

УДК 532.5

О РАЗЛИЧНЫХ МОДАХ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ТЕЧЕНИЯХ С ВЕНТИЛИРУЕМОЙ КАВЕРНОЙ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

© 2019 г. И. И. Козлов^а, С. А. Очеретяный^а, В. В. Прокофьев^{а*}

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

*e-mail: prokof@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 18.09.2018 г.

После доработки 15.10.2018 г.

Принята к публикации 18.10.2018 г.

Рассматривается задача о возникновении кавитационных автоколебаний при течении жидкости в магистрали с двумя сопротивлениями: первое сопротивление кавитатор, за которым образована искусственная вентилируемая каверна со средним давлением, большим атмосферного, через второе сопротивление происходит истечение жидкости и газа в атмосферу. Исследования показали, что частоты автоколебаний в основном определяются свойствами каверны и условиями истечения в атмосферу. Возникновение различных мод автоколебаний непосредственно связано с числом волн, образующихся вдоль длины каверны. Показано, что свойства напорного трубопровода, а также объем каверны влияют на моду кавитационных автоколебаний (при одинаковой геометрии и гидравлических параметрах течения наблюдалось до 4-х частотных мод). Ставится вопрос о возможности использования автоколебаний для создания на выходе пульсирующих струй. Представляется наиболее подходящим для создания импульсных струй режим первой моды, так как в этом случае колебания давления в каверне максимальны. С использованием экспоненциального сопла Войцеховского экспериментально получены режимы, где на выходе реализуется прерывистое струйное истечение жидкости.

Ключевые слова: струйное течение, каверна, отрицательное число кавитации, неустойчивость Рэлея–Тейлора, кавитационные автоколебания, пульсационные технологии

DOI: 10.1134/S0568528119030071

В НИИ механики МГУ в течение ряда лет исследовалось течение жидкости с образованием вентилируемой газовой полости с повышенным по сравнению с внешним давлением (каверны с отрицательным числом кавитации) (см. [1]). Каверна образуется путем поддува газа за препятствие в гидравлической магистрали (кавитатор), длина каверны ограничена вторым сопротивлением, через которое происходит истечение жидкости и газа в атмосферу. При достаточно больших поддувах газа в каверну и небольших ее объемах (и присоединенных к полости подводящих воздух магистралей) возникают автоколебательные режимы с сильными пульсациями давления как в каверне, так и в подводящих воду системах [2]. Эксперименты проводились на плоской струйной установке, подробное описание которой дано в работе [2]. Вода в установку поступает из бака–демпфера, где пульсации давления выравниваются воздушной подушкой, подача воздуха в каверну регулируется вентилем, который работает в критическом режиме. Для этого на нем поддерживается большой перепад давления – давление в воздушной магистрали примерно 60 МПа, давление в каверне менее 10 МПа. Измерения проводились при условии, что коэффициент перепада давления на газовом вентиле был не менее 0.7 (заведомо критический режим). Таким образом, пульсационное течение имеет место в подводящей воду магистрали, в форкамере рабочей части установки и каверне. Схема плоской рабочей части установки показана на рис. 1. Течение жидкости и газа происходит в зазоре шириной 9 мм между двумя прозрачными толсто-стенными пластинами из оргстекла. Подача воды и поддув воздуха осуществляются по нормали к пластинам, вода из форкамеры 5 истекает через щель 2 шириной D между вертикальной стенкой и горизонтальной вставкой с острой кромкой (кавитатором 1). На рис. 1 показан вариант

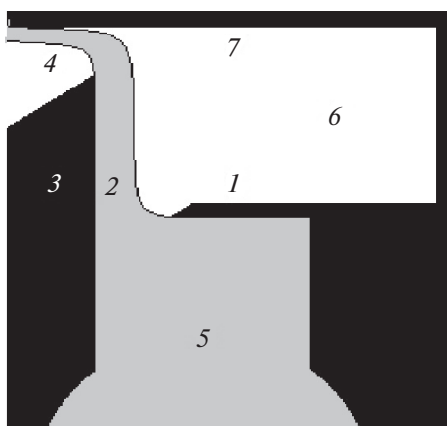


Рис. 1. Схема плоской рабочей части: 1 – пластина-кавитатор, 2 – щель между кавитатором и щитом, 3 – плоский щит, 4 – щель между щитом и экраном, 5 – форкамера, 6 – газовая полость, 7 – экран.

стационарного предельного (критического) струйного течения, когда истекающая в атмосферу через щель 4 шириной H струя касается горизонтального экрана 7.

