

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ
БАЛЛИСТИКИ ИМПУЛЬСНОГО ВОДОМЕТА**

Г. А. АТАНОВ, Ю. Д. УКРАИНСКИЙ

(Донецк)

Измерены скорость поршня и давление воды в стволе импульсного водомета. Результаты сравнены с расчетом, показано, что квазистационарная постановка дает достаточную точность.

1. В работах [1, 2] приведен метод расчета внутренней баллистики импульсного водомета в предположении квазистационарности процесса выстрела. Для определения параметров выстрела получена следующая система уравнений и начальных условий:

$$(1.1) \quad \frac{dm}{d\tau} = -\alpha \sqrt{(P+1)^{(n-1)/n} - 1}, \quad \frac{dW}{d\tau} = \beta(C_2 - P)$$

$$\frac{dx}{d\tau} = \left\{ W \left[C_1 - \frac{1}{n(P+1)} \right] - C_3 \frac{dm}{d\tau} \right\} \left[C_1 - \frac{C_3}{1-x} + \frac{1}{n(P+1)} \right]^{-1},$$

$$(1.2) \quad \frac{dP}{d\tau} = n(P+1) \left[\frac{1}{m} \frac{dm}{d\tau} - \frac{1}{1-x} \frac{dx}{d\tau} \right] [1 + C_1 n(P+1)]^{-1}$$

$$P(0) = P_y, \quad m(0) = 1, \quad W(0) = 1, \quad x(0) = 0$$

$$(1.3) \quad C_2 = \frac{P_g F_2}{F_1 B}$$

$$(1.4) \quad \alpha = \varphi_c \sqrt{\frac{2}{n-1} \frac{a_0}{W_0} \frac{F_*}{F_1}}$$

$$(1.5) \quad \beta = \frac{1}{n} \left(1 + \frac{M_*}{M_k} \right) \frac{m_0}{M_*} \left(\frac{a_0}{W_0} \right)^2 = \frac{a_0^2 m_0}{2\varphi_c n E_g}$$

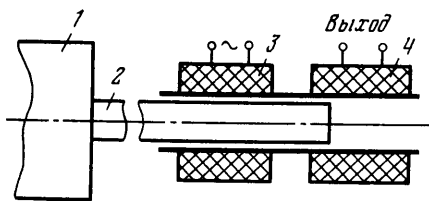
Здесь P – давление воды, m – масса воды в стволе, W – скорость поршня, x – его перемещение, $C_1 \approx 0.004$ и $C_3 \approx 0.005$ – коэффициенты, учитывающие упругие деформации поршня и ствола; P_y – давление за ударной волной, возникающей при ударе поршня; C_2 , α , β – критерии подобия установки; F_2 – площадь поршня со стороны сжатого газа; F_* – эффективная площадь истечения, определяемая суммой площадей выходного сечения сопла и зазора между стволом и поршнем; F_1 – площадь поперечного сечения ствола; P_g – давление газа на поршень, принимаемое постоянным в процессе выстрела; $a_0 = 1460$ м/сек – скорость звука в воде при нормальных условиях; E_g – энергия сжатого газа, затраченная на разгон поршня; φ_c – коэффициент потерь скорости истечения; φ_e – коэффициент потерь энергии при разгоне поршня; M_* – масса поршня; M_k – масса корпуса установки; $n = 7.15$ – показатель адиабаты воды. Переменные безразмерны, в качестве масштабов взяты начальная скорость поршня W_0 , энтропийная функция $B = 0.3$ гПа в уравнении состояния воды (в качестве него взято уравнение Тэта); начальная масса воды m_0 ; приведенная длина ствола l , определяемая отношением начального объема воды к F_1 ; величина l/a_0 .

Проведенный в [3] анализ влияния волновых процессов показал, что квазистационарная постановка дает приемлемую точность при условии, что максимальное давление выстрела P_{\max} и P_y находятся в соотношении $P_{\max}/P_y > 8 \div 10$.

