

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДНА

SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ECOLOGICAL SAFETY OF THE SHIP

УДК 629.122

DOI:10.37890/jwt.vi83.588

Оценка некоторых гидродинамических характеристик подводного крыла вблизи свободной поверхности с помощью «Ansys Fluent»

С.П. Астреин

ORCID: 0009-0007-9369-2921

С.Н. Гирин

ORCID: 0009-0001-3741-8502

А.С. Гусев

ORCID: 0009-0004-2952-0672

Е.Ю. Чебан

ORCID: 0000-0001-0983-9879

*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород,
Россия*

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются несколько задач по определению гидродинамических характеристик подводного крыла в программном комплексе ANSYS Fluent при различных заглублениях крыла. Целью выполненных исследований является учет особенностей применения указанного комплекса для решения задач обтекания различных тел жидкостью. Верификация результатов численных экспериментов осуществляется путем сопоставления с известными экспериментальными данными, полученными различными авторами. В отечественной литературе опубликованы результаты испытаний крыла при различных заглублениях и углах атаки, выполненные в 60-х годах прошлого века. В настоящей статье показано, что максимальное расхождение в величинах коэффициента подъемной силы, численного и модельного экспериментов, не превышает 10%. В зарубежной литературе опубликованы экспериментальные результаты определения коэффициентов подъемной силы и сопротивления крыла, выполненные сравнительно недавно с использованием современной аппаратуры. Численные эксперименты, выполненные авторами настоящей статьи, показали, что в данном случае расхождение в результатах не превышает 4%. На основании полученных результатов делается вывод о возможности использования указанного комплекса для решения ряда задач, связанных с проектированием крыльевых систем.

Ключевые слова: Катамаран, катамаран с подводными крыльями, подводные крылья, судно на подводных крыльях, крыльевые системы, буксировочные испытания, подъемная сила, сила сопротивления, эксперимент, свободная поверхность.

Estimation of some hydrofoil's hydrodynamic characteristics near free surface using «Ansys Fluent»

Sergey P. Astrein

ORCID: 0009-0007-9369-2921

Stanislav N. Girin

ORCID:0009-0001-3741-8502

Alexander S. Gusev

ORCID: 0009-0004-2952-0672

Ehor Yu. Cheban

ORCID:0000-0001-0983-9879

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. In this paper several tasks of hydrofoil's hydrodynamic characteristics determination at the various depths using the ANSYS Fluent are considered. The purpose of this studies was consideration of the feature this software for solving some issues hydrodynamics interaction between hydrofoil and free surface. The results of numerical experiments were vitrified by comparison with experimental data obtained by different authors. For comparison, the results of hydrofoil tests at various depths and angles of attack published in various scientific sources were used, including those of Egorov and Sokolov conducted in the 60s of the last centuries. The present paper shows that the maximum discrepancy in the values of the lift coefficient of numerical and model experiments does not exceed 10%. In the experiment of Zao Ni and Manhar Dhanak, modern equipment was used for model tests, which were compared with the results of numerical simulation. When comparing the results, a discrepancy of 4% was obtained, which is a good indicator. The results obtained in this work allow us to draw a conclusion about the possibility of using AnsisFluent 2020 to solve tasks related to the design of wing systems.

Keywords: Catamaran, hydrofoil assisted catamaran, hydrofoils, hydrofoil vessel, foil systems, towing tests, lifting force, drag force, experiment, free surface.

Введение

При проектировании катамаранов на подводных крыльях, у которых последние расположены между корпусами, возникает задача определения усилий, действующих на крылья. Очевидно, что эта задача существенно отличается от исследованных ранее задач для судов на подводных крыльях с традиционной крыльевой схемой. Существующие в настоящее время программные комплексы, в принципе, позволяют решить поставленную задачу, однако точность решения зависит от ряда факторов, которые необходимо учитывать при численном моделировании. Кроме того, коммерческие программы постоянно совершенствуются и изменяются, что также может привести к изменению результатов моделирования.