Следует ввести еще один геометрический параметр течения – длину каверны L , равную сумме длины свеса щита 3 и ширины щели 4. Как было получено ранее [3], свес начинает влиять на критическое число кавитации при его длине, меньшей толщины истекающей из форкамеры струи (в нашем случае примерно $D/2$). Величина критического стационарного коэффициента давления в каверне при условии, что отношение величины свеса к D больше 0.5, в основном зависит от отношения H/D . Введем такие обозначения: \bar{p}_k, \bar{p}_0 – среднее давление в каверне и форкамере, p_a – наружное – атмосферное давление, коэффициент давления $C_d = (\bar{p}_k - p_a)/(\bar{p}_0 - p_a) = P_k/P_0$, характерные скорости стационарного истечения жидкости в атмосферу $V_\infty = \sqrt{2P_0/\rho_l}$ и на границе каверны $V_k = V_\infty \sqrt{1 - C_d}$, ρ_l – плотность жидкости, коэффициент поддува газа в каверну $C_q = Q_g/Q_l$, где Q_g и Q_l – объемные расходы поддуваемого в каверну газа и жидкости в струе, число Струхала $Sh = fD/V_\infty$, где f – частота колебаний. Отметим, что характерные скорости V_∞, V_k соответствуют стационарному течению, где постоянные давления в форкамере и каверне равны средним по времени величинам реального нестационарного течения. Указанных выше геометрических параметров, а также коэффициента давления C_d достаточно для теоретического определения режима плоского стационарного течения идеальной жидкости: истечение через щель 4 (рис. 1) либо по схеме с возвратной струйкой, либо с присоединением струи к экрану (критический режим), либо без взаимодействия с экраном (сверхкритический режим). При нестационарном режиме (строго говоря, рассматриваемое течение всегда нестационарно – наименьшие возмущения, связанные только с неустойчивостью Релея–Тейлора границы каверны, имеют место при околокритическом режиме) существенными становится объем каверны и параметры подводящей трубы (длина, скорость распространения волн давления). Исследования показали [2], что в нашем случае автоколебательные эффекты, по-видимому, связаны с взаимодействием двух колебательных систем – гидродинамика вентилируемой каверны и гидроакустика напорного трубопровода. Подобная ситуация возникновения сильных пульсаций давления в напорном водоводе гидроагрегата приведена в работе [4]. Ниже будут представлены примеры влияния на моды колебаний параметров напорной трубы, а также объема каверны. Было показано экспериментально [2], что моды колебаний связаны с количеством волн, образующихся на границе каверны. При этом скорость перемещения этих волн близка к введенной выше характерной скорости жидкости на границе каверны V_k . Это согласуется с имеющимся теоретическим решением работы [5]. Там показано, что при нестационарном истечении жидкости через щель из пространства, в котором имеется пульсирующий источник, на истекающей струе образуются волны, перемещающиеся со скоростью, равной средней скорости истечения жидкости.

Если период колебаний связать со временем прохождения волны вдоль каверны длиной L , и предположить, что скорость волн равна V_k , то для числа Струхала первой моды таких колебаний можно написать

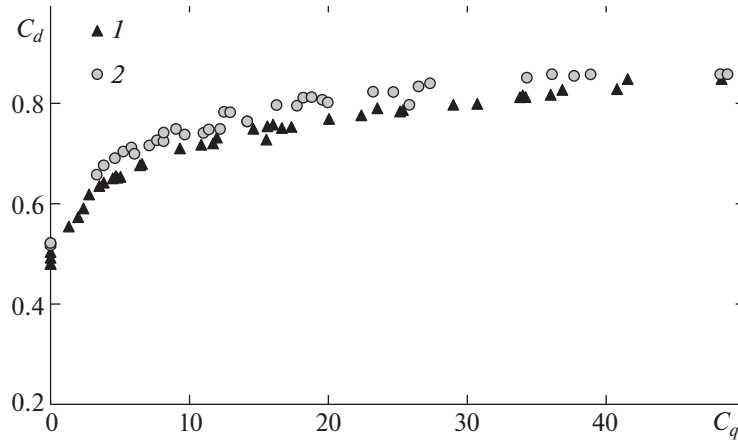


Рис. 2. Зависимости $C_d(C_q)$ для двух каверн различной длины: 1 – $L/D = 5.3$, 2 – $L/D = 3.2$ при одинаковых $H/D = 1.2$.

