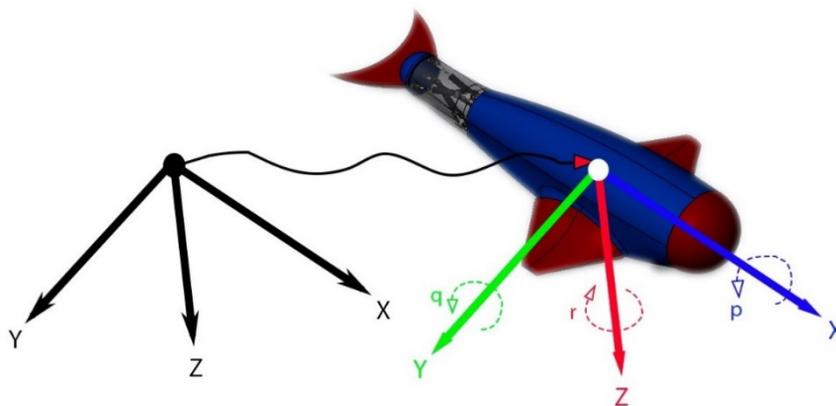


Рис. 2. Система координат выбранного типа двигателя

На рис. 3 представлены геометрические размеры исследуемого ПБА.

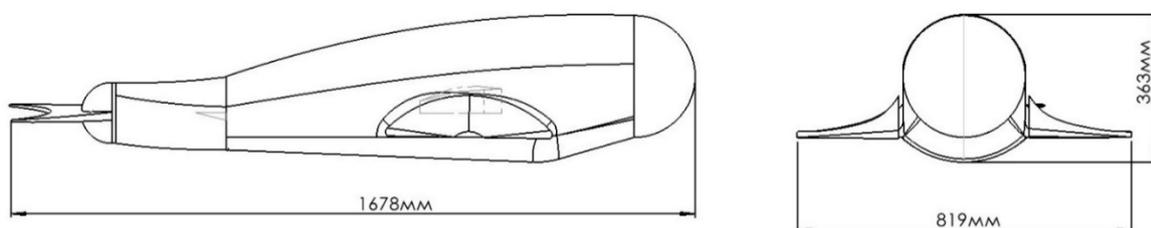


Рис. 3. Геометрические размеры исследуемого ПБА

Основными этапами разработки компьютерной модели в SolidWorks Flow Simulation являются: создание 3D-модели, построение сетки расчетной области, наложение граничных условий, визуализация полученных результатов.

Методика проведения исследования гидродинамических параметров ПБА заключается в следующем. На первом этапе задаются начальные параметры: в качестве жидкости используется морская вода, температура выбрана равной средней температуре мирового океана 17,5 °С, давление водяной среды выбрано равным 101 325 Па, что соответствует давлению на глубине 10 м.

На рис. 4–8 показаны интерфейсные окна программного модуля SolidWorks Flow Simulation, с помощью которых задаются начальные параметры.