Одним из наиболее распространённых программных продуктов для моделирования гидро- и аэродинамики крыльев является ANSYS Fluent. Так, в статье [1] с помощью ANSYS Fluent исследовалась гидродинамика трехмерного подводного крыла NACA 0012. При моделировании использовалась k- ω модель турбулентности и несколько вариантов сеток. Сравнение результатов моделирования с экспериментом показало хорошую сходимость. В работе Maria Margareta и Zau Beu [2] с помощью ANSYS Fluent моделировалось двумерное обтекание подводного крыла при различных углах атаки, в том числе с отрывными течениями для чисел $Re > 10^6$. В работе использовалась k-epsilon (ϵ) модель турбулентности. В результате работы получены расхождения между экспериментальными данными и ANSYS Fluent при углах атаки более 10 градусов, причины этих расхождений авторами не проанализированы. В работе [3] также с помощью ANSYS Fluent получены распределения давлений для профилей NACA0012, NACA0015, NACA2412, NACA2414, NACA2415, NACA 4412, и E387 при различных углах атаки. Возможность использования данной программы на основе верификации результатов моделирования и испытаний в опытовых бассейнах и аэродинамических трубах показана в различных работах по исследованию гидро- и аэродинамики крыльев [4].

В то же время значительная часть вопросов в области определения гидродинамических характеристик подводных крыльев численными методами остается неисследованной. Поэтому в настоящей статье рассматривается задача определения коэффициента подъемной силы крыла, движущегося в невозмущенной жидкости вблизи свободной поверхности, решаемая с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Полученные решения сравниваются с результатами экспериментов, приведенных в монографии [5] и работах [7]

В соответствии с [5], [6] влияние свободной поверхности на величину подъемной силы начинает проявляться при заглублении менее двух хорд, поэтому исследования в настоящей работе проводятся при относительных заглублениях в диапазоне от 1,5 до 0,25 долей хорды крыла.

Для решения такой задачи принято крыло с относительным удлинением равным 10 хордам, размер хорды составил 0,1 метра, а толщина профиля - 6% хорды. Максимальная толщина профиля расположена на расстоянии равном 40% хорды от носика профиля.

Кроме заглубления в ходе исследования изменялся и угол атаки крыла. В процессе решения задачи определялись зависимости коэффициента подъемной силы от углов атаки крыла в диапазоне от -2° до 6° при различных погружениях (рис. 1) в соответствии с [5].

При проектировании крыльевых систем кроме подъемной силы крыла необходимо определение гидродинамического качества крыла, что требует знания силы сопротивления, но, к сожалению, в работе [5] не приводятся результаты эксперимента по определению сопротивления.

Более подробная информация о силах, действующих на крыло, представлена в работе [8], однако, в ней исследуются характеристики крыла при одном относительном погружении 1,0 (рис.2).

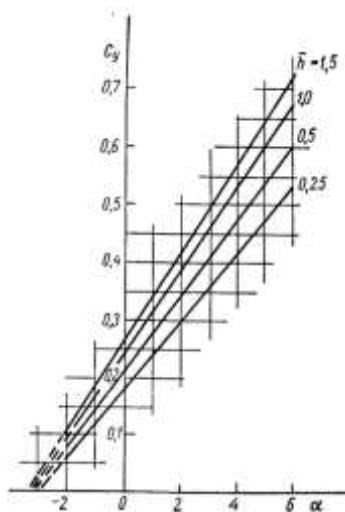


Рис. 1. График зависимости коэффициента подъемной силы крыла от угла атаки (И.Т. Егоров и В.Т. Соколов [5])

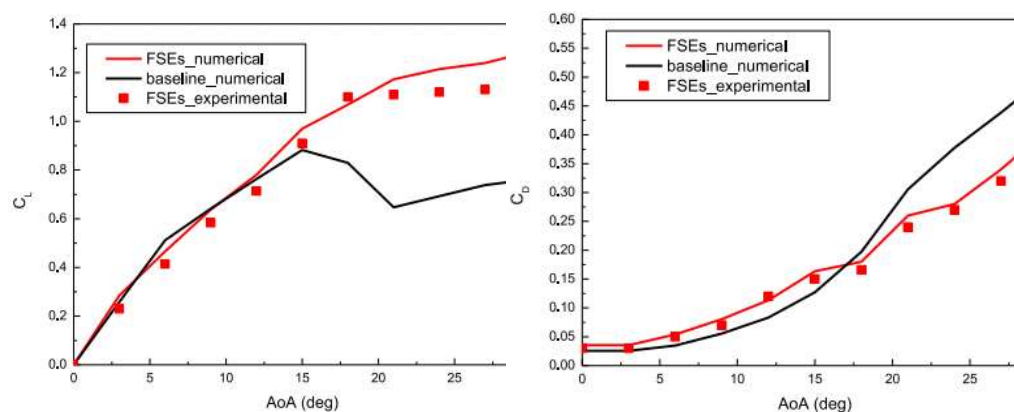


Рис. 2. Графики зависимостей коэффициентов подъемной силы и силы сопротивления при относительном погружении 1,0 по исследованию зарубежных авторов [7] (красные квадраты на графике)

