

В практике проектирования амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП) их амфибийные свойства 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 воздухонагнетателями 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 и пропуская под собой вершины волн при ходе над водой или неровности рельефа поверхности, соответственно, над сухой. В случае оснащения АСВП двухъярусным ГО расчетная высота преодолеваемого препятствия традиционно принимается равной высоте его нижнего яруса, изготавливаемого в виде расчлененных и потому легко отклоняющихся и пропускающих встречные препятствия элементов, навешиваемых по всему периметру на надувной относительно мягкий, но менее податливый торообразный ресивер, являющийся верхним ярусом ГО. Высота навесных элементов ГО в долях от его полной высоты H_c составляет, как правило, ок. 0,5. В то же время податливость надувного ресивера ГО при его контактах с высокими препятствиями на подстилающей поверхности зависит от свойств используемого конструкционного материала и в еще большей степени от коэффициента перепада давлений внутри надувного ресивера и в воздушной подушке, обозначаемого обычно как коэффициент K_p [1].

Амфибийные свойства АСВП и, в первую очередь, его так называемая проходимость принято характеризовать прежде всего высотой преодолеваемого препятствия типа «вертикальной стенки» h (рис. 1).

Устанавливаемое значение этой высоты обычно оговаривается заказчиком в ТЗ на проектирование и определяется

ЗАДАЧА ПРЕОДОЛЕНИЯ АМФИБИЙНЫМ СУДНОМ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ ПРЕПЯТСТВИЯ ТИПА «УЗКАЯ ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТЕНКА»

В.К.Дьяченко, *д-р технических наук,*

И.А.Захряпин, *вед. инженер,*

Д.Е.Цымяков, *канд. техн. наук, гл. конструктор проектов,*

АО «ЦМКБ «Алмаз»»,

контакт. тел. (812) 369 1144

гидрологической обстановкой и рельефом местности в районах предполагаемых выходов АСВП из воды и движения по берегу (в том числе и надо льдом).

Определение проходимости АСВП, исходя из предположения о необходимости равенства высоты преодолеваемого препятствия в виде вертикальной стенки и высоты податливых навесных элементов ГО, не отражает реальной картины процесса преодоления судном препятствия, поскольку не предполагает учета динамического характера этого процесса, когда имеет место инерция движения и наличие упора воздушных движителей (например, воздушных винтов (ВВ)). Влияние упора ВВ, а также величины массы объекта (АСВП) и скорости его движения в момент преодоления препятствия и предполагается оценить здесь далее.

Под *инерцией* здесь понимается запас количества движения, равный произведению массы на скорость движения. В математической модели далее принято допущение, что скорость вращения и угол установки лопастей ВВ как движителя в процессе преодоления препятствия остаются постоянными.

Дифференциальное уравнение движения АСВП записывается в виде

$$M \left(\frac{dv}{dt} \right) = T_0 + \left(\frac{dT}{dv} \right) \cdot (v - v_0) - (R_0 + \Delta R), \quad (1)$$

где M – масса АСВП, кг; v – скорость движения АСВП, м/с; T – сила тяги ВВ, Н; T_0 – сила тяги ВВ до встречи с препятствием, Н; R_0 – сопротивление движению АСВП до встречи с препятствием, Н; ΔR – дополнительное сопротивление от встречи с препятствием (вводится допущение, что в процессе преодоления препятствия $\Delta R = \text{const}$), Н.

До встречи с препятствием при равномерном движении $v = v_0$, $T_0 = R_0$ и $\left(\frac{dv}{dt} \right) = 0$, следовательно, уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$M \left(\frac{dv}{dt} \right) = \left(\frac{dT}{dv} \right) v - \left(\frac{dT}{dv} \right) v_0 - \Delta R. \quad (2)$$

Считая величину $\left(\frac{dT}{dv} \right)$ постоянной, введем в рассмотрение модуль этой величины $\left| \frac{dT}{dv} \right|$ и, учитывая, что его значение $\frac{dT}{dv} \leq 0$, перепишем уравнение:

$$M \left(\frac{dv}{dt} \right) + \left| \frac{dT}{dv} \right| v = \left| \frac{dT}{dv} \right| v_0 - \Delta R. \quad (3)$$

