

УДК 532.5

ВЛИЯНИЕ СУЖЕНИЯ СОПЛА НА РАБОТУ ГЕНЕРАТОРА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

© 2022 г. С. А. Очеретяный^{а,*}, В. В. Прокофьев^{а,**}

^а МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики,
Москва, Россия

*E-mail: ocheret@imec.msu.ru

**E-mail: vlad.prokof@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2021 г.

После доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 01.10.2021 г.

Проведенные ранее экспериментальные исследования струйных течений жидкости в присутствии искусственной каверны с отрицательным числом кавитации показали, что при определенных условиях в гидравлической системе возникают кавитационные автоколебания с высокой интенсивностью пульсаций давления. В работе исследуется течение в магистрали, состоящей из сопротивления (кавитатора), искусственной газовой каверны и сужающегося сопла, через которое жидкость и газ истекают в атмосферу. Обнаружено, что при умеренных поддувах газа в каверну, когда автоколебания отсутствуют и давление в каверне стационарно, в области взаимодействия струи с препятствием (экраном) наблюдаются импульсы давления ударного характера. Этот эффект связан, по-видимому, с интенсивным развитием тейлоровских структур на границе образующейся в этом течении каверны с отрицательным числом кавитации. Проведено исследование зависимости интенсивности периодического импульсного воздействия на препятствие от величины сужения сопла для двух частотных режимов кавитационных автоколебаний. Расчеты, проведенные в рамках одномерной модели истечения из сопла порции несжимаемой жидкости, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: струйное течение, каверна, отрицательное число кавитации, кавитационные автоколебания, пульсационные технологии

DOI: 10.31857/S0568528122020062

Экспериментальные исследования струйных течений жидкости в присутствии вентилируемой каверны с отрицательным числом кавитации, проведенные в Институте механики МГУ [1, 2], показали, что в гидравлической системе, содержащей искусственную газовую каверну, могут возникать кавитационные автоколебания с высокой интенсивностью пульсаций давления как в каверне, так и в подводящем жидкость трубопроводе. Была показана принципиальная возможность использования режима автоколебаний для создания периодических импульсных струй при истечении из сужающегося сопла в атмосферу. При давлениях напора 5–10 МПа они могут быть использованы в технологиях разрушения материалов, например, горных пород. В отличие от известных установок [3–5], периодический режим прерывистого истечения жидкости реализуется здесь при постоянных параметрах, подаваемых в систему воды и газа, без применения каких-либо механических устройств. В работе представлены результаты исследования влияния степени сужения выходного сопла на интенсивность ударного воздействия истекающей жидкости на экран, расположенный перпендикулярно направлению истечения.

Исследования влияния параметров сопла на работу генератора импульсных струй проведены на той же струйной установке, что и в работе [6]. На схеме (см. рис. 1) показана плоская рабочая часть установки с истечением жидкости и газа в атмосферу через сужающееся сопло. Жидкость (вода) из форкамеры установки (на рис. 1 не показана) через щель шириной $D = 25$ мм, образованную перегородкой (кавитатором – 1) и боковой стенкой – 2 истекает в каверну 3, в которую организован поддув газа (воздуха). Затем струя жидкости попадает в сопло 4, состоящее из скругленного входа 7 (радиус 35 мм), участка постоянного сечения шириной $H_0 = 25$ мм и линейно сужающейся части с шириной выхода H_e , общая длина сопла составляла 45 мм. На расстоянии

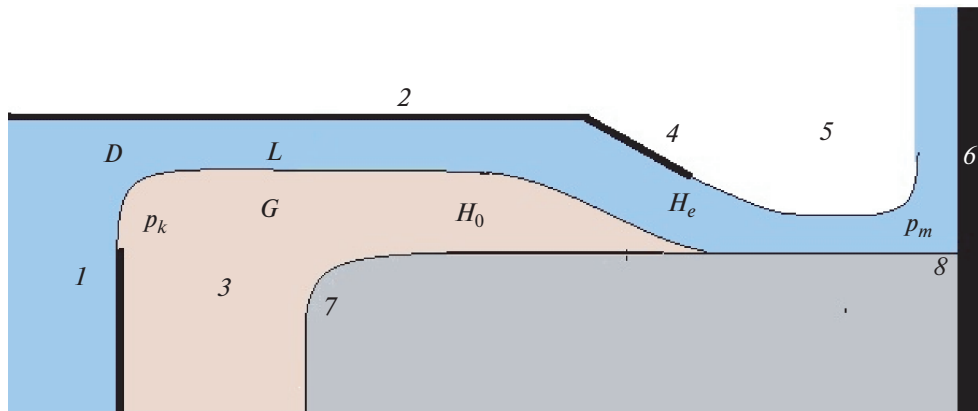


Рис. 1. Схема плоской рабочей части (показано стационарное течение с замкнутой каверной). 1 – перегородка (кавитатор), 2 – прямолинейная стенка (латунь), 3 – газовая каверна, 4 – сужающаяся часть сопла, 5 – атмосфера, 6 – плоский экран (латунь), 7 – скругление на входе в сопло, 8 – угловая точка на экране. L – область, занятая жидкостью, G – газом.

35 мм от выходного сечения сопла перпендикулярно струе помещен плоский экран 6, вдоль которого жидкость истекает в атмосферу. В отличие от работы [6] изменялась ширина выходного сечения сопла – исследования проводились при $H_e = 7, 10, 15, 20, 25$ мм. Для первых трех вариантов обеспечивался одинаковый угол наклона стенки сопла ($\sim 22^\circ$), при $H_e = 20$ угол наклона стенки сопла был уменьшен до 6° , при $H_e = 25$ мм сопло представляло собой скругленный входной участок 7, сопряженный с каналом постоянного сечения шириной H_0 . Во всех случаях длина сопла была одинакова (изменялись длина линейного сужения сопла и длина участка постоянного сечения), расстояние от среза сопла до экрана также оставалось неизменным. На рис. 1а буквами p_k и p_m показаны точки измерений соответствующих давлений в каверне и на экране (вблизи угловой точки 8).

