



УДК 530.151:531.355:532.11

А. В. Суров

Торможение макетов изделий в водной среде

Предложено решение задачи многократного использования макетов изделий при выходе из трубы в водной среде с учетом влияния формы тормозного устройства, предохраняющего макет от разрушения в ходе проведения испытаний.

Ключевые слова: торможение в жидкости, макет изделия.

Введение

Отработка подводного выхода изделий из пусковых устройств – сложный и дорогостоящий процесс. В настоящее время проведению натурных испытаний предшествует этап макетных испытаний, для которых требуются макеты изделий и испытательные стенды (ИС). Зачастую для удовлетворения требований технического задания необходимо проводить всесторонние параметрические расчеты, при которых важным моментом является возможность многократного использования макетов с целью удешевления испытаний.

Таким образом, актуальной является разработка системы торможения макета после выхода его из пускового устройства в пределах объема стенда. Отметим, что в настоящей статье рассмотрен стенд с замкнутым объемом.

Постановка задачи

Одной из возможных схем, позволяющих обеспечить достаточно полную диаграмму изменения усилия торможения и остановку макета изделия, является схема с использованием сопротивления жидкости. На рис. 1 изображена предлагаемая схема гидродинамического торможения макета изделия. При входе изделия в тормозное устройство (ТУ) увеличивается сопротивление его движению за счет увеличения давления в ТУ. Обязательным условием для смягчения роста давления в начальный момент входа макета в ТУ является наличие воздушного объема в верхней части устройства, что значительно снижает риск возникновения гидравлического удара, приводящего к недопустимо высоким нагрузкам на макет изделия.

В предлагаемой схеме внутри ИС закреплено ТУ. На его верхней торцевой части установлена заглушка, которую целесообразно

изготовить в виде резинового уплотнения. В случае возникновения аварийной ситуации оно может защитить ИС и макет изделия от повреждений.

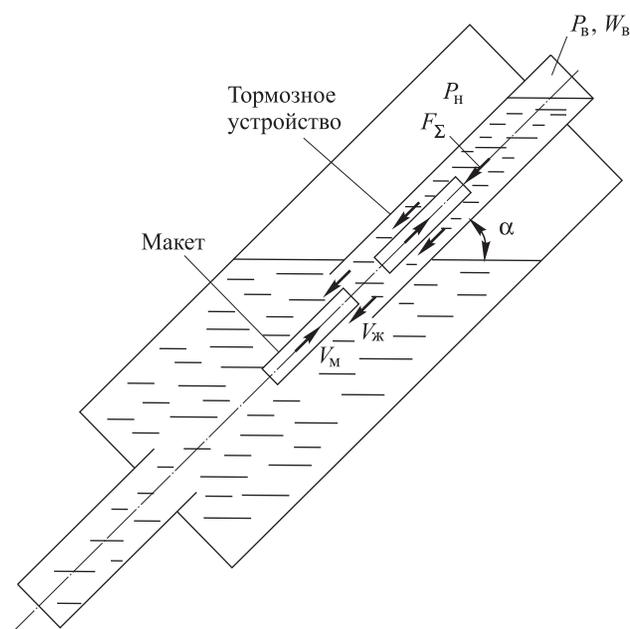


Рис. 1. Схема гидродинамического торможения изделия:

P_n – рабочее давление в объеме ИС; P_b, W_b – давление и объем воздушной полости ТУ; V_m, V_j – скорости макета изделия и жидкости (воды); $F_Σ$ – суммарная сила, $F_Σ = F_x + F_T - F_a + F_n$; α – угол наклона ИС

После заполнения стенда водой и повышения давления P_n в резервуаре до рабочего значения в верхней части ТУ образуется воздушная полость с границей раздела вода – воздух.

Таким образом, при входе в ТУ на макет изделия в продольном направлении будут действовать следующие силы:

- сила лобового сопротивления

$$F_x = c_x ((\rho_j V_m^2)/2)S, \quad (1)$$

где c_x – коэффициент сопротивления макета изделия;



$\rho_{ж}$ – плотность жидкости (воды);
 S – площадь поперечного сечения макета изделия;

- сила тяжести

$$F_T = m_M g \cos(\alpha), \quad (2)$$

где m_M – масса макета изделия;
 g – ускорение свободного падения;

- сила Архимеда

$$F_a = \rho_{ж} g W_M \cos(\alpha), \quad (3)$$

где W_M – объем макета изделия;

- сила от перепада давления на головную и донную части изделия

$$F_{\Pi} = F_{гч} - F_{д} = (P_{гч} - P_{д})S, \quad (4)$$

где $F_{гч}$ – сила от давления на головную часть макета изделия;

$F_{д}$ – сила от давления на дно макета изделия;

$P_{гч}$ – давление на головную часть макета изделия;

$P_{д}$ – давление на дно макета изделия.

