

**М**ореходность и проходимость амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП) волн при ходе над водой или над неровностями рельефа поверхности, соответственно над сушей, обеспечиваются оснащением судна податливым гибким ограждением (ГО) области воздушной подушки (ВП) под его днищем, крепящимся по всему периметру корпуса и призванным минимизировать, с одной стороны, расходы воздуха, направляемого специальными воздуходувками под днище судна в область ВП, генерирующей подъемную силу, а с другой, контакты днища корпуса судна с препятствиями на подстилающей поверхности, отклоняясь при встрече с ними, пропуская под собой их вершины. Проходимость АСВП принято характеризовать не только высотой преодолеваемых препятствий при ходе над подстилающей поверхностью [3], но и способностью преодолевать уклоны берега при выходе на сушу с использованием собственной инерции движения и тяги воздушных винтов. Последнее важное свойство АСВП зависит от гидрологической обстановки региона (углов наклона дна, параметров приливов и отливов) и характера берегового рельефа в предполагаемом районе высадки и определяется заказчиком в ТТЗ на проектирование судна в виде назначаемого угла преодолеваемого берегового уклона не менее  $6^\circ$ . Это свойство АСВП чрезвычайно важно еще и потому, что хранение таких судов осуществляется, как правило, на специальных береговых горизонтальных площадках, куда такие суда выходят по наклонному (обычно бетонному) слипу, ведущему от площадки к урезу воды.

Настоящая работа призвана оценить характер зависимости величины преодолеваемого уклона берега (угла  $\alpha$ ) от начальной скорости хода АСВП  $v_0$ , его силы тяжести  $G$  и характеристик движителей (максимальной тяги  $T_m$  и угла установки лопастей воздушных винтов).

Преодоление уклона берега с очень малой скоростью движения или удержание АСВП без хода на наклонном участке берега (рис. 1) возможно при следующем условии:

$$T_m = G \cdot \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $T_m$  – максимальная тяга воздушных винтов (ВВ) при парении АСВП без хода;  $\alpha$  – угол уклона берега к горизонту.

В этом случае максимальная величина уклона берега, которую может преодолеть АСВП,

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{T_m}{G} \right). \quad (2)$$

Выход на берег сходу, используя инерцию движения АСВП при подходе

## ЗАДАЧА О ВЫХОДЕ СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ НА БЕРЕГ С ПРЕОДОЛЕНИЕМ УКЛОНА

**В.К. Дьяченко**, д-р техн. наук,

**Д.Е. Цыпляков**, канд. техн. наук, гл. конструктор проектов,  
АО «ЦМКБ «Алмаз»,  
контакт. тел. (812) 369 1144

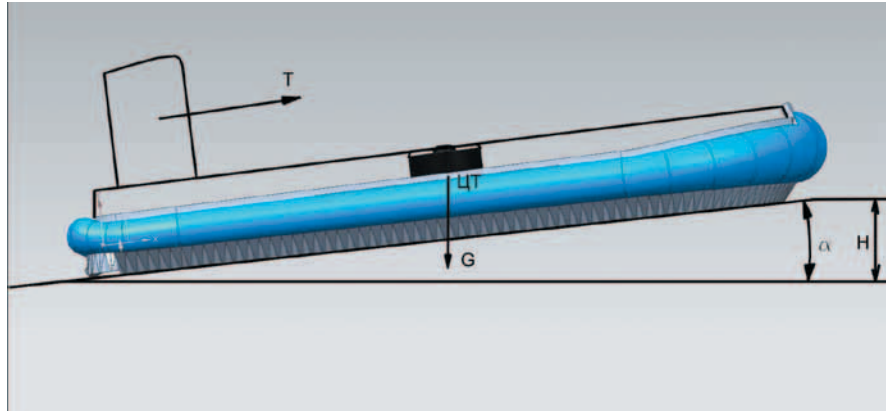


Рис. 1. Схема преодоления АСВП берегового уклона с углом  $\alpha$

к берегу, дает большие возможности для преодоления берегового уклона. В этом случае судоводитель может выполнить маневр выхода на берег двумя способами. В первом случае при выходе на берег угол установки шага воздушного винта (ВВ) не изменяется, остается таким же, каким был при движении над водой. Во втором случае в момент подхода АСВП к черте берега судоводитель изменяет шаг установки лопастей до величины, обеспечивающей максимальную тягу  $T_m$  при парении АСВП на ВП без хода – см. (1).