Схема, показанная на рис. 1, соответствует идеальному стационарному течению с образованием каверны, замыкающейся на горизонтальную стенку, другой вариант, когда каверна замыкается на экране, приведен ниже, на рис. 2. Измерения пульсационных характеристик проводились при постоянных расходах, поступающих в установку жидкости и газа. Расход воды измерялся турбинным датчиком расхода с пределом измерения 3 л/с и точностью 0.4%, расход газа измерялся с помощью набора шайб с измерением перепада давления на шайбе водяным манометром с точностью до 30 Па. Давление газа перед шайбой поддерживалось на уровне 0.8 МПа. Переменные давления в каверне измерялись дифференциальными датчиками 40PC100G1A фирмы Honeywell с рабочим давлением до 0.7 МПа (точность измерений 0.2%). Давление в форкамере (область выше кавитатора) измерялось датчиком абсолютного давления MPX5700AP с рабочим давлением до 0.7 МПа фирмы Nxp Semiconductors (точность измерений 0.25%). Ударное давление в угловой точке экрана измерялось дифференциальным датчиком MPX5999D0 с рабочим давлением до 1 МПа фирмы Nxp Semiconductors (точность измерений 0.25%). Чувствительный элемент датчика был соединен с точкой измерения довольно длинным каналом (диаметр 3 мм, длина 58 мм), что приводило к занижению измеренной амплитуды импульса. Однако тракт измерений и сам датчик оставались неизменными для всей серии экспериментов, что позволяет проводить сравнительные оценки изменения интенсивности ударных воздействий на экран в зависимости от параметров сопла и режима течения. Датчики были подключены к многофункциональному устройству ввода-вывода USB-6259 фирмы NI, имеющего 32 аналоговых входа и 48 цифровых вводов-выводов. Для приема сигналов с датчиков, оцифровки и обработки сигнала использовалась программа LabView 2013, частота опроса 10000 точек в секунду. Все необходимые данные подавались на монитор РС, что давало возможность оперативно управлять экспериментом, а также осуществлять запись в файл. Для корректного вычисления средних по времени величин время записи выбиралось большим 10 периодов наблюдаемых автоколебаний

Основные параметры течения

$C_d = P_k/P_0$ – коэффициент давления в каверне, где $P_k = \bar{p}_k - p_a$, $P_0 = \bar{p}_0 - p_a$ (сверху чертой обозначены средние за период измерения значения давлений в каверне и форкамере соответственно), p_a – атмосферное давление.

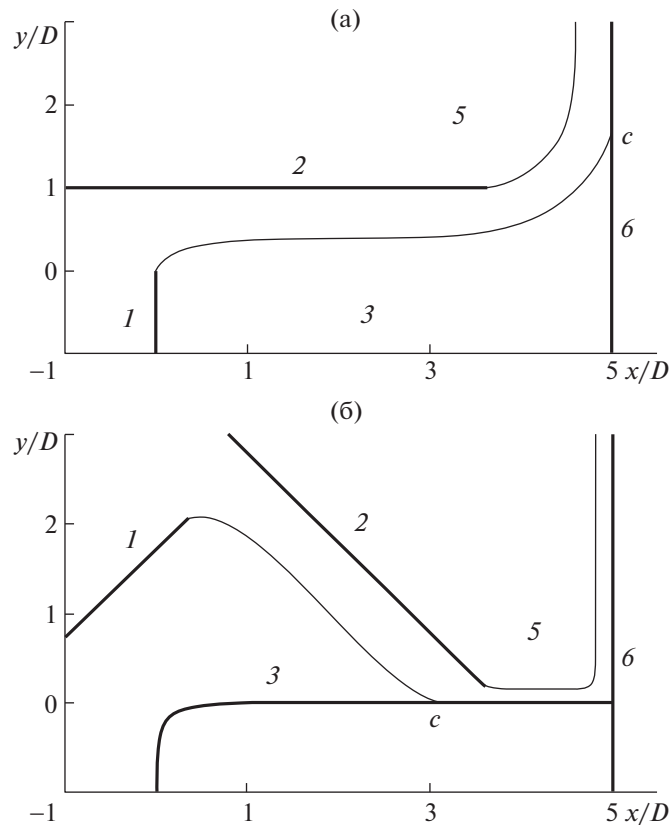


Рис. 2. Расчеты свободных границ течения с замыканием каверны на стенке при $D = 25$ мм, $H_0 = 25$ мм, $H_e = 25$ мм (а) и 7 мм (б). Цифрами обозначены объекты, аналогичные схеме рис. 1. а – истечение из равномерного сопла без взаимодействия с нижней стенкой сопла (на рис. она не показана), б – течение с наклонной верхней стенкой (наклонная прямая стенка моделирует линейное сужение сопла). Буквой c отмечена рассчитанная точка присоединения каверны к экрану (а) или к горизонтальной стенке сопла (б).

$C_q = Q_g / Q_l$ – коэффициент поддува газа в каверну, здесь Q_g – объемный расход поддуваемого газа (приведенный к давлению \bar{p}_k), Q_l – расход жидкости в струе.

$Sh = f D / V_\infty$ – число Струхалия, здесь f – характерная (ведущая) частота автоколебаний,

$V_\infty = \sqrt{2 P_0 / \rho_l}$ – характерная скорость течения, ρ_l – плотность жидкости.

D – величина зазора между кавитатором 1 и стенкой 2 (рис. 1).

1. О ДРОБЛЕНИИ СТРУИ В ОТСУТСТВИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

В основном в работе речь идет об использовании автоколебательных режимов для организации прерывистого режима истечения жидкости из сопла с последующим ударным воздействием струи на препятствие. Однако стационарное течение, схематически показанное на рис. 1, на практике не реализуется в связи с неустойчивостью границы каверны с отрицательным числом кавитации (число кавитации равно величине C_d с обратным знаком). С развитием этой неустойчивости может быть связано возникновение дискретного характера течения в сопле и последующим ударным взаимодействием жидких фрагментов с экраном, причем это происходит при умеренных поддувах раньше, чем развиваются интенсивные автоколебания. На рис. 3 приведен пример возникновения такого режима: при сравнительно небольшом поддуве $C_q = 2.6$, давлении напора $P_0 = 0.22$ МПа при истечении через сопло с относительной шириной выходного сечения сопла $H_e / H_0 = 0.6$ (нужно отметить, что эффект наблюдался для сопла с длинным участком постоянного сечения H_0 , так что общая длина сопла была равна примерно $6H_0$). Видно, что интенсивные импульсы давления p_m , измеренные в угловой точке экрана δ (см. рис. 1), возникают при

