

УДК 533.657

Верификация программного комплекса OpenFOAM на задачах моделирования глиссирования морских летательных аппаратов

Варюхин А.Н.*, Овдиенко М.А. **

Предприятие «ТримСистемс», ул. Декабристов, 81,

Казань, 420034, Россия

**e-mail: trizaxe.info@gmail.com*

***e-mail: m.a.ovdienko@gmail.com*

Аннотация

В работе представлены результаты верификации программных комплексов вычислительной гидродинамики на экспериментальных данных. В качестве программы для верификации была выбрана открытая платформа для численного моделирования OpenFoam. Было показано, что для решения задач по определению гидродинамической подъёмной силы и момента, действующих на тело при глиссировании и входе в воду в стационарной и нестационарной поставке программный комплекс OpenFoam дает высокую точность совпадения с экспериментом.

Ключевые слова: гидросамолет, моделирование глиссирования, численное моделирование, мореходность.

Введение

Сопротивление и устойчивость движения самолета-амфибии по воде, а также максимальная высота волны, которую он способен преодолеть являются

определяющими в эксплуатационных характеристиках самолета-амфибии. Эти характеристики определяют требования к двигателю и конструкции самолета. В настоящее время отработка гидродинамической компоновки полностью выполняется в опытовом бассейне на динамически подобных моделях. Стоит задача минимизации количества испытаний путём численного моделирования. В настоящее время существует большое количество программных комплексов вычислительной аэрогидродинамики. Разработчики каждого из них утверждают о возможности решения любых задач в том числе моделирования процесса глиссирования по воде. К сожалению авторам данной работы не встретились работы, в которых бы была выполнена методическая верификация программных комплексов, сравнение результатов расчетов с надёжными экспериментальными данными для задач глиссирования.

Поэтому целью данной работы является верификация программного комплекса вычислительной гидродинамики на экспериментальных данных, надёжность которых не вызывает сомнений у специалистов [1]. В данной работе верифицируется программный комплекс OpenFOAM. Его особенностью является открытый исходный код, распространяемый под универсальной общественной лицензией GNU GPL. При этом её возможности ничуть не меньше, чем у коммерческих программных комплексов. Следует отметить, что до этого авторами данной работы были предприняты попытки моделирования рассматриваемых задач с применением коммерческих продуктов. К сожалению результаты оказались неудовлетворительными. Только программный комплекс Star CCM в рамках тестовой эксплуатации показал вполне приемлемые результаты.

Программный комплекс Open FOAM также, как и аналогичные продукты позволяет решать систему уравнений Рейнольдса, дополненных дифференциальной моделью турбулентности, методом конечных объёмов. Программа позволяет использовать различные типы расчетных сеток, в том числе Декартовы. Именно Декартовы сетки наиболее лучшим образом подходят для решения задач со свободной границей, т.к. в большинстве случаев она будет параллельна граням расчетной сетки.

Тестирование выполнялось на трёх типах задач: стационарное глиссирование килеватого тела по невозмущенной поверхности воды на полной и неполной ширине, прохождение килеватым телом серии регулярных волн, вход призматического тела в воду. Эти задачи являются базовыми для проблематики глиссирования гидросамолетов, самолетов-амфибий и экранопланов.

1. Стационарное глиссирование по спокойной воде

В работе [1] представлены результаты систематических экспериментов по определению гидродинамических сил и моментов при стационарном глиссировании плоскокилеватых пластин в опытовом бассейне ФГУП «ЦАГИ». Несмотря на то, что эти результаты были получены более полувека назад, сомневаться в их достоверности не приходится.

Выделяют два режима глиссирования по характеру обтекания. Первый – это глиссирование на неполной конструктивной ширине, также называемое, как глиссирование без смачивания скул (см. Рис. 1а). Второй – глиссирование на полной

конструктивной ширине или режим глиссирования со смачиванием скул (см. Рис. 1б). Характер обтекания в обоих случаях существенно различается.

При глиссировании на неполной конструктивной ширине проекция смоченной поверхности плоскокилеватой пластины на плоскость, проходящую через киль, перпендикулярную продольной плоскости симметрии пластины, представляет треугольник (см. Рис. 1а).

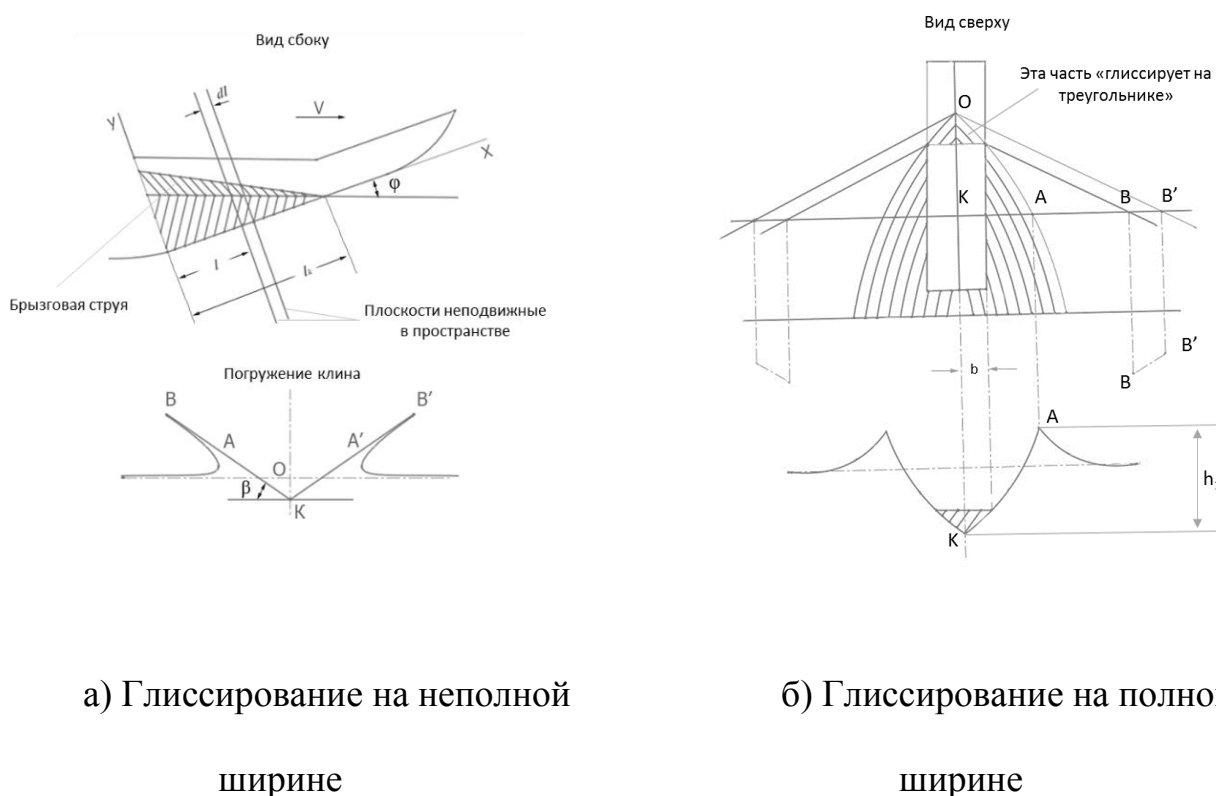


Рис. 1. Схема течений жидкости при глиссировании на полной и неполной конструктивной ширине

