

УДК 532.5.528

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

В. В. Прокофьев, С. А. Очеретяный, Е. А. Яковлев

Научно-исследовательский институт механики Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119192 Москва, Россия
E-mails: vlad.prokof@yandex.ru, ocheret@imec.msu.ru, yakovlev.evgeniy.42@mail.ru

Исследуется возможность использования струйных течений жидкости при наличии искусственной каверны с отрицательным числом кавитации для генерации периодических импульсных струй. Изучается течение в магистрали, состоящей из кавитатора, искусственной газовой каверны и сужающегося сопла, через которое жидкость и газ истекают в атмосферу. Экспериментально найдены режимы, когда характер истечения жидкости близок к прерывистому. Для таких режимов течения предложена одномерная модель, позволяющая оценить скорость истечения порций жидкости из сопла.

Ключевые слова: струя, каверна, отрицательное число кавитации, кавитационные автоколебания, помпаж, импульсные струи.

DOI: 10.15372/PMTF20210111

Введение. Исследования течений с образованием искусственных каверн с отрицательным числом кавитации (искусственная газовая каверна, давление в которой превышает статическое давление в окружающей жидкости) проводятся в Институте механики Московского государственного университета (МГУ) достаточно давно [1, 2]. Вследствие определенной специфики использования таких схем течения каверны с отрицательным числом кавитации иногда называются кормовыми. При значительном увеличении объема поддуваемого воздуха и небольших объемах каверны могут возникать автоколебательные режимы течения с сильными пульсациями давления как в каверне, так и в подводящих воду и воздух системах [3, 4]. Количество работ, посвященных исследованию такого рода гидродинамических колебаний незначительно: кроме Института механики МГУ такие исследования проводятся в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана, где изучаются автоколебания в гидролинии с искусственной газовой каверной на выходе [5].

1. Экспериментальная установка. На рис. 1 приведены схемы используемых в эксперименте плоских рабочих частей двух видов. Течение жидкости и газа создавалось между двумя прозрачными пластинами (ширина зазора $h = 9$ мм), газ и жидкость подавались по нормали к пластинам. Вода поступает в установку из бака-демпфера, в котором пульсации давления выравниваются с помощью воздушной подушки, подача воздуха в каверну

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-01-00040).

© Прокофьев В. В., Очеретяный С. А., Яковлев Е. А., 2021

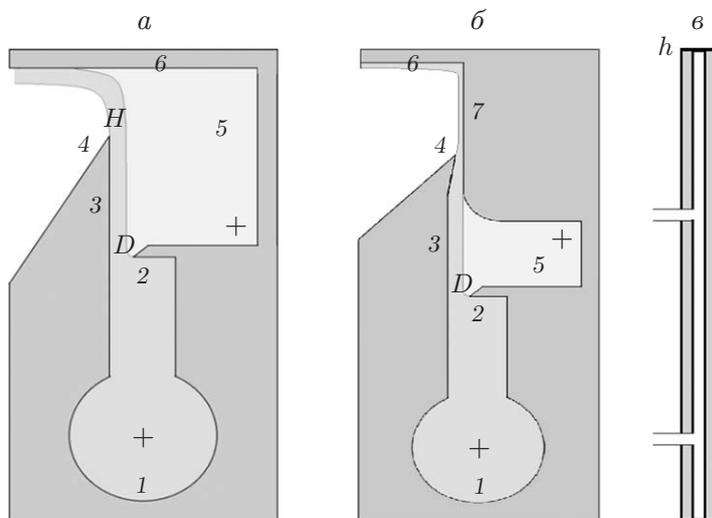


Рис. 1. Схема плоской рабочей части:

a, б — вид спереди (*a* — истечение жидкости через боковую щель, *б* — истечение жидкости через сопло), *в* — вид сбоку; 1 — форкамера (точки — места подачи жидкости или газа), 2 — кавитатор, 3 — прямолинейный свес, 4 — выходное сечение, 5 — каверна, б, 7 — экран

регулируется вентилем, работающим в критическом режиме. Таким образом, пульсационное течение имеет место в подводящей воду магистрали на участке от бака-демпфера до рабочей части, в форкамере рабочей части установки и в каверне.

При описании экспериментальной части работы используются следующие обозначения: p_k, p_0, p_m, p_a — абсолютные нестационарные давления в форкамере, каверне, угловой точке экрана, образованной прямолинейными стенками б, 7, и атмосферное давление соответственно; $P_0 = \bar{p}_0 - p_a$ и $P_k = \bar{p}_k - p_a$ — средние за период наблюдения величины (черта означает осреднение по времени); ρ, ρ_g, ρ_a — плотность жидкости и газа в каверне и при нормальных атмосферных условиях; Q_l, Q_g — расход жидкости и объемный расход поддуваемого газа, не меняющиеся в течение времени записи каждой осциллограммы, причем величины Q_g, ρ_g приведены к среднему давлению газа в каверне \bar{p}_k по изотермическому закону. С использованием осредненных величин введены два основных безразмерных параметра кавитационного течения: коэффициент давления в каверне $C_d = P_k/P_0$ (равен числу кавитации с обратным знаком) и коэффициент поддува газа в каверну $C_q = Q_g/Q_l$. Зная геометрические характеристики течения и коэффициент давления, можно построить некоторое стационарное струйное течение идеальной жидкости. Скорость стационарного истечения струи в пространство с атмосферным давлением $V_\infty = \sqrt{2P_0/\rho}$ используется в качестве характерного масштаба скорости. Кроме того, вводится скорость на границе каверны стационарного течения $V_k = V_\infty \sqrt{1 - C_d}$, которую можно использовать для оценки скорости распространения волн вдоль границы каверны. Режим развитого течения значительно отличается от стационарного, однако результаты прямых измерений показывают, что волны распространяются с постоянной скоростью, близкой к V_k . Такой же вывод следует из нелинейного решения модельной задачи о плоском струйном истечении жидкости из пространства с осциллирующим источником [6]. Экспериментальная установка имела следующие основные геометрические характеристики: D — ширина входного зазора между кавитатором (см. рис. 1) и вертикальной стенкой, H — ширина выходного сечения, L — расстояние от кромки кавитатора до экрана или до входа в сопло (длина каверны), h — ширина зазора между боковыми прозрачными стенками рабочей части (см. рис. 1, в).

