

УДК 629.12:532.5

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
АЭРОГИДРОДИНАМИКИ АМФИБИЙНОГО СУДНА  
НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ  
РАЗГРУЗКОЙ НА РЕЖИМЕ ХОДА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

© 2014 г. П.С. Кальясов<sup>1</sup>, А.В. Февральских<sup>1</sup>, В.В. Шабаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО Судостроительная компания «Аэроход», Нижний Новгород

<sup>2</sup>НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

pkalyasov@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2014

Разработана методика расчета аэрогидродинамического сопротивления амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой на режиме хода на воздушной подушке. Методика базируется на суперкомпьютерных технологиях вычислительного эксперимента, позволяющего моделировать турбулентные течения с границами раздела сред. Результаты расчетов верифицированы по результатам буксировочных испытаний в скоростном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

*Ключевые слова:* амфибийное судно, воздушная подушка, аэродинамическая разгрузка, математическое моделирование, вычислительный эксперимент, аэрогидродинамика, буксировочное сопротивление.

### **Введение**

Особенностью амфибийного судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой (АСВП с АР) является наличие двух основных ходовых режимов: первого основного режима движения на статической воздушной подушке и второго режима движения на динамической воздушной подушке при отсутствии механического контакта с подстилающей поверхностью. Оба режима являются крейсерскими и экономичными.

В настоящей статье рассматриваются принципиальные моменты организации вычислительного эксперимента, ориентированного на моделирование аэрогидродинамики АСВП с АР с учетом деформации водной поверхности, функционирования воздушной подушки и работы поддувных вентиляторов, аэрогидродинамического взаимодействия элементов компоновки. Вычислительный эксперимент реализован с помощью программного комплекса ANSYS CFX. Примеры решения подобных задач в публикациях отсутствуют. В статье приведена верификация результатов моделирования по результатам буксировочных испытаний модели АСВП с АР в опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр», выработаны рекомендации к мощности вычислительных систем, требуемых для решения проектных задач аэрогидродинамики АСВП.

### Постановка задачи и некоторые аспекты методологии вычислительного эксперимента

Несущий комплекс АСВП с АР (рис. 1) состоит из вентиляторной группы 1, зоны воздушной подушки (ВП) 2, глиссирующих баллонетов (пневмоскегов) 3, носового 4 и кормового 5 гибких ограждений. Воздушная подушка реализована под центропланом 6. Аэродинамическая разгрузка на первом режиме движения осуществляется за счет верхней поверхности центроплана и консолей 7.

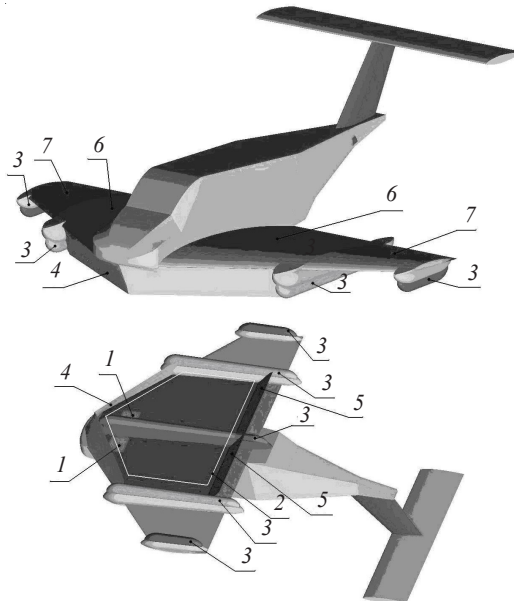


Рис. 1. Общий вид и элементы АСВП с АР

При движении на первом режиме разгрузка АСВП с АР происходит за счет действия избыточных давлений в ВП, гидродинамических подъемных сил, действующих на глиссирующие фрагменты баллонетов, аэродинамических сил на консолях и верхней поверхности крыла. Баллонеты находятся в зоне действия избыточного давления ВП, и их гидродинамические характеристики должны определяться в составе аэрогидродинамической компоновки с учетом деформаций воды и скосов потока, индуцируемых распределенным по ВП давлением. В свою очередь, истечение воздуха из ВП, а следовательно, распределение давлений по днищу АСВП существенным образом зависит от смоченной поверхности баллонетов и возмущений, вносимых ими в воздушный и водный потоки. Истечение из воздушной подушки оказывает влияние на формирование аэродинамических сил на консолях и верхней поверхности крыла.