При выходе на берег с уклоном АСВП получает отрицательное ускорение и, в конце концов, остановится. В первом случае в момент остановки АСВП тяга винтов

$$T = R_0 + \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v_0, \quad (3)$$

где  $v_0$  – скорость хода судна в момент подхода к берегу, м/с;  $R_0$  – соответствующая этой скорости величина сопротивления движению по воде, Н.

Во втором случае тяга ВВ после увеличения угла установки лопастей

$$T = R_0 + \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v + \Delta T, \quad (4)$$

где  $\Delta T = T_m - R_0 - \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v$  (рис. 2).

Величину модуля производной  $\left| \frac{dT}{dv} \right|$  можно считать постоянной, не зависящей от угла установки лопастей. В таком случае тяга винтов в момент остановки судна при выходе на берег с уклоном будет равна  $T_m$ .

Уравнение движения АСВП по берегу, имеющего уклон, имеет вид

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) = T - R, \quad (5)$$

где сопротивление движению над наклонным твердым экраном  $R$  определяют, исходя из известных выражений, как

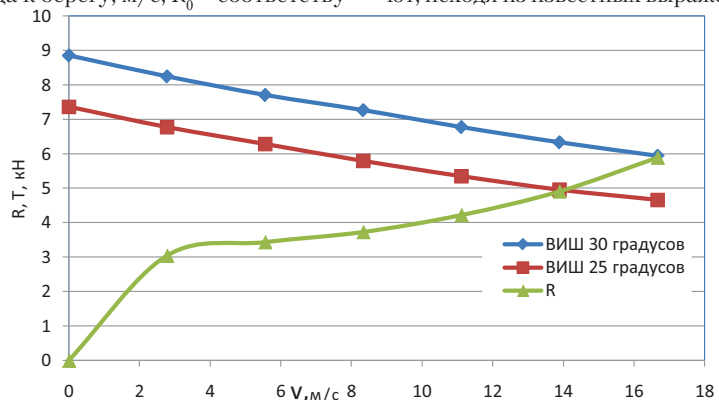


Рис. 2. Кривая сопротивления (кН) и зависимость тяги ВВ АСВП пр. 12270М при различных углах установки лопастей от скорости движения (м/с)

сумму импульсного сопротивления, аэродинамического сопротивления и проекции силы тяжести [1, 2]:

$$R = \rho_a Qv + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} + G \sin \alpha, \quad (6)$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход воздуха в ВП, м<sup>3</sup>/с;  $C_x$  – коэффициент профильного сопротивления;  $S_{\infty}$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>, а упор как

$$T = T_0 - \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot (v - v_0) + \Delta T. \quad (7)$$

Величина сопротивления движению по воде в момент подхода к черте берега

$$R_0 = T_0 = \rho_a Qv + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} + R_w, \quad (8)$$

где  $R_w$  – волновое сопротивление движению с учетом мелководья, Н [1].

При движении по берегу с уклоном без увеличения угла установки лопастей уравнение движения принимает вид

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) = \rho_a Qv_0 + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} + R_w - \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot (v - v_0) - \rho_a Qv - C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} - G \sin \alpha. \quad (9)$$

При движении с увеличенным углом установки лопастей

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) = T_m - \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v - \rho_a Qv - C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} - G \sin \alpha. \quad (10)$$

Сгруппировав неизвестные в левой части уравнения и оставив константы в правой части, получим

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) + \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v + \rho_a Qv + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} = \rho_a Qv_0 + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} + R_w - G \sin \alpha \quad (11)$$

или

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) + \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v + \rho_a Qv + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} = T_m - G \sin \alpha. \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) являются нелинейными, так как содержат в левых

частях слагаемые, пропорциональные квадрату скорости хода –  $C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty}$ .