Также использовались характеристики автоколебательных режимов: $Sh = fD/V_\infty$ — число Струхала, f — характерная частота автоколебаний, A — средняя за время записи амплитуда пульсаций давления в каверне.

Измерения пульсационных характеристик проводились при постоянных расходах поступающих в установку жидкости и газа. Расход воды измерялся с помощью турбинного датчика (максимальный расход составлял 3 л/с, погрешность 0,4 %), расход газа определялся с помощью набора шайб при измерении перепада давления водяным манометром (длина измерительной трубки 3 м, погрешность до 3 мм вод. ст.). Давление газа перед шайбой поддерживалось на уровне 0,8 МПа. Переменные давления измерялись дифференциальными датчиками 40PC100G1A фирмы Honeywell (рабочее давление до 0,7 МПа, погрешность измерений составляет 0,2 %). Датчики подключались к многофункциональному устройству ввода-вывода USB-6259 фирмы NI, имеющему 32 аналоговых входа и 48 цифровых вводов-выводов. Для приема сигналов с датчиков, оцифровки и обработки сигнала использовалась программа LabView 2013 (частота опроса 10 000 точек/с). Все данные передавались на монитор компьютера, что позволяло оперативно управлять экспериментом, а также осуществлять запись в файл. Для корректного вычисления средних по времени величин выбиралось время записи, превышающее (как правило, значительно) 10 периодов наблюдаемых автоколебаний.

Экспериментальные исследования на плоской рабочей части (см. рис. 1, *a*) показали, что автоколебания появляются при сверхкритических условиях течения, т. е. когда значения коэффициента давления в каверне больше значения, соответствующего стационарному течению с замкнутой каверной. С увеличением объема поддуваемого в каверну газа автоколебания сначала аналогичны колебаниям струи в окрестности стационарного положения, на стадии развитого течения появляется помпажный режим с почти дискретным периодическим выбросом жидких масс. Установлено, что при одинаковых условиях могут возникать колебания с различными частотами, причем механизм автоколебаний одинаков и обусловлен распространением волн вдоль границы каверны. В работе [4] показано, что осредненные характеристики течения (такие как коэффициент давления C_d при заданном коэффициенте поддува газа C_q) не зависят от характера возникающих автоколебательных пульсационных течений. Пример развитых автоколебаний в рабочей части, показанной на рис. 1, *a*, приведен на рис. 2, где представлены осциллограммы давления в форкамере $p_0(t)$ и каверне $p_k(t)$, а также показана зависимость от времени разности этих давлений. Следует отметить, что большое значение имеет сдвиг по фазе осциллограмм $p_0(t)$ и $p_k(t)$. В области, где разность давлений $p_0 - p_k$ положительна, формируется порция жидкости,

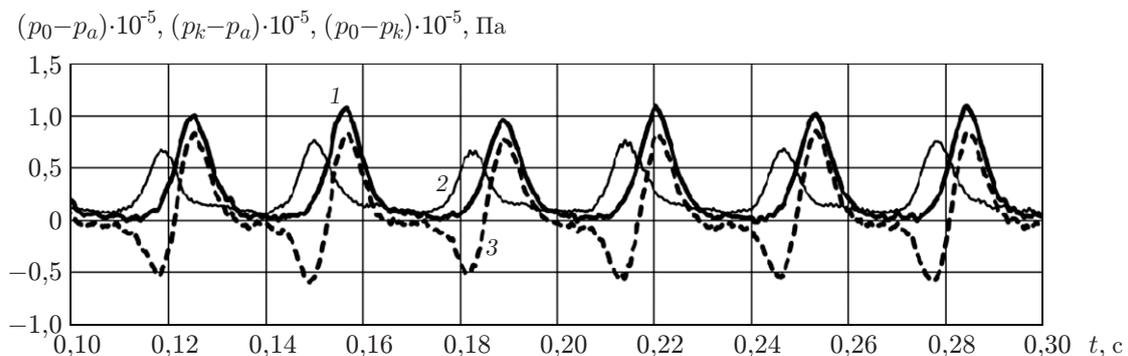


Рис. 2. Осциллограммы давлений в форкамере (1), каверне (2) и разности этих давлений (3) от времени при $P_0 = 0,03$ МПа, $C_q \approx 30$, $C_d = 0,848$, $H = 30$ мм, $L = 80$ мм, длине свеса 50 мм

истекая через щель шириной D (см. рис. 1), образует волну, распространяющуюся вдоль границы каверны (или вдоль струи). Визуальные исследования показали, что момент начала роста давления в каверне коррелирует с началом перекрытия порцией жидкости выходного сечения 4 и началом стадии выброса порции жидкости наружу [2]. Одновременно в области, где разность $p_0 - p_k$ отрицательна, прекращается истечение жидкости через щель шириной D . Снижение давления (продувка каверны) начинается в момент, когда тейлоровские волновые структуры, образующиеся на задней границе выбрасываемой через сечение 4 наружу порции жидкости, начинают непосредственно взаимодействовать с внешней средой.

