

УДК 532.5

© 1993 г. Г. А. АТАНОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫСТРЕЛА ИМПУЛЬСНОГО ВОДОМЕТА С ПОРОХОВЫМ ПРИВОДОМ

Получена система уравнений внутренней баллистики импульсного водомета с пороховым приводом. Сформулирована вариационная задача определения поверхности горения порохового заряда с целью получения импульса давления, обеспечивающего максимум коэффициента напора струи. Построен алгоритм численного решения, приведен пример расчета.

В рамках допущений, общепринятых для импульсных водометов и ствольных орудий, получена система уравнений внутренней баллистики импульсного водомета с пороховым приводом. Сформулирована вариационная задача определения поверхности горения порохового заряда для получения импульса давления, обеспечивающего максимум коэффициента напора струи. Построен алгоритм численного решения, приведен пример расчета.

1. Получение струй в импульсном водомете основано на принципе сжатия и вытеснения (экструзии) жидкости через небольшое отверстие [4]. Обязательные элементы импульсного водомета: ствол, в котором находится вода, сопло, через которое оно истекает, привод, система автоматики, обеспечивающая автоматический режим работы. В традиционной схеме такого водомета сжатие воды происходит под действием тяжелого поршня, который предварительно разгоняется сжатым газом. Такая схема предполагает естественное жестко заданное протекание процесса выстрела и исключает возможность управления им.

Формула импульса давления в стволе имеет колоколообразную форму [2], такой же характер имеет и зависимость скорости истечения воды. Это приводит к тому, что в начальной стадии выстрела, при возрастании давления, скорость истечения увеличивается и последующие частицы воды движутся быстрее предыдущих. В результате начальная часть струи разбрасывается, а последующая тормозится и скорость «головы» имеет значения меньше, чем скорость истечения. В силу этого динамическое давление (напор) струи не достигает давления в стволе. Количественно это оценивается коэффициентом напора k_n , представляющим собой отношение максимального динамического давления струи к максимальному давлению в стволе. Экспериментальные исследования показали, что для традиционного устройства $k_n = 0,4-0,5$ [3].

Кроме того, при спаде давления уменьшается скорость истечения и передняя часть струи отрывается, так что время истечения сплошной струи меньше времени выстрела.

Таким образом, важной является задача увеличения k_n ($k_{n\max} = 1$), что можно сделать, изменяя форму импульса давления. Из приведенных выше соображений ясно, что наилучшим будет прямоугольный импульс. В этом случае взаимодействие частиц струи между собой отсутствует, скорость струи постоянна и имеет минимум функционал

$$I = \int_0^{t_1} (p_s - p)^2 dt \quad (1.1)$$

где p — давление в стволе, p_s — заданное постоянное давление выстрела, t_1 — время выстрела.

Изменять форму импульса, т.е. управлять выстрелом, позволяют нетрадиционные схемы импульсного водомета, в частности схема с пороховым приводом, описанная в патенте [4]. Суть ее состоит в том, что вода вытесняется продуктами сгорания пороха. Для этого в традиционной схеме исключаются газовый ресивер, поршень, а ствол делится на две части, в одной из которых находится вода, а в другой (камере сгорания) пороховой заряд. При сгорании заряда изменяется площадь его поверхности S , а следовательно, и количество возникающих газов, что и обуславливает возможность управления.

2. Расчет проводится при общепринятых допущениях внутренней баллистики ствольных орудий

[5] и импульсных водометов. Согласно им, параметры как газа, так и воды считаются изэнтропически заторможенными, процессы квазистационарны. Для простоты пренебрежем также второстепенными факторами: неидеальностью процессов, упругостью ствола и коволюмом газа. При этом давления в воде и газе одинаковы.

В соответствии с первым началом термодинамики имеем

$$L_1 = V \frac{dp}{dt} - Q(k-1) \frac{dm_1}{dt} + \kappa p \frac{dN}{dt} = 0 \quad (2.1)$$

где Q — теплотворная способность пороха; m_1 , V и κ — масса, объем и показатель адиабаты продуктов сгорания.

Объем продуктов сгорания определяется суммой начального объема газа в камере сгорания, обусловленного тем, что камера заполнена порохом не полностью, и объемов сгоревшего пороха и вытесненной воды. Поэтому

$$L_2 \equiv V - V_0 + (m_{ch} - m_1)/\rho_1 - fx = 0 \quad (2.2)$$

где V_0 — объем камеры сгорания, m_{ch} — масса заряда, ρ_1 — плотность пороха, f — площадь поперечного сечения ствола, x — перемещение границы газ — вода.

Учитывая, что в рассматриваемом интервале давлений скорость горения пороха линейно зависит от давления ($u = u_1 p$, $u_1 = \text{const}$), получаем уравнение для определения массы газов

$$L_3 \equiv \frac{dm_1}{dt} - \rho_1 u_1 p S = 0 \quad (2.3)$$

Выбирая начальное значение $x(0) = 0$, из уравнения состояния воды $p = B[(\rho/\rho_0)^n - 1]$ получаем

$$L_4 \equiv x - l + m \left(\frac{a_1}{p+B} \right)^{1/n}, \quad a_1 = \frac{B}{f\rho_0}, \quad l = \frac{m_0}{f\rho_0} \quad (2.4)$$

Здесь ρ и ρ_0 — текущая и начальная плотности воды, m — ее масса, m_0 — начальная масса воды.