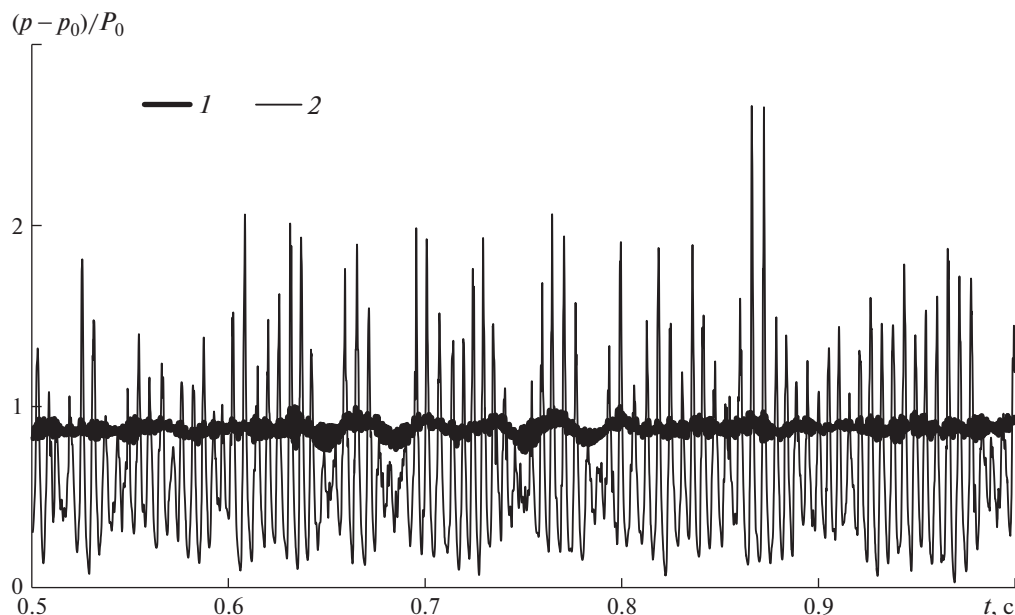


Рис. 3. Осциллограммы давлений p_k в каверне (1) и p_m в угловой точке экрана (2) (отнесенные к P_0) для $C_q = 2.6$, давлении напора $P_0 = 0.22$ МПа при истечении через сопло с $H_e = 6$ мм, $H_0 = 10$ мм.

практически постоянном давлении в каверне p_k (толстая линия на рис. 2), т.е. в отсутствие автоколебаний.

Приведем некоторые соображения для объяснения этих наблюдений. На рис. 2 приведены результаты теоретических расчетов формы плоской стационарной каверны, замыкающейся в хвостовой части на твердой границе. Расчет стационарной задачи позволяет также определить значение C_d , соответствующее течению с замкнутой на стенке каверной (ниже такие течения будем называть критическими). Для C_d , превосходящих это значение, стационарное взаимодействие со стенкой невозможно.

Решение получено с помощью методов теории функций комплексного переменного с использованием свойств двоякопериодических тэта функций. Геометрические параметры соответствуют условиям эксперимента: $D = H_0 = 25$ мм. На рис. 2а, б твердые границы обозначены толстыми линиями, свободные — тонкими. Приведены два случая расчета с шириной выходного сечения сопла 25 мм (рис. 2а) и $H_e = 7$ мм (рис. 2б). Цифрами обозначены объекты, аналогичные схеме рис. 1. При истечении из равномерного сопла (рис. 2а) отсутствует взаимодействие с нижней стенкой сопла (поэтому она не показана), течение при наличии линейного сужения сопла 4 (рис. 1) моделируется в расчетах течением с наклонной верхней стенкой (см. рис. 2б). Буквой с отмечена рассчитанная точка присоединения каверны к экрану (а) или к горизонтальной стенке сопла (б).

Во всех случаях ширина текущей вдоль стенки сопла струи определяются толщиной щели D (см. рис. 1 и рис. 2а, б). Видно (рис. 2), что при небольшой ширине выходного сечения сопла (рис. 2б) каверна замыкается внутри канала сопла, при истечении же из равномерного сопла (рис. 2а) точка замыкания каверны находится на экране, перпендикулярном истекающей струе.

В реальном течении в хвостовой части каверны развиваются волновые структуры Релея—Тейлора (см. [7]), размер которых соизмерим с шириной струи. На рис. 4 представлено искровое фото течения с разворотом струи на 90° при подаче газа в каверну, несколько большей необходимого, для создания замкнутой каверны. Это течение близко к показанному на рис. 2а (истечение из сопла с замыканием каверны на экране). Отметим, что кривизна границы каверны в представленном на рис. 2а течении меняет знак, и часть каверны, примыкающая к кавитатору устойчива, структуры, связанные с неустойчивостью Релея—Тейлора, развиваются только в хвостовой части каверны. В случае, когда каверна замыкается внутри сопла (рис. 2б) за счет тейлоровских структур, может сформироваться прерывистый режим истечения из сопла.

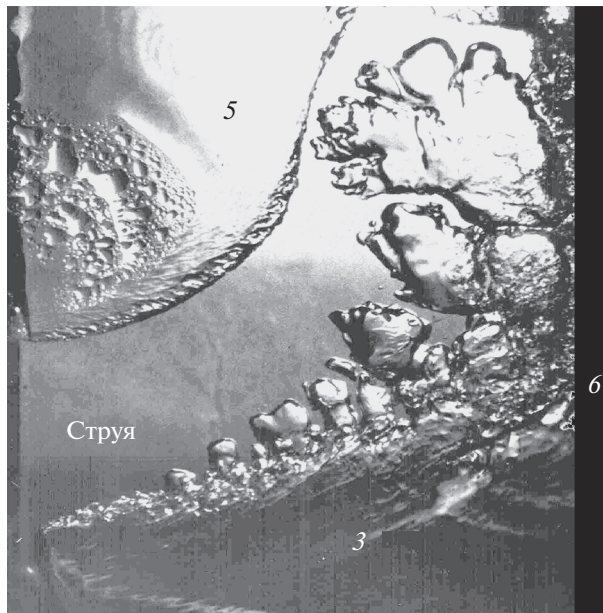


Рис. 4. Взаимодействие струи, истекающей из сопла (не показано) с плоским экраном б (нумерация аналогична рис. 1), 3 – газовая каверна, 5 – атмосфера. (Схема течения здесь близка к показанному на рис. 2а).

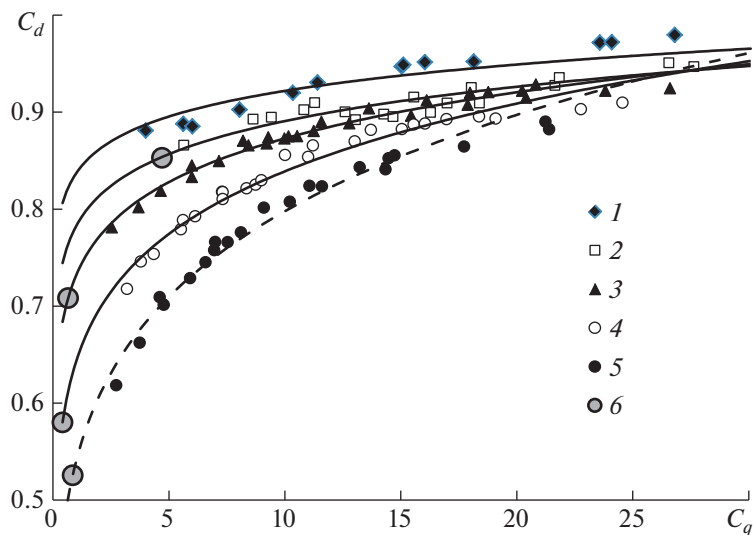


Рис. 5. Экспериментальные зависимости C_d от коэффициента поддува C_q при среднем давлении напора $P_0 = 0.1$ МПа и ширине выходного сечения сопла $H_e = 7, 10, 15, 20$ и 25 мм (1–5 соответственно). Большими кругами 6 отмечено положение соответствующих критических точек, вычисленных теоретически (см. выше).

