

УДК 532. 512.: 629. 735.35

А.А. Расстрыгин

*Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники
Вооруженных Сил Украины, Киев*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ МОРЕХОДНОСТИ САМОЛЕТА-АМФИБИИ ПРИ ПРОДОЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предложена методика численных исследований гидродинамических характеристик летательных аппаратов (транспортных средств) водного и амфибийного базирования на дозвуковых скоростях, реализованная с использованием синтеза методов дискретных вихрей и плоских сечений для формирования гидродинамических составляющих вектора правых частей дифференциальных уравнений продольного (как основного на взлетно-посадочных режимах) движения по водной поверхности и входящая в состав разработанного автором научно-методического аппарата гидродинамической модели для последующего его интегрирования в САПР.

гидродинамические характеристики, транспортные средства водного и амфибийного базирования, глиссирование, мореходность, синтез методов, надежность гидродинамического проектирования

Вступление

Постановка проблемы. Среди проблем создания высокоэффективных транспортных средств (ТС) различного назначения, взаимодействующих с водной поверхностью (водного и амфибийного базирования (ВАБ) – самолеты-амфибии (СА), гидросамолеты (ГС), экранопланы (ЭП), скоростные корабли, катера, суда на воздушной подушке и др.), важное место занимает обеспечение их надежности в процессе эксплуатации.

Известно, что эффективность использования таких ТС во многом зависит от их мореходности, которая определяется гидродинамическими характеристиками (ГХ). Возросшие скорости движения рассматриваемых ТС, в первую очередь, летательных аппаратов (ЛА) ВАБ на взлетно-посадочных режимах (ВПР) приводят к повышению гидродинамических нагрузок на элементы конструкции при контакте с водной поверхностью, что при эксплуатации может вызывать неустойчивость движения,

деформации и разрушение днищ лодок. Из практики летно-морских испытаний ГС, СА известно, что перегрузки, действующие на элементы их днищ, существенно, а иногда и многократно превышают значения соответствующих параметров при полете в атмосфере.

В связи с отмеченным, особое место при обеспечении достаточной мореходности, а следовательно, и надежности рассматриваемых ЛА, занимает проблема обеспечения достоверной расчетной информации о ГХ уже на стадии проектирования, которая остается весьма актуальной. До сих пор она решается, как правило, двумя основными подходами: расчетным, с использованием полуэмпирических или численных моделей и физическим моделированием в гидроканалах (гидробассейнах) или на открытой воде посредством протяжек геометрически подобных моделей исследуемых объектов. Окончательная доводка осуществляется в процессе летно-морских испытаний образцов [1].

Анализ известных результатов исследований и публикаций Известно [2], что решение задачи нестационарного взаимодействия тел со свободной поверхностью жидкости (глиссирование, посадка на воду) в общей постановке чрезвычайно сложно. В связи с этим, традиционно, выполняют ее упрощение путем сведения пространственной задачи к плоской [3]. Такой подход, в частности, реализуется при использовании общепринятого и широко используемого для подобного рода задач метода плоских сечений (МПС) [2, 3].

Суть подхода заключается в следующем [3].

Каждое поперечное сечение глиссирующего тела считается расположенным в относительном плоском потоке, нормальном к килю. Скорости натекания плоских потоков в различных поперечных сечениях считаются равными нормальным к килю скоростям соответствующих точек кия. Течения жидкости в различных поперечных сечениях предполагаются независимыми друг от друга. Течением жидкости вдоль кия пренебрегается. Последнее допущение предполагает большие смоченные удлинения исследуемых объектов (отношение смоченной длины к ширине), что характерно для современных ТС ВАБ при движении по водной поверхности [1].

Таким образом, в МПС рассматриваются вертикальные плоскости, перпендикулярные продольной оси, расположенные на известном (заданном) расстоянии от начала неподвижной системы координат. Течение жидкости в этой плоскости принимается двухмерным, вызванным прониканием в жидкость и деформацией контура, образующегося при пересечении телом рассматриваемой плоскости.

В этом случае вертикальная сила определяется только геометрией контура и его движением относительно жидкости. Гидродинамика сечений на различных фазах погружения контура в жидкость определяется с использованием аналитических теорий [1 – 3]. Так, на режимах погружения до замыва скул в основе расчета ГХ сечений здесь используются два подхода [3]:

- первый основывается на теории автомодельного погружения Вагнера [4];
- второй основывается на теории Седова удара клина, который плавает на поверхности жидкости.

