

12, декабрь 2015

УДК 623.4.018

Испытательный стенд для миномётной схемы подводного выброса изделия из пусковой установки

*Майоров А.С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет*

*Научные руководители: Сабиров Ю.Р.,
Зам. начальника отдела аэродинамики и баллистики,
Россия, 143966, Московская обл., г. Реутов,
АО «ВПК «НПО машиностроения»*

*Плюснин А. В.
Зам. начальника отдела, к.ф.-м.н., доцент
Россия, 143966, Московская обл., г. Реутов,
АО «ВПК «НПО машиностроения»
bauman@bmstu.ru*

Введение

Газодинамические процессы, происходящие в пространстве пусковой трубы под изделием при «миномётном» подводном выбросе изделия, существенно зависят от действия на изделие внешних продольных сил. Наиболее заметное влияние оказывает гидростатическая сила, обусловленная глубиной выброса изделия. Подводный минометный выброс изделия из пусковой трубы (ПТ) осуществляется путем создания внутри ПТ избыточного давления газов, действующего на днище изделия и его обтюрирующий пояс. Давление создается, например, пороховым газогенератором (ПГГ), запускаемым внутри ПТ в пространстве над её днищем.

Продольную силу, действующую в воде на изделие, можно условно представить в виде суммы следующих сил:

- сила, обусловленная гидростатическим давлением на глубине выброса изделия;
- гидродинамическое сопротивление;
- реакция воды вследствие её инерционных свойств.

Для полной имитации подводного выброса изделия из пусковой трубы на наземном стенде необходимо, чтобы на выходящее из ПТ наземного стенда изделие действовала

продольная сила, равная силе воздействия воды на выбрасываемое из ПТ изделие при настоящем подводном выбросе.

Существует техническое решение [1], в котором продольная сила, действующая на изделие против направления его движения и эквивалентная суммарной силе от гидростатического давления, гидродинамического сопротивления, силы трения и силы тяжести, создаётся пороховым двигателем, направленным в противоположную от движения изделия сторону.

Это решение имеет следующие недостатки:

1. На испытаниях расходуются дорогостоящие пороховые двигатели противотяги, специально изготавливаемые и испытываемые для каждого эксперимента.
2. Тяга порохового двигателя всегда имеет технологические отклонения ($\pm 25\%$) от требуемых для имитации выброса величин, что ухудшает качество имитации.
3. В ходе эксперимента тяга порохового двигателя не регулируется, ее величина выбирается по предполагаемому среднему значению имитируемых сил.
4. К стенду должны быть предъявлены специальные требования по пожаро-взрывобезопасности работы с двигателями, а это сильно увеличивает стоимость стенда.

В данной статье предлагается рассмотреть наземный стенд, в котором для имитации продольных сил вместо пороховых двигателей используется пневматическая поршневая система (ППС), развивающая силу против направления движения изделия. Схема стенда представлена на рисунках 1, 2 и 3.