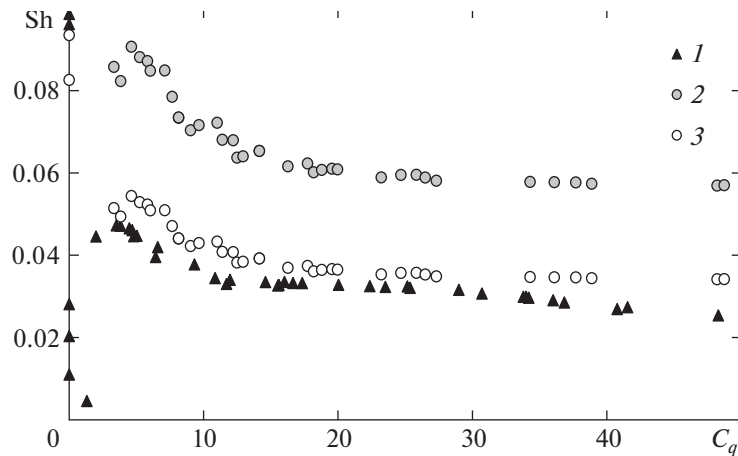


Рис. 3. Зависимости $Sh(C_q)$. Пересчет длины каверны по формуле (1) при одинаковых $H/D = 1.2$: 1 – $L/D = 5.3$, 2 – $L/D = 3.2$, 3 – путем пересчета частот для более короткой каверны на длинную (кривая 1) с коэффициентом, равным отношению длин каверн.

$$Sh = \frac{fD}{V_\infty} = \frac{DV_k}{LV_\infty} = \frac{D\sqrt{1-C_d}}{L} \quad (1)$$

В случае возбуждения более высоких мод число Sh формулы (1) нужно умножить на номер моды. Следует иметь в виду, что формулой (1) можно пользоваться, если время перемещения волны вдоль каверны значительно больше времени истечения порции жидкости через щель 4 (или сопло) и если граница каверны начинается на кромке кавитатора (в процессе колебаний не происходит прорыва воздуха в область перед кавитатором). Вообще же говоря, числа Струхала колебаний не должны превосходить полученные по формуле (1), так как период процесса равен сумме времени распространения волны вдоль каверны и времени истечения жидкости в атмосферу через второе сопротивление.

1. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ КАВЕРНЫ НА ЧАСТОТУ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Для давления напора $P_0 = 3$ МПа представлены данные для двух различных длин каверн $L/D = 5.3$ и 3.2 (см. рис. 2 и 3) при одинаковых $H/D = 1.2$ (следовательно, и при одинаковых C_d) различие во всем диапазоне поддувов порядка 1% (см. рис. 2). Напорные трубы – дюрит (внут-

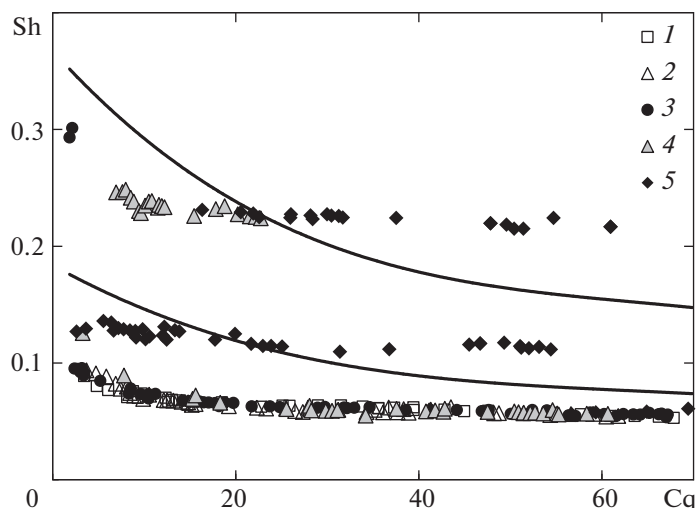


Рис. 4. Зависимости $Sh(C_q)$, влияние параметров напорных труб: 1 – стальная труба длиной 590 мм, 2 – отсутствие вставки (только стальные подводы к фланцам общей длиной 150 мм), 3–5 – дюритовые вставки длиной 160, 500 и 1000 мм.

