

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ, Р. В. КРАСИЛЬНИКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТДЕЛЕНИЯ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ОТ НАДВОДНОГО НОСИТЕЛЯ

Представлена математическая модель процесса траверзного пуска необитаемых подводных аппаратов, применяемых, в том числе, в целях исследования Мирового океана. Приведены результаты моделирования и сформулированы рекомендации по общему проектированию пускового комплекса.

Ключевые слова: необитаемые подводные аппараты, траверзный пуск, системный подход к проектированию, математическая модель.

Проектирование пускового комплекса. Способ траверзного группового отделения необитаемых подводных аппаратов (НПА) от надводного судна реализуется с помощью устройства, разработанного с участием авторов настоящей статьи [см. лит.]. Основу такой пусковой системы составляет стандартный 40-футовый контейнер, в котором располагаются касеты с НПА. Для пуска НПА с использованием гидравлической системы осуществляется наклон контейнера на определенный угол, после чего производится освобождение НПА от удерживающих захватов, что приводит к их отделению от носителя.

Одним из ключевых моментов при проектировании такого комплекса механизмов, как пусковая система, является системный подход к его созданию. В рассматриваемом случае системный подход к проблеме отделения необитаемых подводных аппаратов от надводного носителя базируется на комплексном анализе взаимосвязей в единой системе „корабль — контейнер — НПА“, функционирующей в заданных условиях эксплуатации. Рассмотрим указанные взаимосвязи более подробно.

Взаимосвязи „НПА — корабль“. Большинство необитаемых подводных аппаратов имеют ограниченный радиус действия, напрямую связанный с запасом энергии устройства. Именно поэтому для первоначальной доставки НПА в рабочий район используется надводный носитель. Для выполнения поставленной задачи НПА необходимо принять на корабль, закрепить на направляющих дорожках, а также обеспечить их штатное обслуживание в походе (проверку состояния энергетике и аппаратуры, пополнения энергоресурсов и т. д.) и подготовку (прежде всего, ввод программы работы устройств и приборов) к применению.

Взаимосвязи „контейнер — корабль“. Как отмечалось выше, контейнерное устройство предназначено для отделения НПА от носителя. Работа устройств и приборов контейнера требует соответствующего обеспечения надводного носителя гидравликой, электропитанием и т.д. Например, судно-носитель предназначено для транспортировки 40-футовых контейнеров международного класса и оснащено соответствующими гнездами для их крепления. Эти гнезда используются для размещения и крепления переходного блока, включающего устройства

для установки контейнера в наклонное положение, при котором обеспечивается последовательный и безопасный пуск НПА.

Взаимосвязи „контейнер — НПА“. Для повышения эффективности работы комплекса количество НПА в одном контейнере должно быть максимальным, т.е. кассета, вставляемая в контейнер, должна иметь соответствующее количество пусковых блоков, образованных направляющими. Каждый блок должен обеспечивать продольную и поперечную фиксацию аппарата при его хранении и транспортировке в подготовленном виде. Стопор продольной фиксации должен надежно удерживать НПА при наклонном положении контейнера. При этом механизм освобождения НПА от стопора должен быть дистанционным. Кроме того, каждый пусковой блок должен обеспечивать безопасное отделение НПА от носителя. Под безопасностью в данном случае понимается следующее:

— для аппарата (после полного выхода из контейнера) — успешное приводнение с сохранением работоспособности всех его систем;

— для носителя — исключение несанкционированных соударений с корпусом корабля при качке с удалением места приводнения аппарата (точки входа головной его части в воду) от борта судна не менее чем на 5 м (для исключения „присоса“ НПА к плоскости борта).

Кассета с расположенными в ней НПА также должна быть надежно зафиксирована во внутреннем объеме контейнера с учетом ходовых вибраций и качки корабля.

Такие жесткие требования к контейнеру обуславливают целесообразность предварительного снаряжения и подготовки НПА в наземных условиях с их погрузкой в заранее доставленные контейнеры.

Несомненно также, что требования к контейнерным устройствам должны быть сформированы с учетом всех неблагоприятных факторов (влияния внешней среды и погодных условий). При этом основным фактором, негативно влияющим на процесс отделения НПА от носителя, является волнение моря.

С учетом приведенных соображений была разработана математическая модель, описывающая процесс отделения НПА от носителя при регулярном волнении.

Математическая модель. При составлении модели рассматривался случай траверзного пуска НПА при бортовой качке. Для выявления основных закономерностей, характеризующих наклонный траверзный пуск длинномерного калиброванного по диаметру аппарата, продольная и килевая качки в первом приближении не учитывались.

Особенностью конструктивного решения рассматриваемой системы является наличие поворотного ролика, установленного на максимальном удалении (с учетом расположения в транспортном контейнере) от удерживаемого на стопоре НПА. Изменение контактных реакций при движении НПА по направляющей дорожке к поворотному ролику способствует снижению сил механического трения (от скольжения к качению) и тем самым увеличению скорости выхода НПА из контейнера и приводнению его вне потока, создаваемого движением судна, что должно исключить „присоса“ аппарата к борту и соприкосновение с носителем. Как отмечалось выше, расстояние от борта до места приводнения должно быть не менее 5 м.

В этих условиях при отделении НПА от судна-носителя могут быть выделены два этапа движения аппарата.

Первый этап движения. На этом этапе НПА перемещается по наклонной направляющей под действием движущей силы, являющейся проекцией силы тяжести на продольную ось НПА. Движение считается однонаправленным (вдоль направляющих) и безотрывным. Этап заканчивается, когда центр тяжести аппарата выходит за пределы оси поворотного ролика (линию опоры). При этом угловая скорость ω НПА в вертикальной плоскости его движения будет соответствовать угловой скорости Ω_n бортовой качки носителя, а начальный угол θ_1 дифферента НПА — наклону направляющей дорожки в этот момент времени.

Гравитационные волны, вызванные ветром, преобладают в открытых акваториях. Для корабля они являются основным постоянно действующим возмущением. При бортовой качке судно-носитель поворачивается на угол крена относительно центра тяжести, поэтому неподвижную систему координат ξ — η свяжем с точкой G — центром тяжести судна. Важным критерием остойчивости судна является метацентрическая высота h . Будем считать, что подъем контейнера незначительно влияет на положение центра тяжести корабля и параметры его качки.

На рис. 1 приведена схема корпуса судна и изменения его положения при бортовой качке; здесь θ_0 — угол подъема контейнера; R_p — радиус-вектор поворотного ролика; M — метациентр; r — радиус кривой, по которой смещается центр величины; C — центр величины.

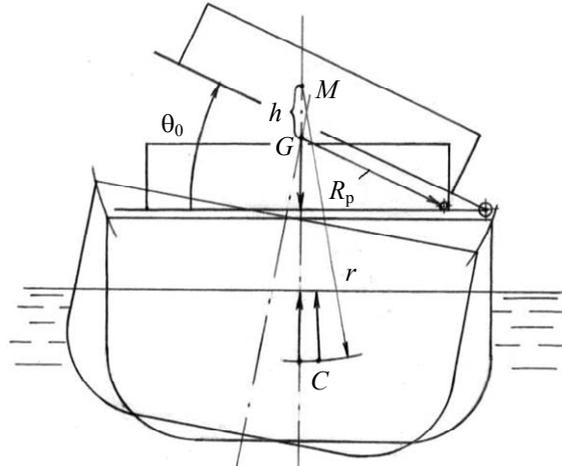


Рис. 1

При расчете бортовая качка принималась регулярной. Угол Θ_n крена корабля изменяется по синусоидальному закону:

$$\Theta_n = \Delta_n \sin(vt + \Theta_{n0}),$$

где Δ_n — угловая амплитуда качки судна; $v = 2\pi/T$ — частота бортовой качки; T — период качки; Θ_{n0} — угол крена корабля в момент начала движения НПА при пуске; t — текущее время.

Тогда угловая скорость Ω_n бортовой качки корабля будет определяться выражением

$$\Omega_n = v\Delta_n \cos(vt + \Theta_{n0}),$$

а начальное ее значение в момент начала движения НПА будет равно

$$\Omega_n = v\Delta_n \cos \Theta_{n0}.$$

Обозначим начальный угол по часовой стрелке радиус-вектора поворотного ролика R_p как θ_{p0} . Тогда при $\Theta_{n0} = 0$ начальные координаты оси ролика

$$\xi_{p0} = R_p \cos \theta_{p0}, \quad \eta_{p0} = R_p \sin \theta_{p0};$$

при качке текущие значения этих координат определяются как

$$\theta_p = \theta_{p0} + \Theta_n; \quad \xi_p = R_p \cos \theta_p, \quad \eta_p = R_p \sin \theta_p.$$

Одним из важнейших параметров при отделении НПА является высота борта судна-носителя. Так как в условиях качки она переменна, целесообразно ввести величину H_G — высоту центра тяжести судна над уровнем спокойной воды. В этом случае расстояние от оси ролика до уровня спокойной воды рассчитывается по формуле

$$l = H_G - \eta_p.$$

Схема начального положения аппарата на направляющей дорожке приведена на рис. 2, где $\theta_0 + \Theta_n$ — текущее угловое положение наклонной направляющей дорожки; a — положение центра тяжести от носовой оконечности изделия; b — расстояние от начального положения

носовой оконечности аппарата до конца направляющей дорожки; c — расстояние от конца дорожки до центра ролика; A — центр масс аппарата; mg — сила тяжести; F_d — сила контакта НПА с дорожкой; $F_{дв}$ — движущая сила; $F_{тр}$ — сила механического трения аппарата о дорожку.

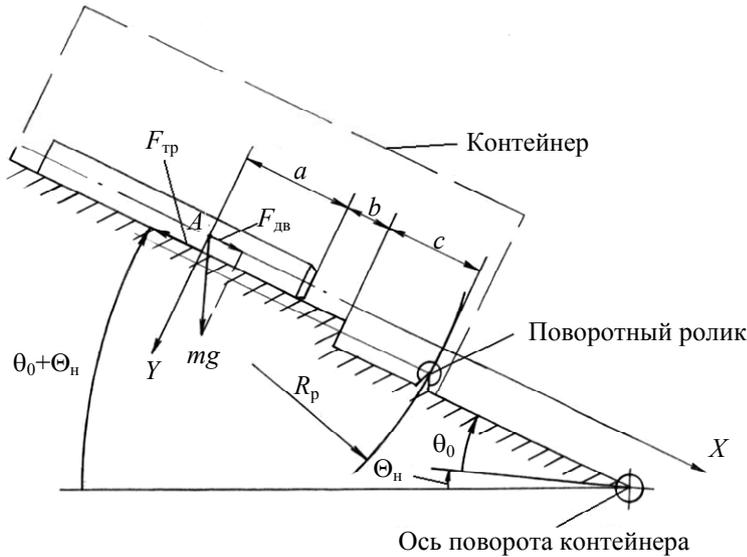


Рис. 2

На первой стадии первого этапа движения ($X \leq b + c$) можно записать общеизвестные соотношения при движении тела по наклонной плоскости:

$$F_d = mg \cos(\theta_0 + \Theta_n) + F_k;$$

$$F_{дв} = mg \sin(\theta_0 + \Theta_n);$$

$$F_{тр} = \mu_1 F_d,$$

где F_k — сила Кориолиса; μ_1 — коэффициент трения материала корпуса аппарата о направляющую дорожку.

Расчетная схема для второй стадии первого этапа движения НПА ($b + c < X \leq a + b + c$) приведена на рис. 3, здесь F_p — сила контакта НПА с роликом, V — скорость НПА.

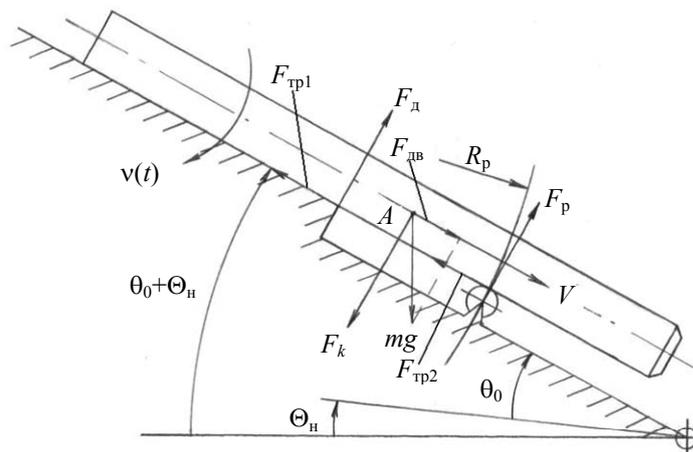


Рис. 3

На основе приведенных зависимостей сформирована расчетная модель первого этапа движения. Силы, действующие на аппарат, определяются выражениями

$$F_d = mg \cos(\theta_0 + \Theta_n) + F_k - F_p;$$

$$F_{дв} = mg \sin(\theta_0 + \Theta_n);$$

$$F_{тр1} = \mu_1 F_d; \quad F_{тр2} = \mu_2 F_p;$$

$$F_k = 2m\Omega_H V,$$

где μ_2 — коэффициент трения качения, m — масса НПА; при этом

$$F_p = 0, \text{ если } X \leq (a + b);$$

$$F_p = (X - a) [mg \cos(\theta_0 + \Theta_H) + F_k] / (b + c), \text{ если } X > (a + b).$$

С учетом приведенных соотношений система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{m} (F_{дв} - F_{тр1} - F_{тр2}), \\ \frac{dX}{dt} &= V. \end{aligned} \right\}$$

Второй этап движения. Основным допущением, принимаемым при рассмотрении второго этапа движения НПА, является предположение о его безотрывном от ролика поступательно-вращательном движении. Под действием моментов силы тяжести НПА и силы Кориолиса относительно поворотного ролика формируется угловая скорость ω НПА в вертикальной плоскости. По окончании контакта аппарата с роликом угловая скорость изменяться не будет, что определяет угол $\theta_{пр}$ его дифферента при приводнении.

Для второго этапа движения аппарата справедливы следующие расчетные соотношения:

— начальное положение центра опорного ролика при известном крене Θ_H судна:

$$\xi_{p1} = R_p \cos(\theta_{p0} + \Theta_H), \quad \eta_{p1} = R_p \sin(\theta_{p0} + \Theta_H);$$

— начальное положение центра тяжести НПА (точка A):

$$\xi_{A1} = \xi_{p1} + \left(r_p + \frac{d}{2}\right) \sin(\theta_0 + \Theta_H), \quad \eta_{A1} = \eta_{p1} - \left(r_p + \frac{d}{2}\right) \cos(\theta_0 + \Theta_H),$$

где d — диаметр калиброванной части аппарата; r_p — радиус ролика.

Проекции вектора скорости V НПА (определяемого по результатам моделирования движения изделия на первом этапе расчета) на оси неподвижной системы координат определяются как

$$V_\xi = V \cos(\theta_0 + \Theta_H), \quad V_\eta = V \sin(\theta_0 + \Theta_H).$$

Расчетная схема для второго этапа движения аппарата приведена на рис. 4, где α — угол атаки; K — точка, расположенная на носовой оконечности аппарата; θ — угол, образованный горизонтальной плоскостью и продольной осью НПА.

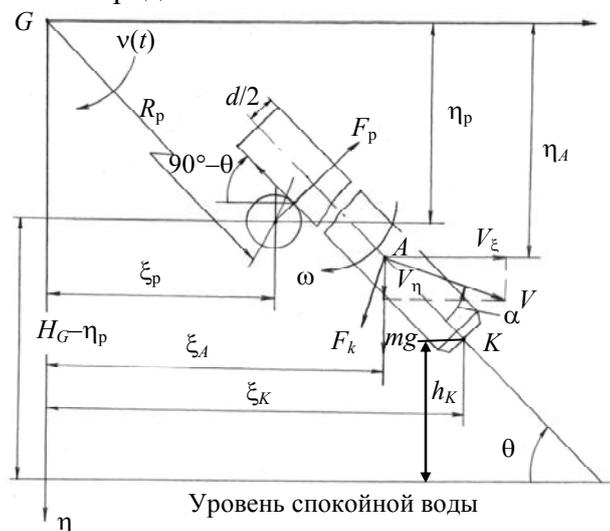


Рис. 4

Силы, действующие на аппарат, определяются выражениями

$$\begin{aligned} F_k &= 2\omega m V; \\ F_p &= mg \cos \theta + F_k \cos \alpha; \\ F_{тр} &= \mu_1 F_p. \end{aligned}$$

Соотношения, необходимые для составления математической модели (см. рис. 4):

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_\xi^2 + V_\eta^2}; \\ \beta_V &= \arcsin(V_\eta/V); \\ \alpha &= \theta - \beta_V; \\ q &= \sqrt{(\eta_A - \eta_p)^2 + (\xi_A - \xi_p)^2 - \left(r_p + \frac{d}{2}\right)^2}; \\ h_n &= H_G - \eta_p + \left(r_p + \frac{d}{2}\right) \sin \theta, \\ h_K &= h_n - (q + a) \sin \theta. \end{aligned}$$

С учетом приведенных соотношений система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dV_\xi}{dt} &= \frac{1}{m} (F_p \cos \theta - F_{тр} \sin \theta - F_k \sin \beta_V); \\ \frac{dV_\eta}{dt} &= \frac{1}{m} (mg + F_k \cos \beta_V - F_p \sin \theta - F_{тр} \cos \theta); \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left(F_p q + F_{тр} \frac{d}{2} \right); \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega; \quad \frac{d\xi_A}{dt} = V_\xi; \quad \frac{d\eta_A}{dt} = V_\eta. \end{aligned}$$

Моделирование прекращается при $h_K = 0$ (начало приводнения НПА).

С помощью представленной математической модели был проведен ряд исследований.

Результаты исследований.

Исследование процесса приводнения НПА при изменении крена судна. Зависимость угла наклона носителя и его угловой скорости от фазового смещения угла качки γ в момент начала движения показана на рис. 5.



Рис. 5

Результаты исследования при основных углах подъема контейнера $\theta_0 = 24^\circ$ и $\theta_0 = 30^\circ$ (выбранных по результатам моделирования и экспериментов) приведены в табл. 1 и 2 соответственно, где приняты следующие обозначения: V_1 — скорость НПА при отделении от ро-

лика; $V_{пр}$ — скорость НПА при приводнении; $t_{пр}$ — время от момента начала движения НПА до его приводнения; $\theta_{пр}$ — угол между продольной осью НПА и поверхностью воды в момент приводнения; $\alpha_{пр}$ — значение угла атаки в момент приводнения НПА; $\omega_{пр}$ — угловая скорость НПА в момент приводнения; N — расстояние от борта корабля до точки приводнения. Значения параметров, представленные в таблицах, получены при следующих условиях: $H_G = 8$ м, $R_p = 6,1$ м, $T = 18$ с.

Таблица 1

Параметр	$\gamma = 0$	$\gamma = \pi/2$	$\gamma = \pi$	$\gamma = 3\pi/2$
V_1 , м/с	5,69	6,13	3,52	4,35
$V_{пр}$, м/с	10,79	11,56	17,55	11,03
$t_{пр}$, с	3,61	3,13	4,84	6,05
$\theta_{пр}$, ...°	54,60	55,38	74,55	61,27
$\alpha_{пр}$, ...°	-34,84	-34,30	-11,35	-13,60
$\omega_{пр}$, рад/с	1,28	1,12	1,97	1,75
N , м	4,94	5,01	2,41	3,89

Таблица 2

Параметр	$\gamma = 0$	$\gamma = \pi/2$	$\gamma = \pi$	$\gamma = 3\pi/2$
V_1 , м/с	6,68	7,14	5,55	5,24
$V_{пр}$, м/с	11,16	11,66	12,91	11,78
$t_{пр}$, с	2,92	2,60	3,31	3,91
$\theta_{пр}$, ...°	55,59	54,20	63,29	61,6
$\alpha_{пр}$, ...°	-30,23	-26,90	-10,77	-13,87
$\omega_{пр}$, рад/с	1,12	0,88	1,38	1,54
N , м	4,86	5,10	4,01	4,07

Так как значение N при $\theta_0 = 30^\circ$ и $\gamma = \pi/2$ мало отличается от аналогичного значения, получаемого при $\theta_0 = 24^\circ$, было принято решение о выборе угла подъема контейнера $\theta_0 = 24^\circ$ в качестве базового (в связи с меньшей величиной возвышения контейнера над палубой судна, а следовательно, меньшим влиянием на его остойчивость).

Исследование процесса приводнения НПА при изменении высоты борта судна. В качестве относительного критерия, который характеризует высоту борта носителя, была принята H_G — высота центра тяжести носителя над уровнем спокойной воды. С изменением высоты H_G изменяется осадка судна-носителя, а следовательно, и высота борта. Исследование проводилось для угла $\theta_0 = 24^\circ$. Высота H_G варьировалась в пределах от 7 до 4,5 м. Результаты исследования представлены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	$H_G=7,0$	$H_G=6,0$	$H_G=5,0$	$H_G=4,5$
V_1 , м/с	6,13	6,13	6,13	6,13
$V_{пр}$, м/с	10,78	9,95	9,05	8,77
$t_{пр}$, с	3,05	2,96	2,85	2,81
$\theta_{пр}$, ...°	50,25	44,61	37,69	34,90
$\alpha_{пр}$, ...°	-29,48	-22,48	-12,23	-7,45
$\omega_{пр}$, рад/с	1,11	1,11	1,11	1,11
N , м	5,21	5,22	5,04	4,90

Исследование процесса приводнения НПА при изменении коэффициента μ_1 трения аппарата о направляющую дорожку. Изменение коэффициента μ_1 влияет на выходные параметры движения аппарата по окончании первого этапа отделения: изменяются величины действующих на аппарат сил, скорость движения, время окончания первого этапа. В соответствии с изменением параметров движения НПА на первом этапе изменяются и параметры его приводнения. Исследование проводилось для угла $\theta_0 = 24^\circ$. Значение коэффициента μ_1 варьировалось в пределах от 0,3 до 0,1 (расчетные данные для разных материалов направляющей

дорожки). На практике данная величина будет зависеть от материалов дорожки и корпуса НПА, качества обработки их поверхностей, наличия смазки между дорожкой и корпусом, а также ряда других факторов. Результаты исследования представлены в табл. 4 (при условиях, заданных для табл. 1, 2).

Таблица 4

Параметр	$\mu_1=0,3$	$\mu_1=0,2$	$\mu_1=0,1$
V_1 , м/с	6,13	6,92	7,51
$V_{пр}$, м/с	11,56	11,85	12,21
$t_{пр}$, с	3,13	2,69	2,39
$\theta_{пр}$, ...°	55,38	54,08	52,95
$\alpha_{пр}$, ...°	-34,30	-32,50	-30,93
$\omega_{пр}$, рад/с	1,12	1,14	1,11
N , м	5,01	5,13	5,66

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о возможности достижения параметров, необходимых для безопасного отделения аппаратов от надводного носителя с учетом воздействующего на носитель регулярного волнения. Представленная математическая модель позволяет производить проверку правильности выбора параметров проектируемого пускового комплекса, а также может быть полезна при создании и отработке опытного образца системы натурального масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

Пат. 2372575 РФ, МПК F41F 5/04. Миносбрасывающий комплекс для надводного судна / О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников, И. А. Шавырин // Опубл. 10.11.09. Бюл. № 31.

Сведения об авторах

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

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
05.07.13 г.