Численное моделирование обтекания крыла по И.Т. Егорову и В.Т. Соколову

Для численного моделирования была подготовлена 3d-модель крыла (рис.3) в модуле ANSYS SpaceClaim в соответствии с исходными данными, приведенными в монографии [5] (табл. 1).

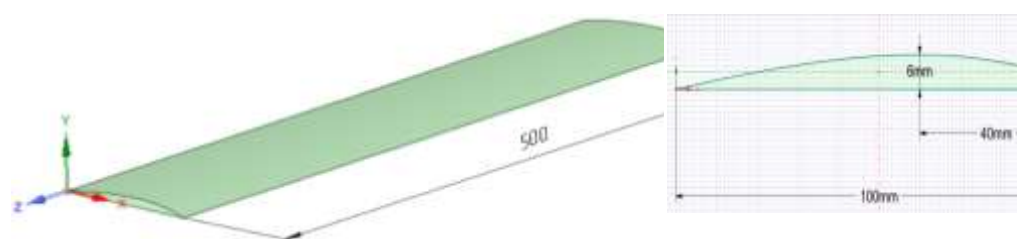


Рис. 3. Исследуемая модель крыла

Таблица 1

Исходные данные эксперимента [1]

Наименование	Обозначение	Величина	Размерность
Размах крыла	l	1	м
Хорда крыла	b	0,1	м
Относительная толщина профиля	t/b	6	%
Положение максимальной толщины от носика профиля	a/b	40	%
Тип профиля	Плоско-выпуклый		
Скорость движения	v	3,97	м/с
Относительное заглубление крыла	h/b	1,5;1,0;0,5;0,25	-
Угол атаки крыла	α	-2;0;2;4;6	град.

Ввиду симметрии крыла, для уменьшения затрат машинного времени достаточно использовать только половину крыла, с установкой соответствующего граничного условия симметрии.

В работе [5] отсутствует информация по расположению крыла и размерам бассейна, в котором проводились эксперименты, поэтому ширина расчетной области определяется, исходя из предположения авторов данной статьи о закреплении крыла

по его торцам в бассейне. Использовалась расчетная область в виде параллелепипеда с размерами, рекомендованными в работах [7], [8], [9] в долях от хорды:

- 1) перед крылом - 5 хорд;
- 2) за крылом - 10 хорд;
- 3) над крылом - 5 хорд;
- 4) под крылом - 10 хорд;

Граничные условия домена показаны на рис. 4 и 5.

Для построения расчетной сетки (рис. 6), использовался модуль ANSYS Mechanical. Для получения точных значений гидродинамических характеристик крыла было выполнено измельчение сетки в районе носовой и кормовой кромок, а также вблизи свободной поверхности. Задача решалась с учетом модели турбулентности $k - \omega - SST$ при величине $y^+=1$, выбранной по рекомендациям [7], [8] и [9], а также с учетом границы раздела сред вода-воздух с использованием VoF-модели.