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости коэффициента давления C_d от коэффициента поддува C_q при среднем давлении напора $P_0 = 0.1$ МПа, и при ширине выходного сечения сопла $H_e = 7, 10, 15, 20$ и 25 мм (1–5 соответственно). Точки, обозначенные на рис. 5 большими кругами (6), соответствуют критическим режимам течения. Эти режимы достигаются при значениях коэффициента поддува C_q порядка 1, развитые же автоколебательные режимы (см. разд. 2) имеют место при поддувах на порядок больших. Сплошные кривые на рис. 5 – аппроксимации экспериментальных зависимостей степенными функциями.

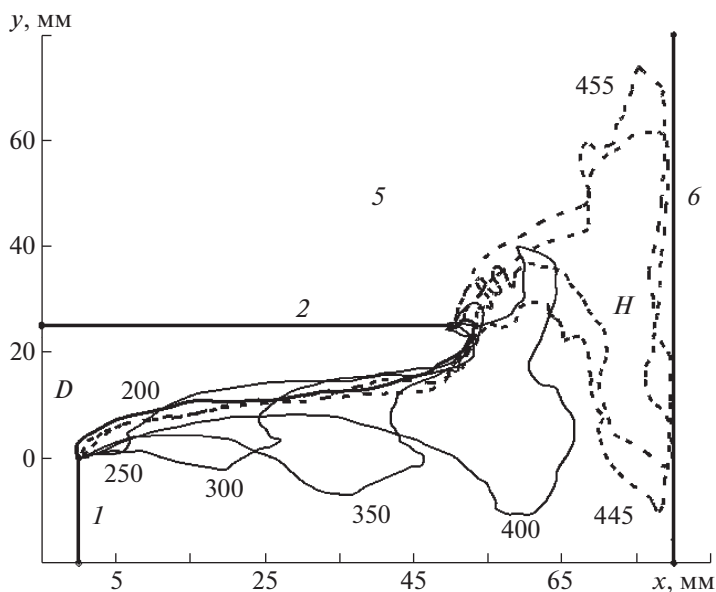


Рис. 6. Расшифровка одного периода истечения жидкости в камеру при развитом автоколебательном режиме (первая мода). Показана эволюция во времени границы раздела жидкость–газ. Цифры около кривых – номера кадров, частота кадров 9000 кадр/с. Расстояние от кавитатора до экрана 80 мм, $D = 25$ мм, ширина щели, через которую происходит истечение в атмосферу, $H = 30$ мм.

2. РАЗВИТЫЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Автоколебательные режимы течения наблюдаются только в области поддувов, превышающих критические значения. В начальной стадии развития автоколебаний наблюдаются просто поперечные колебания струи с периодическим взаимодействием со стенкой 2, при дальнейшем увеличении поддува газ в камеру течение переходит в стадию развитых колебаний, когда истечение жидкости происходит отдельными порциями. На рис. 6 представлена расшифровка видеозаписи для одного периода развитого автоколебательного режима истечения жидкости в камеру. Показана эволюция во времени границы раздела жидкость–газ. В отличие от схемы рис. 1, здесь отсутствует вставка и нет сопла, порция жидкости взаимодействует непосредственно с экраном 6, схема течения аналогична той, что показана на рис. 2а. Здесь элементы, аналогичные со схемой рис. 1, обозначены теми же цифрами, числа около кривых – номера кадров видеосъемки, частота кадров 9000 кадр/с. Расстояние от кавитатора 1 до экрана 6–80 мм, ширина щели между кавитатором 1 и твердой стенкой 2, $D = 25$ мм, ширина боковой щели между кромкой стенки 2 и экраном 7– $H = 30$ мм, размеры на рис. 6 указаны в мм. Начальный кадр № 200 соответствует моменту максимального проникновения газа в область выше кавитатора (видно, что здесь это проникновение незначительно). В этот момент щель H (см. рис. 6) открыта в наружное пространство, давление в камере близко к атмосферному – происходит интенсивное истечение жидкости из форкамеры через щель D в камеру (кадры № 250–400). Видно, что из-за нестационарного характера истечения струя имеет грибовидную форму, максимальная ширина струи превосходит ширину щели D . Струя ударяется об экран, давление газа в камере растет, начинается процесс быстрого выбрасывания порции жидкости через щель H (кадры № 445–455, показанные пунктиром). Задняя граница раздела имеет вогнутую в сторону жидкости форму, похожую на головную часть пузыря снарядного типа. Собственно, уже здесь имеет место удар жидкости об экран с возможностью возникновения давлений гидроудара. Однако жидкость здесь движется с наименьшей скоростью, близкой к скорости стационарного течения на границе камеры [6]. Следовательно, теряется энергия, связанная с ускорением жидкости газом за счет повышенного давления в камере. В схеме, исследуемой в настоящей работе (рис. 1), между кавитатором и экраном в камеру вставлен сопловой блок, в котором жидкие порции получают значительное ускорение за счет работы газа.

Как указывалось ранее [2], могут возникать различные автоколебательные режимы в зависимости от таких параметров, как объем камеры или акустические свойства подводящего воду трубопровода, причем было показано, что частотный режим автоколебаний определяется коли-