Разделим обе части этого уравнения на величину M и введем следующие обозначения:

$$\left| \frac{dT}{dv} \right| / M = X; \quad \left[\left| \frac{dT}{dv} \right| v_0 - \Delta R \right] / M = Y. \quad (4)$$

Тогда

$$\left(\frac{dv}{dt} \right) + Xv = Y. \quad (5)$$

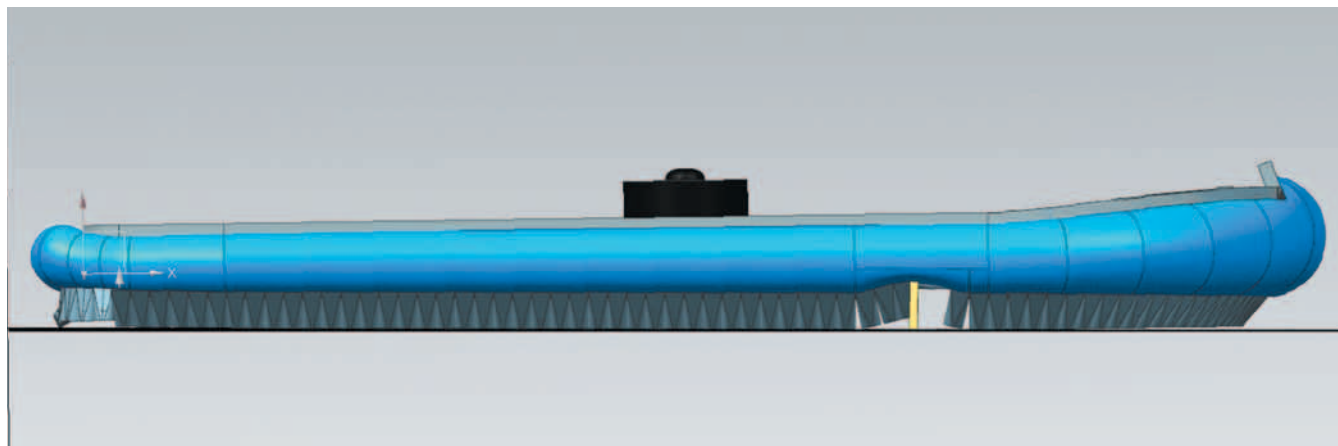


Рис. 1. Схема преодоления моделью АСВП препятствия типа «узкая вертикальная стенка» высотой h

Уравнение (5) является линейным дифференциальным уравнением, общий интеграл которого записывается в виде

$$v = e^{(-q)} \left[\int Y \cdot e^{(q)} dt + C \right], \quad (6)$$

где $q = \int X dt$.

Учитывая, что величины X и Y не зависят от времени, получаем

$$q = \int X dt = Xt; \quad \int Y \cdot e^{(q)} dt = \left(\frac{Y}{X} \right) \cdot e^{(Xt)}. \quad (7)$$

После подстановки (7) в общее решение (6) получим

$$v = \left(\frac{Y}{X} \right) + C \cdot e^{(-Xt)}. \quad (8)$$

Константу интегрирования C определим из начального условия: при $t = 0$; $v = v_0$

$$C = v_0 - \frac{Y}{X}. \quad (9)$$

После подстановки константы в решение (8) и приведения подобных членов получим

$$v = \left(\frac{Y}{X} \right) \cdot (1 - e^{(-Xt)}) + v_0 \cdot e^{(-Xt)}. \quad (10)$$

Исключим из (10) величину Y , используя выражения (4):

$$v = \left(v_0 - \Delta R \left/ \frac{dT}{dv} \right. \right) \cdot (1 - e^{(-Xt)}) + v_0 \cdot e^{(-Xt)}. \quad (11)$$

Тогда время преодоления препятствия t_1 можно определить из условия

$$\int_0^{t_1} v dt = L_c, \quad (12)$$

где L_c – длина воздушной подушки АСВП (т.е. отрезок пути, на котором судно контактирует с препятствием; здесь – с вертикальной стенкой), м.