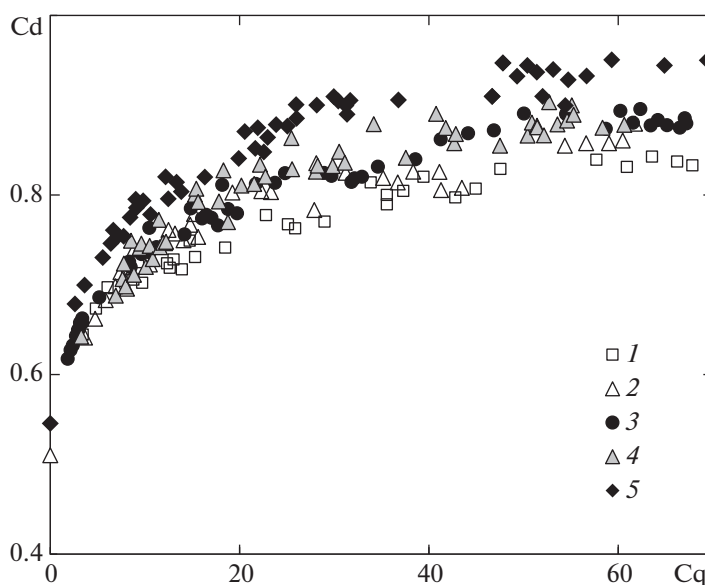


Рис. 5. Зависимости $C_d(C_q)$, влияние параметров напорных труб: 1 – стальная труба длиной 590 мм, 2 – отсутствие вставки (только стальные подводы к фланцам общей длиной 150 мм), 3–5 – дюритовые вставки длиной 160, 500 и 1000 мм.

ренный диаметр 50 мм) длиной 342 мм (для более длинной каверны) и 1000 мм (для более короткой), но в обоих случаях возбуждалась первая мода автоколебаний. Видно, что с ростом поддува увеличивается C_d , а Sh уменьшается в соответствии с формулой (1). Видно также, что частоты для более короткой каверны выше. Кривая 3 получена путем пересчета частот для более короткой каверны на длинную (кривая 1) с коэффициентом, равным отношению длин каверн (как следует из формулы (1)). Различие точек кривых 1 и 3 порядка 1%, что свидетельствует о том, что в приведенном примере эта формула применима. Таким образом, можно изменять частоту автоколебаний, изменяя расстояние от кавитатора до экрана (при прочих одинаковых параметрах).

Следует отметить, что наличие длинного свеса щита существенно – при его отсутствии доминирует механизм истечения (выбрасывания) порции жидкости из щели (или сопла). Например, на

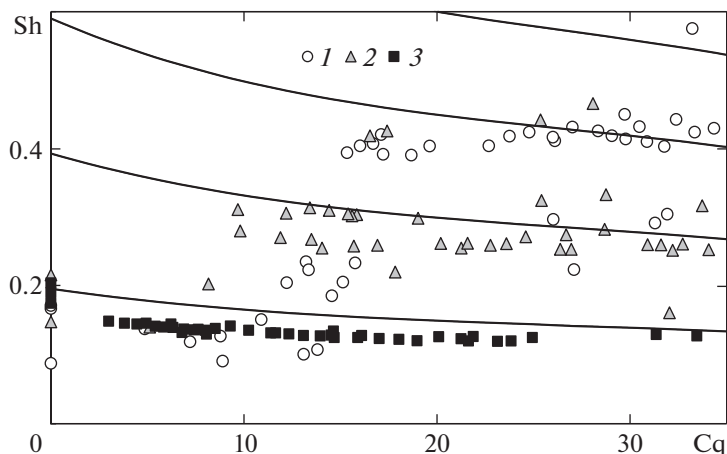


Рис. 6. Возникновение различных мод автоколебаний при одинаковых гидравлических условиях. Сплошные линии – расчет по формуле (1): 1 – эксперимент со стальной вставкой 1230 мм, $C_k = 11.66$; 2 – то же, но $C_k = 7.69$; 3 – эксперимент с дюритовой вставкой 1210 мм, $C_k = 11.66$.

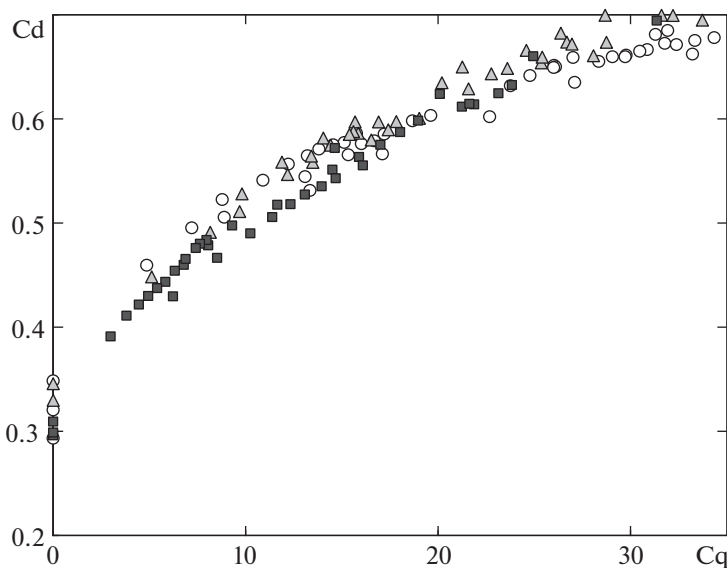


Рис. 7. Зависимости $C_d(C_q)$ для тех же условий, что на рис. 6.

