

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРШНЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В. А. Башкатов, Г. С. Мигиренко, Л. Н. Рогачевская

(Новосибирск)

В работе рассматривается движение жидкометаллического поршня в канале, образованном двумя электродами и стенками из изолятора, находящемся в поперечном магнитном поле. Показано, что основная масса поршня при некоторых условиях остается монолитной, а теория, основанная на гипотезе о существовании поршня, удовлетворительно совпадает с результатами опытов. Кроме этого, приводятся осциллограммы и результаты киносъемок, характеризующих процесс.

В соответствии со схемой процесса (фиг. 1), составляется уравнение динамики, в котором жидкометаллический поршень считается поступательно движущимся телом с неизменной формой и массой. Пренебрегая трением, можно записать

$$\rho b h l dv/dt = bh [P_1(x) - P_2] - jHbh/c \quad (1)$$

Закон Ома

$$vHh/c = jblR^\circ \quad (2)$$

Применяется квази-одномерное приближение.

Магнитное поле, индуцированное током, текущим в электродах и жидком металле, не учитывается, так как рассматриваются процессы, происходящие при малых R_m .

После несложных преобразований и нормировки уравнения (1), (2) приводятся к виду

$$v_* v_*' = D [P_{1*}(x_*) - P_{2*}] - 2S_0 v_* \quad (3)$$

$$v_* = \frac{v}{v_0}, \quad x_* = \frac{x}{l}, \quad \left(\frac{d}{dx_*} \right)' = \frac{d}{dx_*} \left(\frac{d}{dx_*} \right); \quad P_{1*}(x_*) = \frac{P_1(x_*)}{P_0}, \quad P_{2*} = \frac{P_2}{P_0}$$

$$S_0 = \frac{h}{blR^\circ}, \quad R^\circ = R + r, \quad D = \frac{P_0}{\rho v_0^2}, \quad S_0 = R_{m0} \frac{H^2/8\pi}{\rho v_0^2}, \quad R_{m0} = \frac{4\pi\sigma^2 v_0 l}{c^2}$$

Здесь D — динамический параметр; S_0 — параметр магнитного взаимодействия; R_m — магнитное число Рейнольдса; H — напряженность магнитного поля, постоянная по длине канала; R — сопротивление электрической цепи, подключенной к электродам; r — сопротивление жидкого металла, контакта с электродами и электродов; v_0 — скорость поршня в начальном сечении; $P_1(x)$ — давление газа перед поршнем, меняющееся по заданному закону, например в виде адиабаты Ax^{-k} , P_2 — давление за поршнем, считающееся постоянным.

Можно показать, что при некоторой убывающей функции $P(x)$ всегда существует решение уравнения (3), удовлетворяющее краевым условиям

$$x_* = 0, \quad v_* = 1; \quad x_* = L_*, \quad v_* = 1$$

где L_* — вполне определенное значение, удовлетворяющее условию

$$\int_0^{L_*} \{D [P_{1*}(x_*) - P_{2*}] - 2S_0 v_*\} dx_* = 0, \quad (4)$$

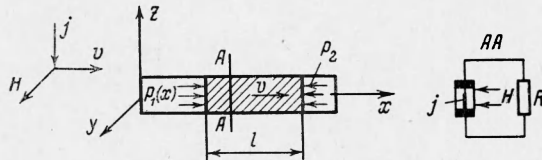
которое означает, что работа расширения газа затрачивается на преодоление электромагнитных объемных сил и, следовательно, равна джоулеву теплу, выделившемуся во

всех элементах замкнутого контура. Эта энергия, отнесенная к объему канала bhL , определится формулой

$$e = 2R_m \frac{H^2}{8\pi}$$

$$(R_m = R_{m0} \langle v_* \rangle)$$

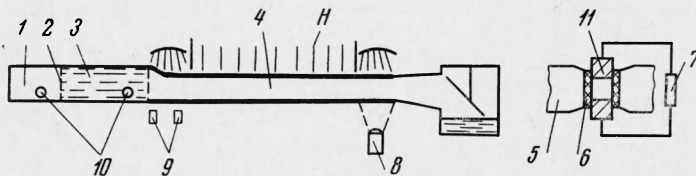
$$\langle v_* \rangle = \frac{1}{L_*} \int_0^{L_*} v_* dx_*$$