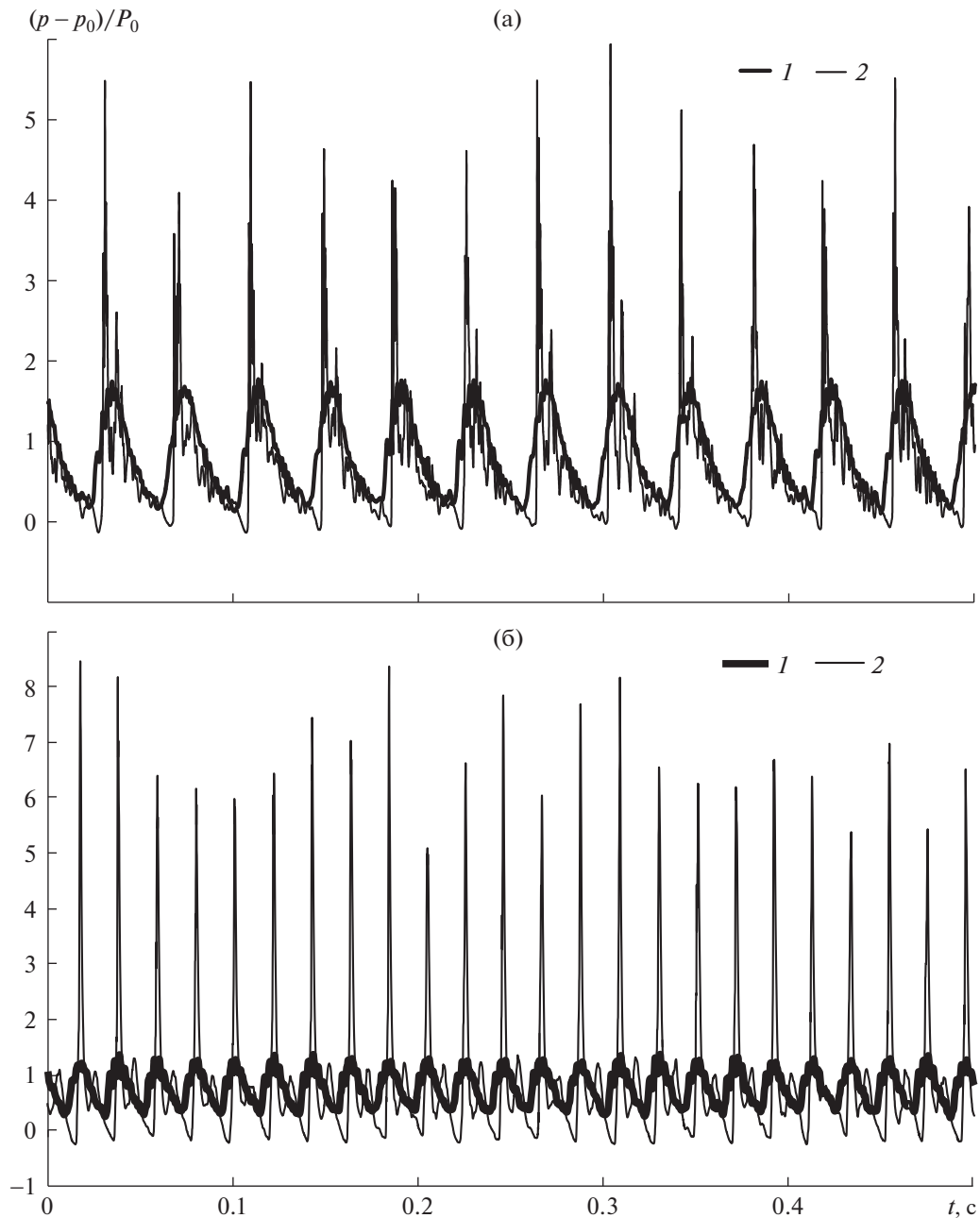


Рис. 7. Осциллограммы давлений в каверне (1) и в угловой точке экрана (2) (отнесенные к P_0) для $C_q = 6$, давлении напора $P_0 = 0.15$ МПа в режиме первой моды автоколебаний (а) и второй (б) для ширины выходного сечения сопла $H_e = 10$ и 20 мм соответственно.

чеством волн, образующихся вдоль каверны. В дальнейшем одноволновой режим будет называться первой модой или низкочастотным режимом, а режим с образованием двух волн – второй модой или высокочастотным. В представленной здесь серии экспериментов напорный бак с постоянным давлением был соединен с плоской рабочей частью трубой длиной 1200 мм, внутренним диаметром 50 мм. При использовании дюритовой напорной трубы с ростом поддува сначала наблюдались колебания второй моды, а затем автоколебания становились низкочастотными (первая мода). При использовании стальной трубы во всем диапазоне поддувов наблюдались только низкочастотные колебания.

На рис. 7 приведены осциллограммы колебаний давления в каверне – 1 и в угловой точке экрана – 2 для низкочастотных (рис. 7а) и высокочастотных (рис. 7б) мод колебаний при примерно одинаковых давлении напора и коэффициентах поддува. Нужно заметить, что точно из-

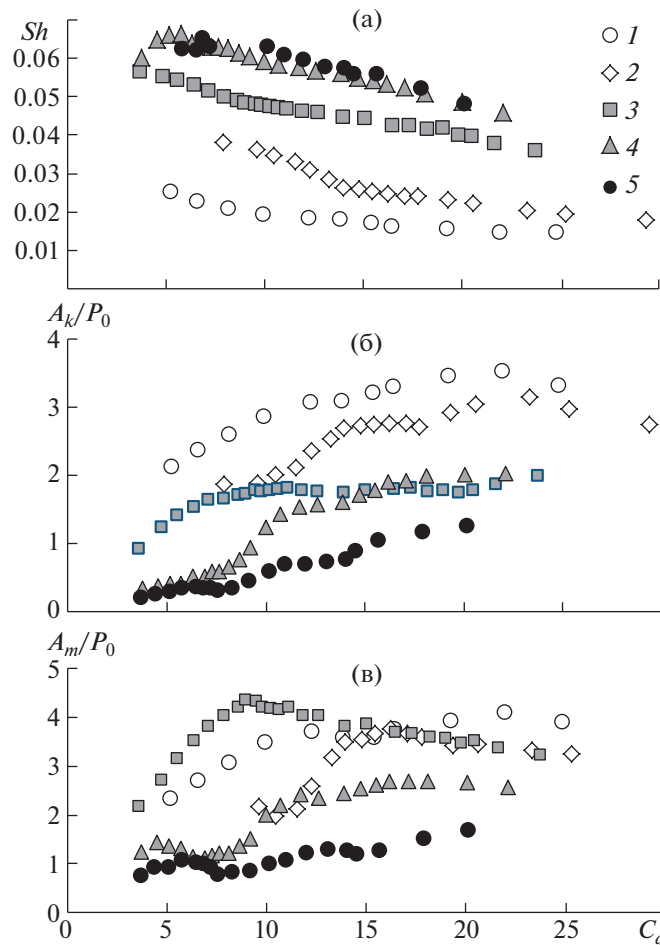


Рис. 8. Зависимость числа Струхала Sh (а), интенсивности пульсаций давления в камере A_k (б), интенсивности ударных импульсов A_m (в), отнесенных к P_0 от поддува C_q при ширине выходного сечения сопла $H_e = 7, 10, 15, 20, 25$ мм (1–5 соответственно).

мерить максимум импульса давления, возникающего при взаимодействии импульсной струи с экраном затруднительно. Как было отмечено выше, для измерения давления p_m в угловой точке (8, рис. 1), чувствительный элемент датчика был соединен с точкой измерения довольно длинным каналом и возможны погрешности (в сторону уменьшения) при измерении импульсов давления. Однако предполагается, что можно производить сравнительное исследование интенсивности воздействия прерывистых струй для различных сопел при условии неизменности измерительного тракта. Отметим, что, несмотря на потери измеряемой амплитуды импульсов, максимальное давление, которое фиксируется в угловой точке, в 6–10 раз превосходит среднее давление напора.