Рис. 4. Размеры расчетной области

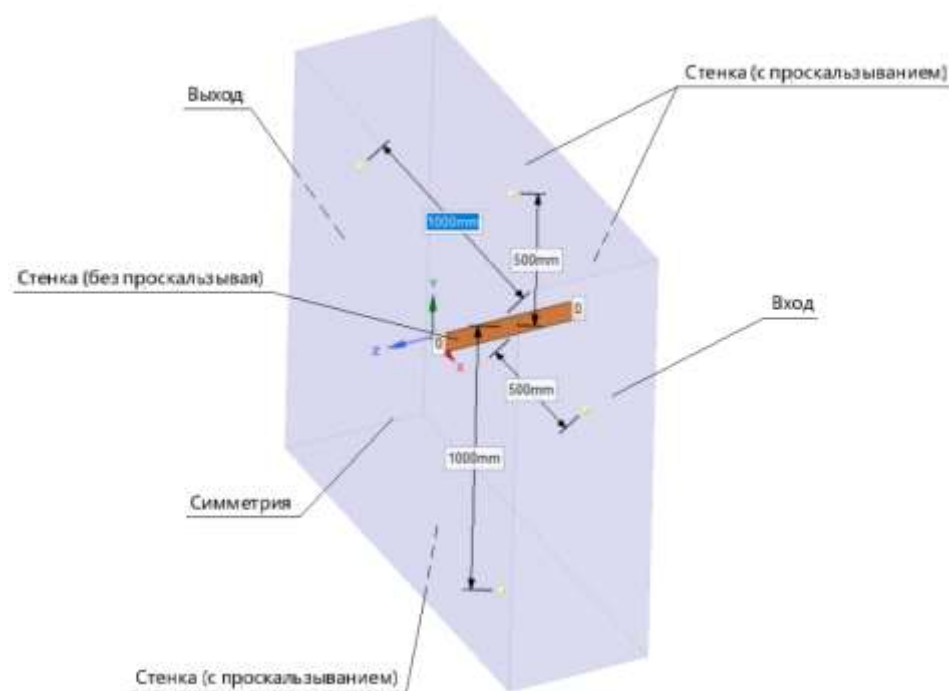


Рис. 5. Расчетная область и граничные условия

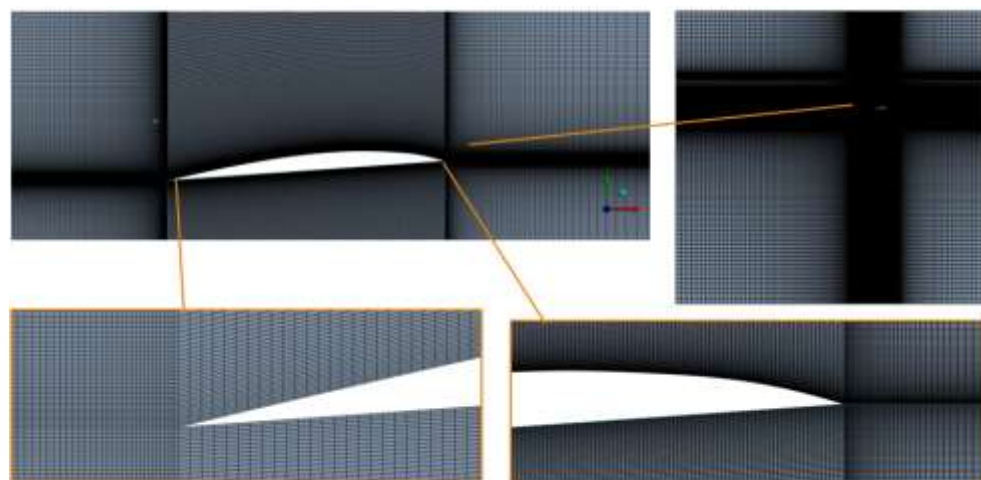


Рис. 6. Расчетная сетка

Таблица 2

Параметры расчетной сетки		
Наименование	Значение	Размерность
Начальная сетка	100	мм
Сетка на поверхности крыла	0,4	мм
Размер сетки в районе носовой и кормовой кромок	1	мм
Фактор сгущения сетки от начальной до адаптационной	1,3	-
Общее число ячеек	≈110 тыс.	шт

В результате численного моделирования были получены формы свободной поверхности жидкости и линии тока скоростей, проиллюстрированные на рис.7, а также значения коэффициентов подъемной силы, графики которых в виде зависимостей коэффициента подъемной силы от углов атаки, показаны на рис. 8.

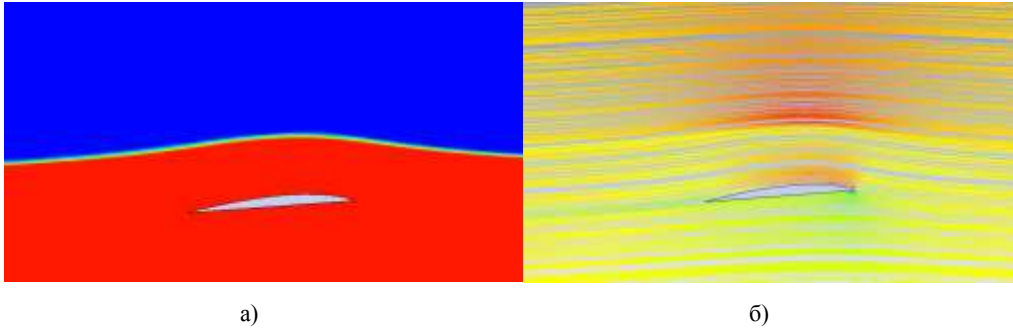


Рис. 7. а) свободная поверхность при $h'=0,25$; б) линии тока скоростей при $h'=0,25$;