Автоколебания могут быть использованы для создания устройств, формирующих периодические импульсные струи. Исследования способов разрушения материалов высоконапорными струями показывают, что эффективность этих способов в значительной мере зависит от характера (статические (непрерывные) или динамические (пульсирующие)) прилагаемых нагрузок, которые создаются струей жидкости, действующей на разрушаемый объект [7]. Для создания пульсирующих струй необходимы эффективные и удобные в эксплуатации устройства, формирующие импульсные струи с требуемыми параметрами. Исследованию этой проблемы посвящено большое количество работ. Как правило, в таких установках используются механические устройства, обеспечивающие пульсирующий режим работы установки (см., например, [7, 8]). В то же время в рассматриваемом струйном течении в режиме устойчивых автоколебаний при постоянных значениях параметров подаваемых в систему воды и воздуха без использования каких-либо механических систем может быть реализован режим прерывистого истечения жидкости. Возможность использования автоколебаний для создания на выходе пульсирующих струй исследовалась в работе [9], в которой выходное сечение рабочей части (см. рис. 1, *a*) было дополнено сужающимся соплом Войцеховского [10]. Показано, что при помпажном режиме возможно прерывистое истечение порций жидкости со скоростями передней границы, значительно превышающими скорость стационарного истечения.

Для исследования удара прерывистой струи о препятствие использовалась рабочая часть, показанная на рис. 1, *б*. Струя, текущая вдоль стенки-свеса 3, попадает в сужающееся сопло 4, истекает из него вдоль прямолинейной стенки 7 и взаимодействует с экраном 6, расположенным перпендикулярно на некотором расстоянии от среза сопла. Образующаяся угловая точка используется для измерения импульсов давления при нестационарном истечении струи жидкости. Исследования проводились при следующих значениях геометрических параметров: ширина щели, через которую происходит истечение из форкамеры, $D = 25$ мм, длина прямолинейной стенки 3 $L = 50$ мм, общая длина сопла — 46 мм. Сопло имеет входной участок с сечением постоянной ширины $H_0 = 25$ мм, затем клиновидное сужение с выходным сечением шириной 10 мм, расстояние от выходного сечения сопла 4 до стенки-экрана 6 составляет 34 мм. На рис. 3 показаны осциллограммы пульсаций давления в каверне $p_k - p_a$ и в угловой точке на экране $p_m - p_a$ при значениях среднего избыточного давления в форкамере и коэффициента поддува $P_0 = 0,3$ МПа, $C_q = 3$. При этих условиях наблюдались две моды колебаний с числом Струхала $Sh = 0,037$ (см. рис. 3, *a*), $Sh = 0,051$ (см. рис. 3, *б*). Осциллограммы, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об импульсном воздействии жидкости на экран. При использовании рассматриваемой методики измерения давления возникающее на экране максимальное давление занижается, кроме того, показания датчика ограничены сверху значением 0,72 МПа. На рис. 3 видно, что первый (максимальный) импульс возникает даже раньше, чем давление в каверне достигает максимума, т. е. до начала “продувки” сопла. Давление на экране между импульсами приближается к атмосферному, что свидетельствует об отсутствии динамического воздействия жидкости на экран в эти моменты. Заметим, что режимы пульсаций, приведенные на рис. 3,

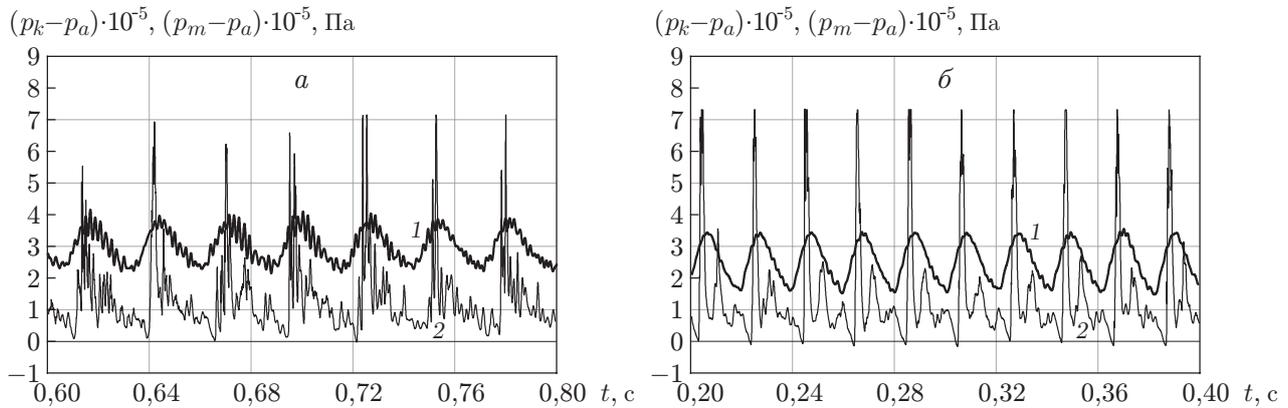


Рис. 3. Осциллограммы пульсаций давления в камере (1) и в угловой точке на экране (2) при $P_0 = 0,3$ МПа, $C_q = 3$:
 а — низкочастотная мода колебаний, б — высокочастотная

соответствуют умеренному поддуву, наибольшие пульсации давления в камере наблюдались при значениях коэффициента расхода, приблизительно равных 20 [9]. Результаты сравнения двух осциллограмм (см. рис. 3, а, б) показывают, что вторая мода может быть более предпочтительной, чем первая, так как увеличивается не только частота ударов, но и интенсивность импульсов (см. рис. 3, б).