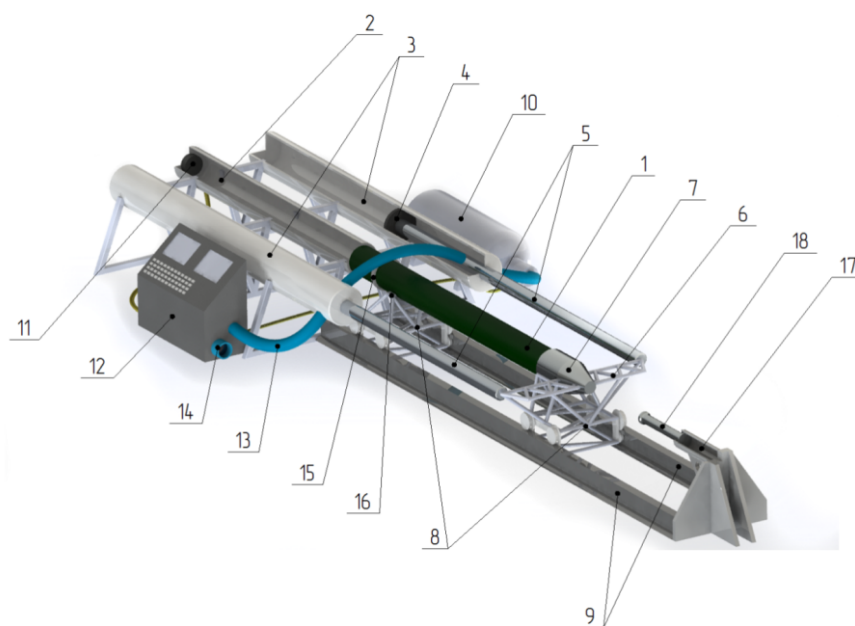


Рис. 1. Схема стенда. Промежуточное положение

Принцип работы стенда

Макет изделия (1) в ПТ (2) закреплён на одном основании с парой силовых цилиндров (3). Длина цилиндров на 10-20 % больше длины ПТ для обеспечения торможения изделия. Поршни (4) закреплены на штоках (5) силовых цилиндров, сами штоки соединены траверсой (6) с фиксатором носа макета (7), закрепленным на подвижной тележке (8), которая может поступательно перемещаться по рельсам (9). Тележка имеет колёса с обеих сторон от рельса для фиксации в вертикальном направлении. Масса всех подвижных частей должна быть равна массе натурального изделия. До запуска ПГГ в пусковой трубе с помощью ППС имитируется воздействие гидростатической силы на макет изделия при заданной глубине выброса. Для этого рабочий объём цилиндров заполняют воздухом из баллона (10) до начального давления. При запуске ПГГ (11) макет начинает двигаться по ПТ. Компьютерный терминал (12) получает информацию с датчиков внутри стенда (перемещение, скорость и ускорение изделия, давление в цилиндрах и т. д.) и, проводя расчёты, стравливает воздух из цилиндров через воздухопровод (13) и далее через дроссель (14), создавая действующую на макет переменную силу и обеспечивая тем самым имитацию движения макета изделия под действием сил сопротивления. Расчётный процесс и имитация ведётся вплоть до полного выхода задней части изделия из стакана. В этот момент изделие за обтюратор (15) подхватывается и фиксируется захватным устройством (16), закреплённом на второй подвижной тележке, и продолжает двигаться по инерции вместе с тележками. Начинается процесс торможения силовыми цилиндрами. Окончательной остановке и гашению вибраций способствует демпфер, выполненный в виде цилиндра (17) со штоком (18).

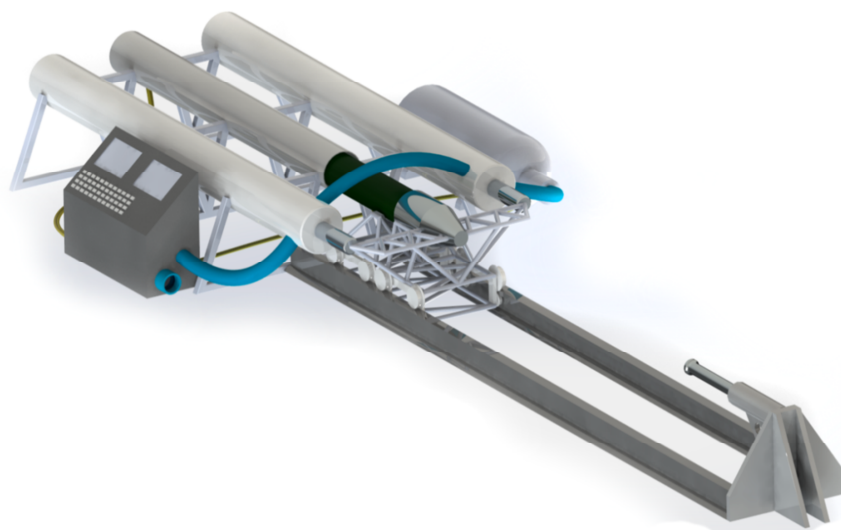


Рис. 2. Схема стенда. Начальное положение

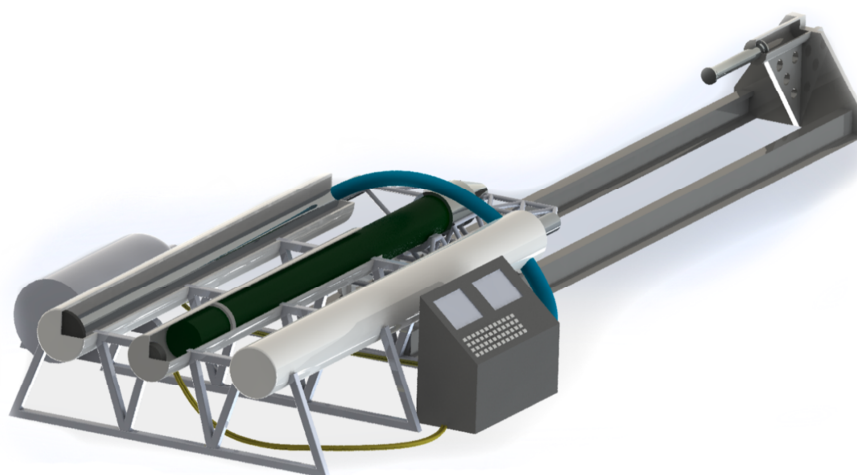


Рис. 3. Схема стенда

Модель газодинамических процессов в ПТ под обтюратором изделия

Данная модель позволит определить скорость, ускорение и перемещение макета изделия по ПТ, что будет использовано в численном эксперименте работы стенда. В модели учтены размерные и массовые характеристики изделия, сила трения покоя и сила отрыва болтов системы удержания. Также использована расходная характеристика реального ПГГ для моделирования избыточного давления в задонной части. В систему входят следующие уравнения:

$$F_{действ}(t) = \left[(m_0 \cdot R_0 + m_{gg}(t) \cdot R_{gg}) \left(\frac{T(t)}{V_0 + S_{nm} \cdot l(t)} \right) - P(H_0) \right] \cdot S_{nm} -$$