Фиг. 1

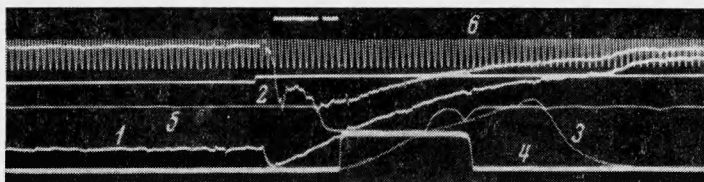
Чтобы пользоваться приведенными уравнениями для расчета, необходимо экспериментально проверить устойчивость жидкометаллического поршня и, следовательно, применимость «поршневой» теории. Некоторым обоснованием ее могут служить также следующие обстоятельства. Известны экспериментальные данные Деринга и Коула [1], что граница между газом и водой при расширении газового пузыря после взрыва в течение достаточно большого времени остается невозмущенной, а образование газо-водя-

ной смеси практически не происходит. По-видимому, этот эффект обусловлен отсутствием существенных касательных составляющих скорости газа на границе, которые, как известно из [2], являются причиной, обуславливающей возникновение неустойчивых капиллярных волн на поверхности жидкости. Естественно предположить, что удачный подбор геометрии газопускного участка и достаточно быстрый процесс подъема давления газа позволят реализовать поршневой режим течения металла.



Фиг. 2

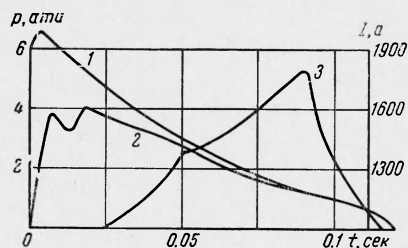
Процесс движения и устойчивость жидкометаллического поршня исследовалась на экспериментальной установке (фиг. 2). Ртутный поршень длиной $l = 175$ мм из контейнера 3 при разрыве мембран 2 под действием давления воздуха, содержащегося в резервуаре 1, входит в канал 4 с рабочим объемом $5 \times 5 \times 400$ мм, находящийся в поле постоянного магнита 5. К электродам подсоединено протарированное сопротивление 7 — R . Если поршень не разрушается и плотно прилегает к электродам 11, в цепи должен возникнуть ток.



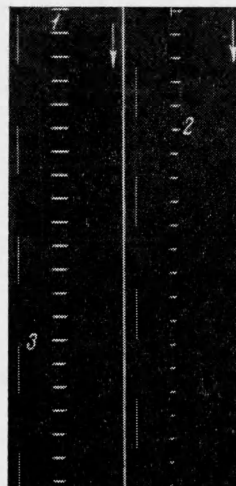
Фиг. 3

Измерялись следующие величины: падение напряжения на нагрузке, давление воздуха в двух точках тензометрическими датчиками 10, распределение напряженности магнитного поля по длине прибором ИМИ-3. Кроме этого, перед опытом измерялось электрическое сопротивление поршня в статическом состоянии методом вольтметра-амперметра приборами класса 0.5. Стенки-изоляторы 6 были изготовлены из органического стекла. Это позволило регистрировать моменты прохождения поршня мимо той или иной точки канала при помощи фотодиодов 9 и производить скоростную кинокамерой 8 кино съемку процесса перед входом в магнитное поле и на выходе из него. Киносъемки и подсветка фотодиодов производились в проходящем свете. Величины, меняющиеся во времени, регистрировались осциллографом. Отметки времени на пленках осциллографа и кино-съемочного аппарата были синхронизированы.

На фиг. 3 приведена характерная осциллограмма процесса при $H = 6000$ э, $R = r = 1.5 \cdot 10^{-5}$ ом, на которой 1 — давление в резервуаре, 2 — давление в кон-



Фиг. 4



Фиг. 5

тейнере 3, 3 — ток, 4, 5 — отметки фотодиодов, 6 — отметчик времени (500 μ t). На фиг. 4 дана расшифровка осциллограммы.

