

3. Куреев В. Д. Введение в теорию синтеза траекторий безопасного выведения космических аппаратов на орбиты. СПб: ВИКУ им. А. Ф. Можайского, 1999. 111 с.
4. Аверкиев Н. Ф. Синтез оптимального управления движением динамической системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т. 44, № 8. С. 21—25.
5. Аверкиев Н. Ф., Булекбаев Д. А. Задача синтеза экономичных трасс запусков космических аппаратов // Вооружение и экономика. 2012. № 5(21). С. 60—64.
6. Черноусько Ф. Л., Баничук Н. В. Вариационные задачи механики и управления. М.: Наука, 1973. 236 с.

Сведения об авторах

Николай Федорович Аверкиев

— д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полетов летательных аппаратов, Санкт-Петербург;
E-mail: averkievnf@yandex.ru

Дастанбек Абдыкалыкович Булекбаев

— канд. техн. наук, доцент; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра высшей математики, Санкт-Петербург; E-mail: atiman@mail.ru

Рекомендована кафедрой навигационно-баллистического обеспечения применения космических средств и теории полета летательных аппаратов

Поступила в редакцию 25.03.13 г.

УДК 623.5

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ, Р. В. КРАСИЛЬНИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПУСКА ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ С НАДВОДНОГО НОСИТЕЛЯ

Рассматривается способ осуществления траверзного пуска необитаемых подводных аппаратов (НПА) с надводного судна. Приведена математическая модель функционирования гидробаллистического масштабного стенда, предназначенного для исследования предлагаемого способа пуска НПА, его конструкции и результатов экспериментальных исследований.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, пуск аппарата, испытания, масштабный гидробаллистический стенд, оценка параметров стенда.

Сегодня перед разработчиками средств освоения океана стоит задача создания автономных, компактных, легко транспортируемых научно-исследовательских комплексов, включающих в себя необитаемые подводные аппараты (НПА) и системы их взаимодействия с надводным носителем. В качестве примера такого комплекса можно привести норвежскую систему обслуживания НПА HUGIN 3000 L/R, размещаемую в контейнере, не связанном с судном-носителем [1].

Преимущества такого подхода к проектированию исследовательских технических средств очевидны: комплекс располагается в автономном помещении и может быть доставлен к месту проведения исследований с использованием многих видов транспорта. Кроме того, его возможно смонтировать на любое, подходящее по грузоподъемности, судно, которое при этом может не иметь дополнительных устройств для спуска в воду и подъема из нее подводных аппаратов. Для такого комплекса не требуются предварительные работы по размещению и наладке регистрационно-управляющей аппаратуры на судне.

Но НПА HUGIN 3000 L/R имеет и недостатки: комплекс не может обеспечить одновременного функционирования в заданном районе нескольких НПА, что желательно (а в некоторых случаях — просто необходимо). Пуск аппарата производится с кормы судна-носителя, что ограничивает возможности размещения на последнем контейнера (контейнеров), подготовка к пуску и сам пуск требуют много времени (необходимость выдвигания спускоподъемного модуля, медленный спуск НПА движительным комплексом вперед, отсоединение строп — все это требующие повышенного внимания к безопасности работ временные затраты). Кроме того, контейнер для размещения НПА создается по отдельному проекту.

В настоящей статье обоснована возможность создания автономного исследовательского комплекса, размещаемого в стандартном транспортном контейнере, при этом обладающего возможностью организации одновременной работы до шести НПА [2].

Главной особенностью предлагаемого решения является его способность к организации траверзного (со стороны борта) пуска НПА, что делает возможным нахождение на палубе в состоянии готовности к использованию одновременно нескольких контейнеров и, таким образом, существенно облегчает вопрос группового использования НПА.

Для доказательства реализуемости предлагаемого решения группой исследователей, в которую помимо авторов входили профессор О. И. Ефимов и магистр техники и технологии С. А. Ануфриков, было проведено экспериментальное исследование. Для моделирования процесса пуска НПА был создан гидробаллистический масштабный стенд. В рамках исследований были определены качественные параметры процесса пуска НПА, обоснованы критерии масштабного моделирования, выполнено полное математическое описание процесса пуска НПА и его компьютерное моделирование (как для натуральных условий, так и для масштабных исследований) с целью предварительного определения возможности реализации способа, предложена конструктивно-технологическая схема стенда, разработаны программа и методики проведения экспериментальных исследований и осуществлено экспериментальное определение всех обозначенных параметров пуска НПА для ряда выбранных начальных условий. На рис. 1 представлен общий вид стенда (1 — макет НПА; 2 — направляющий аппарат пускового блока; 3 — опорный ролик; 4 — поворотная рама пускового блока; 5 — основание пускового блока; 6 — опорные балки, перпендикулярные продольной оси бассейна; 7 — стена бассейна).