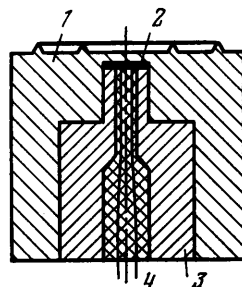
2. В эксперименте для определения фактической величины начальной скорости поршня, которая отличается от рассчитанной по идеальной теории ($\varphi_e < 1$) из-за

наличия трения, несовершенства процесса расширения газа и других факторов, не поддающихся описанию, использован электромагнитный датчик (фиг. 1), выходной сигнал которого зависит от положения поршня. Он состоит из двух катушек 3 и 4, намотанных на трубчатый текстолитовый каркас 5, в котором свободно перемещается связанный с поршнем 1 сердечник 2 из отожженного железа. При питании одной из катушек переменным током во второй наводится э.д.с., пропорциональная коэффициенту связи между катушками, который в свою очередь зависит от положения сердечника.

Чтобы можно было ограничиться статической тарировкой, частота тока, питающего катушку, должна быть не менее чем в 5 раз больше наивысшей частоты сигнала датчика. В то же время верхний ее предел ограничен частотами, на которых коэффициент связи между катушками линейно зависит от положения сердечника.



Фиг. 1



Фиг. 2

Этим требованиям удовлетворяет частота 15 кГц, наибольшая величина полезного сигнала при этом составляет 150 мВ. В измерительной катушке необходимо также обеспечить отсутствие постоянного тока; для этого использована двухполупериодная мостовая схема детектирования. Нагрузкой служил осциллограф С1-18 с входным сопротивлением 0,5 мОм, несущая частота отфильтровывалась конденсатором емкостью 10 нФ. Погрешность эксперимента ~4% и определяется главным образом неравномерностью развертки осциллографа.

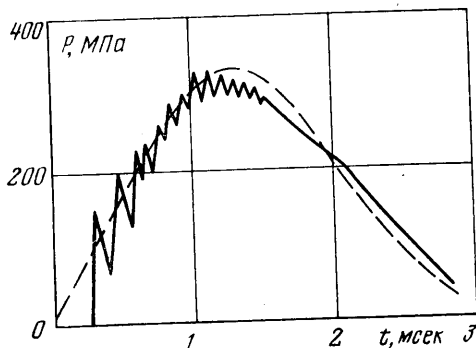
Измерения проводились на лабораторном импульсном водомете лаборатории газовой динамики кафедры физической гидродинамики Донецкого государственного университета. Давление сжатого воздуха, разгоняющего поршень, при этом изменялось до величины 8 МПа, наибольшее значение скорости поршня составляло при этом $34 \pm 1,2$ м/сек, коэффициент потерь энергии изменялся от 1 до 0,72, уменьшаясь с ростом скорости поршня.

Как известно, для измерения нестационарных давлений необходимо применять датчики, которые удовлетворяют определенным требованиям, важнейшими из которых являются следующие: статическая характеристика датчика должна быть линейна во всем интервале измеряемых давлений; частота собственных колебаний датчика должна быть не менее чем в 3 раза выше наибольшей частоты измеряемого сигнала. Кроме того, датчик должен обладать высокими прочностными свойствами.

Всем необходимым требованиям удовлетворяет марганцевый датчик, аналогичный применяемому для исследования ударных волн в твердых телах [4]. Датчик устанавливается в специальное гнездо в стволе водомета и воспринимает давление через отверстие диаметром 3 мм. Датчик (фиг. 2) состоит из стального корпуса 1, плоской бифилярной спирали 2 из марганцевой проволоки диаметром 0,07 мм в однослойной шелковой изоляции, пробки 3 и выводов 4. Зазор величиной ~0,2 мм между пробкой и корпусом заполнялся эпоксидным компаундом. Так как чувствительный элемент датчика воспринимает не отклонения мембраны от положения равновесия, а напряжение в твердом теле, частота собственных колебаний датчика определяется скоростью звука в материале датчика и по оценкам составляет не менее 200 кГц.