Подставив в подынтегральное выражение зависимость (11) и выполнив интегрирование, получим

$$L_c = \left(v_0 - \Delta R \left/ \frac{dT}{dv} \right. \right) \cdot t_1 + \left(\Delta R \left/ \frac{dT}{dv} \right. \right) \cdot \left(\frac{1}{X} \right) \cdot (1 - e^{(-Xt_1)}). \quad (13)$$

В частном случае, полагая величину X_{t_1} малой первого порядка, разложим экспоненту $e^{(-Xt)}$ в степенной ряд, сохраняя в разложении слагаемые второго порядка малости:

$$e^{(-Xt)} = 1 - Xt_1 + \frac{X^2 t_1^2}{2}. \quad (14)$$

Тогда

$$1 - e^{(-Xt)} = Xt_1 - \frac{X^2 t_1^2}{2}. \quad (15)$$

Подставив (15) в уравнение (13) и выполнив приведение подобных членов, получим квадратное уравнение относительно неизвестного t_1

$$L_c = v_0 \cdot t_1 - \left(\Delta R \left/ \frac{dT}{dv} \right. \right) \cdot Xt_1^2. \quad (16)$$

Заменим величину X , используя (4), и сгруппируем все слагаемые уравнения (16) в левой части:

$$\left(\frac{\Delta R}{2M} \right) \cdot t_1^2 - v_0 t_1 - L_c = 0. \quad (17)$$

Решение уравнения (17) имеет вид

$$t_1 = \frac{v_0 M}{\Delta R} - \left(\frac{v_0 M}{\Delta R} \right) \sqrt{1 - \frac{2L_c \Delta R}{v_0^2 M}}. \quad (18)$$

В формуле (18), полученной как корень рассматриваемого квадратного уравнения, перед радикалом взят знак (–) для обеспечения сохранения количества движения объекта (АСВП), так как при прохождении препятствия его скорость уменьшается.

Переменная t_1 принимает реальные значения при выполнении условия

$$1 - \frac{2L_c \Delta R}{v_0^2 M} > 0$$

или

$$v_0^2 > \frac{2L_c \Delta R}{M}. \quad (19)$$

Таким образом, преодолеть с ходу препятствие типа «узкой вертикальной стенки» АСВП может не при любой величине скорости хода, а лишь, если она удовлетворяет условию (19), т.е. или при малой высоте препятствия (когда ΔR мало), или при большой инерции движения (когда масса АСВП M велика).

Приведем численный пример использования изложенного расчетного алгоритма. В качестве объектов исследования возьмем английское АСВП SR-N6 и отечественный десантный катер на воздушной подушке (ДКВП) пр. 12061Э, поставлявшийся на экспорт в Республику Корея в 2005–2007 гг.

Для выполнения численного расчета необходимо в качестве исходных данных иметь значения следующих величин, входящих в расчетные зависимости:

$$M, \left| \frac{dT}{dv} \right|, L_c, \Delta R.$$

Характеристики SR-N6 представлены в табл. 2 монографии [1, с.318]: SR-N6: $M = 10$ т, $L_c = 12,5$ м; ДКВП пр.12061Э: $M = 148$ т, $L_c = 27,8$ м.

Для определения величины $\left| \frac{dT}{dv} \right|$ используем следующие известные зависимости:

$$T = \rho \alpha \lambda n^2 D_p^4; \quad \lambda = v / (n D_p), \quad (20)$$

где n – число оборотов воздушного винта (ВВ) в секунду, D_p – величина диаметра воздушного винта, м.

Величина производной равна

$$\frac{dT}{dv} = \frac{d(\rho \alpha \lambda n^2 D_p^4)}{d(\lambda D_p)} = \rho n D_p^3 \left(\frac{d\lambda}{d\lambda} \right). \quad (21)$$

В упомянутой выше табл. 2 из работы [1] находим значения диаметра ВВ и его обороты:

SR-N6: $D_p = 2,74$ м; $n = 2000$ об/мин = $33,33$ об/с;

ДКВП пр. 12061Э: $D_p = 3,5$ м; $n = 1580$ об/мин = $26,33$ об/с.

При малой относительной величине поступи ВВ λ , характерной для всех АСВП, практически для любых свободных воздушных винтов СВП первого поколения (см. [2]) величина производной $d\lambda/d\lambda$ близка к $(-0,1)$. Для современных винтов в кольцевой насадке производства ОАО «Аэросила» типа АВ-96 (АВ-98, АВ-99) эта производная близка к значению $(-0,24)$ [3].