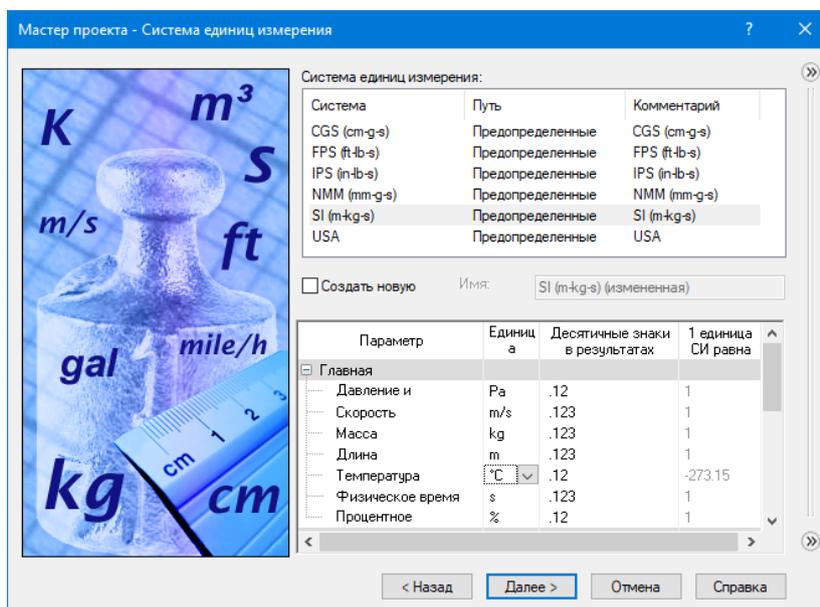


Рис. 4. Выбор и задание единиц измерения

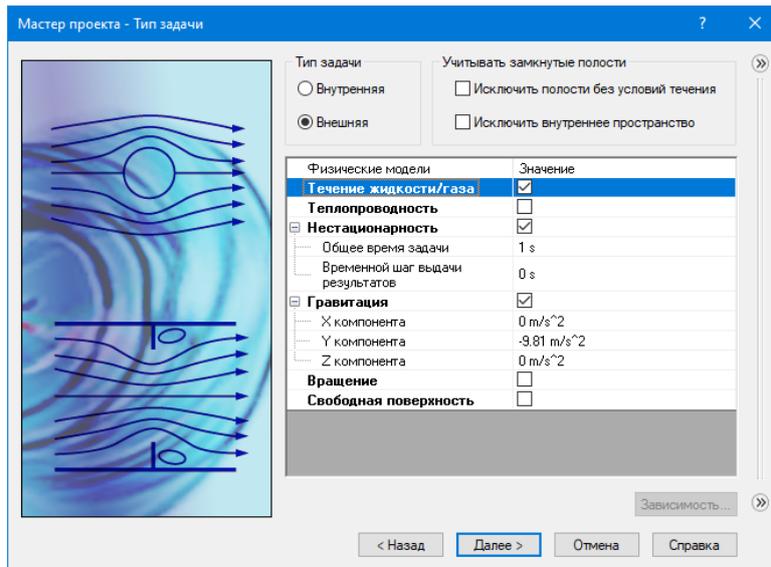


Рис. 5. Задание типа задачи

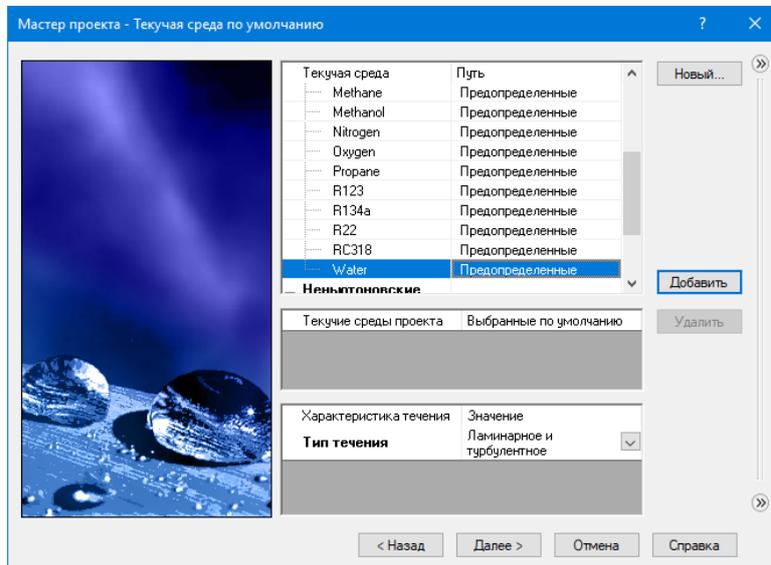


Рис. 6. Выбор среды

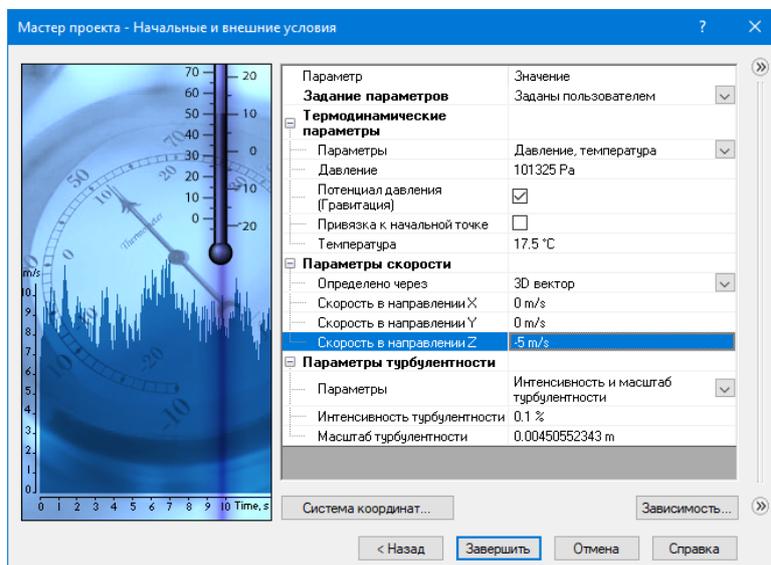


Рис. 7. Начальные и внешние условия моделирования

На втором этапе определяют расчетную область моделирования (рис. 8).