2. Математическое моделирование течения в сопле. Из приведенных выше данных следует, что в случае развитого помпажного режима каждый период можно рассматривать как отдельный выброс через сопло в атмосферу порции жидкости под действием избыточного давления в камере. Задача подобна задаче, рассмотренной для гидропушки в одномерном приближении для несжимаемой [10] и сжимаемой [11] жидкостей. На рис. 4 показана схема одномерного расчета для сопла, форма которого близка к экспериментальной (см. рис. 1, б). (Здесь x_1 — координата переднего фронта жидкой массы, x_m — координата фронта области перемешивания жидкости и газа, x_2 — координата условной задней границы раздела жидкости и газа.) С учетом потерь одномерные уравнения движения несжимаемой жидкости (справедливые для области $[x_m, x_1]$) в канале с переменным сечением имеют вид

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\lambda}{D_\Gamma} \frac{V^2}{2}, \quad VF = Q(t), \quad F = hH(x), \quad (1)$$

где V — скорость жидкости вдоль оси x ; $F = hH(x)$ — площадь прямоугольного сечения канала; $Q(t)$ — объемный расход жидкости; $H(x)$ — ширина канала, заданная как функция x . В соответствии с формулой Альтшуля [12] (шероховатостью пренебрегается,

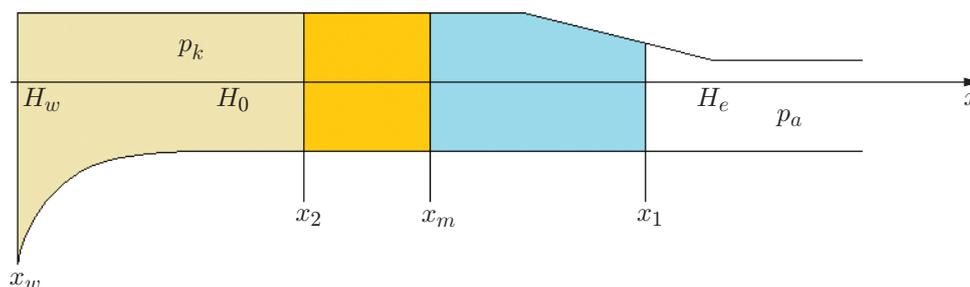


Рис. 4. Схема расчета для сопла

сечение канала имеет форму прямоугольника со сторонами длиной H и h) для коэффициента трения λ можно записать

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{100}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad \text{Re} = \frac{VD_\Gamma}{\nu}, \quad D_\Gamma = 2 \frac{Hh}{H+h}.$$

Выражая скорость через расход и площадь сечения с помощью второго уравнения системы (1) и подставляя это выражение в первое уравнение (1), получаем

$$\frac{\dot{Q}}{F} - \frac{Q^2}{F^3} F' = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\lambda}{D_\Gamma} \frac{Q}{F^2}. \quad (2)$$

Давление на переднем фронте будем считать равным атмосферному p_a , за фронтом области перемешивания двухфазную структуру представим в виде системы длинных пузырей, соединенных с каверной (аналогично решению о развитии одноволновых структур Рэлея — Тейлора [13]). Тогда давление в пузырях можно положить однородным и равным давлению в каверне p_k . В соответствии с [13], полагая, что длина волны, определяющая размер пузырей, равна характерному размеру сопла H_0 (снарядный режим двухфазного течения), для скорости перемещения границы x_m получаем

$$\begin{aligned} \dot{x}_m &= V_m + 0,23\sqrt{H_0 a}, & V_m &= \frac{Q}{F(x_m)}, \\ a &= \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\dot{Q}}{F(x_m)} - V_m Q \frac{F'(x_m)}{F^2(x_m)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициент 0,23, определяющий скорость движения пузырей относительно жидкости, также получен в работе [13]. Формула (3) имеет смысл при $a \geq 0$, при $a < 0$ поверхность раздела газ — жидкость устойчива в смысле Рэлея — Тейлора, поэтому будем полагать, что при отрицательном ускорении граница области перемешивания движется со скоростью, равной скорости жидкости V_m , т. е. второй член в уравнении (3) полагается равным нулю.