Таким образом, получим

$$\text{для SR-N6: } \left| \frac{dT}{dv} \right| = 0,125 \cdot 33,33 \cdot (2,74)^3 \times \times [-0,1] = 8,57 \text{ кгс/с;}$$

$$\text{для 12061Э: } \left| \frac{dT}{dv} \right| = 0,125 \cdot 26,33 \cdot (3,5)^3 \times \times [-0,24] = 33,86 \text{ кгс/с (для одного ВВ).}$$

Труднее всего определить величину ΔR дополнительного сопротивления движению рассматриваемого объекта при встрече его с препятствием. Самым надежным способом определения этой величины явился бы эксперимент с буксируемой моделью. Но при отсутствии этих данных попробуем построить некую умозрительную картину данного физического явления.

Для этого воспользуемся схематизацией явления согласно его изображению – см. рис 1. Силу возникающего при встрече с препятствием дополнительного сопротивления движению будем считать состоящей из двух компонент: силы сопротивления давлению, действующей на кормовую часть ГО в области ВП, и силы, возникающей при изгибе и деформации навесных элементов ГО в момент прохождения под ними жесткого препятствия, т.е. верхней части преодолеваемой стенки.

Величину избыточного давления в носовой части ВП будем считать равной нулю в связи с образованием большого зазора, способствующего беспрепятственному истечению воздуха после деформации ГО, вызванной его взаимодействием с препятствием.

В этом случае величина сопротивления давлению (в Н) будет равна

$$\Delta R_1 = P_c \cdot B_c \cdot h, \quad (22)$$

где P_c – величина давления в ВП, Па; B_c – ширина ВП, м; h – высота преодолеваемого препятствия, м.

Вторую составляющую сопротивления определим на основании экспериментальных данных, полученных английскими исследователями. В 1968 г. фирма ВНС проводила испытания судна SR-N6 с целью определения усилий, действующих на навесные элементы ГО [4]. В процессе испытаний судна SR-N6 проводилось тензометрирование звеньев цепочки, с помощью которых концы навесного элемента крепились к внутреннему полотнищу оболочки гибкого ресивера в области ВП. Испытания по-

Расчет параметров АСВП в процессе преодоления твердого препятствия типа «вертикальная стенка»

Наименования величин	SR-N6					12061Э				
	v_0 , м/с	6,64	6,74	6,84	6,93	7,03	4,53	4,71	4,87	5,03
v_2 , уз	12,92	13,11	13,30	13,49	13,67	8,82	9,15	9,48	9,79	10,09
Fr_1	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,27	0,28	0,30	0,30	0,31
h/H_c	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
h , м	0,61	0,671	0,732	0,793	0,854	0,75	0,825	0,9	0,975	1,05
ΔR , н	17627	18157	18 688	19 219	19 749	54 692	58 929	63 166	67 404	71 641
$2L_c \cdot \Delta R / M$	44,07	45,39	46,72	48,05	49,37	20,55	22,14	23,73	25,32	26,91
t_2 , с	3,77	3,71	3,65	3,59	3,54	4,53	4,71	4,87	5,03	5,19
dv/dt , м/с ²	1,76	1,81	1,86	1,92	1,97	0,35	0,38	0,41	0,43	0,46
$(dv/dt)/g$	0,18	0,18	0,19	0,20	0,20	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05

казали, что максимальное усилие в точке крепления одного конца навесного элемента в самом критическом случае так называемого «подлома» ГО (навесные элементы при этом действительно «подламывались» и ложились горизонтально, т.е. параллельно подстилающей поверхности) достигало 350 англ. фунтов (156 кг (силы)). Учитывая то, что каждый навесной элемент крепился к гибкому ресиверу двумя концами, а также то, что навесные элементы располагались (и располагаются в настоящее время) на обоих бортах и еще на секционирующем гибком киле, эту силу следует увеличить в 8 раз, т.е. общая величина составляющей ΔR_2 составит 1248 кг.

Приведенная величина, конечно, очень условна (т.е. оценочна), так как силы, возникающие при деформации навесных элементов потоком набегающей воды, могут отличаться от сил, возникающих при деформации навесных элементов в случае преодоления жесткого препятствия, а силы, возникающие при деформации навесных элементов на бортовых участках ГО, могут отличаться от сил на навесных элементах секционирующего кила. Это может показать только эксперимент.

Однако, поскольку до проведения модельных испытаний никакой другой информации о величинах сил при изгибной деформации навесных элементов не существует, для ориентировочной оценки способности судна преодолевать препятствия типа «узкой стенки» приходится останавливаться на указанной величине силы. При оценке величины этой силы применительно к другим объектам будем пересчитывать величину пропорционально кубу масштаба, предполагая идентичными свойства конструктивных материалов, схемы образования и конструкции ГО.

Оценим значение первой составляющей сопротивления ΔR_1 , исходя из известных величин давления в ВП и ширины воздушной подушки [1]. В этом случае ΔR_1 , измеряемая в Н:

$$\begin{aligned} \text{для SR-N6: } \Delta R_1 &= 1450 \cdot 6 \cdot H = 8700 \cdot h, \\ \text{для 12061Э: } \Delta R_1 &= 4280 \cdot 13,2 \cdot H = \\ &= 56 500 \cdot h. \end{aligned}$$

Результаты расчетов по апробации предложенной методики расчета сведены в табл. 1 и иллюстрируются графиками на рис. 2.

При фиксированных значениях масс M каждого из рассматриваемых АСВП и длин их ВП L_c высоты твердого преодолеваемого препятствия типа «вертикальная стенка» h принимались здесь варьируемыми. Исходные скорости v_0 каждого из АСВП принимались в том диапазоне, когда преодоление препятствий, характеризуемого как h/H_c , было предельно реализуемым, поскольку эта скорость v_0 во время прохождения препят-

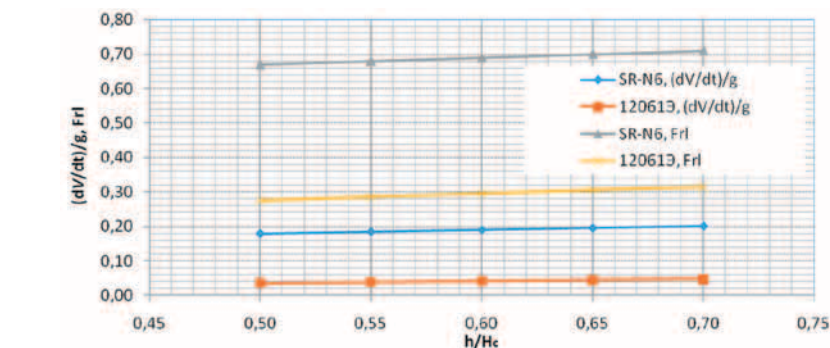


Рис. 2. Зависимость относительной величины продольного ускорения $(dv/dt)/g$ и относительной скорости Fr_1 при которой судно полностью теряет скорость при прохождении препятствия типа «вертикальная стенка» от ее относительной высоты h/H_c

ствия опускалась практически до нуля ($v(t_1) = 0,01$) и при меньшей скорости хода АСВП v_0 судно препятствие не преодолеет и остановится, ибо оказывается недостаточным количество движения.

Приведенные в табл. 1 и на рис. 2 результаты расчетов показывают, что АСВП SR-N6 способно преодолеть препятствия типа «вертикальной стенки» высотой от 0,5 до 0,7 высоты ГО с полной потерей скорости в диапазоне чисел Фруда Fr_1 от 0,67 до 0,71. При этом величина продольной перегрузки составит от 0,18 до 0,2.

Для ДКВП пр. 12061Э при таких же условиях из-за существенно большего значения количества движения диапазон относительной скорости хода составит Fr_1 от 0,27 до 0,31, а величина продольной перегрузки составит от 0,04 до 0,05.

Это становится понятным, если учесть, что масса ДКВП пр. 12061Э более чем на порядок превышает массу судна SR-N6. Следовательно, и запас количества движения при преодолении препятствия у ДКВП пр.12061Э больше.

Приведенные результаты расчетов хорошо совпадают с экспериментальными данными натурных испытаний только при значениях высоты верти-

кальной стенки, несущественно превышающих высоту навесного элемента ГО (величина которой, по сути своей, и является значением высоты гарантированно преодолеваемого АСВП препятствия). Следует отметить, что предлагаемая методика не учитывает влияния свойств используемых конструктивных материалов ГО и коэффициента перепада давления между гибким ресивером и областью воздушной подушки K_p , увеличивая который, проектант получает ресивер ГО более жестким, обладающим меньшей податливостью при встрече с преодолеваемыми препятствиями

Тем не менее представленная здесь формализация процесса преодоления препятствия, позволившая получить соответствующий расчетный алгоритм, дает инструмент для оценки реальных амфибийных качеств АСВП уже на ранних стадиях проектирования. Кроме того, позволяет определить расчетные усилия на узлы крепления элементов ГО при его проектировании, а также выработать инструкции по преодолению препятствий для судоводителей при разработке эксплуатационной документации у рассматриваемых типов судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демешко Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке. – Ч.1–2. – СПб.: Судостроение, 1992.