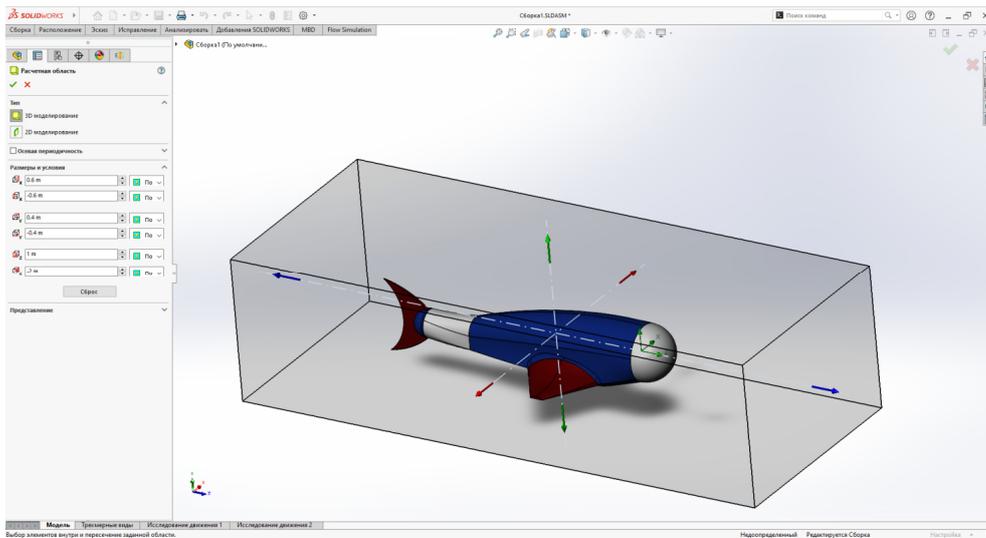


Рис. 8. Расчетная область моделирования

На третьем этапе устанавливаем цели моделирования: выбираем силу гидростатического сопротивления объекта жидкости, скорость течения жидкости по оси Z и давление жидкости на корпус исследуемого аппарата.

На четвертом этапе запускаем моделирование внешнего потока жидкости вокруг подводного аппарата.

На заключительном этапе оцениваются результаты имитационного моделирования.

Результаты моделирования давления потока жидкости на корпус ПБА приведены на рис. 9.

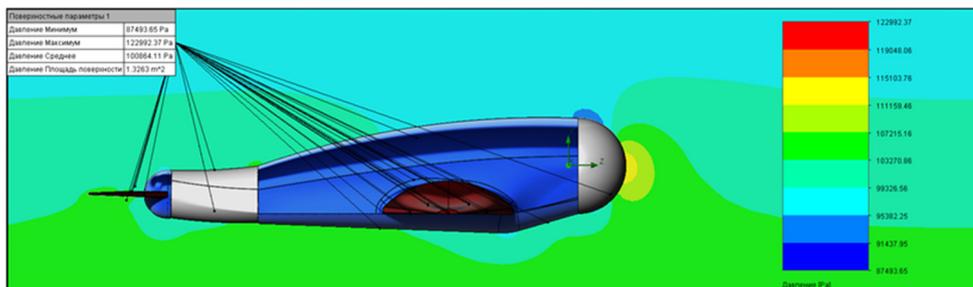


Рис. 9. Эпюра давлений потока

Анализ результатов моделирования показывает, что жидкость оказывает максимальное давление на носовую часть корпуса аппарата, охватывая малую область, после чего давление резко падает, создавая «яму низкого давления» под корпусом аппарата, и далее равномерно распределяется вплоть до хвостовой части. Максимальное давление на корпус составило $P_{\max} = 116$ кПа, минимальное давление – $P_{\min} = 90$ кПа, среднее значение давления – $P_{\text{cp}} = 100$ кПа.

Далее было проведено исследование ПБА при разных положениях хвостового движителя. На рис. 10, 11 приведены результаты моделирования при изменении скорости потока жидкости в горизонтальном положении хвостового движителя (как у дельфина).