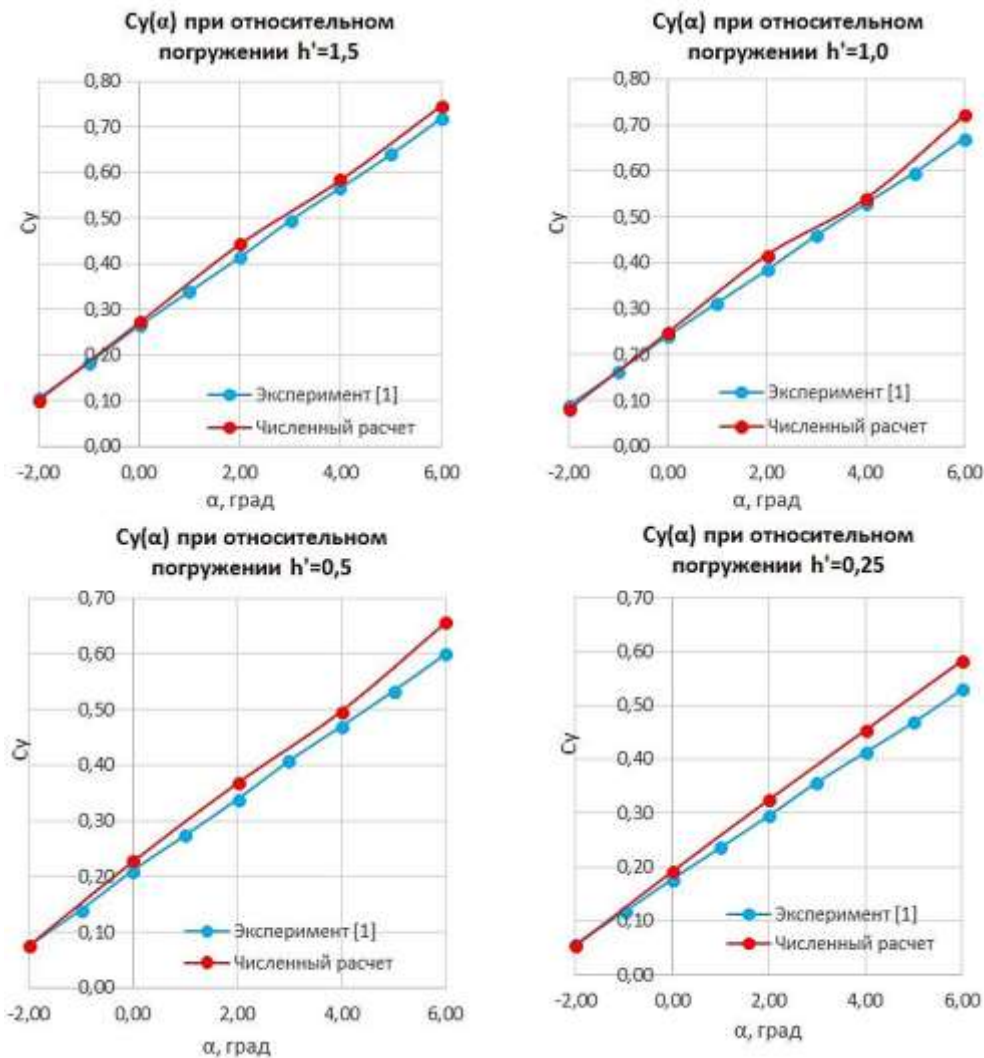


Рис. 8. Сравнение численного расчета крыла с экспериментом [1] при разных погружениях

Численным методом подтверждено существенное влияние свободной поверхности на подъёмную силу при малых заглублениях. В результате исследования наблюдается уменьшение коэффициента подъемной силы при приближении к свободной поверхности, что соответствует данным монографии [5].