15 мая 2021 г. исполнилось бы 90 лет выдающемуся ученому и инженеру-практику Владимиру Кузьмичу Дьяченко.

Он вырос в семье инженера-электротехника, ставшего позднее директором ленинградского завода «Электросила», ребенком в полной мере испытал все тяготы и лишения того непростого времени: арест отца в 1938 г., войну и эвакуацию из Ленинграда в 1941 г.

После возвращения из эвакуации в 1944 г. Владимир оканчивает семилетку и поступает в Ленинградское военноморское подготовительное училище, а после получения десятиклассного образования – в Ленинградский кораблестроительный институт, который оканчивает в 1955 г., где получает квалификацию инженера-кораблестроителя по специализации «гидромеханика и прочность корабля».

По окончании института Владимир Кузьмич начинает свою трудовую деятельность в ЦКБ-19 (после объединения с ЦКБ-5 в 1964 г. – ЦМКБ «Алмаз») и одновременно заочно получает второе высшее образование в ЛГУ на механико-математическом факультете.

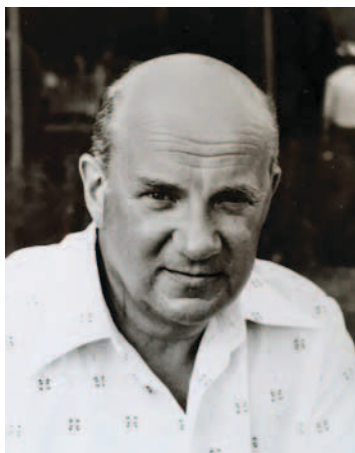
В ЦМКБ «Алмаз» участвует в только начавшихся тогда экспериментальных и теоретических работах по созданию катеров и кораблей на воздушной подушке (КВП). Созданные Владимиром Кузьмичом методики пересчета с

2. Кравец А.С. Характеристики воздушных винтов. – Киев: Оборонгиз, 1941.

3. Остроухов С.П. Аэродинамика воздушных винтов и винтокольцевых движителей. – М.: Физмалит 2014.

4. Wheeler R. L. The New Development Phase of the Mountbatton Class (SR-N4) Hovercraft// AIAA .– 1969. – Paper № 69 – 410. ■

ПАМЯТИ УЧИТЕЛЯ



В.К. Дьяченко

модельных испытаний и расчета гидродинамических характеристик КВП были по-инженерному просты, физически обоснованы и надежно подкреплены экспериментами. В 1962 г. Владимир Кузьмич становится начальником сектора гидродинамики КВП в бюро, который возглавлял до 1982 г.

В 1966 г. Владимир Кузьмич защищает диссертацию на соискание степени кандидата, а в начале 80-х гг. перед своим переводом в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова – на соискание доктора технических наук по гидродинамике судов с но-

выми принципами движения. С 1973 по 1975 г. он участвует в деятельности рабочей группы по безопасности СВП и СПК Межправительственной морской консультативной организации в Великобритании, ФРГ, Канаде. В 1978 г. Владимиру Кузьмичу с группой коллег присуждена Государственная премия за работы в области создания кораблей и катеров с новыми принципами движения.

Обладея недюжинным педагогическим талантом, Владимир Кузьмич воспитал целую плеяду инженеров, обеспечивших создание отечественных катеров и кораблей на воздушной подушке, в том числе крупнейшего в мире КВП пр. 12322 «Зубр».

В 2010 г. планировался к публикации ряд совместных с В.К. Дьяченко статей по гидродинамике СВП, но его преждевременный уход из жизни в 2013 г. и моя занятость вследствие начавшихся работ над пр. 12270М, а затем и пр. 22800, к сожалению, не позволили ранее завершить эту работу. С разрешения жены и дочери Владимира Кузьмича, уважаемых Светланы Александровны и Натальи Владимировны, восполню этот пробел.

*Главный конструктор
АО «ЦМКБ «Алмаз» Д.Е. Цымяков.*