возрастание давления в камере два этих механизма реагируют противоположно – если скорость распространения волны падает, то скорость выбрасывания порции, напротив, возрастает. В работе [1] при истечении струи из сужающегося сопла непосредственно в канал, с уменьшением ширины канала H , несмотря на существенное увеличение C_d , частота автоколебаний не зависела от H .

2. ВОЗНИКНОВЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МОД КАВИТАЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Эксперименты показали, что при одинаковых параметрах могут реализовываться различные моды колебаний. В предыдущей работе [2] был приведен пример, показывающий влияние длины напорной трубы и ее акустических свойств на возникновение двух мод автоколебаний. Экс-

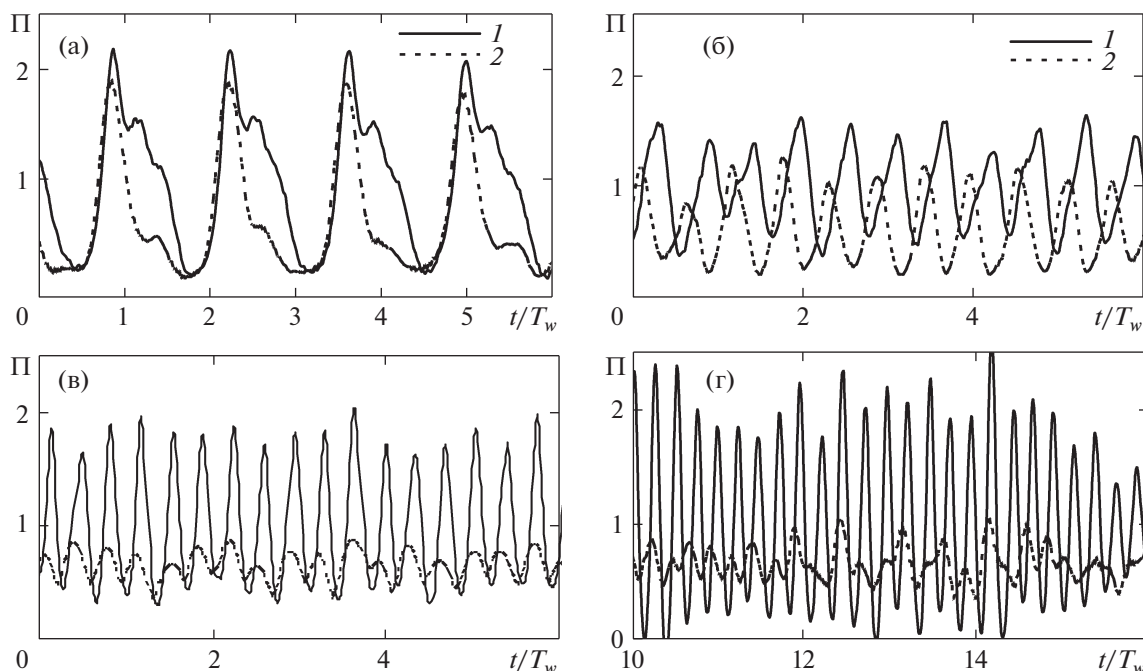


Рис. 8. Первая–четвертая моды (а–г) автоколебаний: 1, 2 – осциллограммы давления в форкамере и каверне; $\Pi = (p - p_a)/P_0$.

перименты были проведены при среднем избыточном давлении в форкамере $P_0 = 2$ МПа. Использовались трубы внутренним диаметром 50 мм (толщина стенок 5 мм). Материал труб – сталь (скорость распространения волн давления ~ 1400 м/с) и дюрит (менее 100 м/с). Плоская рабочая часть (рис. 1) имела размеры $L = 80$ мм, $H = 30$ мм, $D = 25$ мм. Цифрами на рис. 4 и 5 обозначены результаты для различных труб-вставок: 1 – стальная труба длиной 590 мм, 2 – отсутствие вставки (оставались только стальные подводы к фланцам общей длиной 150 мм), 3–5 – дюритовые вставки длиной 160, 500 и 1000 мм соответственно. Кривые, нанесенные сплошными линиями на рис. 4, построены по числам Струхалия, вычисленным по формуле (1) (использовались значения C_d , приведенные на рис. 5) для экспериментальных данных, полученных для течения с дюритовой трубой-вставкой длиной 1000 мм. