

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ БАЛЛИСТИКИ ГИДРОПУШКИ

АТАНОВ Г. А., СЕМКО А. Н., УКРАИНСКИЙ Ю. Д.

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования внутренней баллистики гидропушки ударного действия, выстрел которой сопровождается отколом. Течение рассчитано в квазиодномерном приближении методом С. К. Годунова, обобщенным на случай течений с отколами [1]. Измерены давление в стволе гидропушки и скорость струи на срезе сопла. Сравнение эксперимента с теорией показало допустимость применения квазиодномерного приближения и выбранной модели движения среды в отколе.

1. Исследования проводились на лабораторной гидропушке, принцип действия которой заключается в следующем [2]. Столб жидкости длиной  $L$  расположен у входа в сопло, из которого выкачан воздух. Поршень, разогнавшись под действием сжатого воздуха, ударяет по жидкости, генерируя в ней ударную волну. Приведенная в движение ударной волной жидкость втекает, ускоряясь, в сопло и с большой скоростью истекает из него. Вода в исходном положении удерживается тонкими диафрагмами. Параметры гидропушки следующие: масса поршня  $M=2,25$  кг; длина столба воды  $L=14$  см; начальная масса воды  $m=0,5$  кг; длина сопла  $l=25,3$  см; диаметр выходного сечения сопла  $d_2=1$  см; диаметр ствола и входного сечения сопла  $d_1=6,6$  см; длина участка разгона поршня  $l_p=0,5$  м.

Впервые процесс в такой гидропушке был рассмотрен в [2], для расчета был применен метод характеристик. Было установлено, что в гидропушке такой схемы течение сопровождается разрывом жидкости — отколом. Применение метода характеристик к расчету течений с отколами затруднено из-за необходимости выделения всех особенностей течения, в частности линии нулевого давления, при переходе через которую жидкость разрушается, и определения на ней некоторых функций. Эти сложности усугубляются для легких поршней и сопел, в которых начальная стадия втекания не особенно интенсивна (это имеет место и в исследуемой гидропушке).

2. Указанных недостатков лишен метод сквозного счета, примененный в [1], который был использован в настоящей работе. Течение рассчитывалось в квазиодномерном приближении, система уравнений бралась в дивергентной форме

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho F) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u F) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u^2}{2} + \varepsilon \frac{\rho^{n-1}}{n-1} \right) = 0 \quad (2.1)$$

где  $u$  — скорость,  $\rho$  — плотность,  $n$  — показатель адиабаты (в качестве уравнения состояния воды взято уравнение Тэта),  $F=F(x)$  — площадь поперечного сечения,  $\varepsilon=1$  при  $\rho \geq 1$ ,  $\varepsilon=0$  при  $\rho < 1$ . В выражении (2.1) переменные нормированы на длину сопла, скорость звука  $a_0$  и плотность  $\rho_0$  при нормальных условиях, величину  $l/a_0$ .

Начальные условия разрывны

$$u(x, 0) = 0, \quad \rho(x, 0) = 1, \quad -L/l < x \leq 0 \\ u(-L/l, 0) = u_0$$

где  $u_0$  — скорость поршня в момент удара.

Условия на поршне

$$\frac{du(x_p, t)}{dt} = A \left\{ \frac{P_d}{B} + \varepsilon [1 - \rho^n(x_p, t)] \right\}, \quad A = \frac{lm}{nLM}$$

где  $P_d$  — давление газа, которое определяется при расчете разгона поршня (обычно  $P_d$  значительно меньше давления воды, и им можно пренебречь);

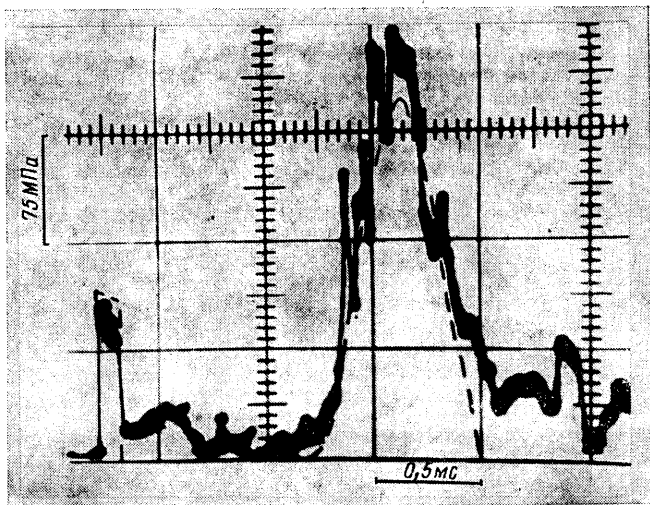
Условия справа

$$\rho(x_f, t) = 1, \quad x_f = x_c, \quad t < T; \quad x_f = 1, \quad t \geq T$$