$$- M \cdot g \cdot \cos(\theta) - \rho_{\epsilon} \cdot Cx(t) \cdot \frac{v(t)^2}{2} \quad (1)$$

$$F_{\text{сум}}(t) = F_{\text{действ}}(t) - F_{\text{трени}}(F_{\text{действ}}(t)) \quad (2)$$

$$a(t) = \frac{1}{M + \lambda_{11}} \cdot [F_{\text{сум}}(t) - F_{\text{удерж}}(F_{\text{сум}}(t))] \quad (3)$$

$$T'(t) = G_{\text{gg}}(t) \cdot \left[\chi \cdot \frac{l(t) \cdot Cp_{\text{gg}} \cdot T_{\text{nm}} - Cv_{\text{gg}} \cdot T(t)}{m_0 \cdot Cv_0 + m_{\text{gg}}(t) \cdot Cv_{\text{gg}}} - \frac{(m_0 \cdot R_0 + R_{\text{gg}} \cdot m_{\text{gg}}(t))(T(t) \cdot S_{\text{nm}} \cdot v(t))}{(m_0 \cdot Cv_0 + m_{\text{gg}}(t) \cdot Cv_{\text{gg}})(V_0 + S_{\text{nm}} \cdot l(t))} \right] \quad (4)$$

$$m_{\text{gg}}'(t) = G_{\text{gg}}(t) \quad (5)$$

$F_{\text{действ}}$ – сила, действующая на макет. Равнодействующая от силы давления, создаваемой ППГ, силы тяжести, внешнего давления и сопротивления воды;

$F_{\text{трени}}$ – сила трения покоя;

$F_{\text{сум}}$ – разность между действующей силой и силой трения покоя;

$F_{\text{удерж}}(F)$ – сила удержания изделия. Обнуляется при достижении аргументом Критического значения;

G_{gg} и m_{gg} – расход и масса продуктов сгорания ППГ;

Cv_0 и Cr_0 – коэффициенты теплоёмкости воздуха;

Cv_{gg} и Cr_{gg} – коэффициенты теплоёмкости продуктов сгорания ППГ;

m_0 , V_0 и $T_{\text{пт}}$ – начальная масса, объём и температура воздуха в задонном пространстве;

$S_{\text{пт}}$ – площадь поперечного сечения ПТ;

$x(t)$, $v(t)$, и $a(t)$ – перемещение, скорость и ускорение макета при движении в ПТ;

M – масса изделия;

g – ускорение свободного падения;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность морской воды;

H_0 – заданная глубина выброса;

λ_{11} –присоединенная масса изделия в направлении продольной оси ПТ;

$Cx(x(t))$ – гидродинамическое сопротивление изделия, вышедшего из ПТ на величину $x(t)$;

θ – угол тангажа.

Решая систему уравнений (1) – (5), находим параметры движения изделия (рис. 4) и давление в задонном объёме (рис. 5).