В каждом поперечном сечении глиссирующей пластины течение имеет характер, сходный с течением, образуемым клином, погружающимся в воду с постоянной скоростью. Вблизи передней кромки глиссирующей поверхности имеет

место ветвление потока, на этих линиях давление максимально. В районе пересечения свободной границы и поверхности пластины имеет место подъём жидкости выше невозмущенного уровня. Экспериментально и теоретически показано [1, 2], что количественное отношение смоченных ширин с учетом подпора c и без учета подпора c_0 составляет:

$$\bar{c} = \frac{c}{c_0} \approx \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

В работе [3] было экспериментально подтверждено это выражение для глиссирующих плоскокилеватых пластин с углом поперечной килеватости $\beta = 30^\circ$ в широком диапазоне скоростей, погружений и углов дифферента.

При глиссировании на полной ширине проекция смоченной поверхности на плоскость, проходящую через скулы, представляет пятиугольник (см. рис. 1б). Картина обтекания существенно отличается от картины обтекания на неполной ширине. Передняя часть днища глиссирует без смачивания скул основным потоком. Остальная часть глиссирует с погруженной скулой. Основной поток в этом случае срывается не только с транца пластины, но и со скуловой линии.

Эксперименты в работе [1] выполнялись по следующей схеме. Тело, похожее на корпус лодки с постоянным углом поперечной килеватости β с фиксированным углом дифферента ϑ буксировалось по поверхности спокойной воды с постоянной скоростью. Тело имело свободу вертикальных перемещений. В процессе испытаний измерялись скорость, вертикальные перемещения, сила сопротивления, продольный момент. Подъёмная сила задавалась весом тела, который можно было изменять

путём разгрузки через систему блоков. Для исключения влияния аэродинамической силы при буксировке перед моделью был установлен аэродинамический щит.

Испытания на режиме без смачивания скул проводились с телом шириной $B=0,6$ м, длиной 2м, углом поперечной килеватости $\beta=30^\circ$. На режиме со смоченной скулой испытания проводились с телом шириной $B=200$ мм, длиной 2м, углом поперечной килеватости $\beta=15^\circ$.

При численном моделировании задача решалась в обращенной постановке [5-12]. Тело было зафиксировано по углу дифферента и погружению киля в районе транца относительно невозмущенного уровня жидкости. На входе в расчетную область перед телом задавалась скорость потока жидкости.

На рис. 2 показан фрагмент расчетной сетки. В силу симметрии задачи рассматривалась только половина тела. Размер расчетной области $20 \times 10 \times 5$ м. Основной объём расчетов был выполнен на расчетной сетке объёмом 9,5 млн ячеек. Величина Y^+ на поверхности тела не превышал значения 1,0. В ходе расчетов подбирался шаг по времени. В итоге основная часть расчетов выполнялась с шагом 0,0001-0,001 сек.

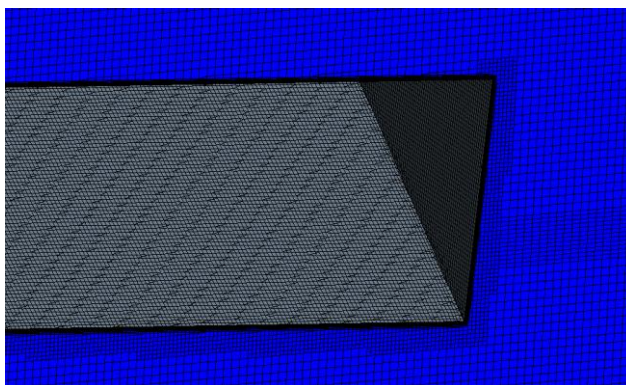


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

Были выполнены серии расчетов при разных углах дифферента, погружениях модели, скорости потока.

На рис. 3 представлено изображение свободной поверхности воды позади глиссирующего тела.

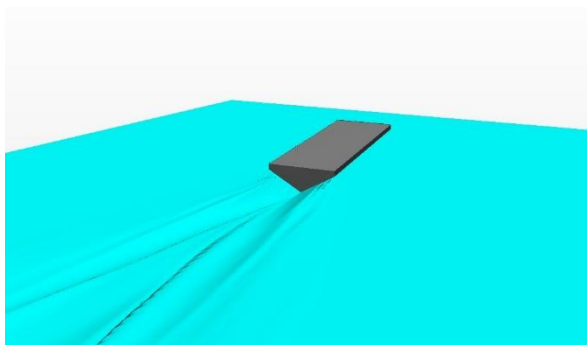


Рис. 3. Изображение системы волн на поверхности воды, сформированной глиссирующим телом.

Качественно картина течения и система волн соответствуют реальной картине течения. За телом формируется волновая впадина, которая затем переходит в горб, также за телом формируются система косых относительно направления движения волн. Форма смоченной поверхности днища имеет форму треугольника (см. Рис. 4). Вблизи тела имеет место подъем свободной границы на встречу глиссирующей поверхности и формируются брызговые потоки (см. рис. 1а). На рис. 5 показаны изображения границы жидкости в вертикальных поперечных сечениях тела. Хорошо видны брызговые потоки на границе жидкости на поверхности тела.