Предположим, что в процессе истечения порции жидкости из сопла газ занимает объем Ω_k , ограниченный твердыми стенками, входным сечением 2 (см. рис. 1) и задней границей истекающей из сопла порции жидкости. (Результаты эксперимента показали, что даже в режиме развитых колебаний можно пренебречь перетеканием газа в область, расположенную выше кавитатора). Давление в каверне p_k определим из условия баланса массы газа в полости переменного объема Ω_k при постоянном массовом расходе \dot{m} поддуваемого в каверну газа. В начальный момент объем газа W_0 равен объему полости, ограниченной сечением кавитатора и входным сечением сужающегося сопла, за вычетом объема находящейся в полости жидкости, который в случае одноволнового режима колебаний (первая мода) можно считать равным произведению расхода жидкости Q_l и периода колебаний $T = 1/f$. Увеличение объема Ω_k в процессе выброса будем определять по изменению координаты задней границы порции жидкости x_2 , которая вычисляется без учета перемешивания при условии постоянства объема жидкой массы. Полагая процесс изотермическим и учитывая, что масса газа в каверне M меняется только за счет внешнего поддува, на основе соотношений

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}, \quad M = \rho_g \Omega_k, \quad \rho_g = \frac{\rho_a p_k}{p_a}$$

(ρ_g, ρ_a — плотность газа в каверне и при нормальных атмосферных условиях) получаем дифференциальное уравнение для p_k :

$$\left(W_0 + \int_{x_w - L_m}^{x_2(t)} F(x) dx \right) \frac{dp_k}{dt} + p_k F(x_2) \frac{dx_2}{dt} = \frac{p_a}{\rho_a} \dot{m}. \quad (4)$$

В рассматриваемой модели форма порции жидкости на входе в сопло моделируется прямоугольным параллелепипедом с заданной шириной H_w и длиной L_m , такой что объем порции $F_w L_m = Q_l T$ (F_w — площадь сечения параллелепипеда; T — период автоколебаний). Координата x_w в уравнении (4) соответствует сечению сопла площадью F_w , откуда начинается процесс истечения жидкости из сопла. Интегрируя (2) по x от x_m до x_1 , получаем дифференциальное уравнение для Q :

$$\dot{Q} \int_{x_m}^{x_1} \frac{dx}{F} + Q^2 \int_{x_m}^{x_1} \frac{1}{F^2} \left(\frac{\lambda}{2D_\Gamma} - \frac{F'}{F} \right) dx = \frac{1}{\rho} (p_k - p_a), \quad (5)$$

$$\dot{x}_1 = \frac{Q}{F(x_1)}, \quad \dot{x}_2 = \frac{Q}{F(x_2)}.$$

Будем решать систему обыкновенных дифференциальных уравнений (3)–(5) со следующими начальными условиями: $t = 0$, $Q = V_k F_w$, $p_k = p_a$, $x_1 = x_m = x_w$, $x_2 = x_w - L_m$, причем

$$L_m = \frac{TQ_l}{F_w}, \quad \frac{V_k}{V_\infty} = \sqrt{1 - C_d}, \quad C_d = \frac{\bar{p}_k - p_a}{p_0 - p_a}, \quad \text{Sh} = \frac{D}{TV_\infty}, \quad C_q = \frac{Q_g}{Q_l}.$$

В расчетах использовались эмпирические зависимости C_d и Sh от C_q , значения геометрических параметров выбирались равными экспериментальным: $D = 25$ мм, ширина выходного сечения канала $H_e = 10$ мм. Таким образом, начальные условия связывают задачу о вытеснении жидкости из канала в атмосферу с автоколебательным режимом течения, для которого важным параметром является величина P_0 (или V_∞). Например, начальная скорость порции жидкости, расход поддуваемого газа при заданном C_q определяются величиной V_∞ (или P_0). Поэтому, как и в эксперименте, при анализе результатов расчетов в качестве характерной скорости используется скорость V_∞ .

Сравним результаты расчетов с экспериментальными данными, полученными при $P_0 = 0,1$ МПа. Вода из бака подавалась в плоскую рабочую часть по дюритовой трубе длиной 1200 мм. В этом случае в зависимости от коэффициента поддува наблюдались два режима автоколебаний (рис. 5). При незначительном поддуве реализуется высокочастотная мода автоколебаний, при $C_q \approx 10$ происходит переход на низкочастотную (первую) моду. В расчетах (в соответствии с наблюдениями) ширина начального сечения принимается равной $H_w = 2,4H_0$ (т. е. входной ширине реального сопла (см. рис. 4)). Период колебаний и значения коэффициентов C_q , C_d либо задавались равными измеренным в эксперименте величинам, либо определялись путем аппроксимаций экспериментальных данных, высокочастотные моды задавались путем уменьшения периода первой моды в два, три или четыре раза, начальный объем жидкости в каверне выбирался таким же, как в случае первой моды. В расчетах, результаты которых представлены на рис. 6–8, не учитывалось влияние перемешивания (т. е. из системы уравнений исключено уравнение (3), а в уравнении (5) координата x_m заменена на x_2). Проведем сравнение экспериментальных и расчетных значений амплитуды пульсаций давления в каверне (для эксперимента это средняя величина размаха колебаний давления за период наблюдения, для расчетов — максимальное значение давления в каверне на интервале времени от нуля до момента достижения

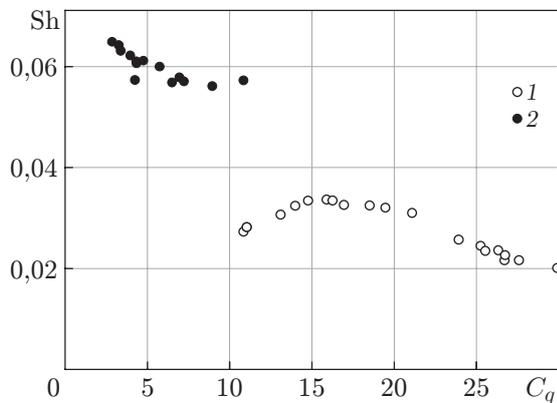


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость числа Струхали от коэффициента поддува при $P_0 = 0,1$ МПа:
1 — мода 1, 2 — мода 2