Приведем уравнение к линейному виду, опустив в левых частях величину аэродинамического сопротивления, поскольку эта величина быстро убывает в процессе торможения судна при движении по берегу с уклоном, кроме того, это слагаемое на два порядка меньше основной составляющей сопротивления – силы  $G \sin \alpha$ . Задача в целом решается в упрощенной постановке (квазистационарно), поэтому можно полагать, что указанное допущение не сильно повлияет на точность решения. По этим же соображениям при расчете величины силы сопротивления движению судна по воде не учтено остаточное сопротивление.

После линеаризации уравнения движения судна записываются в виде

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) + \left[ \left| \frac{dT}{dv} \right| + \rho_a Q \right] v = \rho_a Qv_0 + C_x \left( \frac{\rho_a v^2}{2} \right) S_{\infty} + R_w + \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v_0 - G \sin \alpha \quad (13)$$

или

$$M \left( \frac{dv}{dt} \right) + \left[ \left| \frac{dT}{dv} \right| + \rho_a Q \right] v = T_m - G \sin \alpha. \quad (14)$$

После деления обеих частей уравнений на величину массы АСВП получим линейные уравнения, аналогичные уравнениям, рассматриваемым при решении задачи о преодолении узкой вертикальной стенки [3]:

$$\left( \frac{dv}{dt} \right) + Xv = Y, \quad (15)$$

где в случае движения без увеличения угла установки лопастей

$$Y = \left( \frac{1}{M} \right) \left[ \rho_a Qv_0 + C_x \left( \frac{\rho_a v_0^2}{2} \right) S_{\infty} + R_w + \left| \frac{dT}{dv} \right| \cdot v_0 - G \sin \alpha \right]. \quad (16)$$

При движении с увеличенным углом установки лопастей

$$Y = \left( \frac{1}{M} \right) [T_m - G \sin \alpha]. \quad (17)$$

Величина  $X$  в обоих случаях одинакова и равна

$$X = \left( \frac{1}{M} \right) \left[ \left| \frac{dT}{dv} \right| + \rho_a Q \right]. \quad (18)$$

Начальное условие решаемой задачи при  $t = 0$

$$v = v_0.$$

Решение уравнения имеет вид, аналогичный решению задачи о преодолении вертикальной тонкой стенки:

$$v = \left( \frac{Y}{X} \right) \cdot (1 - e^{-Xt}) + v_0 \cdot e^{-Xt}. \quad (19)$$

Пройденный путь  $S_1$  определяется интегрированием скорости  $v$  по времени  $t$ :

$$S_1 = \int_0^{t_1} v(t) dt. \quad (20)$$

Подставив под знак интеграла выражение (19) и выполнив интегрирование, получим

$$S_1 = \left( \frac{Y}{X} \right) t + (e^{-Xt} - 1) \left[ \frac{Y}{X^2} - \frac{v_0}{X} \right]. \quad (21)$$

Остановка судна произойдет в момент времени, соответствующий условию  $v_0 = 0$ , т.е.

$$\left( \frac{Y}{X} \right) (1 - e^{-Xt_1}) = -v_0 \cdot e^{-Xt_1}. \quad (22)$$

После решения уравнения (22) относительно неизвестной  $t_1$  получим

$$t_1 = \left( \frac{1}{X} \right) \ln \left[ \frac{1}{(1 - v_0 X / Y)} \right]. \quad (23)$$

Подставляя величину  $t_1$  в формулу (21), получим путь, пройденный по склону берега передней точкой ВП. Будем считать, что судно преодолело подъем по уклону берега, если в момент остановки кормовая точка ВП достигла наивысшей точки берегового уклона, т.е.

$$S_1(t_1) - L_c = \frac{H}{\sin \alpha} \quad (24)$$

или

$$H = [S_1(t_1) - L_c] \sin \alpha, \quad (25)$$

где  $H$  – высота преодолеваемого берегового уклона, м;  $L_c$  – длина воздушной подушки АСВП, м.