Гидробаллистический стенд функционирует следующим образом. Макет НПА фиксируется на стенде с помощью тросика; в момент, когда макет „освобождается“, подается сигнал к началу работы измерительных датчиков. На этом этапе отделения (I) на макет действует сила трения скольжения с коэффициентом трения μ . После выхода макета НПА на опорный ролик (II этап) сила трения скольжения частично заменяется силой трения качения с коэффициентом трения $\mu_p \ll \mu$, что обуславливает увеличение скорости отделения. После того как центр масс макета НПА окажется над опорным роликом, начинается поворот макета вокруг ролика при отсутствии контакта с направляющими (III этап). Затем происходит отрыв макета от ролика, падение по параболической траектории и приводнение (IV этап). Датчики могут измерять только продольную скорость отделения макета и прекращают работу по окончании этапа II.

На основе составленной модели процесса пуска НПА было разработано его математическое описание. Успешное выполнение подводным аппаратом поставленных задач определяется рядом факторов, среди которых существенную роль играют безаварийное отделение от носителя и приводнение, поскольку неудачный вход в воду НПА может вызвать соударение с носителем.

Поскольку движение НПА в воде (в том числе при входе в нее) неуправляемо, его математическое описание весьма затруднено и расчетная оценка параметров этого движения в настоящей работе не рассматривается. Этим определяется значимость экспериментов.

Основными кинематическими параметрами, определяющими качество приводнения НПА, были выбраны угол $\theta_{\text{пр}}$ дифферента, скорость $v_{\text{пр}}$ приводнения, угловая скорость $\omega_{\text{пр}}$ приводнения и угол $\alpha_{\text{пр}}$ атаки (угол между продольной осью НПА и вектором скорости в плоскости продольного движения).

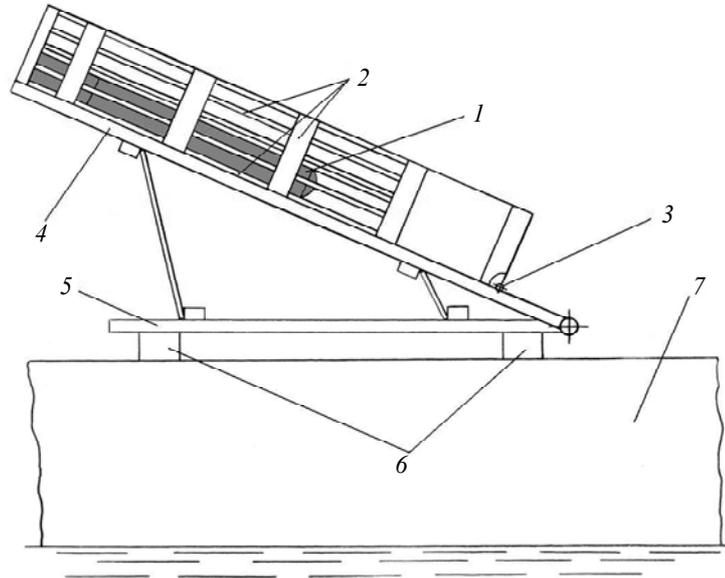


Рис. 1

В качестве показателей успешного приводнения были определены: положение точки приводнения НПА на расстоянии от борта — не менее 0,6 (эмпирический коэффициент) длины НПА и отсутствие движения НПА в сторону судна-носителя после приводнения.