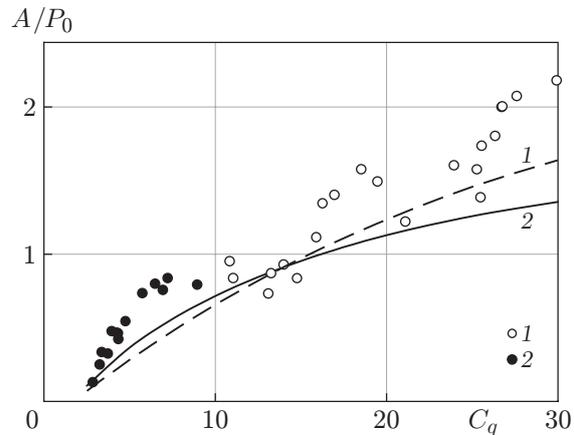


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость амплитуды пульсаций давления в камере, отнесенной к P_0 , от коэффициента поддува для двух мод автоколебаний:
линии — расчет, точки — эксперимент; 1 — мода 1, 2 — мода 2

передним фронтом порции жидкости выходного сечения сопла). На рис. 5, 6 представлены экспериментальные и расчетные данные для двух мод, причем в расчетах зависимости Sh и A/P_0 от C_q задавались с помощью аппроксимации экспериментальных данных отдельно для первой и второй мод автоколебаний. С учетом приближенности математической постановки можно считать, что результаты расчетов и экспериментов удовлетворительно согласуются.

Расчеты движения переднего фронта порции жидкости проводились на участке от входного сечения в сопло x_w до выходного сечения. Истечение из сопла и формирование внешней струи не рассматривались. В проведенных расчетах максимальная скорость переднего фронта достигалась в наиболее узком сечении клиновидного сужения сопла H_e (см. рис. 4). Заметим, что в отсутствие коллиматора это сечение является выходным сечением канала. Скорость V_e рассматривается в качестве характеристики скорости истекающей струи. Из расчетов следует, что в случае второй моды скорость V_e несколько выше, чем в случае первой моды. В области, где согласно эксперименту существуют обе моды ($C_q = 10$), отношение скоростей V_e для второй и первой мод равно 1,14. При увеличении объема поддува ($C_q = 30$) это соотношение скоростей приблизительно сохраняется (1,11), т. е. подтверждаются экспериментальные данные (см. рис. 3, а, б) о том, что интенсивность ударного воздействия жидкости на экран в режиме второй моды может быть выше, чем в режиме первой моды.

На рис. 7 представлены расчетные и экспериментальные зависимости амплитуды пульсаций давления от объема камеры для первой моды автоколебаний (s — отношение полного объема камеры к объему жидкости, протекающей через установку за период) при $P_0 = 0,1$ МПа, $C_q = 15,2$. Видно, что расчетные зависимости качественно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Из рис. 7 следует, что для получения максимальных пульсаций давления в камере (и максимальных скоростей истечения струй) необходимо уменьшать ее объем.

В работе [4] отмечалось, что в экспериментально исследованном диапазоне давлений напора отношение амплитуды колебаний давления в камере к давлению P_0 уменьшает-

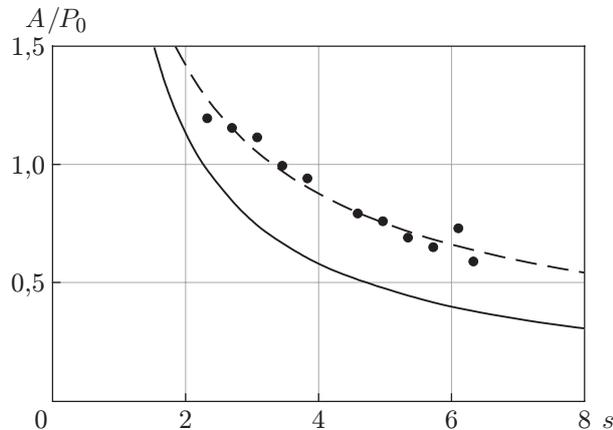


Рис. 7

Рис. 7. Зависимость амплитуды пульсаций давления в камере от относительного объема камеры для первой моды автоколебаний:

линии — расчет, точки — эксперимент; штриховая линия — степенная аппроксимация экспериментальных данных

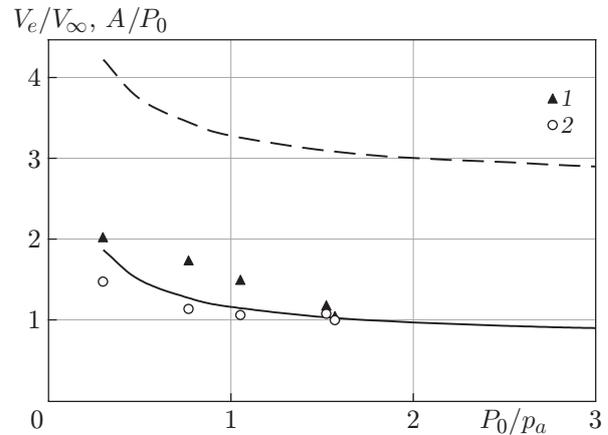


Рис. 8

Рис. 8. Зависимости A/P_0 и V_e/V_∞ от величины P_0/p_a :