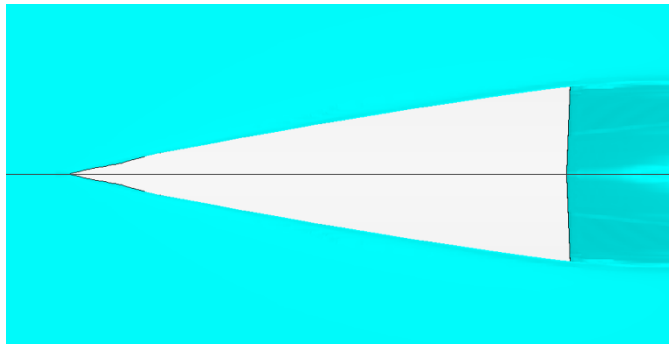


Рис. 4. Изображение смоченной части днища

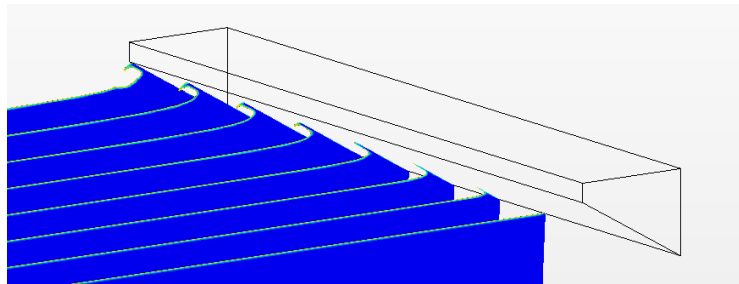


Рис. 5. Формирование всплеска и брызговых потоков на границе
гладясирующего тела и жидкости

Для сопоставления количественных показателей, характеризующих обтекание на рис. 6 представлены отношения смоченной ширины тела и ширины тела на уровне невозмущенной жидкости в районе транца для различных расчетных случаев. На этом же графике отмечено известное значение этого отношения (1), составляющее величину $\pi / 2$.

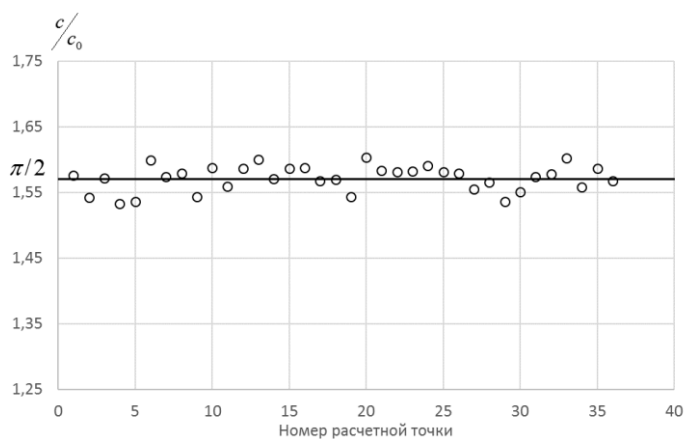


Рис. 6. Отношение смоченной ширины к геометрической ширине, глиссирующей плоскокилеватой пластины

Можно отметить хорошее совпадение расчетных значений с известными результатами в пределах точности выполнения экспериментов [3].

Основные результаты расчетов гидродинамических сил и моментов и их сопоставление с экспериментальными данными для глиссирования на неполной ширине представлены на рис. 7а-в. Результаты относятся к случаю глиссирования плоскокилеватой пластины с углом поперечной килеватости 30° , скоростью 6 м/с, углом дифферента $\vartheta = 4^\circ$. Результаты расчетов представлены в виде зависимостей подъемной силы Y , силы сопротивления X и продольного момента, действующих на тело от глубины погружения килевой линии на транце H относительно невозмущенной границы жидкости. Продольный момент отсчитывается от кормовой точки на киле.

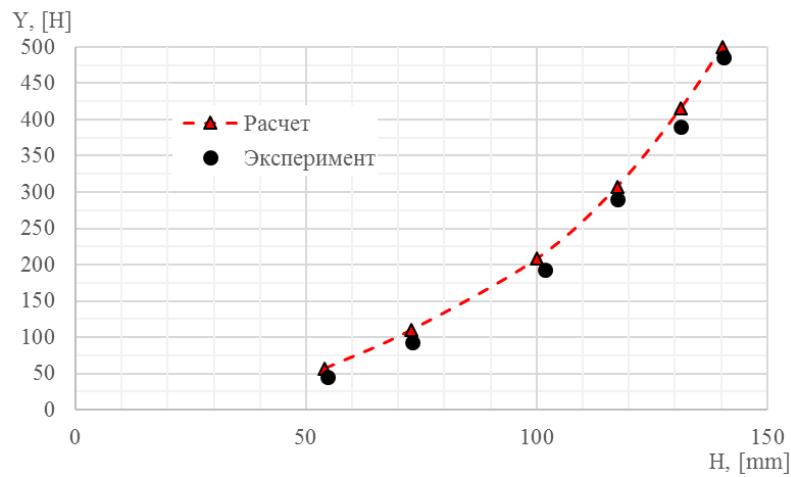


Рис. 7а. Зависимость подъёмной силы Y , действующей на тело от глубины погружения H

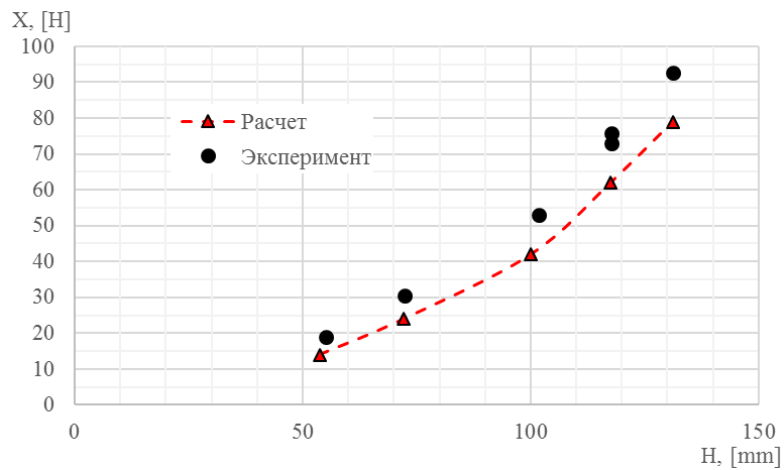


Рис. 7б. Зависимость силы сопротивления X , действующей на тело от глубины погружения H

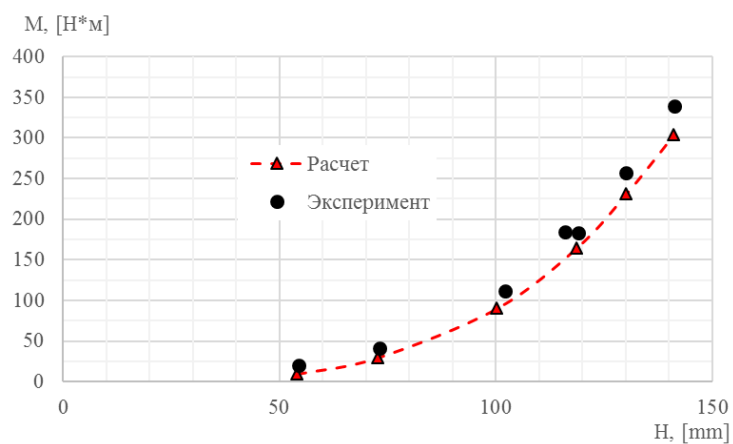


Рис. 7в. Зависимостей продольного момента M , действующего на тело от глубины погружения H

Можно отметить хорошее совпадение значений подъёмной силы, полученных в расчетах и экспериментах. При чем удовлетворительное совпадение уже имеет место при довольно грубых расчетных сетках объёмом 800 000 ячеек (см. рис. 8).