Масса воды определяется из уравнения

$$L_5 \equiv \frac{dm}{dt} + a_2 \sqrt{\left(\frac{p}{B+1} \right)^{1-1/n} - 1}, \quad a_2 = \rho_0 c_0 f_a \sqrt{\frac{2}{n-1}} \quad (2.5)$$

где c_0 — начальная скорость звука в воде, f_a — площадь выходного сечения сопла.

Начальные условия имеют вид

$$m_1(0) = 0, \quad m(0) = m_0, \quad p(0) = 10^5 \text{ Па} \quad (2.6)$$

3. Задачу управления будем решать как вариационную методом неопределенных множителей Лагранжа [6]. Эта задача на условный экстремум, причем в качестве условий выступает система уравнений внутренней баллистики. Кроме того, необходимо уточнить понятие «время окончания выстрела t_1 ». Оно определяется как момент, к которому истекает определенная масса воды. Это не вся масса, так как иначе в конце процесса нарушатся некоторые принятые допущения. Они останутся справедливыми, если вытечет масса $\Delta m \leq 0,9m_0$. Таким образом, имеем еще одно условие

$$m(t_1) = 0,1 m \quad (3.1)$$

Сформулируем вариационную задачу: найти функцию $S(t)$, доставляющую экстремум функционалу (1.1) при дифференциальных связях (2.1), (2.3), (2.5) и конечных связях (2.2), (2.4), (3.1).

Функционал Лагранжа имеет вид

$$J = \int_0^{t_1} [(p_s - p)^2 + \sum_{i=1}^5 c_i L_i] dt \quad (3.2)$$

где $c_i(t)$ — неопределенные множители Лагранжа. Необходимым условием стационарности функционала (1.1) является равенство нулю первой вариации функционала (3.2). В силу переменности предела интегрирования и необходимости варьирования производных вариация состоит из вне- и подынтегральных членов

$$\delta J = \{ (p_s - p)^2 \delta t + c_1 V \delta_1 p - [c_1 (\kappa - 1) Q - c_3] \delta_1 m + c_5 \delta_1 m - c_1 \kappa p \delta_1 V \} \Big|_0^{t_1} +$$

$$\begin{aligned}
& + \int_0^1 \left\{ \left[-V \frac{dc_1}{dt} + c_1 (\kappa - 1) - c_3 \rho_1 u_1 S + c_4 \frac{ma_3}{n(p+B)} \right] \delta_1 p + \right. \\
& + \left[c_2 - c_1 (\kappa - 1) \frac{dp}{dt} - \kappa p \frac{dc_1}{dt} \right] \delta_1 V + (c_4 - fc_2) \delta_1 x + \left[c_4 \frac{ma_3}{n(p+B)} - \frac{dc_5}{dt} \right] \delta_1 m + \\
& \left. + \left(\frac{dc_2}{dt} - c_3 a_3 \right) \delta_1 m_1 + c_3 u_1 \rho_1 \delta_1 S \right\} dt, \quad a_3 = \left(\frac{p+B}{a_1} \right)^{1/n} \quad (3.3)
\end{aligned}$$

Индекс t при вариации означает, что она взята при постоянном t .

Приравнявая нулю выражения при вариациях, кроме $\delta_1 S$, в интеграле (3.3), получаем систему уравнений для множителей c_i

$$\begin{aligned}
\frac{dc_1}{dt} &= \frac{1}{V} \left[(\kappa - 1) \frac{dV}{dt} c_1 - u_1 \rho_1 S c_3 + \frac{ma_3}{n(p+B)} c_4 \right] \\
\frac{dc_3}{dt} &= Q (\kappa - 1) \frac{dc_1}{dt} + \frac{c_5}{\rho_1}, \quad \frac{dc_5}{dt} = a_3 c_4 \quad (3.4)
\end{aligned}$$

$$c_2 = (\kappa - 1) \frac{dp}{dt} c_1 + \kappa p \frac{dc_1}{dt}, \quad c_4 = fc_2$$

Условия для интегрирования первых трех уравнений системы (3.4) находим из внеинтегральных членов вариации (3.3). Так как они содержат вариации δ и δ_1 , связанные соотношением $\delta = \delta_1 + d\delta_1/dt$, то вариации необходимо согласовать. При $t = t_1$ имеем $\delta t \neq 0$, $\delta m_1 \neq 0$, $\delta p \neq 0$, $\delta m = 0$ и, поскольку все эти вариации независимы, используя соотношения (2.5), получаем

$$c_1(t_1) = 0, \quad c_3(t_1) = 0, \quad c_5 = \frac{-(p_s - p(t_1))^2}{a_2 \sqrt{(p(t_1)/B - 1)^{1-1/n} - 1}} \quad (3.5)$$

Выражение перед вариацией управления в интеграле (3.3) представляет собой градиент функционала (1.1) по управлению (невязку)

$$E(t) = \rho_1 u_1 p c_3 \quad (3.6)$$

Для оптимального заряда $E = 0$.