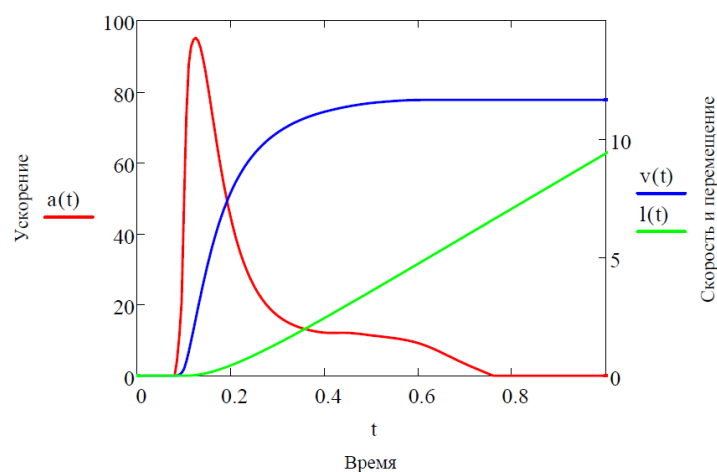


Рис. 4. Параметры движения изделия

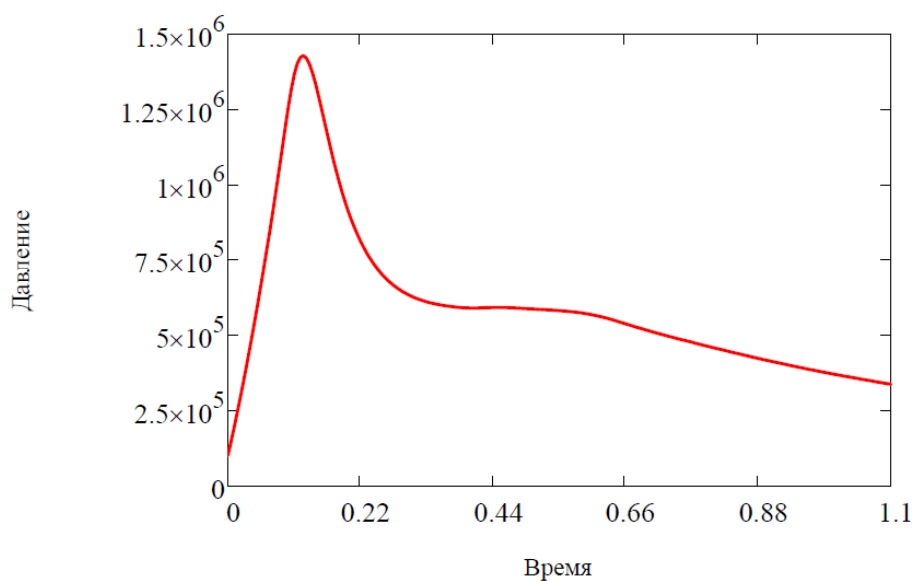


Рис. 5. Давление в задонном объеме

В проведённом расчёте коэффициент теплопотерь χ принят за 1 (считаем, что потерь нет). Проведя реальный эксперимент и замерив, например, ускорение, можно подобрать потери таким образом, чтобы теоретический расчёт совпал с практическим результатом, т. е. определить теплопотери. Проведём численный эксперимент: зададим вручную «полученное экспериментально» ускорение (рис. 6).

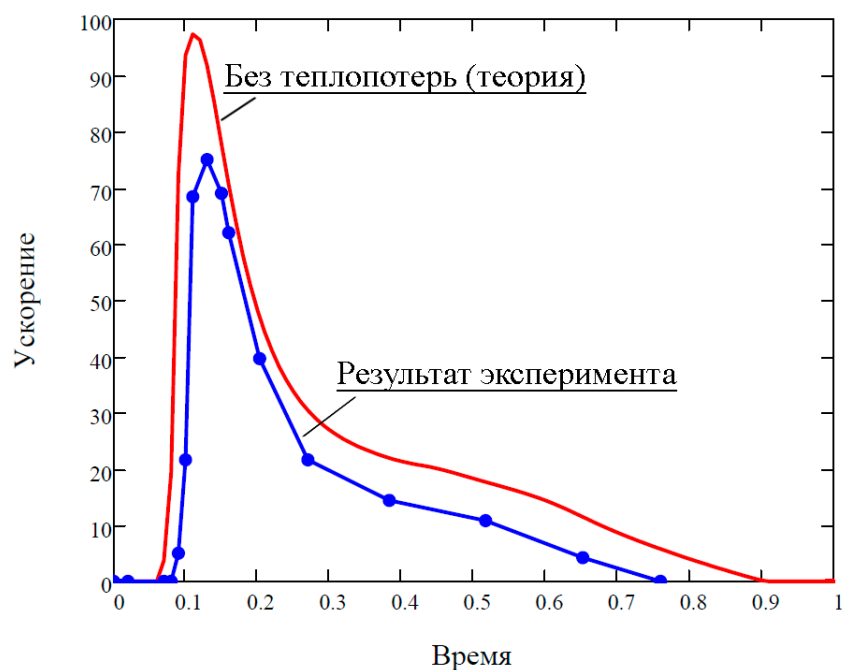


Рис. 6. Экспериментально полученная перегрузка

Разобьём функцию на 10 участков. На каждом участке решаем систему уравнений (1) – (5), увеличивая с мелким шагом коэффициент χ с небольшого значения до максимального. Принимаем для участка такой χ , при котором площадь под графиком ускорения на участке, считаемым в данный момент, максимально близка к площади под графиком экспериментально полученной перегрузки для того же участка. Проделав для каждого участка, интерполируем полученные значения и находим потери как функцию от перемещения изделия по ПТ (рис. 7).

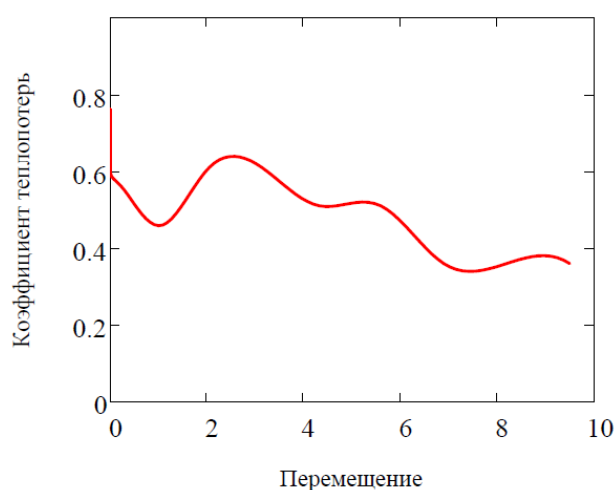


Рис. 7. Теплопотери как функция от расстояния

Чтобы убедиться в правильности вычислений, подставим $\chi(t)$ в систему уравнений(1) – (5) как функцию от времени, и решим систему ещё раз. На рисунке 8 чёрный график – ускорение при отсутствии теплопотерь, синий график – измеренное ускорение, красный – пересчитанное с переменными теплопотерями ускорение. Точность определения теплопотерь составила около 97 %, что можно считать хорошим результатом. Один раз проведя эксперимент на стенде и найдя закон изменения теплопотерь, в дальнейших испытаниях можно делать поправки и обеспечить более точную работу испытательного стенда.