Оба подхода дают близкие результаты и базируются на линейной теории.

На переходном режиме используется функция Логвиновича [5], а на режимах после замыва скул – теория Бобылева [2, 5].

Суммарные ГХ объектов определяются интегрированием по их смоченной длине элементарных сил и моментов по расчетным сечениям.

Наряду с определенной оперативностью получения при этом отдельных интегральных ГХ исследуемых

объектов за счет использования аналитических зависимостей для расчета гидродинамики сечений такой подход имеет существенное ограничение, связанное с возможностью его реализации лишь для плоскокилеватых форм профилей.

В то же время геометрия контуров (сечений) днищ современных ТС ВАБ имеет достаточно сложную профилировку, в результате чего полученная информация с использованием отмеченного выше аппарата может значительно отличаться от реальной и требует в дальнейшем корректировки расчетной модели по результатам физического моделирования, что неоперативно, дорого и может быть справедливым лишь для конкретной гидродинамической компоновки ТС.

В связи с отмеченным, целесообразным представляются исследования, направленные на совершенствование методик гидродинамических исследований, которые целесообразно создавать на основе синтеза различных методов.

Цель исследований. В работе предполагается разработать методику расчета гидродинамических характеристик, основанную на синтезе метода дискретных вихрей и МПС [3, 6] для последующего ее использования в задаче оценки мореходности ТС водного и амфибийного базирования при продольном движении по водной поверхности.

Результаты исследований

Основным режимом движения ТС водного и амфибийного базирования по водной поверхности на ВПР является продольное, которое и принято в дальнейшем за основу при разработке методики.

В рамках общепринятого подхода ЦАГИ, использующего МПС [3], в дальнейшем в работе для расчета ГХ сечений предложено использовать результаты расчета вертикально погружающихся контуров в идеальную несжимаемую жидкость по методике [7], реализующей нелинейную математическую модель [8], которая свободна от ограничений на геометрию контуров (шпангоутов днищ лодок) и показала достаточную эффективность при расчетах их гидродинамических характеристик.

Необходимо отметить, что предложенный подход не исключает возможности использования результатов ГХ контуров (шпангоутов), полученных экспериментально, например, в ударных (брызговых) камерах [9].

Примем стандартные декартовы системы координат:

- неподвижную $Oxyz$;
- подвижную, связанную с центром масс ЛА – $O_1\xi\eta\zeta$ (рис. 1).

Начало неподвижной системы координат фиксируем в произвольной точке O , ось Ox напра-

вим по местной горизонтали в направлении движения, ось Oy – перпендикулярно оси Ox вверх, ось Oz – вправо, перпендикулярно осям Ox , Oy . Начало подвижной системы координат O_1 совместим с центром масс исследуемого объекта, ось $O\xi$ направим вдоль его оси симметрии в направлении движения, ось $O\eta$ – перпендикулярно оси $O\xi$ вверх, ось $O\zeta$ – вправо, перпендикулярно осям $O\xi$, и $O\eta$.

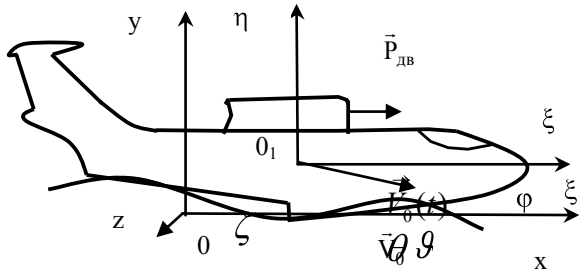


Рис. 1. Системы координат

Угловое положение ТС относительно неподвижной системы координат определяется углами тангажа ν , дифферента φ и наклона траектории (посадки) θ . Ввиду небольших значений угла посадки θ в дальнейшем принято $\nu \approx \varphi$, следовательно, на ВПР можно полагать $\sin \nu \approx \nu$, а вертикальную силу в сечениях смоченной части днищ лодок считать равной нормальной [3].

В качестве характерного линейного размера в дальнейшем принята полуширина на главном редане либо в миделевом сечении – b .

Для численных исследований ГХ теоретический чертеж обводов корпуса ТС ВАБ разбивается на N сечений (с равномерным либо произвольным шагом, в зависимости от сложности геометрии компоновки), перпендикулярных нижней строительной горизонтали.