Задача ставится в рамках модели вязкого турбулентного течения несжимаемой жидкости с границами раздела сред. Течение воздуха и воды в рамках этой модели описывается системой осредненных уравнений Навье – Стокса [1]. Для определения вихревой вязкости используется составная модель SST Ментера [2].

Отдельные аспекты методики вычислительного эксперимента (размеры расчетной области, граничные условия задачи, численные схемы, моделирование работы вентиляторов) отрабатывались при моделировании судов на воздушной подушке различного водоизмещения [3].

Принципиальная схема построения расчетных сеток меняется в связи с необходимостью моделирования аэрогидродинамического взаимодействия баллонетов с планером, являющимся одновременно площадью, находящейся в зоне повышенного давления от воздушной подушки, и крылом, обеспечивающим аэродинамическую разгрузку. Сеточная модель должна с достаточной степенью точности моделировать локальные аэродинамические эффекты, вызывающие существенные изменения аэрогидродинамических характеристик всей компоновки, а именно: образование вихря под консолью вблизи баллонета вследствие истечения воздуха из-под баллонета центроплана и оказывающего существенное влияние на характеристики консоли; срывные течения у выступающих носов передней кромки крыла частей баллонетов и фюзеляжа, сказывающиеся на аэродинамических характеристиках крыла; искривление линий тока у кормовых частей корпуса и баллонетов с последующим распространением разрежения на нижнюю поверхность крыла и пр. Все перечисленные эффекты в значительной степени зависят от характера истечения воздуха из воздушной подушки.

Сеточная модель задачи строилась с использованием сеточного генератора Ansys Extended Meshing. Использовались блочно-структурированные сетки. Структура и размеры элементов сеточной модели подобраны по результатам серии тестовых расчетов аэрогидродинамики ряда упрощенных моделей. Вертикальный размер элемента составляет 3% диаметра нижнего яруса скег и определяет минимально возможный шаг изменения статического уровня воды.

В районе нижнего яруса размер элемента по нормали к поверхности составляет 0,3% диаметра нижнего яруса. Размер элемента выбран исходя из необходимости моделирования величины сопротивления трения, картины замыва баллонета и моделирования влияния на замывы схемы интерцептирования баллонета. По ширине баллонет разбит на 20 элементов. Допустимые размеры элемента в области крыла по нормали к нему не превышают 0,1% хорды крыла. Носик крыла описывается двадцатью элементами; по хорде крыла использовано около 100 элементов со сгущением к носу и хвосту крыла; приблизительно такое же число элементов расположено на полуразмахе крыла со сгущением к баллонетам. Рассматриваемая сеточная модель является достаточной для моделирования аэрогидродинамического взаимодействия крыла с баллонетами и фюзеляжем в присутствии водной поверхности, играющей роль экрана. Сеточная модель в области вертикального и горизонтального оперения менее подробна: 30 элементов расположено по хорде, 10 элементов – по толщине профиля, размер элемента по нормали к поверхности составляет 0,3% хорды.

Количество контрольных объемов симметричной модели (включая фюзеляж, вертикальное и горизонтальное оперение) составляет 5 млн. Увеличение количества элементов в 2 и 3 раза (уменьшение размеров элементов вблизи модели в 1,4 и 1,7 раза соответственно) приводит к незначительному изменению локальных и интегральных аэрогидродинамических характеристик (порядка 3%).