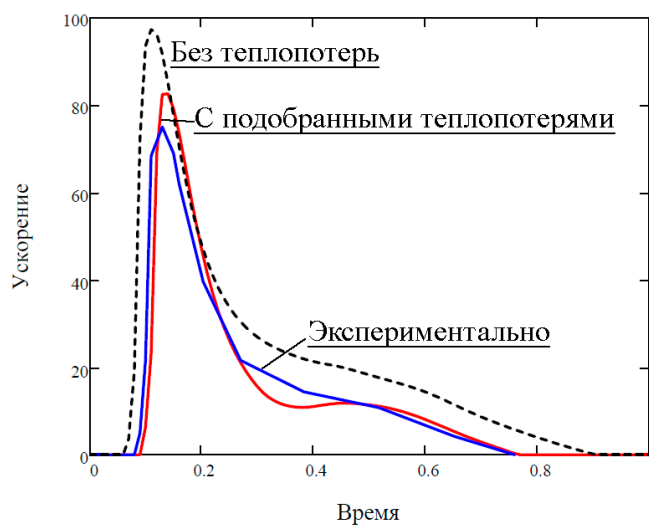


Рис. 8. Работа газодинамической модели с учётом теплопотерь

Теперь покажем, как влияет погрешность задания глубины выброса на давление в задонном объёме ПТ. Примем погрешность глубины равной 5 метров. На рисунке 9 красный график – при выбросе на глубине 30 метров, синие пунктирные – с погрешностью 5 метров в обе стороны. Отличие по давлению составляет не более 0.38 атм в обе стороны. Эта погрешность существенна, и поэтому стенд должен точно имитировать глубину выброса. Стенд с пороховым двигателем [1] имеет погрешность создания давления около 25 %, что влечёт за собой очень большую погрешность в имитации.

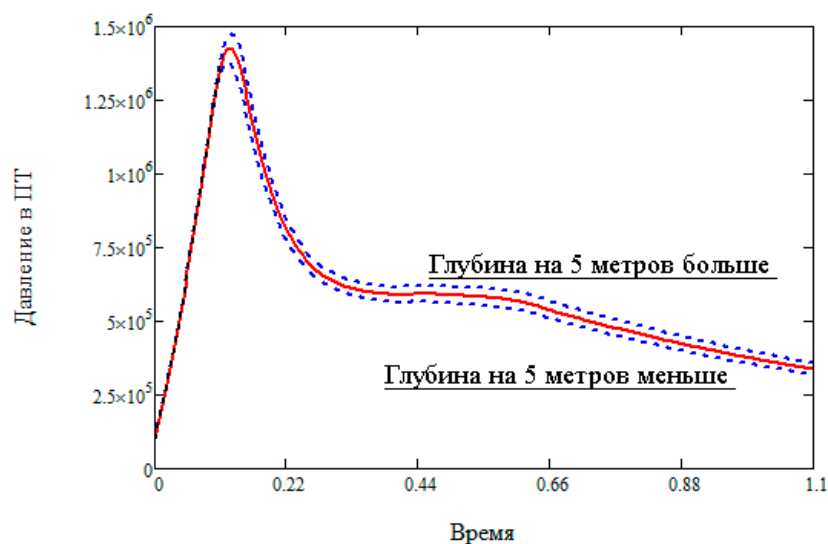


Рис. 9. Влияние точности задания глубины на давление в задонном объёме

Сила гидравлического сопротивления, имитируемая с погрешностью, также приводит к разбросу параметров, например, скорости (рис. 10). Погрешность имитации гидравлического сопротивления на 30 % ведёт к разбросу максимальных значений скорости изделия почти на 1 м/с, что также является существенной погрешностью и говорит о том, что имитация должна быть очень точной. Стенд с пороховыми двигателями противотяги [1] не сможет обеспечить необходимую точность.

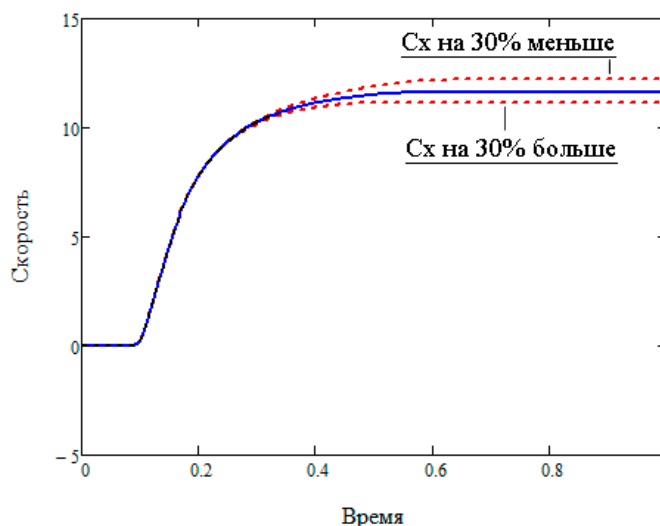


Рис. 10. Влияние сил гидродинамического сопротивления на скорость изделия

Математическая модель стенда с ППС

Начальное давление в силовых цилиндрах, оно же воздействие гидростатической силы на макет на глубине H_0 определяется по формуле (6).

$$P_0 = \frac{S_{nm}}{S_{цил}} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot g \cdot H_0 \quad (6)$$

$S_{цил}$ – суммарная площадь сечения силовых цилиндров ППС.