Численное моделирование обтекания крыла с профилем NACA 63₄-021

Верификация результатов численного моделирования проводилась на основании работы [7] для двояковыпуклого профиля NACA 63₄-021 с хордой $b=100$ мм при установившейся скорости движения $v=1,4$ м/с. Данная задача решается аналогично рассмотренной выше, однако для сопоставления с [7] рассматривается её плоская постановка.

Исследования [7] проводились при углах атаки (рис.2) диапазоне от 0° до 30° , однако в судостроении редко встречаются углы более 10° , поэтому моделирование было ограничено углами атаки 3° ; 6° ; 9° . Кроме того, необходимо отметить большие расхождения с экспериментом при углах атаки более 15 градусов, что позволяет предположить отсутствие учета отрывных течений и интенсивного вихреобразования в работе [7].

Определенной проблемой при получении коэффициентов сопротивления крыла является отсутствие в [7] данных по шероховатости. Достижение сходимости коэффициента сопротивления получено с помощью функции Nasa Correlation, имеющейся в ANSYS Fluent.

В результате решения задачи получены картины обтекания двояковыпуклого профиля и положения свободной поверхности (рис. 9-10), полученные коэффициенты представлены на рис. 11.

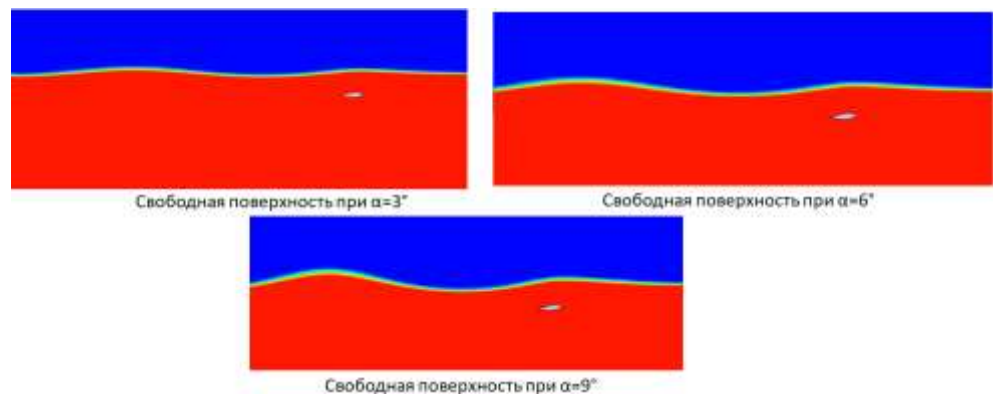


Рис. 9. Свободная поверхность при различных углах атаки

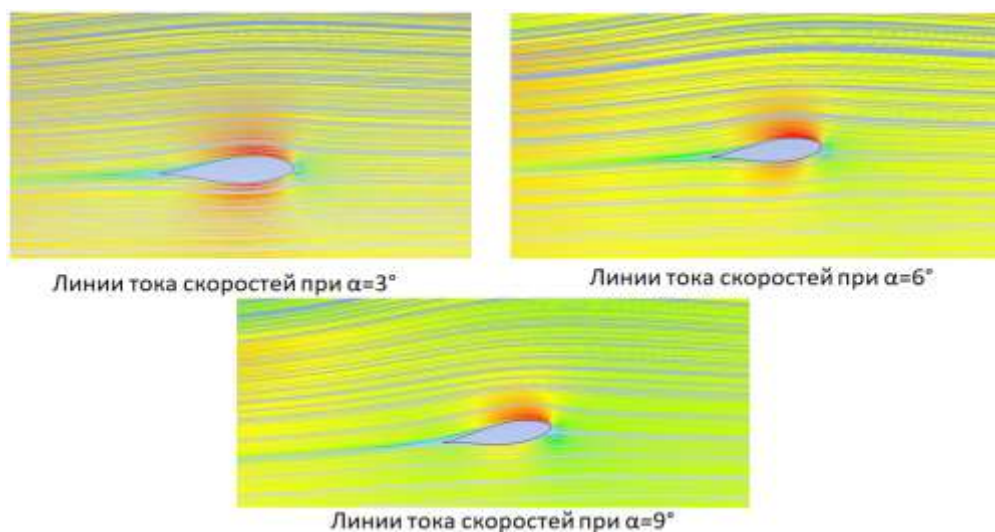


Рис. 10. Картина обтекания профиля крыла

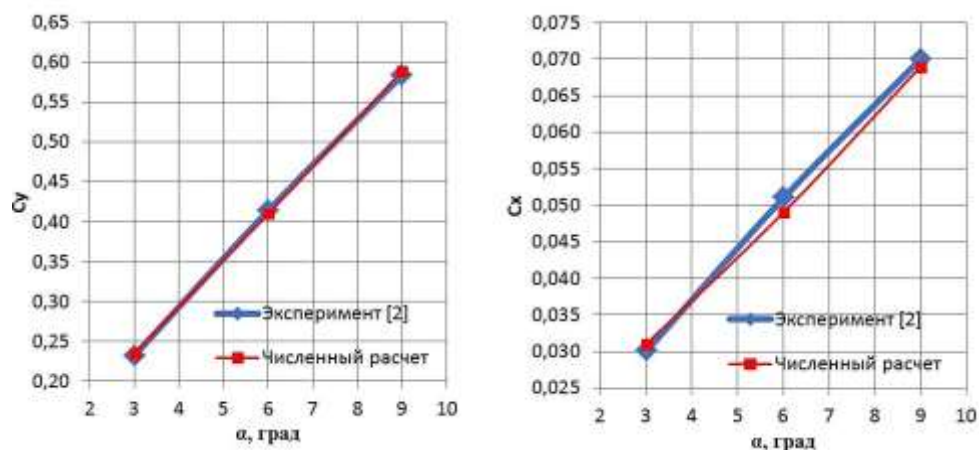


Рис. 11. Коэффициент подъемной силы и силы сопротивления в зависимости от угла атаки при относительном погружении 1,0

Заключение

В настоящей работе с помощью программного комплекса ANSYS Fluent выполнены исследования подъемной силы и силы сопротивления подводных крыльев. Для оценки адекватности полученных решений, результаты сравниваются с известными аналогичными решениями.

В работе [5] приведены результаты испытаний крыла при различных заглублениях, при этом приведены значения коэффициента подъемной силы при различных углах атаки. Сравнение результатов эксперимента с расчетами, выполненными авторами, представлено на рис. 8, который показывает, что максимальное расхождение находится в пределах 10%. Величина расхождения может быть объяснена погрешностью эксперимента, выполненного в 60-х годах прошлого века и отсутствием существенной части информации об этих экспериментах в опубликованных работах.