Спектральный анализ полученного в квазистационарном приближении импульса давления, выполненный с помощью прямого преобразования Фурье [5], показал, что с точностью до 1% по энергии его спектр расположен в полосе частот от 0 до 2500 Гц. При исследовании волновых процессов установлено, что существуют колебания давления, определяемые распространением и отражением возмущения от поршня и сопла. Приближенно можно считать, что эти колебания периодические, в нашем случае частота их составляла 20–40 кГц. Таким образом, частотные свойства датчика позволяют ограничиться статической тарировкой, которая проводилась в бомбе высокого давления. Давление в ней создавалось гидравлическим прессом и определялось с помощью образцового датчика.

Сопrotивление датчика составляло 20 ± 1 ом. Он включался в мост, симметричный относительно измерительной диагонали и питаемый стабилизированным источником питания Б5-8, напряжения питания $E=3$ в. Полезный сигнал датчика при давлении 100 мПа составляет ~ 0.8 мв, этого недостаточно для регистрации осциллографом С1-18 из-за сильного микрофонного эффекта. Поэтому сигнал предварительно усиливался усилителем постоянного тока, выполненным на микросхеме К1УТ401Б. Входное сопротивление усилителя составляет 4 ком, уровень шумов, приведенных ко входу, равен 20 мкв, коэффициент усиления в необходимом интервале частот равен 50.



Фиг. 3

Амплитудная погрешность измерения определяется погрешностью аппаратуры (главную роль здесь играет температурная нестабильность), погрешностью образцового датчика, изменением чувствительности датчика в процессе эксплуатации и составляет $\sim 6\%$. Погрешность определения временных интервалов зависит только от нестабильности развертки осциллографа и равна 3% .

Осциллограмма, полученная при измерении давления в стволе водомета, имеющего значения критериев подобия $\alpha=0.67$ и $\beta=4.04$, и отношение $P_{\max}/P_y=16$, приведена на фиг. 3 сплошной линией. Пунктирной линией здесь дана расчетная зависимость, представляющая собой решение системы (1.1) при условиях (1.2). Рассчитанное максимальное давление выстрела $P_{\max}=340$ мПа, измеренное ниже на 14 мПа, что составляет $\sim 5\%$ P_{\max} . Некоторое отличие процессов в начальной стадии обусловлено особенностью конструктивной схемы водомета. Водомет выполнен таким образом, что поршень разгоняется вместе с подвижным соплом и расположенной между ними водой, так что процесс начинается не с удара поршня по воде, а с остановки сопла, т. е. практически с удара воды по соплу.

Таким образом, экспериментально подтверждена допустимость квазистационарной постановки при расчете параметров выстрела импульсного водомета.

Поступила 7 XII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Атанов Г. А. Расчет параметров выстрела импульсного водомета. В сб. «Гидромеханика», вып. 22. Киев, «Наукова думка», 1972.
2. Атанов Г. А., Черников Г. А. Об оптимальном импульсном водомете. Изв. вузов, Энергетика, 1973, № 1.
3. Атанов Г. А. Расчет выстрела импульсного водомета с учетом волновых процессов. Изв. вузов, Энергетика, 1975, № 3.
4. Калер Р., Ройс Е. Ударные волны в конденсированных средах. В сб. «Физика высоких плотностей энергий». М., «Мир», 1974.
5. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., Физматгиз, 1963.

УДК 532.529

О ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВАХ ПОДВОДНОГО ГОРНОГО ХРЕБТА

В. М. БАБИЧ, И. Я. БИЛЫЙ

(Ленинград)

В 1957 г. М. А. Лаврентьев высказал предположение, что возвышение дна, которое условно будет далее называться горным хребтом, может служить волноводом для волн на поверхности воды. Это предположение было подтверждено экспериментально и теоретически обосновано в [1-3]. Здесь предлагается более простой вариант теории этого явления, основанный, с одной стороны, на работе [3], с другой — на теории сла-