Как уже было сказано в принципе работы стенда, на протяжении выброса идёт непрерывное измерение параметров движения макета изделия. Требуемое давление газа в силовых цилиндрах в соответствии с измеренными параметрами вычисляется по следующей формуле:

$$P_{цил}^{треб}(t) = \frac{S_{nm}}{S_{цил}} \left[\rho_{\epsilon} \cdot g \cdot (H_0 - x(t)) + Cx(x(t)) \frac{\rho_{\epsilon}(v(t))^2}{2} \cdot \frac{S_{хар}}{S_{nm}} + \frac{F_{тр}}{S_{nm}} + \lambda_{11} \cdot a(t) + M \cdot g \cdot \cos(\theta) \right] \quad (7)$$

$S_{хар}$ – характерная площадь для $Cx(x(t))$;

$F_{тр}$ – сила трения опор и обтюлятора макета изделия при контакте с внутренними стенками ПТ.

Основываясь на требуемом давлении в цилиндрах, вычисляется значение площади выходного отверстия дросселя $S_{др}(t)$, и с помощью привода изменяется его площадь для поддержания требуемого давления в рабочих полостях силовых цилиндров.

$$G(t) = \frac{B \cdot S_{др}(t) \cdot P_{цил}(t)}{\sqrt{R_0 \cdot T_{цил}(t)}} \quad (8)$$

$G(t)$ – весовой расход газа через дроссельное отверстие (8);

$S_{др}(t)$ – площадь дроссельного отверстия;

B – расходный комплекс, является функцией от постоянной адиабаты воздуха;

$T_{цил}(t)$ – температура воздуха в цилиндрах.

Дроссель имеет конечную скорость изменения площади отверстия, также учитывается максимальный размер отверстия. Скорость изменения площади отверстия дросселя задана кусочной функцией (рис. 11).

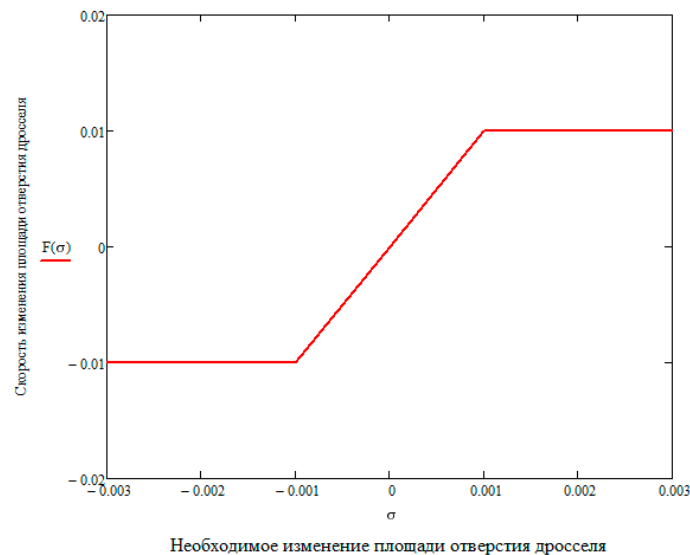


Рис. 11. Функция скорости изменения площади отверстия дросселя

Давление воздуха в цилиндрах описывается уравнением (9).

$$P_{\text{цил}}(t) = P_0 \cdot \left[\frac{\rho(t)}{\rho_0} \right]^n \quad (9)$$

$\rho(t)$ – плотность газа в цилиндрах;

n – показатель политропы.

Уравнение изменения плотности газа в цилиндрах (10):

$$\rho'(t) = \frac{\rho(t) \cdot S_{\text{цил}} \cdot v(t) - G(t)}{V_0 - x(t) \cdot S_{\text{цил}}} \quad (10)$$

Таким образом, второе уравнение в системе примет вид:

$$S_{\text{оп}}'(t) = F(\sigma) \quad (11)$$

Ошибка! Закладка не определена.

σ – необходимое изменение площади отверстия дросселя.

Для имитации необходимо, чтобы регулирование площади дроссельного отверстия обеспечивало минимальное отличие текущего давления в цилиндре $P_{\text{цил}}(t)$ от требуемого $P_{\text{цил}}^{\text{треб}}(t)$.

Рассмотрим эксперимент, в котором масса конструкции изделия, конструкция пусковой трубы и характеристики ПГГ полностью совпадают с теми, для которых был проведен газодинамический расчет, и с помощью пневматической поршневой системы создаётся изменяющаяся от времени сила.