Сравнивая данные рис. 7а,б, можно заключить, что при высокочастотной моде автоколебаний даже при меньшей интенсивности пульсаций давления в камере по сравнению с низкочастотной, интенсивность импульсов давления в угловой точке экрана заметно выше.

На рис. 8а,б,в представлены зависимости числа Струхала, интенсивности пульсаций давления в камере A_k и в угловой точке экрана A_m (отнесенных к P_0) от коэффициента поддува при ширине выходного сечения сопла $H_e = 7, 10, 15, 20, 25$ мм (1–5 соответственно). Здесь интенсивность импульсов давления определялась как разность максимальной и минимальной величины давления для каждого периода колебаний, осредненная для всего интервала записи осциллограммы. Приведены данные только для низкочастотной моды колебаний. Видно, что с уменьшением ширины выходного сечения сопла H_e частота пульсаций уменьшается (что может быть связано с увеличением коэффициента давления C_d – см. рис. 5 и уменьшением скорости распространения волн вдоль камеры – см. [2]). Данные рис. 8б,в показывают, что интенсивность пульсаций давления в камере и в угловой точке экрана, в зависимости от величины поддува газа

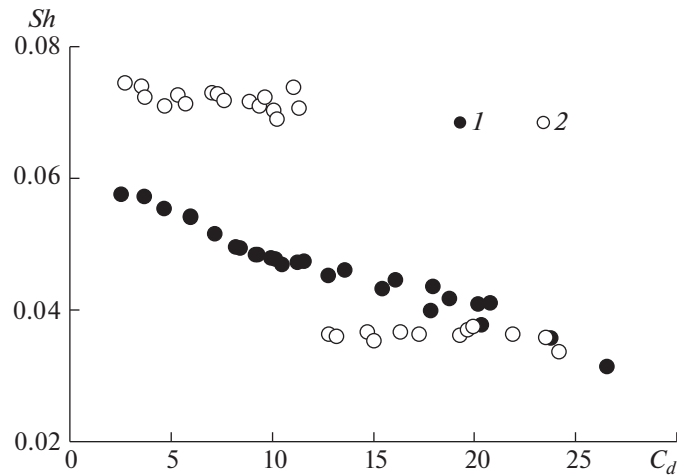


Рис. 9. Зависимость числа Струхали от поддува C_d для стальной (1) и дюритовой (2) напорных труб при давлении напора $P_0 = 0.1$ МПа и ширине выходного сечения сопла 15 мм.

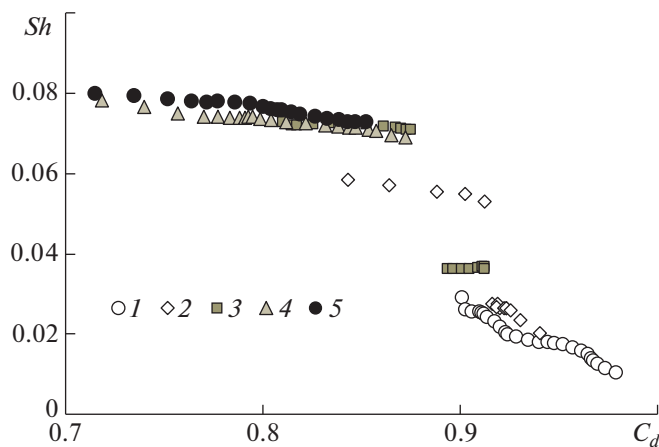


Рис. 10. Зависимость числа Струхали от коэффициента давления C_d для сопел с шириной выходного сечения 7, 10, 15, 20, 25 мм при $P_0 = 0.1$ МПа.

при постоянных прочих параметрах, меняется немонотонно – с ростом поддува интенсивность растет, достигает некоторого максимума, а затем уменьшается. Это связано с тем, что с ростом поддува газа среднее давление в камере приближается к давлению напора жидкости (другими словами, величина C_d приближается к 1). В процессе пульсаций происходит все более значительный прорыв газа в область перед кавитатором, это наблюдается визуально. Смена режимов колебаний, которая происходит при превышении некоторого порогового значения давления в камере, приводит к хаотизации процесса и уменьшению средней интенсивности пульсаций давления. В представленных экспериментах пороговая величина коэффициента C_d примерно равна 0.93.

Данные рис. 8б показывают, что интенсивность пульсаций давления в камере с уменьшением выходного сечения сопла H_e монотонно увеличивается во всем диапазоне поддувов газа C_q , однако интенсивность пульсаций давления на экране немонотонно зависит от ширины выходного сечения сопла H_e (см. рис. 8в) – наиболее интенсивное импульсное воздействие на экран зафиксировано не при наименьшей ширине выходного сечения $H_e = 7$ мм, а при $H_e = 15$ мм.

На рис. 9 представлена зависимость числа Струхали от поддува для сопла с шириной выхода $H_e = 15$ мм, при напоре $P_0 = 0.1$ МПа для первой и второй частотных мод автоколебаний. Отметим, что зависимости $C_d(C_q)$ для обеих мод одинаковы (здесь они не приводятся). Видно, что высокочастотная (вторая) мода в представленных экспериментах возникает при умеренных поддувах, при $C_q > 12$ происходит переход к низкочастотной (первой) моде. Имеется переходная зона (здесь не показана), где существуют обе моды колебаний. На рис. 10 приведены зависимости чи-

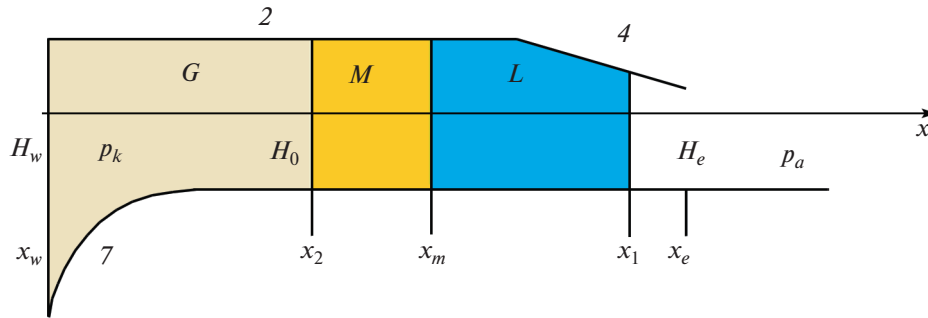


Рис. 11. Схема для численного расчета задачи о движении порции жидкости в канале сопла. Цифрами помечены детали сопла, аналогичные рис. 1, буквами: *L* – область, занятая жидкостью, *G* – газом, *M* – смесью газа и жидкости.