Для проведения исследования необходимо было определить критерии масштабного моделирования, чтобы оценить натурные параметры процесса исходя из полученных опытным путем. В качестве определяющих параметров, связанных с существом процесса пуска НПА, авторами были выделены: w — ускорение; f — площадь; L — длина; V — объем; m — масса; J — момент инерции; F — сила; M — момент силы; t — время; v — скорость НПА; ρ — плотность. Для данных параметров были определены масштабирующие коэффициенты K , позволяющие связать значения натурных (индекс „1“) и масштабных (индекс „2“) величин.

$$K_L = \frac{L_1}{L_2}; K_w = \frac{w_1}{w_2}; K_\rho = \frac{\rho_1}{\rho_2}; K_m = (K_L)^3; K_f = (K_L)^2; K_V = (K_L)^3;$$

$$K_F = (K_L)^3; K_t = \sqrt{K_L}; K_v = \sqrt{K_L}; K_M = (K_L)^4; K_J = (K_L)^5.$$

Для вычисления контактных усилий НПА при его отделении от стенда были получены системы дифференциальных уравнений, описывающих этапы движения НПА.

Значения действующих на НПА сил и контактных усилий, возникающих при его движении внутри пускового устройства, непостоянны во времени. Для каждого из этапов I—IV были составлены аналитические выражения с целью вычисления указанных сил.

На рис. 2 представлено положение макета НПА в начальный момент отделения от стенда. На этапе движения макета НПА I, когда вертикаль веса макета находится в пределах сплошной нижней опорной дорожки, перемещение макета по наклонной плоскости осуществляется за счет скатывающей силы

$$F_d = mg \sin \theta_0.$$

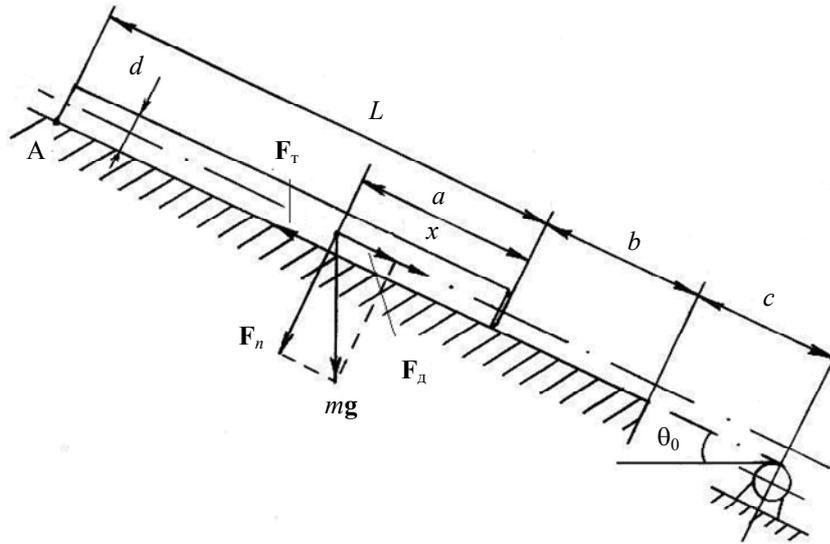


Рис. 2

Этап I может быть описан условием $x_0 < x \leq b$, силы, действующие при этом на макет НПА (рис. 3), определяются следующими выражениями:

$$\frac{(q_k + q_n)}{2} L = mg \cos \theta_0. \quad (1)$$

Здесь q_k и q_n — реакции направляющих в крайних точках макета.

Сумма моментов сил относительно точки А

$$\Sigma M_A = 0 \rightarrow mg \cos \theta_0 (L - a) + \mu mg \frac{d}{2} \cos \theta_0 = q_k \frac{L^2}{2} + (q_k + q_n) \frac{L^2}{3}. \quad (2)$$

Тогда из (1) и (2) следует

$$q_n = 6mg \cos \theta_0 \frac{\left(2 \frac{L}{3} - a + \mu \frac{d}{2}\right)}{L^2}; \quad q_k = \frac{2mg \cos \theta_0}{L} - 6mg \cos \theta_0 \frac{\left(2 \frac{L}{3} - a + \mu \frac{d}{2}\right)}{L^2}.$$

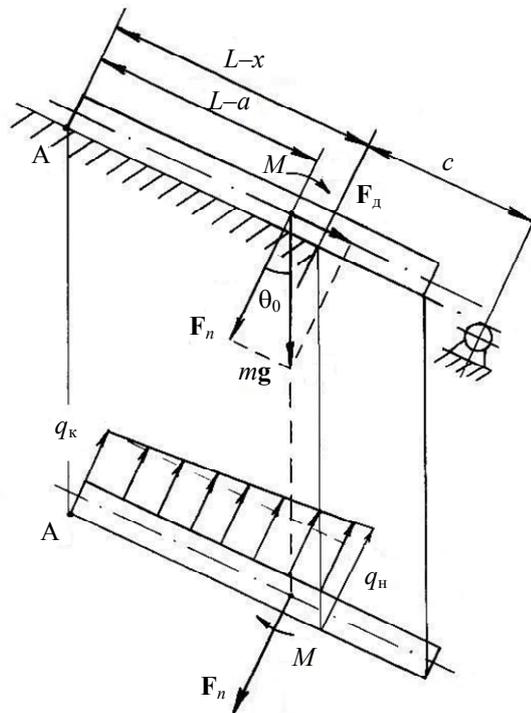


Рис. 3

Этап I включает также движение макета НПА, когда его головная часть сошла с направляющих и находится между ними и опорным роликом. В этом случае $b < x \leq b + c$.

Запишем выражения, определяющие силы, действующие на макет НПА:

$$\frac{(q_k + q_n)}{2}(L - x + b) = mg \cos \theta_0. \quad (3)$$

Сумма моментов сил относительно точки А

$$\Sigma M_A = 0 \rightarrow mg \cos \theta_0(L - a) + \mu mg \frac{d}{2} \cos \theta_0 = q_k \frac{(L - x + b)^2}{2} + (q_k - q_n) \frac{(L - x + b)^2}{3}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) следует

$$q_n = 6mg \cos \theta_0 \frac{\left(L - a + \mu \frac{d}{2} - \frac{(L - x + b)}{3} \right)}{(L - x + b)^2};$$

$$q_k = \frac{2mg \cos \theta_0}{L - x + b} - 6mg \cos \theta_0 \frac{\left(L - a + \mu \frac{d}{2} - \frac{(L - x + b)}{3} \right)}{(L - x + b)^2}.$$

На этапе II (рис. 4) при нахождении центра масс макета НПА между направляющей и роликом возникают две реакции контактирования. Усилие, воспринимаемое роликом по мере выдвижения макета, увеличивается, что способствует снижению силы трения (за счет частичной замены трения скольжения трением качения).

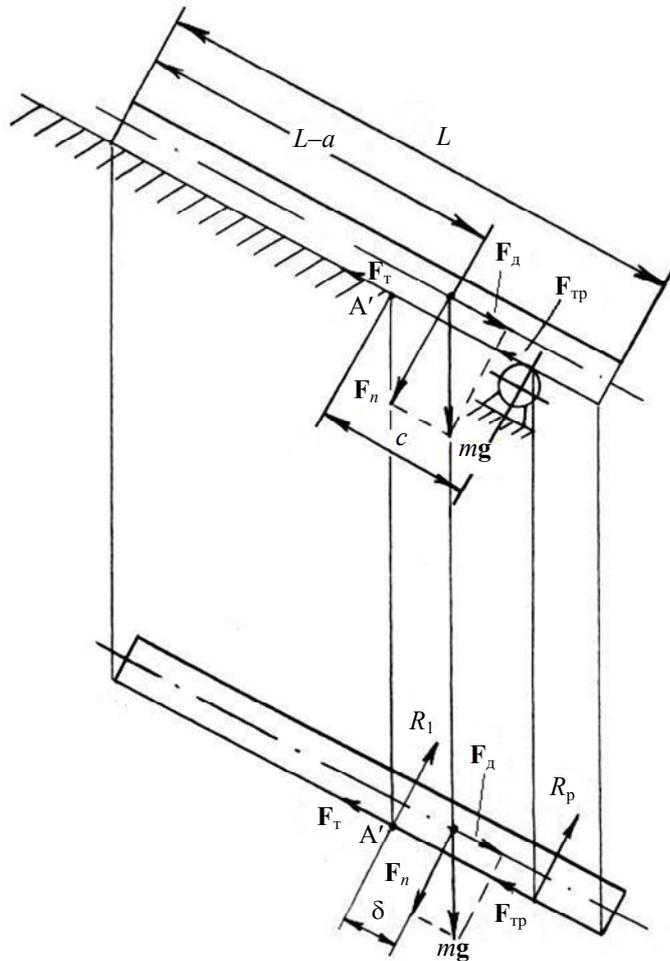


Рис. 4

Этап пуска II характеризуется условием $b + c < x \leq a + b + c$.

Здесь $R_1 + R_p = mg \cos \theta_0$ (R_1 — реакция в точке контакта макета НПА с направляющими; R_p — реакция ролика).