4. Алгоритм численного решения задачи следующий. Задается первое приближение управления S и решается система (2.1)–(2.5) с условиями (2.6) до выполнения условия (3.1) (прямая задача). При этом все уравнения должны быть представлены в дифференциальном виде. Затем задаются значения (3.5) и назад во времени решается система (3.4) (сопряженная задача). Если невязка (3.6) с заданной точностью не равна нулю, то управление корректируется по формуле простой релаксации

$$S_{i+1} = S_i + \alpha E_i$$

где i — номер итерации, $\alpha = \text{const}$, и расчет повторяется заново.

В силу второго условия (3.5) всегда $E(t_1) = 0$ и, следовательно, коррекция поверхности при $t = t_1$ не проводится. Это обстоятельство требует, чтобы $S(t_1)$ задавалось равным его оптимальному значению. Оно соответствует стационарному режиму при $p = p_s$. В этом случае система (2.1)–(2.5) дает решение

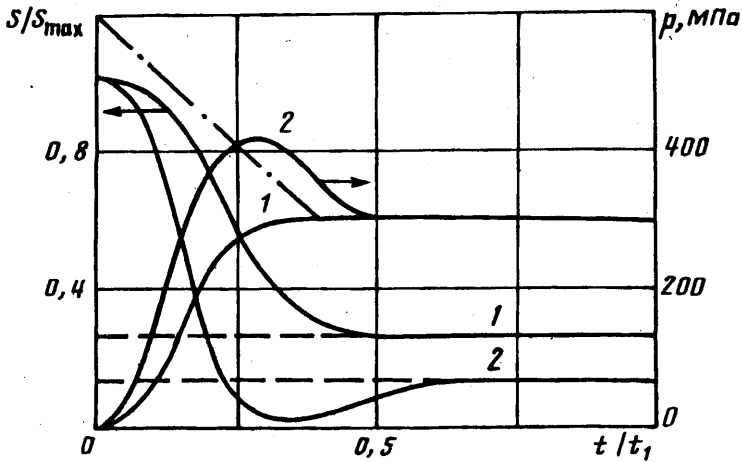
$$S_s = \frac{\kappa \sqrt{(p_s/B + 1)^{1-1/n} - 1}}{c_3 u_1 [Q (\kappa - 1) \rho_1 - \kappa p_s]}, \quad a_{3s} = a_3(p_s)$$

которое следует задавать в качестве первого приближения.

На фигуре кривые I рассчитаны для $p_s = 300$ МПа. Порох пироксидиновый ($\rho_1 = 1600$ кг/м³, $\kappa = 1,25$, $Q = 3600$ кДж/кг), масса $m_0 = 1$ кг, диаметр ствола $d = 0,07$ м, диаметр выходного сечения сопла $d_a = 0,005$ м. Штриховые кривые соответствуют начальному приближению. Оптимальный процесс длится около 0,05 с, при этом сгорает 0,5 кг пороха.

Постепенность повышения давления обусловлена тем, что, во-первых, газы занимают определенный начальный объем и, во-вторых, это повышение сопровождается увеличением объема газов за счет вытеснения воды и сгорания пороха.

В силу указанных особенностей такой выстрел хотя и существенно лучше выстрела традиционных



импульсных водометов с колоколообразным импульсом давления (нет спада давления), однако в начальной стадии имеет тот же недостаток. Поэтому скорость головы струи примет значение, соответствующее скорости стационарного истечения, позднее, чем выравняется давление в стволе. Этот процесс можно ускорить, увеличив начальное давление и, следовательно, скорость истечения, с тем чтобы заторможенная вначале струя имела скорость, близкую к стационарной.

Соответствующие решения показаны кривыми 2. В этом случае в начальной стадии выстрела задавалось не $p_s = \text{const}$, а $p_s = p_s(t)$ так, как показано на фигуре штрихпунктирной линией. Начальный всплеск давления обеспечивает скорейший выход струи на стационарный режим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев: Выща школа, 1987. 155 с.
2. Атанов Г. А., Украинский Ю. Д. Экспериментальное исследование внутренней баллистики импульсного водомета // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. № 3. С. 150—152.
3. Атанов Г. А., Бешевли Б. И. Об особенностях движения струи импульсного водомета // Газ. динамика. Томск, 1987. С. 3—8.
4. Пат. 3631249 ФРГ, МКИ⁴ 42 Д 3/04. Патрон/Динамит—Нобель. // Опубликовано 24.03.88.
5. Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Б. В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.
6. Алексеев В. М., Тихомиров В. М., Фомин С. В. Оптимальное управление. М.: Наука, 1979. 429 с.

Донецк

Поступила в редакцию
28.1.1991