При фиксированных дифференте и скорости моделирование аэрогидродинамики АСВП с АР со свободным всплытием по методике [4] в ряде случаев ведет к неустойчивому счёту, обусловленному «вычислительным» гидродинамическим взаимодействием ВП и ограждений с консолями крыла. Поэтому расчеты проводились на модели, у которой в дополнение к фиксированным дифференту и скорости была фиксирована и посадка. Посадка судна задавалась дискретно с шагом 20 мм. В ходе

вычислительного эксперимента рассмотрено порядка 50 режимов движения судна при различных посадке, углах дифферента, длинах кормового и носового ограждений и скоростях движения. Носовое и кормовое ограждения в модели выполнены в виде тонких поверхностей. Нижняя часть ограждений состоит из полос высотой 10% диаметра нижнего яруса skeg. В ходе расчетов с разными посадкой и дифферентом с помощью полос регулируется длина ограждений, обеспечивающая, с одной стороны, отсутствие их контакта с водой, с другой стороны, минимальный зазор для истечения воздуха из воздушной подушки.

Шаг по времени составлял 0,01 с. Движение по водной поверхности рассчитывалось до скорости 34 м/с ( $F_{rV} = 9,8$ ). На больших скоростях реализуется второй режим движения.

Для расчетов использовались серверы HP DL360p Gen8 и DL 160 Gen8 по 16 ядер и 62 Гб оперативной памяти в каждом.

При моделировании движения по водной поверхности на каждую задачу использовалось 8 ядер и 16 Гб оперативной памяти. В стационарной постановке (с фиксированной посадкой аппарата) для расчета требуется 10 часов. Расчет в нестационарной постановке требует двое суток. Критерием останова задачи принята сформировавшаяся форма водной поверхности, которую можно оценить по неизменности в вычислительном процессе силы трения на замкнутых баллонетах.

### Некоторые результаты вычислительных экспериментов

Верификация результатов моделирования проводилась по результатам буксировочных испытаний модели АСВП с АР в скоростном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [5]. Масштаб буксируемой модели относительно натуре равен 1:4.

На рис. 2–4 представлены зависимости соответственно полного относительного сопротивления  $R/G$  ( $G$  – вес модели), относительного всплытия  $h/b$  ( $b$  – средняя аэродинамическая хорда крыла,  $h$  – расстояние от опорной плоскости до невозмущенного уровня воды в сечении миделя в центре масс) и дифферента  $\psi$  в зависимости от числа Фруда по объемному водоизмещению  $F_{rV}$ . Наблюдается удовлетворительное согласование результатов вычислительного и физического экспериментов.

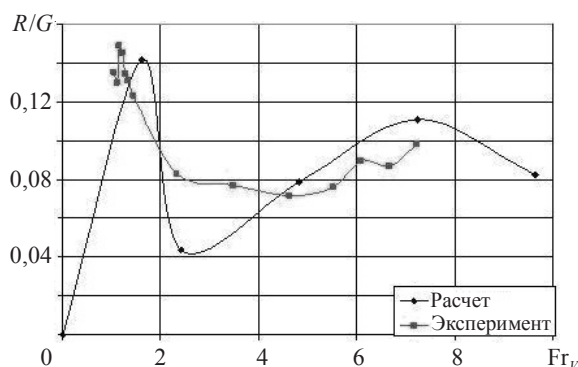


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная зависимости полного относительного сопротивления модели от числа Фруда

Расхождение результатов расчета и буксировочных испытаний связано, в первую очередь, с дискретным подходом (перебором режимов посадки аппарата по дифференту и всплытию) к построению расчетных кривых.

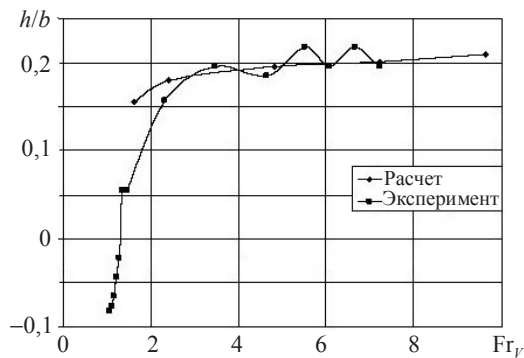


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная зависимости всплывания от числа Фруда