Сумма моментов сил относительно точки А

$$\Sigma M_A = 0 \rightarrow \delta mg \cos \theta_0 + mgr \sin \theta_0 = cR_p, \quad (5)$$

где r — радиус ролика.

Оценим значения R_p и R_1 , а также силы трения направляющих F_T и ролика F_{Tp} в момент начала этапа II. Для этого момента времени $\delta=0$. В соответствии с (5)

$$R_p = \frac{mgr \sin \theta_0}{c}; \quad R_1 = mg \cos \theta_0 - \frac{mgr \sin \theta_0}{c}.$$

Силы трения определяются из следующих соотношений:

$$F_T = \mu R_1; \quad F_{Tp} = \mu_p R_p,$$

где μ_p — коэффициент трения макета НПА о ролик.

Подставив параметры макета НПА ($m = 14,5$ кг, $L = 1680$ мм, $d = 107$ мм, $\theta_0 = 36^\circ$, $r = 53,5$ мм), получим следующие значения искомых величин: $R_p = 15,5$ Н; $R_1 = 108,9$ Н; $F_{Tp} = 0,5$ Н; $F_T = 32,7$ Н. Вычислим значения реакций R_1 и R_p для окончания II этапа ($\delta=c$), тогда

$$R_p = \frac{cmg \cos \theta_0 + mgr \sin \theta_0}{c}; \quad R_1 = mg \cos \theta_0 - \frac{cmg \cos \theta_0 + mgr \sin \theta_0}{c}.$$

Для условий эксперимента при $x = a + b + c$ $R_p = 140,0$ Н, а $R_1 = -15,5$ Н. Это означает, что в начале этапа III контакт между макетом НПА и направляющими отсутствует. Определим расстояние c , на которое ось ролика должна отстоять от конца направляющих, чтобы до начала этапа III контакт макета с направляющими сохранялся. Для этого найдем такое значение $x = a + b + \delta$, при котором $R_1 = 0$:

$$R_p = mg \cos \theta_0 = 124,5 \text{ Н}; \quad \delta = \frac{cR_p - mgr \sin \theta_0}{mg \cos \theta_0} = 0,17 \approx 0,2 \text{ м}.$$

Следовательно, должно быть $c = 0,2$ м. Таким образом, исходя из полученных значений контактных усилий можно определить геометрические размеры пускового блока стенда. Следует заметить: если $c < 0,2$ м (даже при стремлении ее к нулю), это не приводит к значительному влиянию на процесс пуска НПА — возможно небольшое увеличение $\theta_{пр}$ за счет более раннего начала поворота НПА вокруг ролика.

Процесс отделения макета НПА на этапах I—II описывает система дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \left(\frac{1}{m} \right) \left(mg \sin \theta_0 - \mu \left(\frac{mg \cos \theta_0 - k(x-a)mg \cos \theta_0}{b+c} \right) - \mu_p \left(\frac{k(x-a)mg \cos \theta_0}{b+c} \right) \right); \\ \frac{dx}{dt} = v. \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{При этом } \begin{cases} k = 0, \text{ при } x \leq a + b, \\ k = 1, \text{ при } x > a + b. \end{cases}$$

Начало этапа движения III определяется моментом выхода центра масс макета НПА за опорный ролик (рис. 5). Сила веса и опорная реакция ролика создают увеличивающийся со временем момент, обуславливающий формирование угловой скорости вращения макета НПА в плоскости пуска и соответствующее изменение его угла дифферента θ . Этап IV характеризуется свободным движением (падением) макета НПА с постоянной угловой скоростью (кон-

такт с роликом отсутствует, сопротивление воздуха не учитывается). При этом продолжается увеличение угла дифферента макета до значения $\theta_{пр}$ — угла его приводнения.

Допустим, что отделение макета происходит в одной вертикальной плоскости, а макет НПА движется по вращающемуся ролику без скольжения и отрыва (рис. 5).

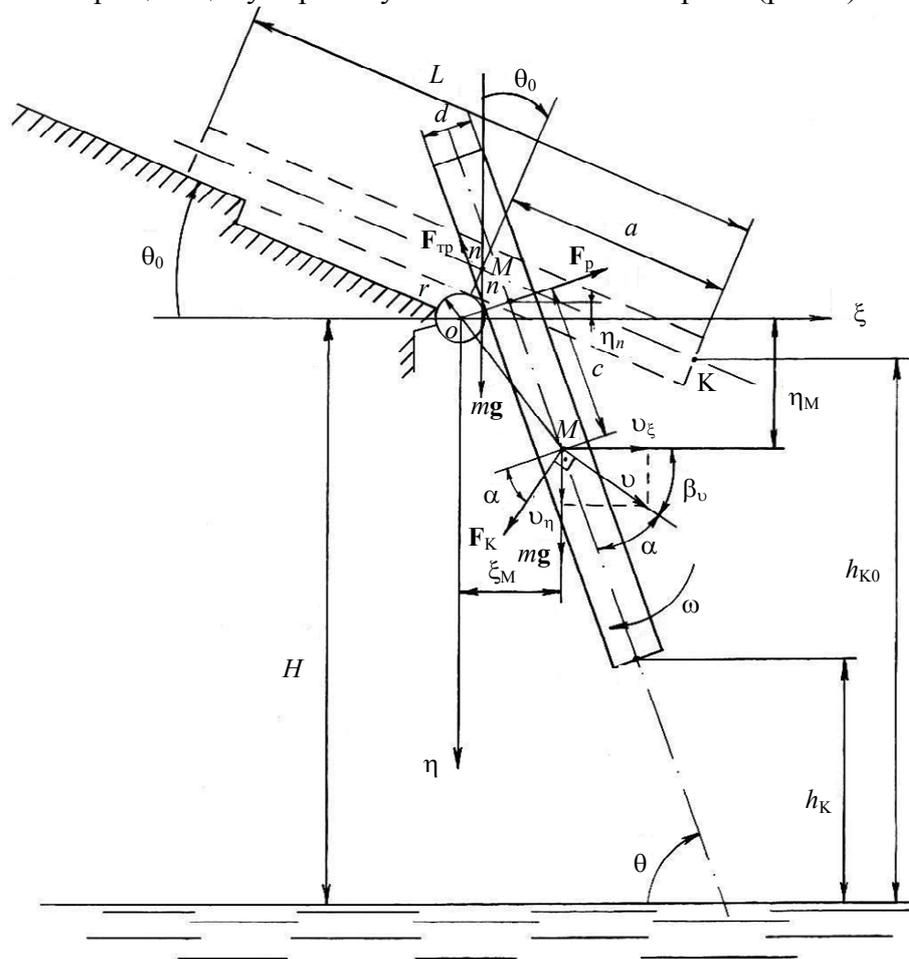


Рис. 5

Система дифференциальных уравнений отделения макета НПА на этапах III—IV имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dv_{\xi}}{dt} = \left(\frac{1}{m}\right) (F_p \sin \theta - F_{тр} \cos \theta - F_k \sin \beta_v); \\ \frac{dv_{\eta}}{dt} = \left(\frac{1}{m}\right) (mg + F_k \cos \beta_v - F_p \cos \theta - F_{тр} \sin \theta); \\ \frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{1}{J}\right) \left(F_p e + F_{тр} \frac{d}{2}\right); \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega; \\ \frac{d\xi_M}{dt} = v_{\xi}; \\ \frac{d\eta_M}{dt} = v_{\eta}. \end{cases} \quad (7)$$

Полученные системы дифференциальных уравнений (6) и (7) решались методом Рунге-Кутты с использованием программы MatLab. При этом выходными данными являлись скорость

макета НПА в момент приводнения $v = v_{пр}$, угол атаки макета НПА в момент приводнения $\alpha = \alpha_{пр}$, угол приводнения макета НПА $\theta = \theta_{пр}$ и координата точки К ξ_k в момент приводнения.

На основании полученных данных были определены предпочтительные диапазоны изменения угла θ наклона пускового устройства к горизонту, а также сформированы программа и методика экспериментальных исследований на гидробаллистическом стенде. Масштаб стенда (1:5) был выбран исходя из предполагаемых геометрических размеров НПА (0,5×0,4×8,4 м) и бассейна СПбГМТУ, в котором проводились исследования (35×6×2,4 м). Стенд располагался на высоте 0,8 м над уровнем воды.

Макет НПА после приводнения должен находиться в вертикальном положении, следовательно, длина макета не должна превышать 2 м, что и соответствует выбранному масштабу 1:5 по отношению к реальным размерам НПА. Испытания проводились с использованием макета НПА (длина 1,68 м, диаметр 0,107 м, масса 14,5 кг). В хвостовой части макета был установлен металлический кожух, заполненный пенопластом, обеспечивающий вертикальное положение макета после его приводнения за счет разности положения центров масс и объема. Расположенный в этой части макета НПА буюк-указатель служил для измерения расстояния от стенда до конечного положения макета в воде.

Цель экспериментальных исследований на масштабном стенде заключалась в подтверждении возможности безаварийного входа макета НПА в воду. В этом случае точка приводнения макета должна находиться на расстоянии от борта судна (Б), составляющем не менее $0,6L$. Конечное положение макета относительно борта (расстояние B^*) фиксировалось буюком-указателем с помощью буйрепа, закрепленного за хвостовую оконечность макета. Отсутствие возвратного движения макета характеризуется тем, что $B^* > B$.

Таблица 1

Вычисленные расстояния от стенда до места приводнения макета НПА и угол приводнения

| θ_0, \dots° | Б, м | $\theta_{пр}, \dots^\circ$ |
|-------------------------|------|----------------------------|
| 24 | 1,34 | 33—35 |
| 30 | 1,18 | 38—40 |
| 36 | 1,19 | 42—44 |

Приведенные в табл. 1 значения приблизительны, так как из-за скоротечности процесса приводнения они не могли быть измерены на месте. Для их определения была произведена видеосъемка, путем покадрового просмотра отснятого материала были выявлены моменты входа макета в воду, после чего по ним путем составления пропорций и были определены искомые величины.

Во всех опытах расстояние B^* более чем в два раза превышало Б, что позволило подтвердить отсутствие движения макета НПА в сторону стенда (НПА в сторону борта судна) при реализуемом способе отделения НПА от носителя. Экспериментальные данные были сопоставлены с данными, полученными расчетным путем с использованием разработанной математической модели (табл. 2).

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных данных с результатами математического моделирования

| № опыта | θ_0, \dots° | Б* | $\theta_{пр}, \dots^\circ$ | | Б, м | |
|---------|-------------------------|------|----------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| | | | эксперимент | расчет ($\mu=0,23$) | эксперимент | расчет ($\mu=0,23$) |
| 5 | 18 | 2,86 | — | — | — | — |
| 6 | 18 | 2,90 | — | — | — | — |
| 1 | 24 | 2,97 | 33—35 | 35,39 | 1,34 | 1,26 |
| 2 | 24 | 2,97 | | | | |
| 3 | 24 | 2,89 | | | | |
| 4 | 24 | 2,99 | | | | |

Продолжение табл. 2

| № опыта | θ_0, \dots° | Б* | $\theta_{пр}, \dots^\circ$ | | Б, м | |
|---------|-------------------------|------|----------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|
| | | | эксперимент | расчет ($\mu=0,23$) | эксперимент | расчет ($\mu=0,23$) |
| 10 | 30 | 3,02 | 38—40 | 38,59 | 1,18 | 1,23 |
| 11 | 30 | 2,97 | | | | |
| 12 | 30 | 2,97 | | | | |
| 7 | 36 | 2,86 | 42—44 | 40,91 | 1,19 | 1,13 |
| 8 | 36 | 2,85 | | | | |
| 9 | 36 | 2,96 | | | | |

Как можно видеть, разработанная авторами математическая модель пуска подводного аппарата с приемлемой (инженерной) точностью позволяет оценить параметры процесса пуска НПА при реализации предложенного способа отделения от надводного носителя. В целом проведенные исследования позволяют говорить о том, что экспериментально доказана работоспособность схемотехнического решения и установлена возможность безопасного отделения НПА от надводного носителя при его продольном наклонном сбросе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [Электронный ресурс]: <www.kongsberg.com>.
- Патент РФ № 2372575. Миносбрасывающий комплекс для надводного судна. на изобретение / *О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, И. А. Шавырин*. Заявл. 03.12.2007; опубл. 10.11.2009. Бюл. № 31.

*Сведения об авторах***Антон Валентинович Красильников**

— канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, научно-исследовательский сектор перспективных энергетических установок; научный сотрудник;
E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Роман Валентинович Красильников

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, научно-исследовательский сектор перспективных энергетических установок; научный сотрудник;
E-mail: r.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
06.03.13 г.