

В. А. ВАЛЕТОВ, А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАТКА ДЛЯ ОТРАБОТКИ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Предложено принципиальное решение оригинальной конструкции гидродинамического стенда для опытной отработки пусковых устройств необитаемых малогабаритных подводных аппаратов в условиях производственных помещений. Приведена методика расчетного обоснования технических характеристик гидродинамического стенда предложенной схемы.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, система динамического пуска изделий, испытания, гидродинамический стенд, технические характеристики, проектное обоснование.

Качество любых изделий в широком смысле этого понятия в огромной степени зависит от уровня технологической подготовки их производства. К этой многогранной проблеме, являясь ее важнейшей составляющей, относится проектирование и изготовление технологического оснащения. При этом особая роль отведена разработке исследовательских и испытательных стендов, без которых создание изделий, работающих в особо сложных условиях, часто оказывается невыполнимой задачей.

К категории таких изделий относятся подводные аппараты (ПА), а также их пусковые устройства (ПУ), обеспечивающие хранение и безаварийное отделение ПА от различных носителей. Для опытной отработки подобных систем и оптимизации их характеристик используются специализированные исследовательские гидродинамические стенды (ГДС). Многие переменные и константы процессов, сопровождающих работу ПУ, пока могут определяться

только экспериментально, поэтому роль гидродинамических испытательных стендов чрезвычайно велика. Авторами предложена методика проектирования гидродинамического стенда, а также создана математическая модель его работы и разработана схема ее применения в варьируемых реальных условиях. В настоящей статье приводится один из фрагментов общей математической модели.

На рис. 1 приведена структура гидродинамического стенда (ГДС) для испытаний комплексов малогабаритных ПА, по которому получен приоритет на изобретение одним из авторов статьи [1]. Здесь 1 — камера-имитатор забортной среды; 2 — шлюзовая полость (ШП); 3 — крышка ШП; 4 — быстроразъемный узел крепления; 5 — ПУ; 6 — ПА; 7 — направляющий аппарат ГДС; 8 — тормозное устройство ГДС; 9 — кольца обтюрации переменного сечения; 10 — шток измерителя перемещения ПА; 11 — демпфирующая полость ГДС; 12 — поршень; 13 — упор начального положения поршня; 14 — сигнализатор начального положения поршня; 15 — клапан наполнения; 16 — клапан сброса давления; 17 — сливной бак; 18 — насос; 19 — клапаны осушения; 20 — клапаны заполнения; 21 — клапаны вентиляции; 22 — манометры.