Значения продольных моментов в расчете воспроизводятся несколько хуже, чем подъёмная сила.

Наибольшие вопросы вызывает точность воспроизведения силы сопротивления. Качественно зависимость рассчитанного сопротивления от скорости соответствует экспериментальному, но количественно на 10-15% меньше.

При сопоставлении результатов расчетов и экспериментов необходимо учитывать точность последних. Подъёмная сила, действующая на буксируемую в процессе экспериментов модель, фактически задаётся её весом. Модель имеет свободу по вертикальным перемещениям, которые относительно уровня невозмущенной жидкости измеряются с точностью 2-4 мм. Данная точность обусловлена в первую очередь погрешностью в определении уровня свободной поверхности в процессе испытаний, в связи наличием постоянно присутствующих длинных волн малой высоты в опытовом бассейне. Скорость измеряется с точностью 0,1 м/с и поддерживается постоянной в пределах 0,2 м/с. Т.е. на уровне погружений более 100 мм для графика на рис. 7а погрешность экспериментальных значений подъёмной силы находится в пределах 4% и менее. При меньших погружениях погрешность увеличивается. Т.е. можно утверждать, что полученные в

процессе расчетов значения подъёмной силы коррелируют с экспериментальными данными в пределах точности экспериментов.

Наибольшую сложность при проведении гидродинамических испытаний в постановке работы [1] вызывает корректное измерение продольного гидродинамического момента. Здесь сказывается множество факторов. Это и исключительно нестационарный характер обтекания при глиссировании, меняющаяся форма и площадь замытой водой поверхности, невозможность создания полноценной базы динамометра, взаимовлияние различных сил, ошибки при определении начального погружения. Суммарно это даёт погрешность эксперимента на уровне 10% и более, особенно точность падает при малых погружениях. Поэтому, можно утверждать, что продольный момент коррелирует с экспериментальными данными в пределах точности измерений.

На основании опыта авторов работы в проведении гидродинамических испытаний можно утверждать, что суммарная погрешность определения силы сопротивления глиссирующего корпуса в работе [1] составляет 3-5%. Различия в значениях силы сопротивления между расчетными и экспериментальными значениями больше погрешности измерений. Сила сопротивления имеет две составляющие. Первое – вызванное статическим давлением, которое пропорционально силе гидродинамической подъёмной силе и угла дифферента $Ytg\vartheta$. Второе обусловлено трением, т.е. касательными напряжениями. Т.к. гидродинамическая подъёмная сила хорошо коррелирует с экспериментальными данными, то можно утверждать, что некорректно моделируется сопротивление трения. Поэтому в дальнейшем необходимо выполнить вариацию параметров

модели турбулентности и пристеночных функций, выполнить расчеты на более детализированной расчетной сетке с малым шагом по времени, что потребует существенных вычислительных ресурсов.

На рис. 8 представлены зависимости значений силы сопротивления, подъемной силы, продольного момента для одного расчетного случая в зависимости от количества ячеек расчетной сетки. Количество ячеек расчетной сетки является всего лишь интегральным показателем, не учитывающим топологию сетки. Но тем ни менее позволяет сделать некоторые выводы. Как уже было сказано, гидродинамическая подъемная сила хорошо воспроизводится уже при 800 000 ячеек и её значение практически не изменяется с их увеличением. Значение продольного момента сходится при количестве ячеек более 4,5 млн. По значению силы сопротивления сходимость по количеству ячеек не достигнута.

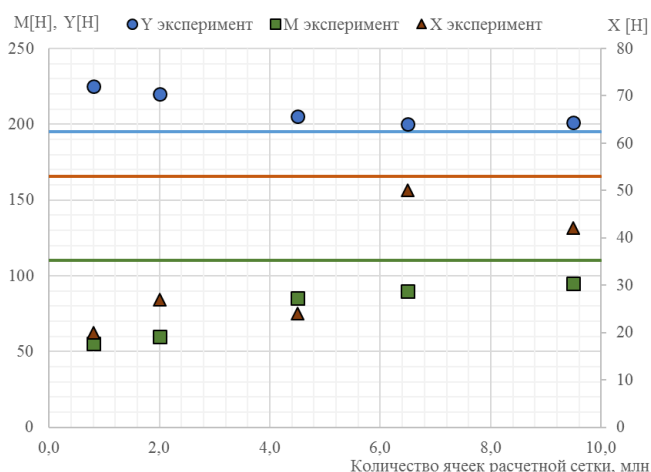


Рис. 8. Влияние количества ячеек расчетной сетки на результаты расчетов

Результаты моделирования для случая глиссирования плоскокилевой пластины на полной ширине в виде зависимостей подъемной силы Y , силы

сопротивления X , продольного момента M представлены на рис. 9а-б. Результаты относятся к случаю глиссирования со скоростью 8м/с, углом дифферента $\vartheta = 5,75^\circ$ пластины с углом поперечной килеватости 15° , шириной 200мм. Объем расчетной сетки составил 9,5 млн. ячеек. Величина Y_+ на поверхности глиссирующей пластины не превышала 1,0.

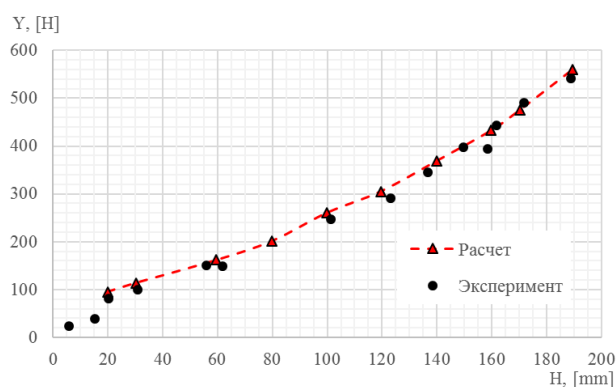


Рис. 9а. Зависимость подъемной силы Y , действующей на тело от глубины погружения H

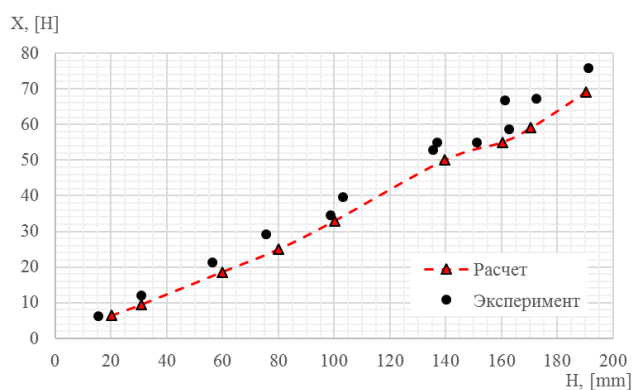


Рис. 9б. Зависимость силы сопротивления X , действующей на тело от глубины погружения H

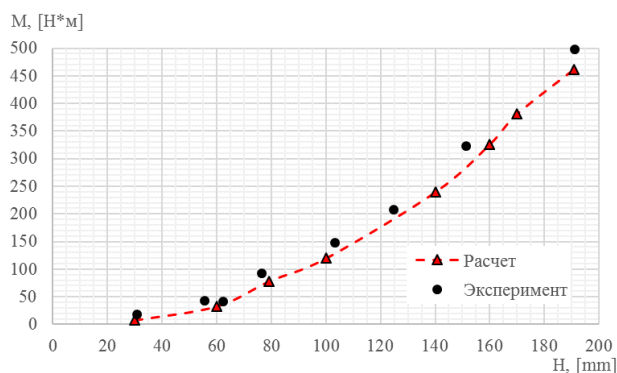


Рис. 9в. Зависимостей продольного момента M , действующего на тело от глубины погружения H

Как и в случае с глиссированием на неполной ширине получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений для суммарной гидродинамической подъемной силы (в пределах точности экспериментов). При этом рассчитанные значения продольного момента и силы сопротивления получились несколько меньше экспериментальных. Здесь, как и в случае глиссирования на неполной ширине, следует учитывать, что точность определения продольного момента глиссирующих объектов в процессе гидродинамических испытаний довольно низкая, поэтому можно утверждать, что в пределах точности эксперимента результаты для продольного момента воспроизводятся удовлетворительно.

В целом по результатам моделирования процесса глиссирования на полной и неполной ширине в условиях спокойной воды можно утверждать, что программный комплекс OpenFOAM позволяет достаточно достоверно воспроизводить картину течения, а также количественные значения подъемной силы и продольного момента (в пределах точности эксперимента). Причем необходимо отметить, что приемлемое

совпадение в пределах точности эксперимента для подъёмной силы могут быть получены уже на расчетных сетках объемом 800 000 элементов.

Вопрос корректности определения силы сопротивления остаётся открытым. В целом, для определённого класса задач, когда точность определения силы сопротивления не является принципиальным фактором, данный уровень точности можно считать удовлетворительным. В дальнейшем необходимо выполнить вариации параметров модели турбулентности, выполнить расчеты с более детализированной расчетной сеткой, выполнить расчеты без использования пристеночных функций в пограничном слое. Но для этого требуются существенные вычислительные ресурсы, недоступные авторам работы в настоящее время.

2. Глиссирование в условиях волнения

В работе [4] были проведены экспериментальные исследования по определению нестационарных нагрузок, действующих на тело с плоскокилеватыми обводами при прохождении им регулярных волн с большими скоростями. Эксперимент выполнялся следующим образом. Модель была зафиксирована на штанге буксировочной тележки опытового бассейне под определенным углом дифферента и на фиксированном заглублении киля в районе транца относительно гребня волн. Испытания проводились при длине волны 3200 мм и высоте 160 мм. Скорость буксировки составляла 8 м/с. В процессе испытаний измерялась мгновенная подъёмная сила. Ширина тела составляла 300 мм, угол поперечной килеватости 15° .

В расчете были воссозданы условия моделирования, но в обращенной постановке. Тело было зафиксировано и были заданы бегущие на встречу модели регулярные волны и скорость потока 8 м/с. Объем расчетной сетки составил 4,5 млн, ячеек, шаг по времени 0,0001 сек.

Результаты расчетов в виде зависимостей максимальной подъемной силы Y_{Σ} от величины заглубления h кила на транце представлены на рис. 10. Величина h отсчитывалась от плоскости, проходящей через гребни волн.

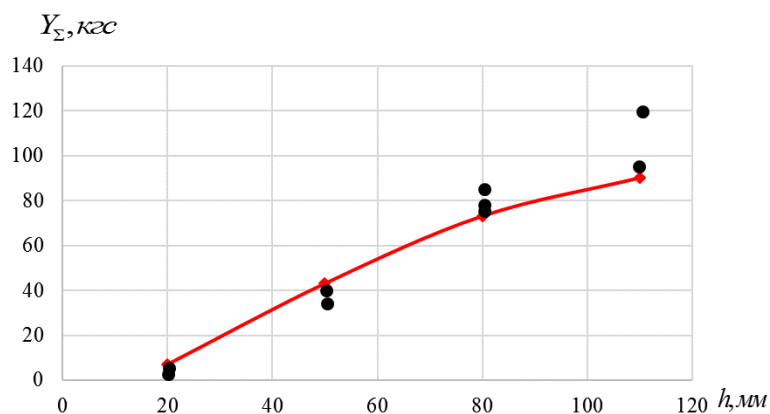


Рис. 10. Зависимость максимальной подъемной силы от погружения редана при стационарном глиссировании плоскокилеватой пластины по взволнованной поверхности воды

Можно отметить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений максимальной подъемной силы в пределах точности эксперимента.

Дополнительно на рис. 11 для величины погружения кила в районе транца $h = 80$ мм представлены графики изменений суммарной подъемной силы от времени, полученные в эксперименте и расчете.

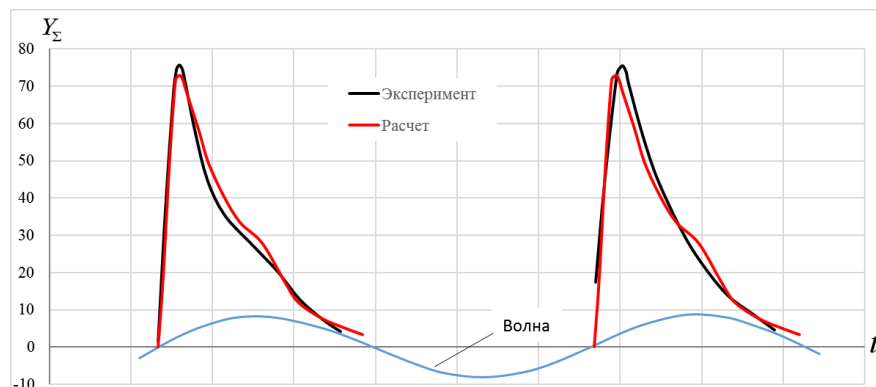


Рис. 11. Зависимости изменения подъемной силы, действующей на тело при прохождении им двух последовательных гребней волны

Здесь также можно отметить хорошее совпадение характера кривых и количественных значений.

Таким образом, можно утверждать, что и для случая нестационарного глиссирования в условиях волнения получены удовлетворительные результаты, позволяющие рекомендовать использовать программный комплекс Open FOAM для моделирования задач глиссирования не только в условиях спокойной воды, но и волнения.

3. Вход в воду килеватых тел

При быстром входе тел в воду образуются всплески и брызговые потоки жидкости, особенностью которых является их относительно высокая кинетическая энергия и малые размеры (стремящиеся к нулю в теории идеальной жидкости). Поэтому у многих исследователей есть сомнения, что численные методы, основанные на методе конечных объемов, способны адекватно решать подобные

задачи, или же для этого могут потребоваться слишком детализированные сетки и, следовательно, большие вычислительные ресурсы. Задача входа тела в воду имеет место не только при приводнении самолета-амфибии. Для расчета сил и моментов, действующих на глиссирующее тело, широко используется метод поперечных плоских сечений. Так Г.В. Логвинович [2] показал, что в первом приближении при глиссировании тела течение в вертикальных поперечных основному потоку слоях жидкости практически не зависят друг от друга и схожи течению при погружении в воду тела с формой, соответствующей поперечному сечению. В основном для определения сил, действующих на погружающийся в воду профиль, используются либо теоретические для простых геометрий (призма, цилиндр, ломаная линия), либо экспериментальные данные. Если численный метод продемонстрирует хороший результат, то это позволит определять силы, действующие на погружающиеся тела практически любых форм. И использовать эти данные в расчетах с применением метода поперечных плоских сечений, который обладает тем преимуществом, что позволяет решать задачу динамики глиссирования в режиме реального времени.

В ФГУП «ЦАГИ» В.П. Соколянским были выполнены эксперименты [5], моделирующие погружение в воду призматических тел в двумерной постановке. Эксперимент был поставлен таким образом, что тело было неподвижно и на него снизу натекало жидкость в вертикальной плоскости. Т.е. скорость жидкости на свободной поверхности была направлена вертикально вверх. В процессе эксперимента измерялась вертикальная сила, действующая на тело, и производилась видеосъемка через прозрачную стенку установки.

С помощью программного комплекса Open FOAM было выполнено численное моделирование в такой же постановке [12-20].

Результаты моделирования входа в воду серии тел представлены на рис. 12-15 в виде зависимостей вертикальной силы, действующей на тело, от глубины его погружения, и изображений водной поверхности в разные моменты времени. Так были смоделированы вход в воду двух клиньев с углами килеватости 15° и 25° , цилиндрического тела и клиновидного профиля с цилиндрической поверхностью у вершины. На рис.12-14 представлены экспериментальные данные.

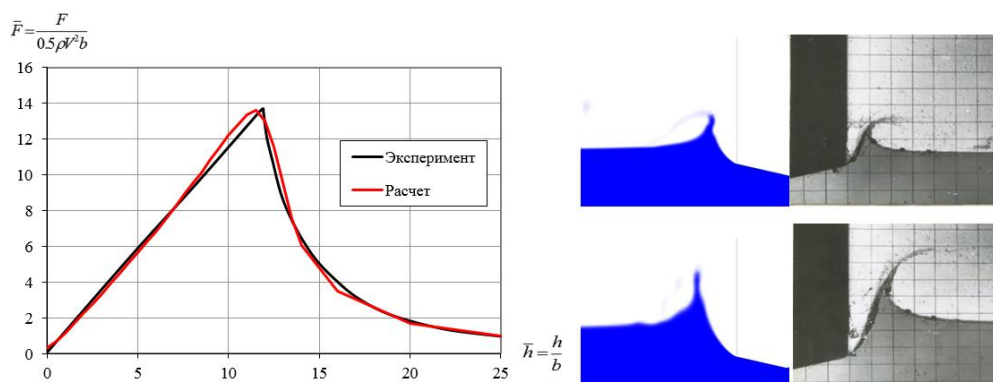


Рис. 12 Сопоставление результатов расчётов и экспериментов погружения в воду клина с углом килеватости 15°

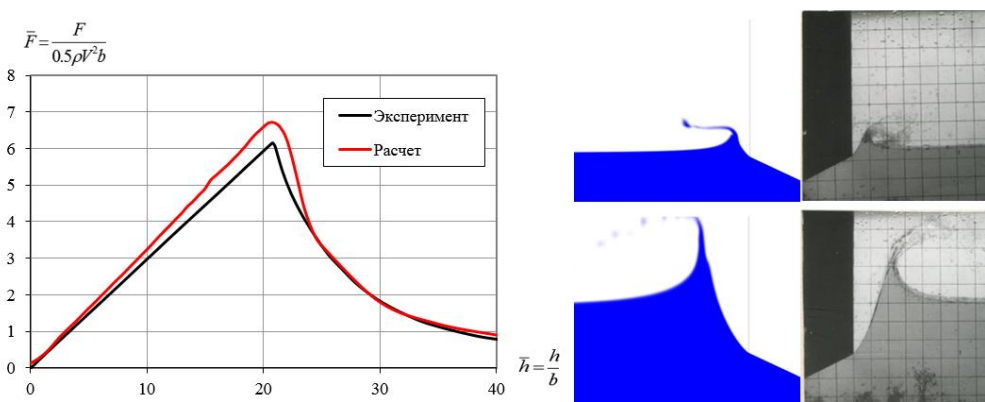


Рис. 13. Сопоставление результатов расчётов и экспериментов погружения в воду клина с углом килеватости 25°

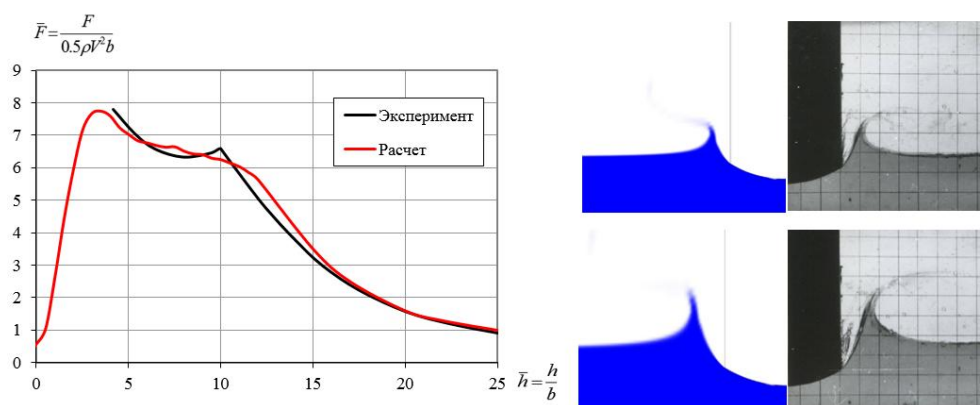


Рис. 14. Сопоставление результатов расчётов и экспериментов погружения в воду цилиндрического профиля

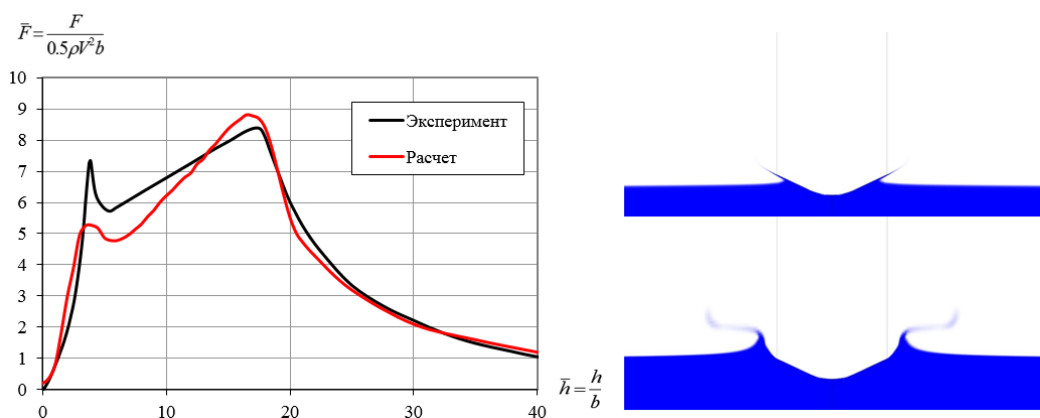


Рис. 15. Сопоставление результатов расчётов и экспериментов погружения в воду клиновидного профиля с цилиндрической поверхностью у вершины.

Как можно увидеть результаты численного моделирования с помощью программного комплекса OpenFOAM качественно и количественно совпадают с экспериментальными данным в пределах точности эксперимента. Таким образом можно рекомендовать использовать программный комплекс OpenFOAM для расчета параметрических зависимостей нагрузок, действующих при входе в воду в вертикальной плоскости сечений днища самолётов-амфибий, имеющих сложную

геометрию. И в дальнейшем использовать эти параметрические зависимости при расчете динамики глиссирования методом поперечных плоских сечений.

4. Глиссирование с транцевым интерцептором

Гидродинамический интерцептор представляет собой небольшую пластину, устанавливаемую поперек потока на транце или редане глиссирующего объекта. Высота интерцептора обычно не превышает 1-1,5% от ширины корпуса. Перед интерцептором происходит торможение потока и возникает зона повышенного давления, которая приводит к увеличению суммарной подъемной гидродинамической силы и смещению центра её приложения ближе к корме. Гидродинамические интерцепторы применяются в качестве элементов механизации днища и позволяют управлять углами дифферента и крена глиссирующих корпусов. В работе [6] были представлены результаты экспериментальных исследований стационарного глиссирования плоскокилеватых пластин с интерцептором. В данной работе было выполнено расчетное моделирование в аналогичной постановке.

На рис. 16 представлены результаты численного моделирования глиссирования корпуса с плоскокилевыми обводами с углом поперечной килеватости 15° в виде зависимостей коэффициента суммарной подъемной силы

$$C_b = \frac{Y}{0.5\rho V^2 B^2}$$
 при высоте интерцептора 0,5% от ширины корпуса и без интерцептора.

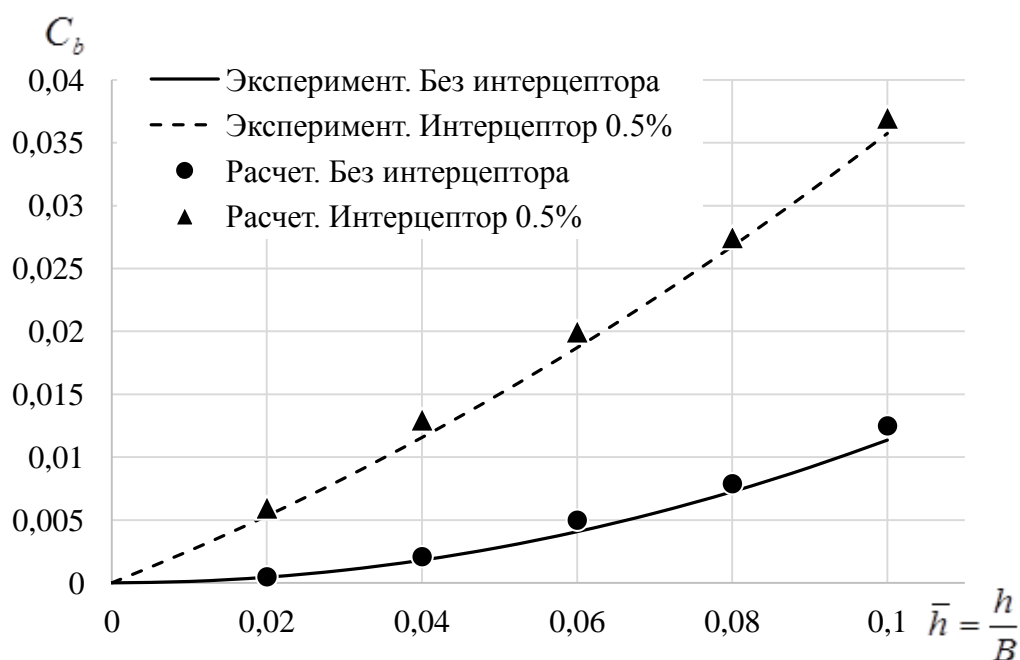


Рис. 16. Зависимость суммарной подъемной силы от высоты интерцептора при разных погружениях кормы

Можно утверждать, что результаты расчетов хорошо коррелируют с экспериментальными данными.