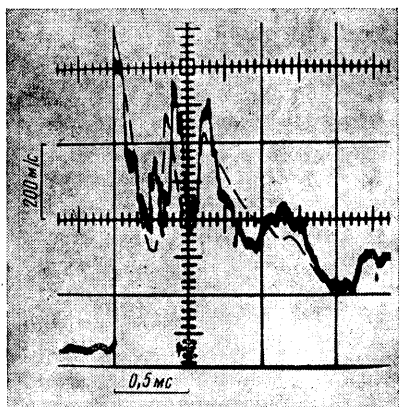
где  $x_c$  — координата свободной поверхности;  $T$  — время втекания жидкости в сопло. При сверхзвуковом истечении условие не ставится.

Расчеты проводились в подвижной сетке, которая слева опиралась на линию поршня, справа — вначале на линию свободной поверхности, затем на линию среза сопла. Количество ячеек сетки сохранялось постоянным. Сетка регулярна по  $x$ , шаг по времени определялся из условия устойчивости Куранта.

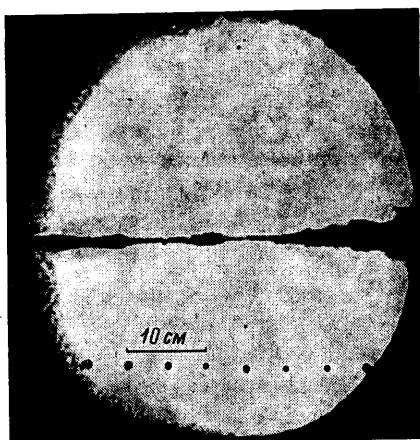
3. В эксперименте определялись скорость поршня в момент удара, давление воды в стволе гидропушки и скорость истечения. Датчик для измерения скорости поршня состоял из железного сердечника, на котором были намотаны подмагничивающая и измерительная катушки. При прохождении мимо сердечника поршня, на котором с постоянным шагом  $h$  были нарезаны канавки, в системе датчик — поршень изменялся магнитный поток и в измерительной катушке наводилась э.д.с. с периодом  $h/u_0$ . Сигнал регистрировался осциллографом, и по измеренному периоду колебаний находилась скорость поршня. Погрешности измерения состоят из погреш-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

ности в размерах канавок, погрешности развертки осциллографа, погрешности обработки осциллограммы и не превышают 7%. Измеренная при давлении газа в ресивере 8 МПа скорость поршня составляла 76,2 м/с или 92% от рассчитанной без учета потерь.

Давление в стволе гидропушки измерялось в сечении  $x = -0,25$  (координата обозначена) датчиком и по схеме, описанной в [3]. Аппаратура запускалась сигналом, выработанным при разрыве проводника в момент удара поршня. На фиг. 1 приведена осциллограмма измерения давления; здесь же штриховой линией показана кривая, полученная при расчетах. Первое повышение давления (до 100 МПа) обусловлено ударной волной. После скачка давления наблюдается некоторое его уменьшение, вызванное волной разрежения, испускаемой поршнем при торможении. Затем давление резко понижается в центрированной волне разрежения, возникающей при отражении ударной волны от свободной поверхности (сектор этой волны очень узок). В течение длительного промежутка времени давление равно нулю, что определяется отколом, далее давление повышается из-за волн сжатия, возникающих в сопле при втекании воды. Максимальное давление, полученное в расчетах, составляет 244 МПа, при измерениях эта величина равна 280 МПа. Четкая регистрация импульса, обусловленного ударной волной, говорит об удовлетворительных частотных свойствах датчика давления.