Тогда изменение скорости (замедление) макета изделия в ТУ можно определить по формуле

$$\frac{dV_M}{dt} = -\frac{F_{\Sigma}}{m_M + m_{пр}}, \quad (5)$$

где t – время торможения макета изделия;

$m_{пр}$ – присоединенная масса жидкости.

При движении макета изделия в ТУ определяющими параметрами, влияющими в большей степени на скорость торможения, являются давления в жидкой среде, действующие на головную $P_{гч}$ и донную $P_{д}$ части макета изделия. Их значения изменяются по мере перемещения макета изделия в устройстве. На рис. 2 представлены силы, действующие на макет изделия в процессе торможения.

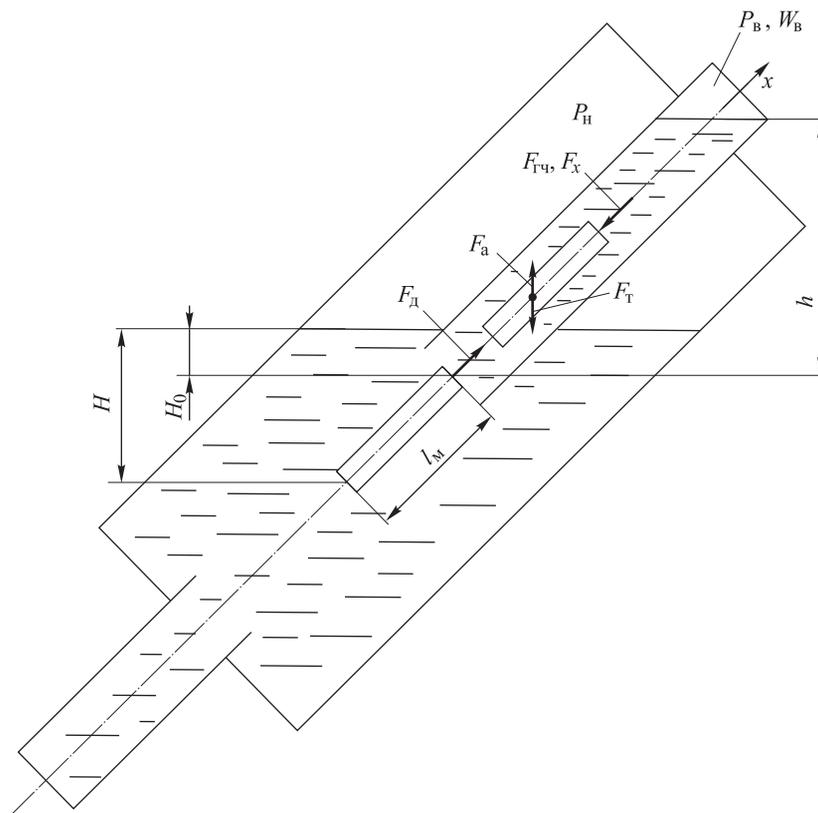


Рис. 2. Силы, действующие на макет изделия в процессе торможения:

x – текущее расстояние, пройденное макетом в ТУ;

h – высота столба жидкости в ТУ над головной частью макета изделия;

H – высота столба жидкости внутри ИС (от зеркала воды) над донным срезом макета изделия; H_0 – высота заглупления ТУ от зеркала воды;