Положим глубину выброса равной 30 метров. Рассмотрим имитацию только гидростатического давления. Решая систему уравнений (6) – (11), получим законы изменения от времени давления $P_{\text{цил}}(t)$, площади дроссельного отверстия $S_{\text{др}}(t)$, и проведем сравнение с требуемым давлением $P_{\text{цил}}^{\text{треб}}(t)$. Построим графики для требуемого (красная кривая) и имитированного (синие точки) давлений и площади отверстия дросселя (рис. 12).

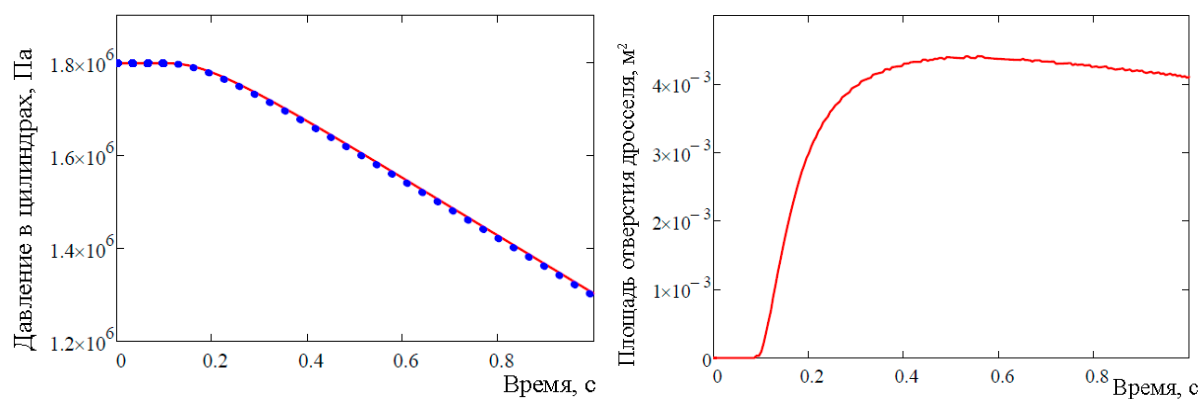


Рис. 12. Имитация гидростатического давления, глубина 30 метров

При имитации силы гидростатического давления, силы трения и силы продольного гидродинамического сопротивления получим графики аналогичных зависимостей (рис. 13).

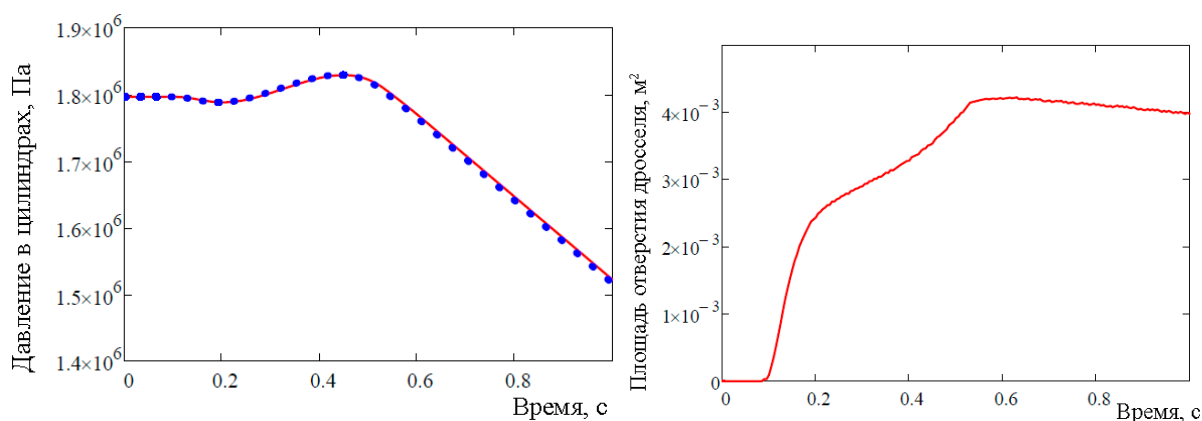


Рис. 13. Имитация силы гидростатического давления, силы трения и силы гидродинамического сопротивления, глубина 30 метров

В проведённых выше экспериментах не учитывалось воздействие присоединённых масс, но его можно имитировать, добавив к массе макета изделия на стенде массу, равную по величине λ_{11} .

Как видно, применение пневматической поршневой системы для имитации сил сопротивления воды обеспечивает имитацию с точностью около 99 %.

В качестве подтверждения универсальности стенда, рассмотрим имитацию выброса изделия с глубин 10 и 50 метров соответственно (рис. 14 и 15).