точки — зависимость A/P_0 от P_0/p_a при $C_q \approx 20$, $s = 2,37$ (1 — эксперимент, 2 — расчет), линии — расчет при $C_q = 20$ (сплошная — A/P_0 , штриховая — V_e/V_∞)

ся с ростом P_0 при одинаковых значениях C_q . На рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные значения A/P_0 при $C_q \approx 20$, $s = 2,37$. Для каждой расчетной точки задавалось соответствующее значение C_q из эксперимента. Кроме того, проведены систематические вычисления при $C_q = 20$ (сплошная линия), также на рис. 8 приведены расчетные данные для относительной скорости на срезе сопла V_e/V_∞ . Видно, что при значениях P_0 , реализованных в эксперименте, относительная амплитуда существенно уменьшается с увеличением P_0 , однако результаты расчетов показывают, что при больших значениях P_0 относительная величина пульсаций давления меняется незначительно. В предложенной модели основной механизм разгона порции жидкости в канале связан с работой поддуваемого в камеру газа. Представляет интерес сравнение скорости V_e , полученной в рамках предложенной модели, со скоростью в случае стационарного истечения, когда такой механизм отсутствует. На рис. 8 видно, что V_e/V_∞ значительно больше единицы. При большом значении давления, при котором работают реальные установки, например $P_0 = 5$ МПа, в расчетах получаем значение $V_e/V_\infty = 2,7$. Результаты вычислений показали, что за счет выбора формы сужающегося сопла это значение можно существенно увеличить. Кроме того, характер расчетных зависимостей показывает, что с ростом P_0 относительная амплитуда колебаний уменьшается менее существенно. Поэтому при умеренных значениях давления напора (0,3 ÷ 0,5 МПа) можно моделировать процессы, происходящие в высоконапорных установках.

Оценка влияния перемешивания (полная система уравнений) проведена для случая истечения из простого сужающегося сопла (ширина входного сечения $H_0/D = 2,0$, выходного $H_e/D = 0,4$ (сужение сопла $H_0/H_e = 5$), длина сопла $X_e/D = 5,4$). Полагается, что после клиновидного сужения имеется отрезок канала с постоянным сечением $H = H_e$ (коллиматор [11]). Заметим, что в данной постановке любое сечение можно считать выходным. В расчетах соотношение размеров входной щели D и ширины выходного сечения сопла H_e принималось таким же, как в эксперименте, поэтому зависимости числа Струхала первой

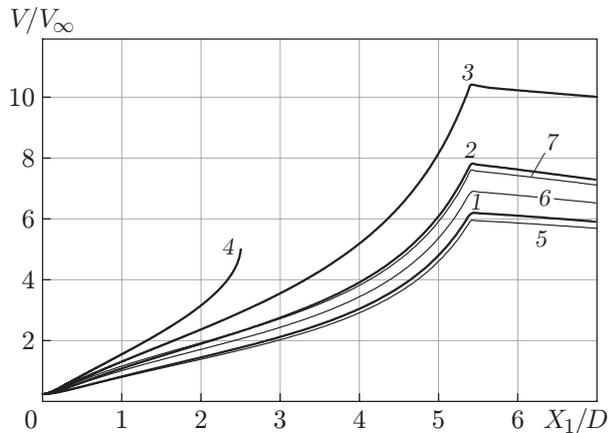


Рис. 9

Рис. 9. Зависимость скорости переднего фронта порции жидкости от координаты X_1/D для клиновидного сужающегося сопла при $H_0/H_e = 5$, $s = 2,23$, $C_q = 20$, $P_0 = 0,4$ МПа:

1–4 — с учетом перемешивания (1 — мода 1, 2 — мода 2, 3 — мода 3, 4 — мода 4), 5–7 — без учета перемешивания (5 — мода 1, 6 — мода 2, 7 — мода 3)

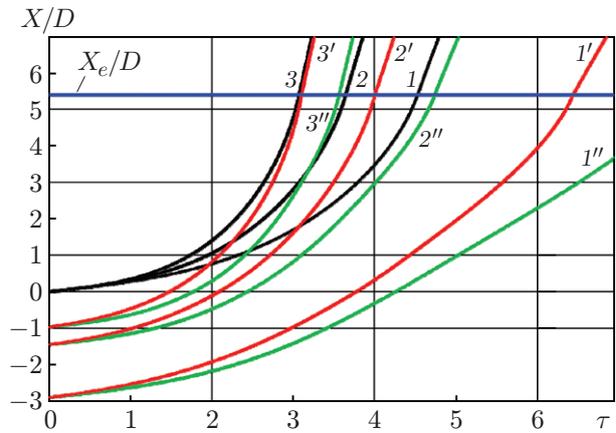


Рис. 10

Рис. 10. Развитие течения в канале сопла для мод 1–3 соответственно:

1–3 — траектории движения передней границы порции жидкости, 1'–3' — траектории движения границы области перемешивания, 1''–3'' — траектории движения задней границы