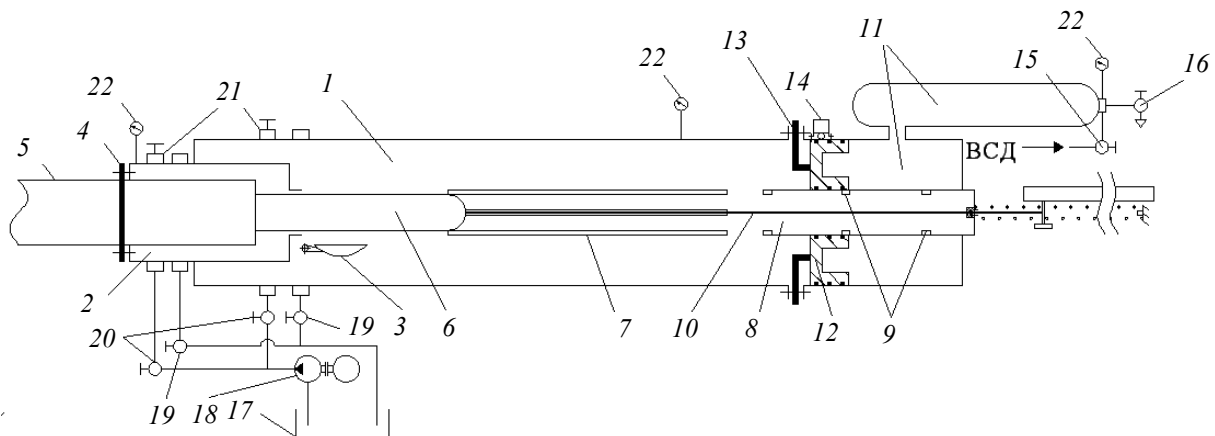


Рис. 1

При пуске аппарата 6 из ПУ 5 осуществляется преобразование энергии воздуха высокого давления (ВВД) в движение поршня силовой установки, выталкивающего ПА за пределы пусковой трубы ПУ. При этом ввиду того что площадь поперечного сечения поршня больше площади поперечного сечения ПА, происходит увеличение скорости последнего с передаточным числом больше единицы и пропорциональным отношением этих площадей; следует отметить, что это передаточное число непостоянно вследствие потерь воды из полости пусковой трубы через обтюрацию, которые зависят от соотношения давлений в полости расширения воздуха (внепоршневой полости) и внешнего гидростатического давления P_h . Значение последнего в условиях ГДС также нельзя считать постоянным, поскольку давление в его демпфирующей полости 11 изменяется по мере ее уменьшения, вызванного движением аппарата и потерями воды через обтюрацию ПУ.

Предварительный анализ показывает, что в процессе работы ГДС можно выделить три переходящих друг в друга этапа.

1. Первый этап начинается с момента открытия проходного сечения в пусковом клапане (регуляторе ВВД) ПУ. Давление в его расширительной полости возрастает до величины, превышающей забортное давление, с учетом инерции поршня и механического трения в его уплотнениях. С этого момента начинается движение поршня ПУ, приводящее к повышению давления перед поршнем и в пусковой трубе. Движение воды через обтюрацию начинается сразу после того, как значение давления в пусковой трубе превысит значение забортного. Когда это превышение достигнет величины, обеспечивающей преодоление инерции ПА, сил механического трения его перемещения и силового воздействия, необходимого для прорыва

мембраны, закрывающей пусковую трубу, произойдут страгивание ПА и дальнейший его разгон с преодолением возникающего гидродинамического сопротивления, а по прохождении определенного пути — и сил трения изделия о направляющий аппарат 7 в камере 1 ГДС. Этот этап работы ГДС заканчивается подходом демпфирующего кольцевого плунжера поршня к соответствующей полости тормозного устройства ПУ. Следует отметить, что нестационарность всех упомянутых процессов будет также определяться изменением давления в демпфирующей полости 11 стенда.

2. На втором этапе происходит торможение поршня до полной его остановки за счет вытеснения воды плунжером поршня из замыкаемой полости тормозного устройства ПУ. При этом ПА продолжает продольное движение в направляющем аппарате 7 ГДС по инерции, а освобождаемый им в пусковой трубе объем перед поршнем заполняется водой из камеры ГДС под переменным давлением в демпфирующей полости 11 стенда. На этом этапе поршень полностью останавливается, закрывая воздух в расширительной полости, давление в которой постепенно уравнивается с давлением в баллоне ВВД. При этом ПА полностью выходит из пусковой трубы (этот момент времени и соответствующая ему выходная скорость аппарата обязательно должны регистрироваться), носовая оконечность ПА подходит к тормозной трубе 8.

Стабилизация давления в демпфирующей полости 11 связана с полной остановкой поршня ПУ, поскольку движение ПА в камере 1 стенда не приводит к изменению объема демпфирующей полости.

3. На третьем этапе происходят торможение и полная остановка аппарата в трубе 8 тормозного устройства ГДС. Одной из задач баллистического проектирования стенда является разработка системы 9 обтюрации в тормозном устройстве, обеспечивающей безопасность работ при аварийном наборе аппаратом скорости, превышающей предельную расчетную.

В процессе работы ПУ в условиях стенда имеет место взаимовлияние всех элементов системы ПУ—ПА—ГДС. Такая система взаимосвязанных процессов обуславливает необходимость составления аналитических описаний этих взаимосвязей на основе известных физических законов, а именно [2]:

— газодинамических, позволяющих выявить изменение значений давления в баллоне ВВД, расширительной (внепоршневой) полости с учетом нестационарного расхода газа через переменные сечения в изменяющихся с глубиной отработки условиях, а также демпфирующей полости;

— закона движения твердых тел (поршня, аппарата) под действием внешних сил, включая силы трения взаимодействующих элементов (в том числе и в уплотнительных узлах);

— законов гидродинамики с учетом конкретных условий истечения воды через обтюрацию, а также в тормозных устройствах для поршня и изделия.