В эксперименте [7] используется современное оборудование для получения данных с модели, которые также сопоставимы с результатами численного расчета.

При анализе результатов в этом случае получено расхождение в 4%, что является хорошим показателем.

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что с помощью ПК ANSYS Fluent возможно получить достаточно точные гидродинамические характеристики крыла вблизи свободной поверхности, а также возможно использовать в дальнейшем этот комплекс для исследования крыльевой системы катамаранов на подводных крыльях.

Список литературы

1. Saadia Adjali, Omar Imine, Mohammed Aounallah, Mustapha Belkadi Numerical Simulation of Free Surface Water Wave for the Flow around NACA 0012 Hydrofoil and Wigley Hull Using VOF Method World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol:9, No:5, 2015 p.884-888
2. Maria Margareta, Zau Beu Computational Fluid Dynamic for Performance Hydrofoil due to Angle of Attack Journal of Earth and Marine Technology (JEMT), 1(1), 12-19/ ISSN 2723-8105 DOI: 10.31284/j.jemt.2020.v1i1.1146
3. Puteri Nurfarah, Adawiyah Taslina, Aliashim Albania, Mohd Zamri Ibrahima, Mohd Azlan Musaa, Zulkifli Mohd Yusopa & Mohd Afifi Jusoha Computational Fluid Dynamics Analysis of Seven Selected Hydrofoils for Different Angle of Attack. Jurnal Kejuruteraan SI 4(1) 2021: 71-75 [https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-si4\(1\)-09](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-si4(1)-09)
4. 4 Чебан, Е.Ю. Численное моделирование испытаний составного крыла экраноплана в аэродинамической трубе / Е. Ю. Чебан, А. Н. Лучков // Научные проблемы водного транспорта. – 2023. – № 75. – С. 108-117. – DOI 10.37890/jwt.vi75.358. – EDN MCXUOT.
5. Егоров И.Т., Соколов В.Т.. Гидродинамика быстроходных судов. Л.: Судостроение. – 1971. – 424 с.
6. Иконников В.В., Маскалик А.И. Особенности проектирования и конструкции судов на подводных крыльях. – Л. Судостроение, 1987. – 320 с.
7. Zao Ni, Manhar Dhanak, Tsung-chow Su. Performance of a hydrofoil operating close to a free surface over a range of angles of attack. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 13. p.1-11, 2021.
8. Nan Xie, Dracos Vassalos. Performance analysis of 3D hydrofoil under free surface\ Ocean Engineering 34 (2007) p 1257-1264. 2006.
9. Миньков Л.Л., Моисеева К.М. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent: учеб пособие. – Томск: STT, 2017. – 122 с.