моды и коэффициента C_d от коэффициента поддува C_q получались путем аппроксимаций экспериментальных данных. Расчеты проводились при $s = 2,23$, $C_q = 20$, $P_0 = 0,4$ Па, $C_d = 0,941$, $Sh = 0,029$. Более высокие моды получались приближенно путем умножения числа Струхала на номер моды. На рис. 9 показана зависимость скорости переднего фронта порции жидкости от его координаты X_1/D для четырех мод. Видно, что скорость увеличивается с увеличением номера моды. В случае четвертой моды фронт перемешивания догоняет передний фронт порции жидкости внутри сужающейся части сопла. В коллиматоре происходит некоторое торможение жидкости, это устройство служит для “накопления” массы жидкости, имеющей достаточно большую скорость на выходе из сопла [11]. На рис. 9 видно, что в случае первой моды влияние перемешивания незначительно, в случае второй моды вследствие перемешивания существенно увеличивается скорость жидкости на выходе из сопла, в случае третьей — перемешивание значительно. На рис. 10 показаны траектории движения переднего фронта порции жидкости и фронта области перемешивания для вариантов расчетов, представленных на рис. 9. (По горизонтальной оси отложено обезразмеренное время $\tau = tV_\infty/D$.) Поскольку в рассматриваемой модели с увеличением номера моды автоколебаний уменьшается масса порции жидкости, к которой приложено избыточное давление в камере, скорость истечения из сопла увеличивается с ростом номера моды. Таким образом, с ростом частоты автоколебаний при тех же условиях (напор жидкости и поддув газа) увеличивается не только частота, но и скорость удара жидкости о преграду. Однако с увеличением частоты уменьшается доля массы жидкости, истекающей из сопла в виде однофазной жидкости. С использованием данных, приведенных на рис. 10, можно вычислить отношение массы жидкости между передним фронтом и фронтом области перемешивания в момент достижения передним фронтом среза сужающегося сопла к массе всей порции жидкости ($s_m = S_m/S_j$). В случае первой моды $s_m = 0,75$, второй моды $s_m = 0,434$, в случае третьей $s_m = 0,076$, при $N = 4$ вся жидкость перехо-

дит в двухфазное состояние еще до момента выхода из сопла (см. рис. 9). Таким образом, вследствие быстрого перемешивания жидкости и газа высокие моды колебаний ($N > 2$) практически непригодны для генерации импульсных струй.

Заключение. Проведены исследования на струйной установке, использующей помпажный режим кавитационных автоколебаний для генерации периодических импульсных струй. Основными элементами установки являются кавитатор с образующейся за ним вентилируемой каверной и выходное сужающееся сопло. Экспериментально найдены режимы, когда естественно возникающее автоколебательное течение сопровождается интенсивным ударным воздействием на препятствие. На основе уравнений одномерной нестационарной гидравлики для развитого, помпажного режима предложена модель, позволяющая оценить скорость истечения порции жидкости из сопла. Получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласование результатов расчетов и экспериментов. Установлено, что для увеличения скорости истечения импульсных струй из сопла при одинаковых условиях (давление напора жидкости и расход газа) следует уменьшить объем каверны, при этом вторая мода автоколебаний более предпочтительна, чем первая (при взаимодействии с препятствием увеличивается не только частота, но и амплитуда импульсов давления). Использование более высоких мод для генерации импульсных струй затруднительно вследствие увеличения в процессе истечения влияния перемешивания фаз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов И. И., Прокофьев В. В.** Унос газа из вентилируемой каверны с отрицательным числом кавитации // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2001. № 4. С. 92–106.
2. **Козлов И. И., Прокофьев В. В.** Закономерности развития волн на поверхности каверны с отрицательным числом кавитации // Докл. РАН. 2006. Т. 409, № 1. С. 43–47.
3. **Козлов И. И., Очеретяный С. А., Прокофьев В. В.** Влияние свойств подводящего трубопровода на характер кавитационных автоколебаний при наличии в системе вентилируемой каверны с отрицательным числом кавитации // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 2. С. 32–43.
4. **Козлов И. И., Очеретяный С. А., Прокофьев В. В.** Автоколебательные режимы в жидкой струйной завесе, разделяющей газовые области с различными давлениями // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 33–43.
5. **Шкапов П. М., Благовещенский И. Г., Гартиг Е. Б.** О гистерезисном характере развития автоколебаний в гидролинии с ограниченной искусственной газовой каверной на выходе // Наука и образование. 2013. № 10. С. 441–450. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33934887>.
6. **Толоконников С. Л.** Истечение жидкости через щель в плоской стенке при наличии источника переменной интенсивности на плоскости симметрии течения // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. 1. Математика. Механика. 2017. № 3. С. 40–45.
7. **Савченко Н. В., Яхно О. М.** Гидродинамические способы создания пульсирующих струй для гидроразрушения твердых материалов // Вестн. Сумского гос. ун-та. Сер. Техн. науки. 2003. № 12. С. 92–98. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://essuir.sumdu.edu.ua>.
8. **Сигаев Е. А.** Исследование гидроотбойки угля пульсирующими струями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово: Кемер. горн. ин-т, 1964.
9. **Козлов И. И., Очеретяный С. А., Прокофьев В. В.** О различных модах автоколебаний в течениях с вентилируемой каверной и возможности их использования для формирования периодических импульсных струй // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2019. № 3. С. 16–27.

10. **Войцеховский Б. В.** Вопросы теории и практики импульсных водяных струй / Б. В. Войцеховский, М. А. Лаврентьев, Э. А. Антонов. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1960.
11. **Атанов Г. А.** Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев: Вища шк., 1987.
12. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960.
13. **Герценштейн С. Я., Чернявский В. М., Штемлер Ю. М.** Об устойчивости Рэлея — Тейлора при больших значениях времени // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 5. С. 8–18.

*Поступила в редакцию 28/IX 2020 г.,
после доработки — 28/IX 2020 г.
Принята к публикации 26/X 2020 г.*