Выводы

В работе была выполнена верификация открытого программного комплекса вычислительной аэрогидродинамики Open FOAM и определена возможность его использования для моделирования обтекания тел жидкостью на режиме глиссирования, имеющих сходные с гидросамолетами обводы. В программном комплексе решались модельные задачи глиссирования и входа тел в воду. Среди них:

- глиссирование плоскокилеватого тела на неполной смоченной ширине по спокойной воде;
- глиссирование плоскокилеватого тела на полной смоченной ширине по спокойной воде;
- прохождение плоскокилеватым телом серии регулярных волны;
- вход призматических тел в воду;
- глиссирование плоскокилеватого тела с гидродинамическим интерцептором на транце по спокойной воде.

Для всех задач получено хорошее качественное совпадение картины течений с тем, что наблюдается в реальности. Это относится и к задачам глиссирования и входа в воду.

Количественно получено хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений гидродинамической подъёмной силы и продольного момента в пределах точности измерений. При чем приемлемые результаты для подъёмной силы могут быть получены на довольно грубых расчетных сетках объёмом до 1 млн ячеек.

Для силы сопротивления расчётные значения качественно соответствует экспериментальным зависимостям, но количественно результаты существенно занижены. Отличие результатов превышает ошибку измерений.

Можно рекомендовать программный комплекс OpenFOAM с открытым исходным кодом для решения задач по определению гидродинамической подъёмной

силы и момента, действующих на тело при глиссировании и входе в воду в стационарной и нестационарной поставке.

Для определения возможности использования программного комплекса OpenFOAM для расчета гидродинамического сопротивления глиссирующих тел необходимо проведение дополнительных исследований, в которых будут варьироваться модели турбулентности и их параметры, параметры пристеночных функций. Также необходимо проведение расчетов на детализированных расчетных сетках объемом более 20 млн. ячеек.

Библиографический список

1. Тихонов А.И., Колосов Г.К. Гидродинамические характеристики плоскокилеватых пластин при установившемся глиссировании и при косом входе в воду с постоянной скоростью и постоянным углом приведения. Сборник работ по гидродинамике. - М.: Изд-во ЦАГИ, 1959. С. 140 - 166.
2. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. - Киев: Наукова думка, 1969. - 215 с.
3. Коврижных Л.Д. Исследование гидродинамических характеристик плоскокилеватых пластин, глиссирующих на режимах без смачивания скул. - Сер. Труды Центрального аэрогидродинамического института имени Н.Е. Жуковского. Вып. 1861. - М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1977. С. 3 - 19.
4. Соколов В.А. О гидродинамической подъемной силе плоскокилеватых тел при движении с большими скоростями по волне. Сборник работ по гидродинамике. - М.: ЦАГИ, 1959. С. 183 - 207

5. Грумодз В.Т., Журавлев Ю.Ф., Парышев Э.В., Соколянский В.П., Шорыгин О.П. Гидродинамика и динамика высокоскоростного движения тел в жидкости. - М.: Наука, 2013. - 573 с.
6. Банникова Т.И., Банников Ю.М., Лукашевский В.А., Цейтлин М.Ю. Исследование гидродинамических характеристик глиссирующих поверхностей с интерцептором на задней кромке. Сер. Труды Центрального аэрогидродинамического института имени Н.Е. Жуковского. Вып. 1906. - М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1978. С. 3 - 22.
7. Лукашевский В.А., Банников Ю.М. Глиссирующее судно. Авторское свидетельство № 1730606/27-11 СССР, 28.12.1971
8. Бочагов В.И., Карпышев А.В. Быстроходное судно // Патент РФ № 2163553, 27.02.2001.
9. Шорыгин О.П., Беляевский А.Н., Гонцова Л.Г., Неделенко Д.В. Расчетная оценка величин гидродинамических нагрузок на цилиндр в условиях его стационарного глиссирования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 3. С. 5 – 10.
10. Zhuravlev Y.F., Varyukhin A.N., Shulman N.A., Arzhanov A.I., Ovdienko M.A. Experimental and theoretical investigations of cylinder with hydrodynamic interceptor glissading on flat water surface // FAST 2013 - 12th International Conference on Fast Sea Transportation, Amsterdam, 2-5 December 2013.
11. Банников Ю.М., Лукашевский В.А., Лукьянов С.С. Математическая модель движения гидросамолета на волнении // Научная конференция по гидроавиации

«Геленджик-96» (Геленджик, 25-27 сентября 1996). Сборник докладов. - М.: ГосНИЦ ЦАГИ, 1996. С. 168 - 172.

12. Справочник авиаконструктора. Т. 2. Гидромеханика гидросамолёта. - М.: Изд-во ЦАГИ, 1938. - 280 с.

13. Логвинович Г. В. Погружение профилей в жидкость, удар и глиссирование. Труды ЦАГИ Вып. 707. – М.: Изд-во-ЦАГИ, 1958. -39 с.

14. Варюхин А.Н., Арилин А.В., Дикий С.В., Овдиенко М.А. Расчётное исследование эффективности применения амортизированных и демпфированных стоек крепления поплавкового шасси для увеличения мореходности поплавкового гидросамолёта // X Международная научная конференция по гидроавиации (Геленджик, 5-6 Сентября 2014). Сборник докладов. Ч. 1. - М.: ЦАГИ, 2014. С. 54 - 61.

15. Банников Ю.М., Лукашевский В.А., Породников С.А. и др. Глиссирующее судно // Патент РФ № 2131373, 10.06.1999.

16. Махров В.П., Глущенко А.А., Юрьев А.И. Влияние гидродинамических особенностей на поведение свободной поверхности жидкости в высокоскоростном потоке // Труды МАИ. 2013. № 64: URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36423>

17. Маркина Н.Л. Алгоритмы численного решения уравнений Навье-Стокса при наличии кавитации // Труды МАИ. 2011. № 44. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25052>

18. Головнев А.В., Котов И.А., Тарасов А.Л. Численное моделирование аэродинамической асимметрии и способ обеспечения боковой устойчивости

маневренного самолета // Труды МАИ. 2015. № 82. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=58621>

19. Вершков В.А., Крицкий Б.С., Махнев М.С., Миргазов Р.М., Требунских Т.В. Сравнение результатов численного моделирования обтекания несущего винта в различных пакетах программ // Труды МАИ. 2016. № 89. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=72704>

20. Варюхин А.Н., Овдиенко М.А. Глиссирование самолета-амфибии при отказе одного из двигателей // 59-я научная конференция МФТИ, (Долгопрудный, 21-26 ноября 2016). Тезисы докладов. URL: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/2781.pdf

Статья поступила в редакцию 13.12.2018