References

1. Saadia Adjali, Omar Imine, Mohammed Aounallah, Mustapha Belkadi Numerical Simulation of Free Surface Water Wave for the Flow around NACA 0012 Hydrofoil and Wigley Hull Using VOF Method World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering Vol:9, No:5, 2015 p.884-888
2. Maria Margareta, Zau Beu Computational Fluid Dynamic for Performance Hydrofoil due to Angle of Attack Journal of Earth and Marine Technology (JEMT), 1(1), 12-19/ ISSN 2723-8105 DOI: 10.31284/j.jemt.2020.v1i1.1146
3. Puteri Nurfarah, Adawiyah Taslina, Aliashim Albania, Mohd Zamri Ibrahima, Mohd Azlan Musaa, Zulkifli Mohd Yusopa & Mohd Afifi Jusoha Computational Fluid Dynamics Analysis of Seven Selected Hydrofoils for Different Angle of Attack. Jurnal Kejuruteraan SI 4(1) 2021: 71-75 [https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-si4\(1\)-09](https://doi.org/10.17576/jkukm-2021-si4(1)-09)
4. 4 Cheban, E.Yu. Chislennoe modelirovanie ispytaniy sostavnogo kryla ekranoplana v aerodinamicheskoy trube / E. Yu. Cheban, A. N. Luchkov // Nauchnye problemy vodnogo transporta. – 2023. – № 75. – S. 108-117. – DOI 10.37890/jwt.vi75.358. – EDN MCXUOT.
5. I.T. Egorov, V.T. Sokolov. Gidrodinamika bystrokhodnykh sudov. L.: Sudostroenie, 1971, 424 s.

6. Ikonnikov V.V., Maskalik A.I. Osobennosti proektirovaniya i konstruksii sudov na podvodnykh kryl'yakh. – L. Sudostroenie, 1987-s.320
7. ZaoNi, Manhar Dhanak, Tsung-chow Su. Perfomance of a hydrofoil operating close to a free surface over a range of angles of attack. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 13. p.1-11, 2021.
8. Nan Xie, Dracos Vassalos. Perfomance analysis of 3D hydrofoil under free surface\ Ocean Engineering 34 (2007) p 1257-1264. 2006.
9. Min'kov L.L., Moiseeva K.M. Chislennoe reshenie zadach gidrodinamiki s pomoshch'yu vychislitel'nogo paketa Ansys Fluent: ucheb posobie. – Tomsk: STT, 2017 -122с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Астрейн Сергей Павлович, аспирант кафедры «Теории конструирования инженерных сооружений», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: theolklim260177@yandex.ru

Sergey P. Astrein, graduate student of the Department of «Theory of engineering structures design», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: : theolklim260177@yandex.ru

Гирин Станислав Николаевич, к.т.н., профессор кафедры «Теории конструирования инженерных сооружений», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

Stanislav N. Girin, Ph.D. in Engineering Science, Professor of the Department of «Theory of engineering structures design», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, e-mail: girin.sn@vsuwt.ru

Гусев Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Теории конструирования инженерных сооружений», Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: gususev@yandex.ru

Alexander S. Gusev, graduate student of the Department of «Theory of engineering structures design», Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, e-mail: gususev@yandex.ru

Чебан Егор Юрьевич, д.т.н., профессор кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Ehor Yu. Cheban, Ph.D. in Engineering Science, Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory and ecological safety Mechanics, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterova street, Nizhny Novgorod, Russia, 603950, e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Статья поступила в редакцию 07.03.2025; опубликована онлайн 20.06.2025.
Received 07.03.2025; published online 20.06.2025.