Относительная высота преодолеваемого берегового уклона  $H/h_s$  в долях высоты гибкого ограждения  $h_s$  равна:

$$\frac{H}{h_s} = [S_1(t_1) - L_c] \frac{\sin \alpha}{h_s}. \quad (26)$$



Рис. 3. ДКВП пр. 1206 и пр. 12061Э

Сравнительные характеристики ДКВП пр. 1206 и пр. 12061

| Основные характеристики   | ДКВП     |             |
|---------------------------|----------|-------------|
|                           | пр. 1206 | пр. 12061 Э |
| Масса, т                  | 117      | 148         |
| Длина ВП, м               | 22,6     | 27,8        |
| Ширина ВП, м              | 10,8     | 13,2        |
| Высота ГО, м              | 1,4      | 1,45        |
| Расход воздуха в ВП, м³/с | 390      | 512         |

Для иллюстрации эффективности предложенного алгоритма ниже приводятся результаты расчета преодоления берегового уклона ДКВП (десантными катерами на воздушной подушке) пр. 1206 и пр.12061Э [4] (рис. 3), основные характеристики которых приведены ниже: Сюда перенести вывод табличный без линеек с отточием

Сравнение этих ДКВП интересно тем, что они имеют одинаковые ГТГА Авт **объяснить сокращение** типа МТ-70, винты АВ-96 и нагнетатели В56К, но отличаются размерениями, массой и, соответственно, режимом работы нагнетательной установки.

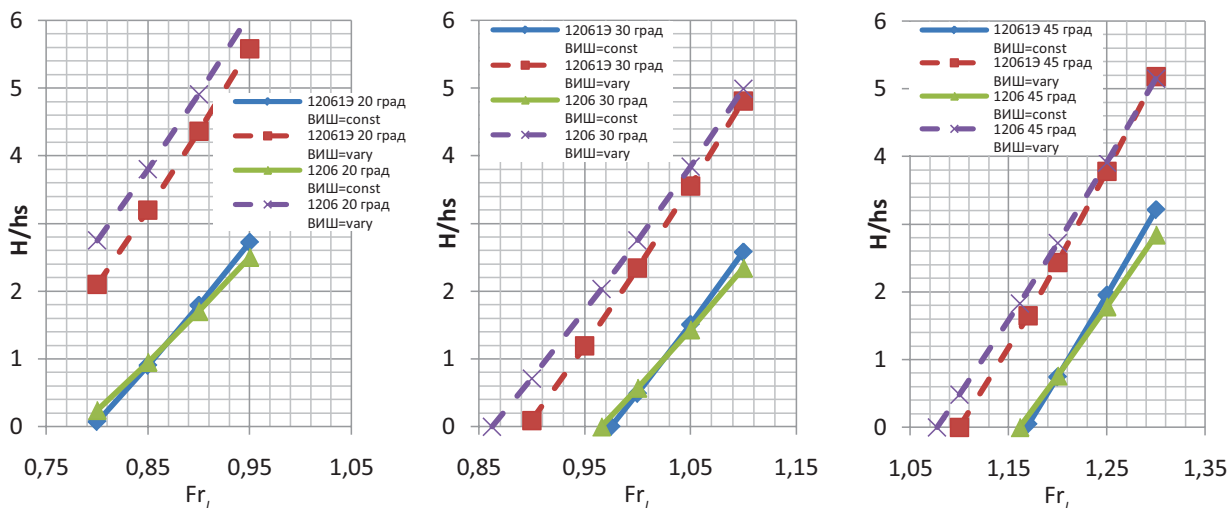


Рис. 4. Зависимости относительной высоты берега с различным уклоном (20°, 30° и 45°), преодолеваемой ДКВП пр. 1206 и пр. 12061Э от числа Fr<sub>1</sub> при выполнении маневра с постоянным и изменяемым (увеличиваемым) углом установки ВИШ