Киносъемка процесса в канале при выходе из магнитного поля, соответствующая осциллограмме, приведена на фиг. 5, где 1 — фотографируемый участок канала, 2 — движущийся ртутный поршень, 3 — отметчик времени (1000 μ t).

В ряде опытов путь поршня отмечался при помощи контактов, устанавливавшихся как в электродах, так и в изоляторах.

Однако удовлетворительной регистрации при помощи этого метода достигнуть не удалось.

Измеренные во время опыта зависимость тока от времени и выделившаяся на нагрузку энергия могут совпасть с рассчитанными по «поршневой» теории лишь в том случае, когда жидкометаллический поршень в течение всего процесса остается монопольным.

При существенном разрушении поршня в действительном процессе увеличится его электрическое сопротивление, изменится масса, скорость и индуцируемая электродвижущая сила, а следовательно, и ток.

Для проведения такого сопоставления результаты расчета, выполненного по сопротивлению, замеренному в статическом состоянии, сравнивались с результатами динамического эксперимента.

Расчет производился по уравнениям

$$\frac{l^2}{v_0^2} \frac{d^2 x_*}{dt^2} = D [(\epsilon_1 + \epsilon x_*)^{-k} - P_{2*}] - 2S_0 \frac{l}{v_0} \frac{dx_*}{dt} \quad (5)$$

$$I = \frac{\tau^0 H b l^2}{c} \frac{dx_*}{dt}, \quad E = \int_0^T R I^2 dt$$

$$\epsilon_1 = \frac{V_1}{V_0}, \quad \epsilon = \frac{V}{V_0}, \quad V = bhl, \quad k = \frac{C_p}{C_n}, \quad v_0 = \left\{ \frac{2P_0 V_0}{\rho V (k-1)} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_1} \right)^{(k-1)} \right] \right\}^{1/2}$$

Здесь V_1 — объем воздуха в момент, когда поршень находится перед входом в магнитное поле; V_0 — объем воздуха перед началом процесса; v_0 — скорость поршня перед входом в канал.

Все величины подставлялись такими же, какие использовались при проведении опытов.

Величина E определялась также и по измеренной зависимости $I(t)$.

На фиг. 6 приведены результаты рассчитанной и измеренной электрических энергий E при различных сопротивлениях нагрузки. Кривая построена по данным расчета, а точки — по результатам опытов. Совпадение опытных данных с расчетом вполне удовлетворительное, что свидетельствует о применимости «поршневой» теории, а также об отсутствии существенного влияния движения на контактное сопротивление между жидким металлом и электродами. Эти данные подтверждаются киносъемкой.

Важно отметить, что устойчивый поршень образуется при достаточно быстром подъеме давления и плавном сужении сечения потока металла на входе в канал. Форму сужающейся части, по-видимому, целесообразно изготавливать близкой к профилю Витошинского, так как при этом можно ожидать наиболее равномерного распределения скоростей по сечению.

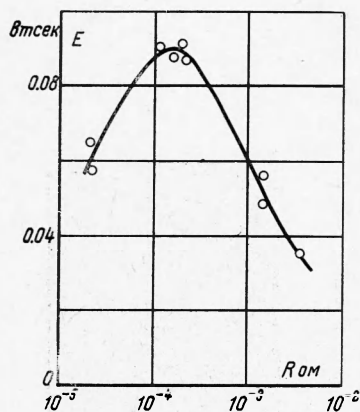
В опытах сужение сечения на входе было равно 2. При отсутствии сужения электрического контакта между жидким металлом и электродами не обнаруживалось.

Можно полагать, что устойчивость жидкого поршня при наличии подтормаживающих и сжимающих жидкость электромагнитных объемных сил будет больше, чем при движении в аналогичных условиях, но без поперечного магнитного поля.

Поступила 20 V 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Коул Р. Подводные взрывы, Изд. иностр. лит., 1950.
2. Релей (Дж. В. Стретт). Теория звука, Гостехиздат, т. 11, 1955.



Фиг. 6