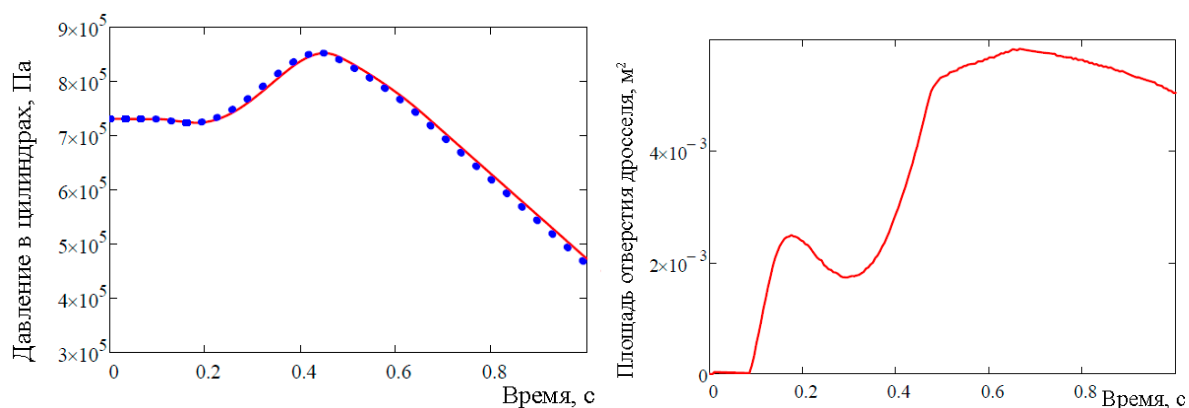


Рис. 14. Имитация силы гидростатического давления, силы трения и силы гидродинамического сопротивления. Глубина 10 метров

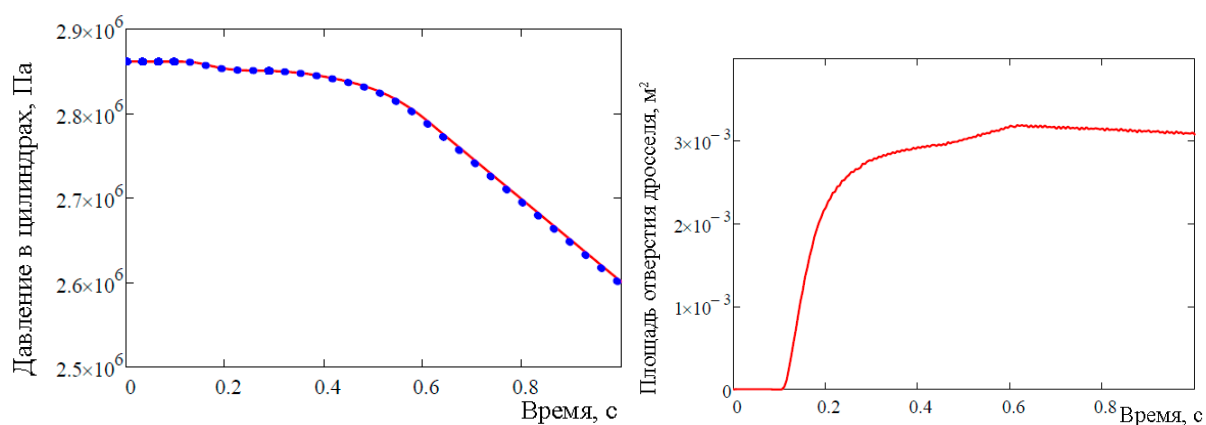


Рис. 15. Имитация силы гидростатического давления, силы трения и силы гидродинамического сопротивления. Глубина 50 метров

Предварительные расчёты показали, что регулирование давления воздуха в ППС с помощью управляемого дросселя позволяет очень точно имитировать воздействие сил гидростатического давления и гидродинамического сопротивления на выбрасываемое изделие при широком диапазоне глубин выброса.

Итоги работы

Показана работоспособность и высокая эффективность стенда.

Стенд способен точно и многократно имитировать выброс изделия при различных заданных условиях (глубина выброса, наклон).

Стенд позволяет провести испытания газогенератора для реального готового изделия, его отработку и приёмку, а также проверять допустимость использования новых газогенераторов с уже разработанным изделием и пусковой установкой.

Внедрённый в производство, такой стенд позволит в несколько раз ускорить темпы развития новых идей и решений, а также отладки и проверки старых.

Дальнейшие планы: в статье не смоделировано торможение вышедшего из пускового стакана макета изделия, что необходимо для дальнейшей конструктивной проработки стенда. Также не продумана система подхвата и удержания вышедшего из пускового стакана изделия.

Список литературы

1. Ефремов Г.А., Минасбеков Д.А., Модестов В.А., Страхов А.Н., Бондаренко Л.А., Якимов Ю.Л., Плюснин А.В., Крупчатников И.В., Соколов П.М., Говоров В.В. Способ имитации условий старта ракеты из подводной лодки и система его осуществления: пат. 2082936 Российская федерация. 1997. Бюл. № 18. 2 с.
2. Дегтярь В.Г., Пегов В.И. Гидродинамика подводного старта ракет. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2009. 448 с.
3. Конюхов С.Н., Логачев П.П. Минометный старт межконтинентальных баллистических ракет. Днепрпетровск: НАН, НКА Украины, Институт технической механики, ГKB «Южное», 1997. 211 с.