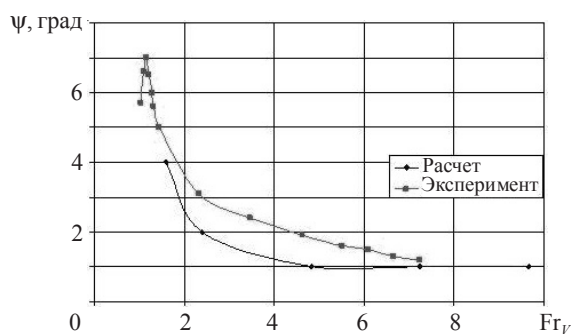


Рис. 4. Расчетная и экспериментальная зависимости дифферента от числа Фруда

На рис. 5 представлены составляющие силы сопротивления на элементах компоновки аппарата.



Рис. 5. Составляющие силы сопротивления на отдельных элементах компоновки с учетом их аэрогидродинамического взаимодействия при различных числах Фруда

На фюзеляже и верхней части центроплана реализуется разрежение, создающее тягу. Основная часть гидродинамического сопротивления реализуется на баллонетах. На носовом и кормовом ограждениях при  $Fr_V > 2$  имеет место аэродинамическое сопротивление, которое на скоростях перехода с первого режима на второй вносит основной вклад в общую величину сопротивления. На малых скоростях ( $Fr_V < 2$ ) высокое сопротивление ограждений связано с их частичным замывом при

низкой посадке и большом дифференте судна. В отсутствие контакта с водой гидродинамическое сопротивление на баллонетах падает до нуля; остается только аэродинамическое сопротивление.

### **Заключение**

Разработана методика расчета аэрогидродинамического сопротивления АСВП с АР при движении на статической воздушной подушке. Результаты расчетов верифицированы по результатам буксировочных испытаний в скоростном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Методика дает достаточно точные для принятия проектных решений результаты. Имеет место согласование экспериментальных и расчетных скоростей и величин сопротивления на двух критических режимах движения: гидродинамическом горбе сопротивления и при переходе с первого режима движения на второй. Близки значения расчетных и экспериментальных величин сопротивления на крейсерских скоростях ( $F_{rV} = 4\div 6$ ) первого режима.

### *Список литературы*

1. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2. М.: Мир, 1991. Т. 1 – 348 с., Т. 2 – 553 с.
2. Menter F.R. Zonal two equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamics flows // AIAA Paper.1993. N93-2906. 21 p.
3. Математическое моделирование аэрогидродинамики несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) баллонетного типа / П.С. Кальясов, А.В. Туманин, А.К. Якимов, В.В. Шабаров // Морской вестник. 2011. №1. С. 104–107.
4. Кальясов П.С., Шабаров В.В. Применение методов вычислительного эксперимента для исследования аэрогидродинамики несущего комплекса амфибийных судов на воздушной подушке баллонетного типа // Сб. докл. IX Междунар. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012» / М., 2012. С. 223–228.
5. Результаты проведения буксировочных испытаний модели судна на воздушной подушке с аэродинамической разгрузкой: Отчет ГИЦ РФ ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова». СПб., 2013. Пер. № 47519. 45 с.

### **MATHEMATICAL MODELING OF AEROHYDRODYNAMIC OF AMPHIBIOUS AIR-CUSHION VEHICLE WITH AERODYNAMIC UNLOADING ON CUSHION REGIME**

**P.S. Kalyasov, A.V. Fevralskikh, V.V. Shabarov**

The technique has been presented for simulation of amphibious air-cushion vehicle with aerodynamic unloading on cushion regime. The technique based on supercomputing technologies of numerical experiment, which allow to modeling turbulent flow with water-air interface. Results of simulations correlated with towing model experiments results, which have been performed in water basin of Krylov State Research Centre.

*Keywords:* amphibious vehicle, air-cushion, aerodynamic unloading, mathematical modeling, numerical simulation, aérohydrodynamics, towing resistance.