Для каждого j -го сечения ($j = 1, \dots, N$) формируется массив исходных геометрических данных, используемых в дальнейшем в качестве опорных расчетных, а также предварительно рассчитываются гидродинамические характеристики этих же сечений – безразмерные коэффициенты нормальной $C_n(\xi, \bar{\eta})$ и архимедовой сил $\bar{A}(\xi, \bar{\eta})$ (определяется как текущая по η погруженная площадь контура в сечении ξ) текущего сечения ξ по безразмерной глубине погружения $\bar{\eta} = \eta/b$.

Для вычисления безразмерного коэффициента присоединенной массы текущего сечения ξ $\bar{m}(\xi, \bar{\eta})$ используется очевидная зависимость, вытекающая из теоретических выкладок [3]:

$$C_n(\xi, \bar{\eta}) = \frac{d\bar{m}(\xi, \bar{\eta})}{d\bar{\eta}(\xi)}. \quad (1)$$

Согласно предложенному подходу [10, 11], коэффициенты нормальной гидродинамической силы $C_n(\xi, \bar{\eta})$ в дальнейшем определяются реализацией математической модели [8] (апробированной при численных исследованиях ГХ килеватых тел для случая их вертикального погружения в жидкость [7]) для плоских контуров (шпангоутов) бесконечной массы.

Методика определения $C_n(\xi, \bar{\eta})$ подробно рассмотрена в [10].

При наличии соответствующих экспериментальных данных гидродинамических характеристик по конкретным шпангоутам днища лодки методика позволяет их использование в качестве исходных данных, наряду с расчетными.

Для повышения точности численного интегрирования искомых характеристик в методике выполняется дополнительная дискретизация на n сечений с шагом $\Delta \xi_i$ вдоль килевой линии с последующим использованием в расчетах процедуры интерполирования (линейного, квадратичного и кубического сплайн интерполирования, i – номер текущего интерполированного сечения) исходных геометрических параметров по N сечениям.

С учетом сказанного ниже приведены окончательные выражения в конечных величинах для расчета стационарных значений ГХ ТС ВАБ, исходная информация о гидродинамических характеристиках сечений которого определяется согласно методологии [10].

Уравнение для суммарной стационарной составляющей гидродинамической и гидростатической подъемных сил R_y^* определяются как

$$R_y^* = \sum_{i=1}^n f_y^*(\xi_i, \eta) \cdot \Delta \xi_i, \quad (2)$$

где $f_y^*(\xi_i, \eta)$ – суммарная стационарная составляющая гидродинамической $f_{гд}^*(\xi_i, \eta)$ и гидростатической $f_{гс}^*(\xi_i, \eta)$ подъемных сил сечения [10].

Суммарные коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений A_{kl} ($k=1, l=1, \dots, 3$) – при переменных параметрах [11], определяющих изменение суммарной гидродинамической подъемной силы, вычисляются по следующим выражениям:

$$A_{11} = \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta})_{\Delta} \xi_i; \\ A_{12} = \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \xi_{i\Delta} \xi_i; \quad (3)$$

$$A_{13} = \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\vartheta + \eta'_k(\xi_i))_{\Delta} \xi_i,$$

где ρ – плотность воды;

$\eta'_k(\xi_i)$ – производная ординаты киля в текущем сечении по длине лодки.

По аналогии с вышеприведенным, выражение для суммарной стационарной составляющей горизонтальной силы R_x^* будет иметь следующий вид:

$$R_x^* = \sum_{i=1}^n f_x^*(\xi_i, \eta) \cdot \Delta \xi_i, \quad (4)$$

а суммарные коэффициенты A_{kl} ($k=2, l=1, \dots, 3$) [10] определяются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} A_{21} &= \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\vartheta + \eta'_k(\xi_i))_{\Delta} \xi_i; \\ A_{22} &= \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\vartheta + \eta'_k(\xi_i)) \xi_{i\Delta} \xi_i; \\ A_{23} &= \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\vartheta + \eta'_k(\xi_i))^2_{\Delta} \xi_i. \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогичным образом определится суммарная стационарная составляющая M_z^* продольного момента M_z

$$\begin{aligned} M_z^* &= \sum_{i=1}^n (f_y^*(\xi_i, \eta) \cdot \xi_i + f_{yгд}^*(\xi_i, \eta) \times \\ &\quad \times \eta'_k(\xi_i) \eta_1(\xi_i, \eta) + f_{yгс}(\xi_i, \eta) \eta_k'^2 \times \\ &\quad \times (\xi_i) \eta_2(\xi_i, \eta) + f_{тp}(\xi_i, \eta) \eta_3(\xi_i, \eta))_{\Delta} \xi_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где $f_{тp}(\xi_i, \eta)$ – сила трения сечения;

$\eta_1(\xi_i, \eta)$, $\eta_2(\xi_i, \eta)$, $\eta_3(\xi_i, \eta)$ – плечи приложения гидродинамической, гидростатической и сил трения в сечении соответственно.