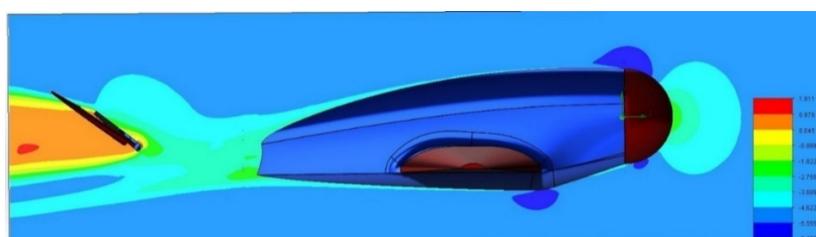


Рис. 10. Эпюра изменения потока жидкости при горизонтальном положении хвостового движителя

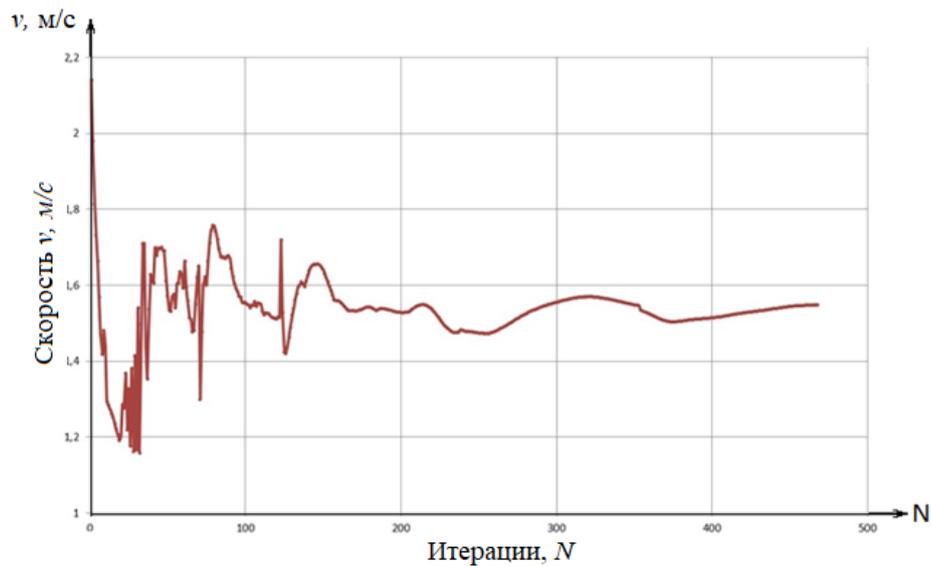


Рис. 11. Зависимость скорости потока жидкости от номера итерации при горизонтальном положении хвостового движителя

На рис. 12, 13 приведены результаты моделирования при изменении минимальной скорости потока жидкости в вертикальном положении хвоста (как у тунца). Таким образом минимальная скорость потока жидкости составила 1,2 м/с.

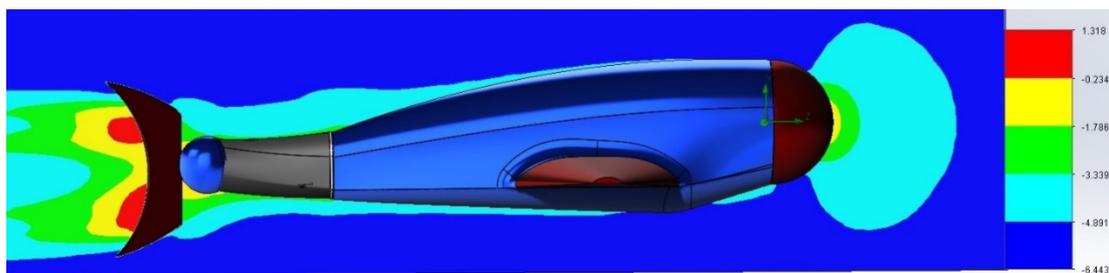


Рис. 12. Эпюра изменения потока жидкости при вертикальном положении хвостового движителя