Пунктирной линией на графиках рис. 4 изображены зависимости преодолеваемых высот берегового уклона без увеличения угла установки ВВ, сплошной линией - при выходе на берег с изменяемым (увеличиваемым) углом установки лопастей ВИШ.

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 4, позволяет сделать вывод о том, что при величине угла уклона берега  $\alpha = 20^\circ$  ДКВП пр. 12061Э способно преодолеть относительную высоту берегового уклона  $H/h_s = 2,5$  при  $Fr_1 = 0,82-0,94$ . ДКВП пр. 1206 эту же относительную высоту берегового уклона преодолевает при более низких значениях начальной скорости хода  $Fr_1 = 0,78-0,95$ .

При величине угла уклона берега  $\alpha = 30^\circ$  относительная высота уклона  $H/h_s = 2,5$  преодолевается ДКВП пр. 12061Э при  $Fr_1 = 1,01-1,1$ , ДКВП пр. 1206 при  $Fr_1 = 0,99-1,12$ .

Наконец, при величине угла уклона берега  $\alpha = 45^\circ$  ДКВП пр. 12061Э преодолевает относительную высоту уклона берега  $H/h_s = 2,5$  при  $Fr_1 = 1,2-1,27$ , а ДКВП пр. 1206 при  $Fr_1 = 1,19-1,29$ .

Во всех случаях при выполнении маневра с изменяемым (увеличиваемым) углом установки ВИШ ДКВП пр.1206

преодолеывает береговой уклон при более низких значениях начальной скорости. Это объясняется тем, что ДКВП пр. 12061Э на 21% тяжелее ДКВП пр. 1206, следовательно, для преодо-

на ранних стадиях его проектирования, а также позволяет выработать рекомендации по управлению им для судоводителей при разработке его эксплуатационной документации.

ления одного и того же уклона берега ДКВП пр. 12061Э необходим больший запас количества движения, т.е. более высокая начальная скорость хода. Однако при движении с постоянным углом установки ВИШ с определенного числа Fr<sub>1</sub> (для уклона 20°, 30° и 45°, соответственно, 0,87, 1,02, 1,21) начинает влиять больший запас количества движения (большая масса) ДКВП пр.12061Э и относительная высота преодолеваемого уклона у него выше.

Следует заметить, что при совершении маневра по преодолению берегового уклона с увеличенным углом установки лопастей всегда возникает угроза быстрого ускорения судна после преодоления уклона и выхода судна на горизонтальный участок суши. После разгона судна до высокой скорости хода над землей справиться с управлением судном не всегда удается. В связи с этим следует иметь в виду, что использовать этот маневр может только опытный судоводитель (рис. 5).

Таким образом, представленная здесь формализация процесса преодоления берегового уклона, позволившая получить соответствующий расчетный алгоритм, дает инструмент оценки реальных амфибийных качеств АСВП уже



Рис. 5. Последствия аварии головного заказа пр.12061Э вследствие неконтролируемого ускорения при выходе на горизонтальную стояночную площадку базы № 226 Медо, Инчхон (Юж. Корея)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кользаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания. – Л.: Судостроение, 1983.
2. Yun L. and Bliault A. Theory and Design of Air Cushion Craft, 2000.
3. Дьяченко В.К., Захрятин И.А., Цымяков Д.Е. Задача о преодолении амфибийным судном на воздушной подушке твердого препятствия типа «узкой вертикальной стенки»//Морской вестник. – 2021. – №2(78). – С. 12–15.
4. <http://russianships/info>. ■