l_M – длина макета изделия

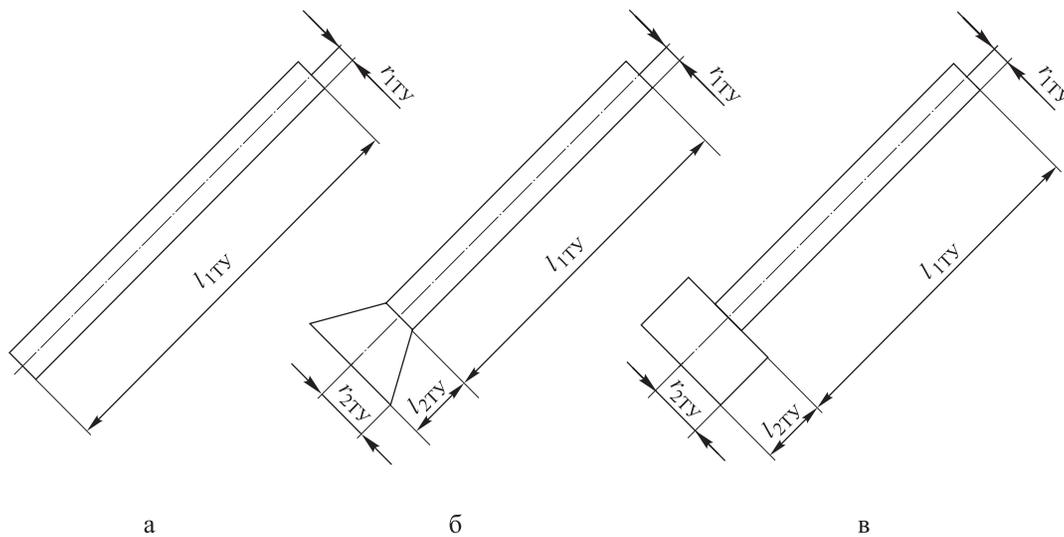


Рис. 3. Варианты конструкций ТУ:

- а – цилиндрическое (вариант 1); б – с конической входной частью (вариант 2);
- в – с расширенной цилиндрической входной частью (вариант 3);
- r_{1TU}, l_{1TU} – радиусы и длины участков ТУ соответственно

В начальный момент входа в ТУ на изделие действуют следующие давления:

$$P_{гч} = P_b + \rho_{ж}gh; \quad (6)$$

$$P_d = P_n + \rho_{ж}gH. \quad (7)$$

Давление в воздушной полости ТУ определяется из уравнения состояния для идеального газа

$$P_b = \frac{m_b R_b T_b}{W_b}. \quad (8)$$

Высота столба жидкости внутри ИС (от зеркала воды) над донным срезом макета изделия определяется как

$$H = H_0 + l_m \cos(\alpha); \quad (9)$$

где m_b – масса воздуха в воздушной полости ТУ;

R_b – газовая постоянная воздуха в воздушной полости ТУ;

T_b – абсолютная температура газа в воздушной полости ТУ.

Массу воздуха в полости можно определить из объема ТУ:

$$m_b = \rho_b W_{TU}, \quad (10)$$

где ρ_b – плотность воздуха в воздушной полости ТУ;

W_{TU} – объем ТУ.

Для определения влияния конструкции ТУ на усилие торможения и путь движения макета изделия в нем при расчете были рассмотрены три варианта ТУ: цилиндрическое; с конической входной частью и с расширенной цилиндрической входной частью (рис. 3).

Объем ТУ рассчитывается, исходя из его конструкции:

$$W_{TU} = \begin{cases} \pi r_{1TU}^2 l_{1TU}, & \text{для варианта 1;} \\ \pi \left(r_{1TU}^2 l_{1TU} + \frac{r_{1TU}^2 + r_{1TU}r_{2TU} + r_{2TU}^2}{3} l_{2TU} \right), & \text{для варианта 2;} \\ \pi (r_{1TU}^2 l_{1TU} + r_{2TU}^2 l_{2TU}), & \text{для варианта 3.} \end{cases} \quad (11)$$

Объем воздушной полости определяется по формуле

$$W_b = \pi r_{1TU}^2 \left(L_{TU} - \frac{h}{\cos(\alpha)} \right). \quad (12)$$

Общая длина ТУ определяется как

$$L_{TU} = \begin{cases} l_{1TU}, & \text{для варианта 1;} \\ l_{1TU} + l_{2TU}, & \text{для варианта 2 или 3.} \end{cases} \quad (13)$$

Для определения начальной высоты столба жидкости над макетом изделия в ТУ (h) вос-



пользуемся уравнениями (6), (8), (12) и дополнительным соотношением, характеризующим равенство давлений на уровне заглубления ТУ:

$$\begin{cases} P_{гч} = P_B + \rho_{ж}gh; \\ P_B = \frac{m_B R_B T_B}{W_B}; \\ W_B = \pi r_{ТУ}^2 \left(L_{ТУ} - \frac{h}{\cos(\alpha)} \right); \\ P_{гч} = P_H + \rho_{ж}gH_0. \end{cases} \quad (14)$$