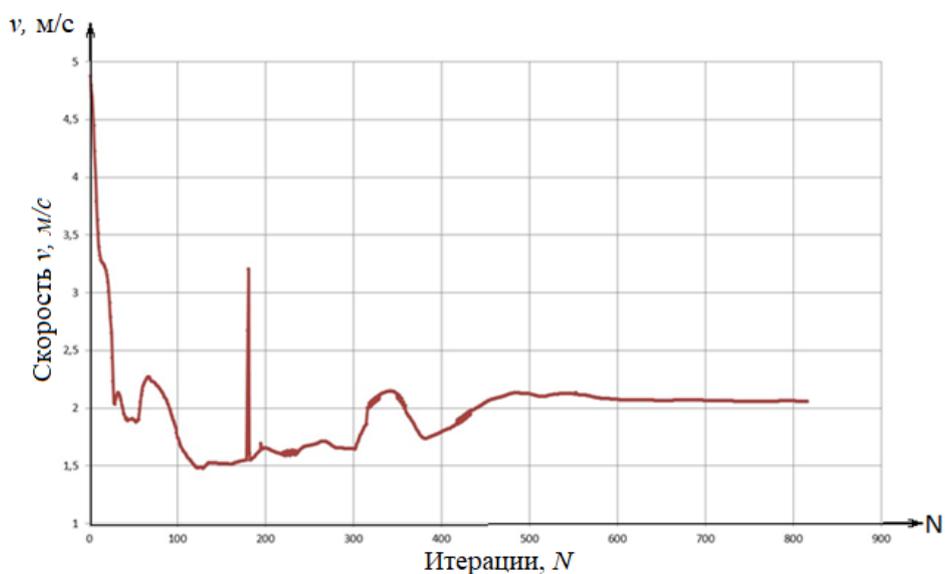


Рис. 13. Зависимость скорости потока жидкости от номера итерации при вертикальном положении хвостового движителя

Анализ результатов исследования показал, что при вертикальном положении хвостового движителя скорость потока больше, чем при горизонтальном, и составляет 1,5 м/с. Следовательно,

для обеспечения ходкости ПБА целесообразно использовать вертикальное положение хвостового движителя, а маневренность ПБА обеспечивается при горизонтальном положении хвостового движителя.

На рис. 14, 15 приведены результаты исследования гидростатического сопротивления при разных положениях хвостового движителя.

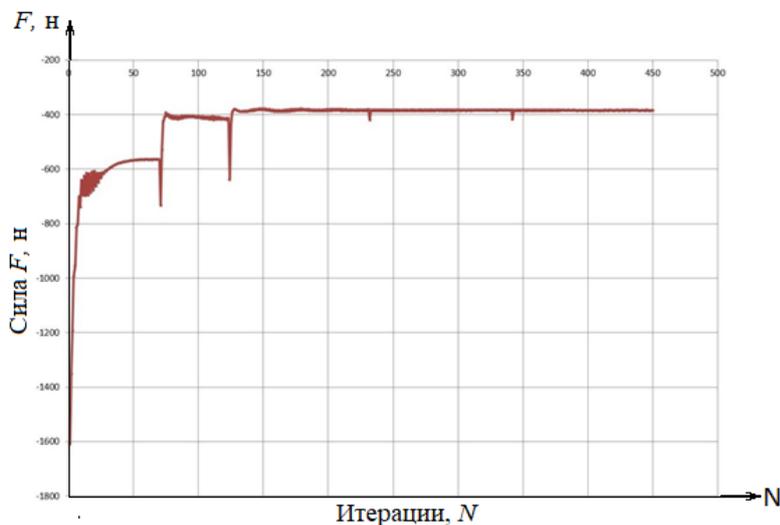


Рис. 14. Зависимость гидродинамического сопротивления от номера итерации при вертикальном положении хвостового движителя

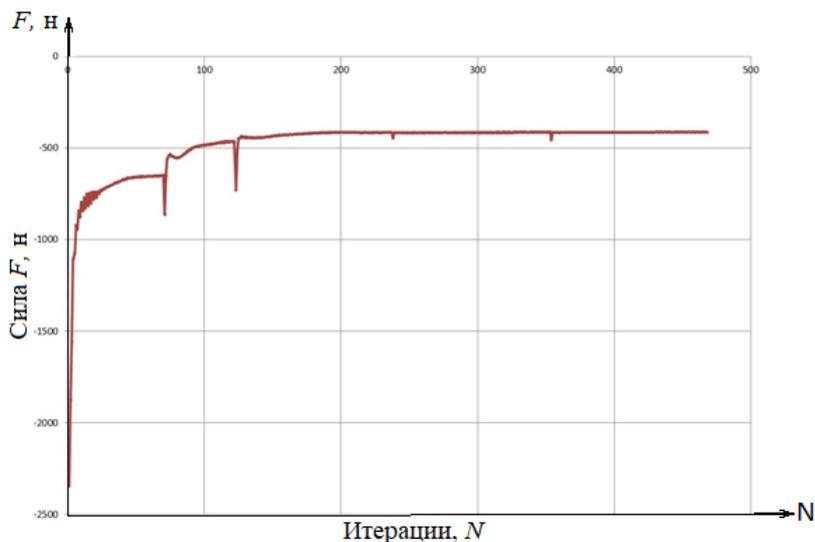


Рис. 15. Зависимость гидродинамического сопротивления от номера итерации при горизонтальном положении хвостового движителя