Скорость течения измерялась кондукционным анемометром с внешним магнитным полем индукции 0,15 Т и межэлектродным зазором 4 мм. Для предотвращения скачка э.д.с. индукции при заполнении межэлектродного промежутка водой струи межэлектродный промежуток заполнялся предварительно. Измерения проводились

на расстоянии 70 мм от среза сопла (конструктивные особенности не позволили уменьшить это расстояние). Аппаратура запускалась сигналом фотоэлектронного умножителя, регистрирующего прерывание струей луча света от специального источника. Осциллограмма скорости струи приведена на фиг. 2. Штриховая кривая показывает расчетную зависимость для среза сопла. Как видно, процесс истечения существенно нестационарен, что объясняется отколом. Имея вначале большое значение (760 м/с), скорость быстро уменьшается, так как волна сжатия, образуемая при втекании воды в сопло, поглощается отколом, поршень не влияет на процесс втекания. Откол закрывается ударной волной, которая, отразившись от поршня, выходит к срезу сопла, образуя второй максимум скорости. Затем качественно процесс повторяется, возникает вторичный откол, скорость истечения уменьшается. Но так как сопло к этому времени уже заполнено водой, начинают преобладать эффекты, вызванные сжатием воды. Вследствие этого скорость опять возрастает. Увеличение давления вызывает интенсивное торможение поршня, скорость истечения уменьшается, процесс выстрела заканчивается. Некоторый сдвиг во времени максимумов скорости истечения экспериментальной и расчетной зависимостей можно объяснить тем, что измерения проводились на некотором расстоянии от среза сопла.

Неравномерный характер истечения приводит к возникновению пучностей на струе во время ее распространения, хорошо видных на фиг. 3, где приведен фрагмент СФР-граммы струи.

Таким образом, показано, что при расчете гидропушки, где нет резкого изменения площади поперечного сечения, квазиодномерная постановка дает вполне приемлемую точность. Кроме того, экспериментально доказана правомочность использования принятой модели ствола.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аганов Г. А. Обобщение метода С. К. Годунова на расчет течений с отколом.— Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1978, т. 18, № 6, с. 1607—1612.
2. Аганов Г. А. Расчет течения с отколами в гидропушке.— Изв. вузов. Энергетика, 1974, № 5, с. 108—113.
3. Аганов Г. А., Украинский Ю. Д. Экспериментальное исследование внутренней баллистики импульсного водомета.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 3, с. 150—152.

Донецк

Поступила в редакцию  
5.I.1982

УДК 532.517.4

### К ВОПРОСУ О СТЕПЕННОМ ЗАКОНЕ ВЫРОЖДЕНИЯ РЕШЕТОЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

БЕКРИЦКАЯ С. И., ПАВЕЛЬЕВ А. А.

По результатам, опубликованным в печати, проведен анализ степенной зависимости, применяемой для аппроксимации экспериментальных данных на начальном участке вырождения турбулентности в потоке за стержневыми решетками. При числах  $Re > 5,5 \cdot 10^3$  ( $Re_t > 20$ ) эти результаты не дают достаточного основания для утверждения, что показатель степени отличен от 1. При числах  $Re < 5,5 \cdot 10^3$  расчетным путем показана возможность аппроксимации результатов на начальном участке указанной зависимостью при условии, что показатель степени возрастает с уменьшением  $Re_t$  потока.

К настоящему времени опубликовано большое число работ, посвященных экспериментальному исследованию стационарного одномерного потока за решеткой. Исследования течения за равномерными решетками из круглых стержней диаметром  $d$ , обладающих квадратной ячейкой со стороной  $M$  и одинаковой пористостью  $(1-d/M)^2 = 0,66$ , показали [1], что при числах  $Re = MU/\nu$  ( $U$  — скорость в потоке за решеткой), лежащих в интервале  $0,55 \cdot 10^4 \div 4,42 \cdot 10^4$ , такое течение оказывается хорошим приближением к модели однородной изотропной турбулентности: энергия пульсаций обратно пропорциональна времени. Аппроксимационная формула для описания результатов экспериментов на участке  $20 < x/M < 160$  имеет вид [1]

$$\frac{1}{\varepsilon^2} = B(x-x_0)^n, \quad \varepsilon = \frac{\langle u' \rangle}{U}, \quad x = \frac{x}{M}, \quad x_0 = \frac{x_0}{M} \quad (1)$$

где  $n=1$ , и содержит константы  $B$  и  $x_0$ .