Замкнутая система уравнений (14) может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{\rho_{ж}g}{\cos(\alpha)} \right) h^2 + \\ & + \left(\rho_{ж}gL_{ТУ} + \frac{P_H + \rho_{ж}gH_0}{\cos(\alpha)} \right) h + \\ & + \frac{m_B R_B T_B}{\pi r_{ТУ}^2} - (P_H + \rho_{ж}gH_0)L_{ТУ} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Пренебрегая малыми величинами в силу физических особенностей рассматриваемого процесса, присоединенную массу жидкости можно определить в основном следующим соотношением

$$m_{пр} = \lambda_{11} = \rho_{ж}W_M K_{11}, \quad (16)$$

где λ_{11} – коэффициент присоединенной массы от поступательного движения;

K_{11} – коэффициент присоединенной массы (таблица) [1].

Таким образом, уравнения (1)–(16) с соответствующими начальными условиями полностью определяют параметры рассматри-

ваемой системы в момент начала процесса торможения.

Алгоритм определения параметров торможения

За начало расчета $t = 0$ принимается момент времени, когда головная часть макета изделия находится в нижнем сечении ТУ. В соответствии с выбранным шагом Δt определяется приращение времени $t_1 = t + \Delta t$. За промежуток времени Δt макет изделия проходит в ТУ отрезок пути, численно равный $\Delta x = V_M \Delta t$.

С одной стороны, движение изделия вызывает перемещение столба жидкости вверх, в результате газовый объем $W_{B1} = W_B - \Delta W_B$ сжимается, что приводит к увеличению в нем давления $P_{B1} = m_B R_B T_B / W_{B1}$ и уменьшению высоты столба жидкости над макетом изделия $h_1 = h - \Delta x \cos(\alpha) + \frac{\Delta W_B}{\pi r_{ТУ}^2 \cos(\alpha)}$, где $h_1 < h$.

Необходимо отметить, что значение ΔW_B будет зависеть от геометрических характеристик макета, например, для цилиндра без профилированной головной части оно составит $\Delta W_B = \pi r_M^2 \Delta x$ (где r_M – радиус макета).

С другой стороны, увеличение давления в газовом объеме приводит к увеличению скорости оттока жидкости через зазор между изделием и ТУ [2]

$$V_{ж} = 0,7\sqrt{2 / \rho_{ж}} \sqrt{\rho_{ж}gh + (P_B - P_H)}.$$

Объемный секундный расход жидкости, вытесняемый газовой полостью из ТУ под действием избыточного давления, определяется как

$$G_{ж} = V_{ж} \pi \left((r_M + l_{зз})^2 - r_M^2 \right),$$

где $l_{зз}$ – размер зазора между изделием и ТУ.

Зависимость коэффициента присоединенной массы от габаритов макета изделия

l_M/d_M	1,000	1,500	2,000	2,510	2,990	3,990
K_{11}	0,500	0,305	0,209	0,156	0,122	0,082
l_M/d_M	4,990	6,010	6,970	8,010	9,020	9,970
K_{11}	0,059	0,045	0,036	0,029	0,024	0,021
Примечание. Здесь d_M – диаметр макета.						



Значение $l_{\text{заз}}$ в зависимости от конструкции ТУ (см. рис. 3) можно определить по следующим соотношениям:

- для варианта 1

$$l_{\text{заз}} = r_{1\text{ТУ}} - r_{\text{м}};$$

- для варианта 2

$$l_{\text{заз}} = \begin{cases} r_{1\text{ТУ}} - r_{\text{м}}, & \text{если } x \geq l_{2\text{ТУ}}; \\ r_{1\text{ТУ}} - r_{\text{м}} + \frac{(r_{2\text{ТУ}} - r_{1\text{ТУ}})(l_{2\text{ТУ}} - x)}{l_{2\text{ТУ}}}, & \text{если } x < l_{2\text{ТУ}}. \end{cases}$$

- для варианта 3

$$l_{\text{заз}} = \begin{cases} r_{1\text{ТУ}} - r_{\text{м}}, & \text{если } x \geq l_{2\text{ТУ}}; \\ r_{2\text{ТУ}} - r_{\text{м}}, & \text{если } x < l_{2\text{ТУ}}. \end{cases}$$

Выход жидкости из ТУ приводит к увеличению объема газовой полости $W_{\text{в}}^{\text{нов}} = W_{\text{в1}} + G_{\text{в}} \Delta t$, а также к снижению в ней давления

$P_{\text{в}}^{\text{нов}} = \frac{m_{\text{в}} R_{\text{в}} T_{\text{в}}}{W_{\text{в}}^{\text{нов}}}$ и, соответственно, к уменьшению высоты столба жидкости над головной частью макета изделия $h^{\text{нов}} = h_1 - \frac{W_{\text{ж}}}{\pi r_{1\text{ТУ}}^2}$.

Высота столба жидкости внутри ИС над донным срезом макета изделия, определяется на каждом временном шаге из соотношения

$$H^{\text{нов}} = \begin{cases} H_0 + (l_{\text{м}} - \Delta x) \cos(\alpha), & \text{если } (x + \Delta x - l_{\text{м}}) < \frac{H_0}{\cos(\alpha)}; \\ 0, & \text{если } (x + \Delta x - l_{\text{м}}) \geq \frac{H_0}{\cos(\alpha)}. \end{cases}$$

Давления, действующие на головную и донную части макета изделия на новом временном шаге определяются по уравнениям (6), (7) с использованием новых значений параметров $P_{\text{в}}^{\text{нов}}$, $h_{\text{в}}^{\text{нов}}$, $H^{\text{нов}}$.

Определяем суммарную силу, действующую на макет изделия, подставив полученные значения в уравнения (1)–(4). Записав уравнение движения в разностном виде $V_{\text{м}}^{\text{нов}} = V_{\text{м}} - F_{\Sigma} \Delta t / (m_{\text{м}} + m_{\text{пр}})$, получим численное решение движения макета изделия в ТУ до полной остановки.

Результаты расчета

Результаты моделирования представлены в виде зависимостей динамических параметров (скорость макета, давление в воздушной полости ТУ соответственно) от перемещения до полной остановки некоторого гипотетического макета изделия на рис. 4 и 5. Они качественно отражают физический характер рассматриваемого процесса.

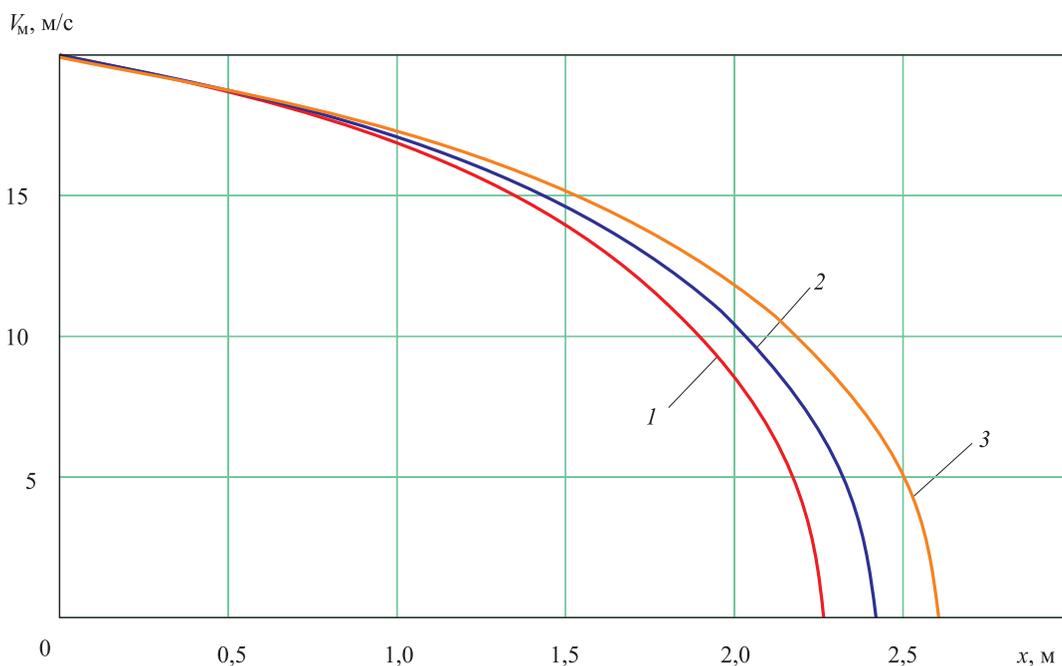


Рис. 4. Зависимость скорости макета от перемещения: 1, 2, 3 – варианты 1–3 конструкции ТУ соответственно

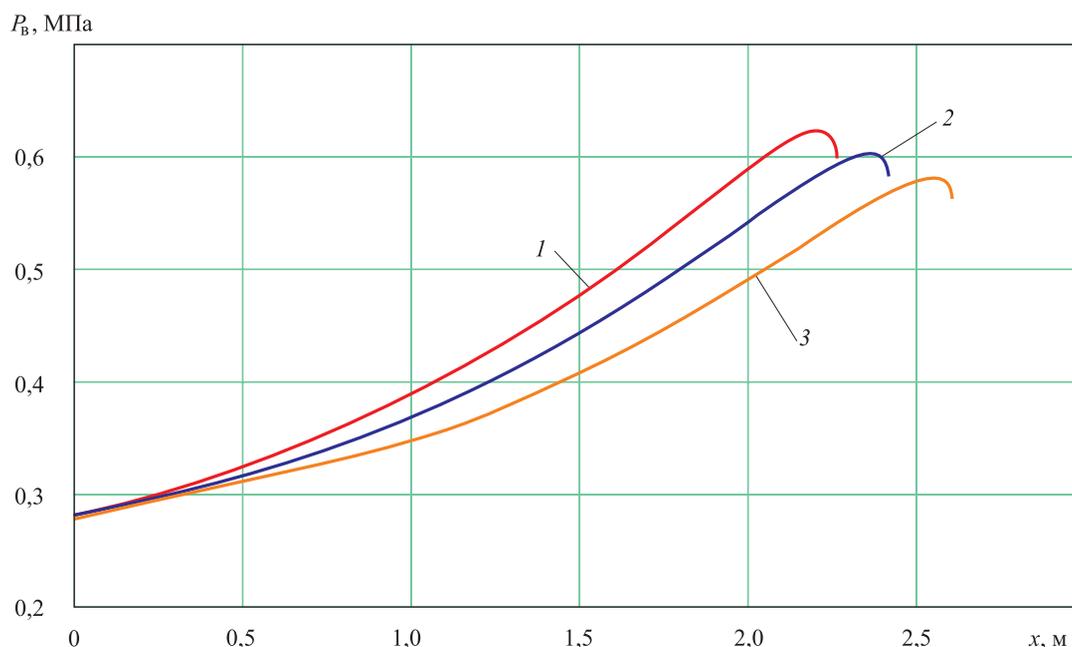


Рис. 5. Зависимость давления в воздушной полости ТУ от перемещения:
1, 2, 3 – варианты 1–3 конструкции ТУ соответственно

На основании анализа математической модели можно сделать следующие выводы о характере физических процессов, сопровождающих движение макета изделия в ТУ.

Применение ступенчатой конструкции ТУ на начальном этапе торможения (по сравнению с вариантом 1 конструкции) приводит к увеличению расхода жидкости через зазор из-за увеличения площади проходного сечения, а также к увеличению объема воздушной полости за счет увеличения общего объема ТУ. Как следствие, усилие торможения уменьшается, путь движения макета изделия в ТУ увеличивается.

Повышение давления наддува стенда приводит к увеличению начального значения давления в воздушной полости и тем самым усиливает процесс торможения, уменьшая путь, проходимый макетом изделия, и время, необходимое для его остановки. В то же время, увеличение начальной скорости входа макета

изделия в ТУ приводит к повышению лобового сопротивления и давления в воздушной полости.

Заключение

На основании разработанной математической модели может быть выдвинут ряд требований к массогабаритным характеристикам макета изделия и конструктивным особенностям ТУ, которые позволят обеспечить многократное использование макетов изделий.

Список литературы

1. Дегтярь В. Г., Пегов В. И. Гидродинамика баллистических ракет подводных лодок. М.: ФГУП «ГРЦ «КБ им. акад. В. П. Макеева», 2004. 256 с.
2. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Поступила 19.01.17

Суров Антон Викторович – инженер-конструктор второй категории АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», аспирант кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: гидрогазодинамика, физика плазмы, тепломассоперенос, струйные течения, течения в каналах.



Decelerating device mock-ups in an aquatic environment

The article presents a solution to the problem of reusing device mock-ups after they exit the test tunnel into an aquatic environment, taking into account the shape of the decelerator protecting the mock-up from destruction during testing.

Keywords: deceleration in fluid, device mock-up.

Surov Anton Viktorovich – Designer Engineer of the 2nd rank, Joint-stock company Design Bureau for Special Mechanical Engineering, post-graduate student, Department of Plasma Gas Dynamics and Thermal Engineering, D. F. Ustinov Baltic State Technical University Voenmeh, St. Petersburg.

Science research interests: fluid and gas dynamics, plasma physics, heat and mass transfer, jet streams, flows through pipes.