Анализ результатов моделирования показывает, что гидродинамическое сопротивление ПБА при вертикальном положении составляет 400 Н, а в горизонтальном положении хвоста – 500 Н. Следовательно, меняя положение хвостового движителя, можно регулировать маневренность и ходкость подводного аппарата.

Заключение

Таким образом, предложенная методика представляет собой эффективное средство моделирования обтекания корпусных элементов подводных аппаратов, позволяющее оперативно оценивать их мореходные качества, в частности, гидродинамическое сопротивление, скорость истечения потока, гидростатическое давление.

С помощью предложенной методики были получены зависимости гидродинамических характеристик конструкции подводного безэкипажного аппарата бионического типа. Это

позволило значительно сократить затраты времени и стоимость проведения работы на этапах проектирования, внедрения и эксплуатации подводной техники.

Список литературы

1. Урваев И. Н. Навигация мобильного робота на основе методов лазерной дальнометрии // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1. С. 44–51. doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5. EDN: TBKHZY
2. Shukla A., Karki H. Application of robotics in o shore oil and gas industry—A review Part II. Robot // Autonomous Systems. 2016. Vol. 75. P. 508–524.
3. González-García J., Gómez-Espinosa A., Cuan-Urquizo E. [et al.]. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. P. 1256.
4. Zhou K., Liu J., Chen W. Numerical Study on Hydrodynamic Performance of Bionic Caudal Fin // Appl. Sci. 2016. Vol. 6. P. 15.
5. Kruusmaa M., Fiorini P., Megill W. [et al.]. FILOSE for Svenning: A Flow Sensing Bioinspired Robot // IEEE Robot. Autom. Mag. 2014. Vol. 21. P. 51–62.
6. Flow Simulation 2009 Tutorial. URL: <http://solidpro.ru/index.php/topic/1093-solidworks-flow-simulation-2009-tutorial-rus>
7. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J. B. C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion // IEEE J. Ocean. Eng. 1999. Vol. 24. P. 237–252.
8. Shriyam S., Agrawal A., Behera L., Saxena A. Robotic Fish Design and Control Based on Biomechanics // Proceedings of the Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems (Kanpur, India, 13–15 March 2014). 2014. Vol. 47.

References

1. Urvaev I.N. Navigation of a mobile robot based on laser rangefinder methods. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2021;(1):44–51. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2021-1-5. EDN: TBKHZY
2. Shukla A., Karki H. Application of robotics in o shore oil and gas industry—A review Part II. Robot. *Autonomous Systems*. 2016;75:508–524.
3. González-García J., Gómez-Espinosa A., Cuan-Urquizo E. et al. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied Sciences*. 2020;10:1256.
4. Zhou K., Liu J., Chen W. Numerical Study on Hydrodynamic Performance of Bionic Caudal Fin. *Appl. Sci*. 2016;6:15.
5. Kruusmaa M., Fiorini P., Megill W. et al. FILOSE for Svenning: A Flow Sensing Bioinspired Robot. *IEEE Robot. Autom. Mag*. 2014;21:51–62.
6. *Flow Simulation 2009 Tutorial*. Available at: <http://solidpro.ru/index.php/topic/1093-solidworks-flow-simulation-2009-tutorial-rus>
7. Sfakiotakis M., Lane D. M., Davies J.B.C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion. *IEEE J. Ocean. Eng*. 1999;24:237–252.
8. Shriyam S., Agrawal A., Behera L., Saxena A. Robotic Fish Design and Control Based on Biomechanics. *Proceedings of the Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems (Kanpur, India, 13–15 March 2014)*. 2014;47.

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Николаевич Урваев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iurvaev@mail.ru

Илья N. Urvaev

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Николаевич Базыкин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cbazykin@yandex.ru

Sergey N. Bazykin

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 12.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.09.2024

Принята к публикации/Accepted 04.10.2024