Считается, что плечо приложения силы трения $\eta_3(\bar{\eta})$ совпадает со значением гидродинамической подъемной силы $\eta_1(\bar{\eta})$ [3, 12].

При определении значений $f_{тp}(\xi_i, \eta)$ в методике используется коэффициент трения – C_f , определяемый известной интерполяционной формулой Прандтля – Шлихтинга для трения плоских пластин, обтекаемых безграничным потоком при турбулентном пограничном слое [1]

$$C_f = \frac{0,455}{(\lg Re)^{2,58}}, \quad (7)$$

где Re – число Рейнольдса по смоченной длине киля l_k , равное

$$Re = \frac{V \cdot l_k}{\nu}. \quad (8)$$

Суммарные коэффициенты A_{kl} ($k=3, l=1, \dots, 3$) [10] вычисляются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} A_{31} &= \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\xi_i + \eta'_k(\xi_i) \eta_1(\xi_i, \eta))_{\Delta} \xi_i; \\ A_{32} &= \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\xi_i + \eta'_k(\xi_i) \eta_1(\xi_i, \eta)) \xi_{i\Delta} \xi_i; \\ A_{33} &= \rho b^2 \sum_{i=1}^n \bar{m}(\xi_i, \bar{\eta}) \cdot (\xi_i + (\vartheta + \eta'_k(\xi_i)) \times \\ &\quad \times \eta'_k(\xi_i) \eta_1(\xi_i, \eta))_{\Delta} \xi_i. \end{aligned} \quad (9)$$

Исследование динамики поведения ТС ВАБ на водной поверхности, когда имеет место изменение кинематических параметров, предполагает для рассматриваемого случая решение соответствующей системы дифференциальных уравнений [11].

Для упрощения форм записи введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} m_{\Sigma} &= (m_c + \sum_{i=1}^n m_i); \\ n_{\Sigma} &= \left(\sum_{i=1}^n m_i l_i \right); \\ J_{z\Sigma} &= (m_c R^2 + \sum_{i=1}^n m_i l_i^2), \end{aligned} \quad (10)$$

где m_{Σ} , n_{Σ} , $J_{z\Sigma}$ – масса ТС с дополнительной массой грузов, продольный момент от дополнительно размещенных грузов и суммарный момент инерции (с учетом дополнительных грузов) относительно поперечной оси соответственно; m_c , m_i – масса ТС и дополнительные сосредоточенные массы соответственно; l_i – плечи дополнительных сосредоточенных масс относительно центра масс ТС;

R – радиус инерции ТС без дополнительных сосредоточенных масс.

Тогда с учетом (9) система уравнений продольного движения [11] относительно параметров \ddot{x} , \ddot{y} , $\ddot{\vartheta}$ (ускорения центра масс ТС вдоль осей Ox , Oy и угловое ускорение вращения относительно оси Oz соответственно) в матричном виде будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} -A_{11} & & & \\ m_{\Sigma} + A_{21} & & & \\ n_{\Sigma} + A_{31} & & & \\ & -A_{12} & & \\ & J_{\Sigma} + A_{32} & & \\ & & m_{\Sigma} + A_{13} & \\ & & -A_{23} & \\ & & -A_{33} & \end{vmatrix} \ddot{x} = \\ = \begin{vmatrix} P_{дв} - X_a - F_{x\Sigma}^* & & & \\ F_{y\Sigma}^* + Y_a + P_{дв} \cdot \vartheta - m_{\Sigma} g & & & \\ M_{z\Sigma}^* + M_{za} - P_{дв} \cdot \eta_{дв} - n_{\Sigma} g & & & \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

где $P_{дв}$, $\eta_{дв}$ – тяга силовой установки и плечо ее действия относительно центра масс;

$F_{y\Sigma}^*$, $F_{x\Sigma}^*$ – составляющие суммарных гидро-

динамической, гидростатической силы вдоль оси $O_1\eta$ и продольной силы от вышеперечисленных и силы трения вдоль оси $O_1\xi$ соответственно;

Y_a, X_a – аэродинамические подъемная сила и сила лобового сопротивления;

$M_{z\Sigma}, M_{za}$ – суммарные моменты, действующие на ТС относительно оси $O_1\xi$ от составляющих $F_{y\Sigma}^*, F_{x\Sigma}^*$ и Y_a, X_a соответственно.