сел Струхалея от коэффициента давления C_d для всех исследованных сопел при одинаковом напоре $P_0 = 0.1$ МПа. Видно, что для сопел с различной шириной выходного сечения переход на другую моду происходит при приблизительно одинаковых значениях C_d .

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ

Рассмотрим развитый автоколебательный режим течения, будем считать, что жидкость истекает из сопла в виде отдельных порций. Оценку скорости истечения порции жидкости из сопла проведем с использованием модели, описанной ранее [6]. На рис. 11 показано расчетное сопло, геометрические параметры которого совпадают с экспериментальными (входная часть со скругленной нижней стенкой 7, участок постоянного сечения 2, линейно сужающаяся часть 4). Расчет начинается от входного сечения сопла (x_w), занятая жидкостью или смесью жидкости и газа область находится в интервале $[x_1, x_2]$, область $[x_2, x_m]$ занята двухфазной средой, образующейся за счет неустойчивости ускоренно движущейся границы раздела жидкость–газ. Заканчивается расчет при достижении передней границей порции жидкости выходного сечения сопла – x_e (см. рис. 11). Уравнения одномерного течения несжимаемой жидкости в трубе с учетом трения используются для расчета движения капельной жидкостью в области $[x_m, x_1]$ (*L* на рис. 11)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\lambda}{D_r} \frac{v^2}{2} \tag{3.1}$$

$$vF = Q(t), \quad F = hH(x)$$

Здесь v – скорость жидкости вдоль оси x , F – площадь прямоугольного сечения канала $F = hH(x)$, $Q(t)$ – объемный расход жидкости, $H(x)$ – ширина канала, заданная как функция x . Для коэффициента трения λ согласно формуле Альтшуля [9] можно написать (шероховатостью пренебрегаем, сечение канала есть прямоугольник со сторонами H и h , где $h = 9$ мм – расстояние между боковыми стенками плоской установки).

$$\lambda = 0.1 \left(\frac{100}{Re} \right)^{0.25}, \quad Re = \frac{vD}{\nu}, \quad D_r = 2 \frac{Hh}{H+h}$$

Область $[x_2, x_m]$, занятую двухфазной средой (*M*, на рис. 11), будем представлять как систему длинных пузырей, соединенных с каверной (как это имеет место в решении о развитии одноволновых релей-тейлоровских структур [10]). Давление в таких пузырях однородно и будем его считать равным давлению в каверне p_k . Полагая, что длина волны, определяющая размер пузырей, максимальна и равна характерному размеру сечения сопла H_0 (снарядный режим двухфазного течения в трубе) на основании той же работы [10], для скорости перемещения границы x_m можно написать

$$\dot{x}_m = v_m + 0.23 \sqrt{H_0 a \theta(a)}, \quad v_m = \frac{Q(t)}{F(x_m)}, \quad a = \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\dot{Q}}{F(x_m)} - v_m Q \frac{F'(x_m)}{F^2(x_m)} \tag{3.2}$$

В формуле (3.2) ускорение жидкости a умножается на функцию Хэвисайда $\theta(a)$, так как при $a < 0$ поверхность раздела газ–жидкость устойчива и развитие релей-тейлоровских структур не происходит.

Будем считать, что газ во время движения порции жидкости в сопле занимает объем Ω_k ограниченный на входе сечением, проходящем через кавитатор (I , на рис. 1) перпендикулярно боковой стенке 2 (считается, что перетеканием газа в область перед кавитатором можно пренебречь) и границами полости, куда производится поддув газа (на рис. 1 показана частично). Учитывается также объем части сопла, который занимает газ в процессе истечения порции жидкости. Последний легко вычисляется, если известны положение передней границы порции x_1 и объем порции несжимаемой жидкости. На стадии втекания порции жидкости в сопло при расчете объема Ω_k учитывается объем жидкой порции, который считается равным измеренным экспериментально среднему расходу жидкости Q_t , умноженному на период автоколебаний T (первая мода) или на два периода (вторая). Давление в каверне p_k будем считать однородным во всем объеме Ω_k . Кроме того, будем считать, что газ ведет себя изотермически. Тогда для массы газа M в объеме Ω_k можно написать следующие соотношения:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}, \quad M = \rho_g \Omega_k, \quad \rho_g = \rho_a p_k / p_a \quad (3.3)$$

Здесь \dot{m} – массовый расход поддуваемого в каверну газа, ρ_g, ρ_a – плотности газа при давлении p_k и при атмосферном давлении p_a . В работе [6] выписана система ОДУ, соответствующая предложенной выше постановке с начальными условиями: при $t = 0$, $Q = v_k F_w$, $p_k = p_a$, $x_1 = x_m = x_w$, $x_2 = x_w - L_m$. Здесь полагается, что в начальный момент давление в каверне равно атмосферному, скорость порции жидкости, втекающей в сопло, примем равной скорости жидкости на границе каверны при стационарном течении (обоснование такого предположения см. в работе [8] и более ранних). Примем для простоты, что площадь сечения жидкой порции в начальный момент равна площади входного сечения сопла $F_w = H_w h$, тогда характерный продольный размер жидкой порции на входе в сопло L_m может быть определен из условия $F_w L_m = Q_t T$.

На рис. 12 представлены данные расчетов и экспериментов для сопла с выходным сечением $H_e = 15$ мм при давлении напора $P_0 = 0.15$ МПа для двух частотных режимов течения. На рис. 12а даны зависимости от поддува интенсивности пульсаций давления в каверне. Для построения теоретических кривых выбиралась максимальная величина давления на интервале времени от начального ($t = 0$) до момента начала истечения жидкости из сопла наружу (при $x_1 = x_e$). Видно, что и количественно, и качественно эксперименты и расчеты хорошо согласуются. Нужно иметь в виду, что при поддувах, превышающих некоторое значение, соответствующее точками максимумов интенсивности пульсаций, существенным является увеличение объема каверны за счет выбрасывания газа в область выше кавитатора, что в теоретической постановке не учтено. Видно (рис. 12б), что скорость истечения в этих примерах может до 4 раз превосходить скорость стационарного истечения V_∞ (в расчетах V_e – скорость передней границы при $x_1 = x_e$), причем эта скорость при высокочастотном режиме выше, чем при низкочастотном. Это должно приводить к более интенсивному ударному воздействию на экран, что и подтверждается данными рис. 12в. С помощью расчетов можно оценить интенсивность перемешивания при ускоренном движении порции жидкости в канале. Для указанных на рис. 10 условий течения при изменении C_q от 6 до 20 в двухфазное состояние переходит от 6 до 15% первоначальной массы порции жидкости для первой моды и от 17 до 35% для второй моды. При этом во всех случаях капельная жидкость занимает бóльшую часть канала сопла в момент достижения передней границей x_1 выходного сечения x_e .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование зависимости от сужения сопла интенсивности ударного воздействия на препятствие периодических импульсных струй. Основные результаты получены для плоской рабочей части струйной установки с поступлением жидкости через щель шириной 25 мм в вентилируемую каверну, из которой вода и газ через сопло истекают в атмосферу. Длина сопла 35 мм, ширина входного сечения 60 мм, ширина выходного сечения варьировалась от 6 до 25 мм. Эксперименты проведены при различных величинах напора жидкости – величина осредненного избыточного давления P_0 изменялась от 0.05 до 0.2 МПа. При каждом значении напора