Описание работы ГДС состоит из двух частей:

— математической модели движения изделия в ПУ при переменном внешнем давлении;

— математической модели работы демпфирующей полости ГДС.

Основные допущения, принятые при составлении математической модели работы ПУ:

— в выделенных газовых полостях — объеме баллона ВВД (V_6) и объеме расширительной полости ПУ (V_p) — газ (воздух) находится в равновесном состоянии, т.е. параметры газа в любой точке объема полости одинаковы;

— процессы в полостях V_6 и V_p — адиабатические, отсутствует теплообмен с внешней средой;

— рабочее тело — идеальный газ;

— жидкость несжимаема;

— во всех точках объема пусковой трубы давление жидкости одинаково.

Динамика состояния газа в баллоне ВВД и расширительной полости для адиабатического процесса определяется рядом уравнений.

Функция q расхода воздуха записывается в следующем виде:

$$q = \begin{cases} 1, & \frac{P_p}{P_6} < \sigma_{кр}; \\ \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{P_p}{P_6} - \sigma_{кр}\right)^2}{(1 - \sigma_{кр})^2}}, & \frac{P_p}{P_6} \geq \sigma_{кр}, \end{cases} \quad (1)$$

где P_p — давление в расширительной полости ПУ, Па; P_6 — давление в баллоне ВВД, Па; $\sigma_{кр} = 0,528$ — критическое отношение давлений P_p/P_6 .

Расход G из баллона с воздухом высокого давления:

$$G = \mu f \frac{P_6}{\sqrt{RT_6}} q, \quad (2)$$

где μ — коэффициент расхода воздуха; f — площадь проходного сечения в регуляторе расхода ВВД, м²; $R = 281$ — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К); T_6 — температура воздуха в баллоне ВВД, К.

Изменение массы воздуха m_6 в баллоне ВВД

$$\frac{d}{dt} m_6 = -G, \quad (3)$$

изменение давления в баллоне

$$\frac{d}{dt} P_6 = \frac{-k}{V_6} RT_6 G, \quad (4)$$

где $k = 1,41$ — показатель адиабаты; V_6 — объем баллона, м³.

Изменение температуры в баллоне ВВД:

$$\frac{d}{dt} T_6 = \frac{T_6}{P_6 V_6} \left(V_6 \frac{d}{dt} P_6 - RT_6 G \right), \quad (5)$$

изменение массы газа m_p в расширительной полости

$$\frac{d}{dt} m_p = G. \quad (6)$$

Изменение давления в расширительной полости

$$\frac{d}{dt} P_p = \frac{k}{V_p} RT_6 G - \frac{k}{V_p} P_p \frac{d}{dt} V_p, \quad (7)$$

где V_p — объем расширительной полости, м³.

Изменение объема расширительной полости

$$\frac{d}{dt} V_p = \frac{d}{dt} Q_v + f_{ПА} v_{ПА}, \quad (8)$$

где Q_v — утечки воды через зазор в обтюрации ПУ, м³/с; $f_{ПА}$ — площадь поперечного сечения ПА, м²; $v_{ПА}$ — текущая скорость ПА, м²/с.

Изменение температуры воздуха T_p в расширительной полости

$$\frac{d}{dt} T_p = \frac{T_p}{P_p V_p} \left(V_p \frac{d}{dt} P_p + P_p \frac{d}{dt} V_p - RT_p G \right). \quad (9)$$

Для учета влияния стенда на работу ПУ введем понятие „коэффициент соответствия“ δ . Для его оценки следует найти такое начальное (установочное) давление P_0 в имитационной полости стенда, соответствующее гидростатическому давлению P_h на исследуемой глубине пуска ПА h , при котором расчетная выходная скорость $v_{\text{вых}}$ ПА, полученная в условиях ГДС, соответствовала бы расчетной выходной скорости в натуральных условиях. Оценка δ выполнялась путем итерационного расчетного подбора значений P_0 для фиксированных значений h (15, 100, 150, 200, 250 и 300 м) в соответствии с выражением $\delta = P_0 / P_h$.

Итерационные расчеты проводились до получения выходной скорости, соответствующей натурным условиям, с погрешностью около 2 % от измеряемой величины. Ориентировочные значения коэффициента δ соответствия показаны на рис. 2 точками (ромбы — для объема воздушной плоскости ГДС ($V_{\text{вп}}$) $0,12 \text{ м}^3$; квадраты — $0,18 \text{ м}^3$).

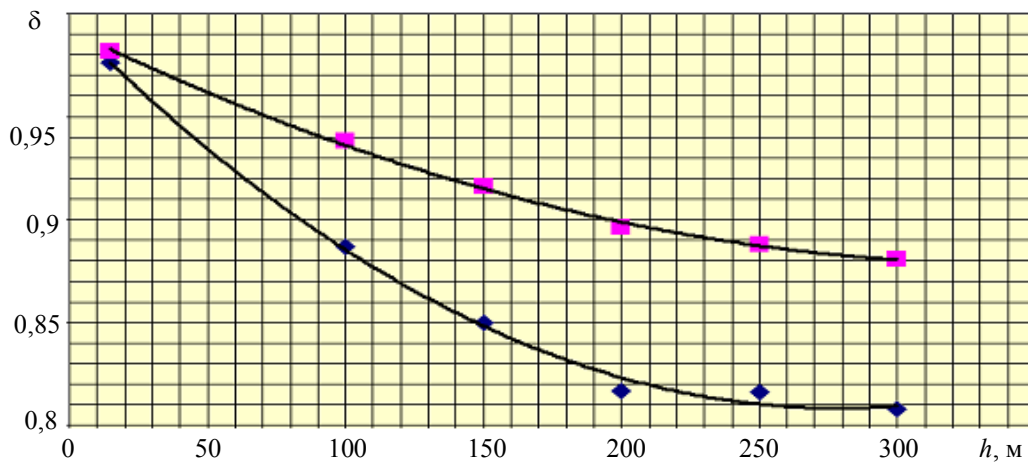


Рис. 2

Так как пользоваться дискретными зависимостями при отработке пусковых устройств ПА затруднительно, полученные ориентировочные фиксированные значения δ были аппроксимированы квадратичными функциями, приведенными в виде сплошных кривых на рис. 2. Проверка обоснованности такой аппроксимации значений δ выполнена путем расчетного сопоставления ожидаемых значений выходной скорости ПА $v_{\text{вых}}$ на стенде с расчетными значениями выходной скорости в натуральных условиях (см. таблицу, здесь Δ — расхождение расчетного значения с экспериментальным).

Гидродинамические характеристики процесса пуска ПА

h , м	$V_{\text{вп}}$, м^3	$\delta_{\text{апп}}$	P_0 , кПА	$v_{\text{вых}}$, м/с	Δ , %
15	0,12	0,976	2,440	28,99	-1,2
100	0,12	0,887	9,976	27,92	-3,6
150	0,12	0,850	13,600	27,73	-2,6
200	0,12	0,817	17,157	26,67	-0,6
250	0,12	0,816	21,216	24,25	+ 0,6
300	0,12	0,808	25,048	21,43	+ 3,4
15	0,18	0,982	2,460	29,11	-0,8
100	0,18	0,938	10,320	28,12	-2,9
150	0,18	0,916	14,660	27,88	-2,1
200	0,18	0,896	18,820	26,62	-0,8
250	0,18	0,888	23,090	24,00	-0,4
300	0,18	0,881	27,310	20,88	+ 0,8

Анализ данных таблицы показывает, что работа на стенде с введением аппроксимированных значений коэффициента соответствия $\delta_{\text{апп}}$ позволяет проводить наладочные испытания с получением фиксированной выходной скорости $v_{\text{вых}}$, близкой к полученной в натуральных условиях (максимальное расхождение между выходными скоростями ПА в натуральных условиях и

в условиях ГДС при $V_{\text{вп}} = 0,12 \text{ м}^3$ не более 3,4 %). Для $V_{\text{вп}} = 0,18 \text{ м}^3$ — не более 2,9 %, т.е. при увеличении габаритных характеристик ГДС соответствие натурным условиям улучшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ефимов О.И., Красильников А.В., Красильников Р.В.* Гидродинамический стенд. Заявка на изобретение № 2008147919, 2008. Положительное решение, 2010.
2. *Красильников Е.П.* Теоретические основы расчета корабельных систем воздуха высокого давления: Учеб. пособие. СПб: СПбГМТУ, 2007. 66 с.

Сведения об авторах

- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Антон Валентинович Красильников** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
14.12.09 г.