Определение аэродинамических характеристик (АХ) предполагает использование, в общей методологии создания модели гидродинамических исследований, синтеза численных методик, реализующих в отдельном блоке околоэкранный аэродинамики линейные и нелинейные математические модели (в зависимости от исследуемых компоновок), а также инженерных методик для расчета характеристик, обусловленных вязкостью среды.

Численная реализация предложенной методики при интегрировании приведенной системы дифференциальных уравнений позволяет моделировать продольное движение исследуемого ТС по водной поверхности с учетом возможных вертикальных и угловых колебаний.

Заклучение

Использование предложенной методики позволяет реализовать в процессе математического моделирования получение необходимой информации о гидродинамических характеристиках исследуемых объектов (балансировочные характеристики, устойчивость движения при различных исходных данных – мореходность, динамические характеристики при разгоне по водной поверхности различного состояния, влияние различных управляющих факторов на процесс движения, оценки нагружения конструкции ТС и возможного влияния на психофизиологические характеристики экипажей, а также многие другие).

Таким образом, приведенная в данной работе методика расчета гидродинамических характеристик транспортных средств водного и амфибийного базирования и особенности ее численной реализации позволяют теоретически исследовать особенности их общей гидродинамики, учесть особенности аэродинамических и гидродинамических характеристик при принятии проектных решений на этапах общего проектирования, что весьма актуально для создания энергетически эффективных компоновок современных транспортных средств водного и амфибийного базирования различного назначения.

Список литературы

1. Косоуров К.Ф. Теоретические основы гидроавиации (гидромеханика гидросамолета). – М.: Воениздат, 1961. – 600 с.
2. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. – К.: Наук. думка, 1973. – 247 с.
3. Тихонов А.И. Гидродинамические силы, действующие на плоскокилеватые пластины при неустановившемся глиссировании // Сборник работ по гидродинамике ЦАГИ. – М.: ЦАГИ, 1959. – С. 167-182.
4. Wagner H. *Über Stoss- und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten* // ZAMM. – 1932. – Н. 4. – P. 193-215.
5. Логвинович Г.В. Погружение профилей в жидкость, удар и глиссирование // Тр. ЦАГИ. – М.: ЦАГИ, 1958. – Вып. 707. – 40 с.
6. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. – М.: Наука, 1978. – 351 с.
7. Майборода О.М., Расстригин О.О., Кумпаненко В.М. Методика розрахунку нелінійних нестационарних гідродинамічних характеристик типових шпангоутів днищ човнів літальних апаратів водного і амфібійного базування при симетричному зануренні у рідину з замовом вилиць // Зб. наук. пр. ЦНДІ ОБТ ЗСУ, 2003. – Вип. 12. – С. 119-127.
8. Майборода А.Н. Математическая модель гидродинамики для тела, пересекающего свободную поверхность идеальной несжимаемой жидкости. – К.: Докл. АН УССР. Сер.А. – № 5, 1991. – С. 50-53.
9. Тихонов А.И. Вопросы глиссирования и удара о воду килеватых тел. – М.: Изд. ЦАГИ. – Вып. 2086. – 1980. – С. 202-221.
10. Расстригин А.А., Майборода А.Н., Михалочкин Н.А. Методологические основы синтеза методов в задаче определения гидродинамических характеристик летательных аппаратов водного и амфибийного базирования для оценки их мореходности при продольном движении по водной поверхности // Пр. VI Міжнародн. наук.-техн. конф. "AVIA – 2004". – НАУ. – Київ 26 – 28 квітня 2004 року. – С. 33.72-33.75.
11. Расстригин А.А. Некоторые аспекты методологического подхода к повышению эффективности гидродинамического проектирования летательных аппаратов водного и амфибийного базирования // Сб. научн. тр. IV Междунар. науч. техн. конф. «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники» 21 – 23 апреля 2003 года – НТУ «КПИ». – Т. 2. – К. – 2003. – С. 17-183.
12. Коврижных Л.Д., Тихонов А.И. Глиссирование килеватой пластины по волне // Ученые записки ЦАГИ. – М.: Изд. ЦАГИ. – Т. XX. – №1. – 1989. – С. 13-22.

Поступила в редколлегию 12.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук ст. научн. сотр. И.Б. Чепков, Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники ВС Украины, Киев.