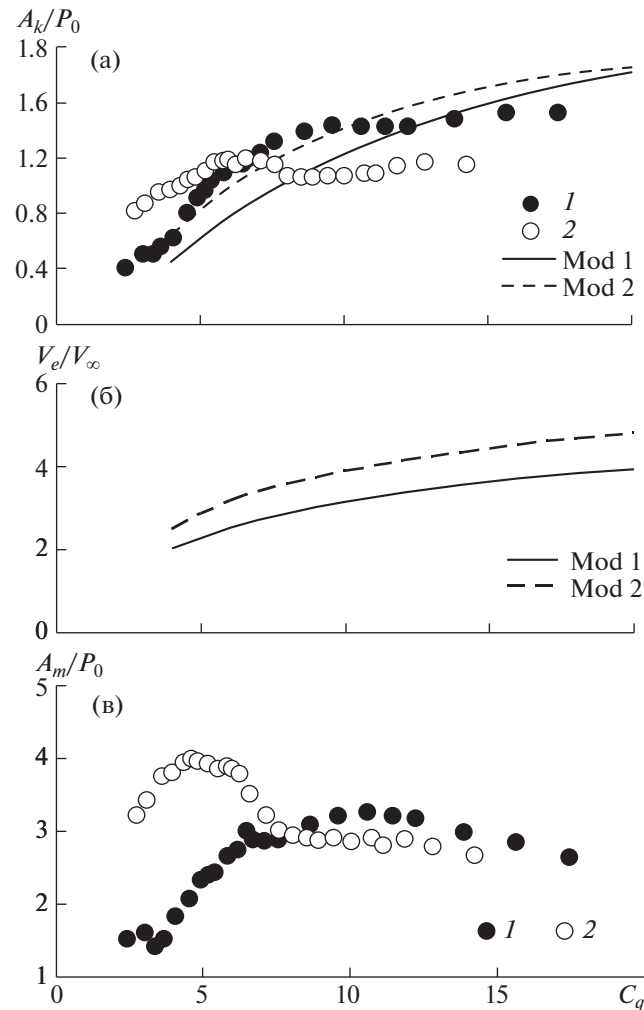


Рис. 12. Сравнение первой и второй частотных мод автоколебаний по интенсивности пульсаций давления в камере (а) (здесь же приведены результаты расчетов) и по амплитуде ударных импульсов на экране (б). Приведены также результаты расчетов скорости истечения порции жидкости из сопла v_e . (в).

коэффициент поддува газа в камеру C_q , равный отношению объемного расхода газа, поддуваемого в камеру к объемному расходу жидкости, менялся в диапазоне от 0 до 30.

Обнаружен режим, когда при сравнительно небольших поддувах, в отсутствие автоколебательных режимов, на экране-препятствии регистрируются значительные импульсы давления. Этот эффект может быть связан с дроблением струи в результате развития в хвостовой части камеры неустойчивых тейлоровских структур, масштаб которых сопоставим с шириной струи или канала сопла.

Показано, что с увеличением сужения сопла (с уменьшением величины H_e/H_0) в исследованном диапазоне число Струхала автоколебаний монотонно уменьшается, а коэффициент давления C_d и интенсивность пульсаций давления в камере возрастают. Осредненная на интервале времени каждой записи осциллограммы давления интенсивность импульсов давления в угловой точке экрана имеет максимум при $H_e/H_0 = 0.6$.

Проведены исследования нестационарного взаимодействия струи с экраном-препятствием для двух частотных мод автоколебаний (частоты различались примерно в 2 раза). Оказалось, что при одинаковых параметрах течения интенсивность импульсов давления в угловой точке экрана в случае автоколебаний второй частотной моды заметно превосходит интенсивность, измеренную для первой моды. Расчеты, проведенные в рамках одномерной модели, истечения из канала порции несжимаемой жидкости хорошо согласуются с экспериментальными наблюдениями.

Рассчитанные максимальные значения давления в каверне в процессе истечения жидкой порции из сопла удовлетворительно согласуются с измеренными величинами пульсаций давления в каверне. Рассчитанная скорость истечения порций жидкости из сопла для второй моды автоколебаний заметно превосходит скорость истечения для автоколебаний первой моды, что можно считать объяснением наблюдаемого в эксперименте возрастания интенсивности импульсного воздействия на преграду в режиме автоколебаний второй моды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Козлов И.И., Прокофьев В.В.* Закономерности развития волн на поверхности каверны с отрицательным числом кавитации // Доклады РАН. 2006. Т. 409. № 1. С. 43–47.
2. *Козлов И.И., Очеретяный С.А., Прокофьев В.В.* Автоколебательные режимы в жидкой струйной завесе, разделяющей газовые области с различными давлениями // Изв. РАН МЖГ. 2013. № 6. С. 33–43.
3. *Савченко Н.В., Яхно О.М.* Гидродинамические способы создания пульсирующих струй для гидроразрушения твердых материалов // Вестник Сумского гос. ун-та. Сер. Технические науки. 2003. № 12 (58). С. 92–98.
4. *Сигаев Е.А.* Исследование гидроотбойки угля пульсирующими струями // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Кемеров. горный ин-т. Кемерово. 1964. 21 с.
5. *Атанов Г.А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород / Под ред. Г.А. Атанов. Киев: Вища школа, 1987. 155 с.
6. *Прокофьев В.В., Очеретяный С.А., Яковлев Е.А.* Использование кавитационных автоколебательных режимов для генерации периодических импульсных струй // ПМТФ. 2021. Т. 62. № 1. С. 97–108.
7. *Козлов И.И., Прокофьев В.В., Пучков А.А.* Исследование развития волновых структур на неустойчивой границе каверны с помощью скоростной видеокамеры // Изв. РАН МЖГ. 2008. № 2. С. 137–148.
8. *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 МЖГ. 2019. № 3. С. 16–27.
9. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. И.Е. Идельчик. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.
10. *Герценштейн С.Я., Чернявский В.М., Штемлер Ю.М.* Об устойчивости Релея-Тейлора при больших значениях времени // Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. № 5. С. 8–18.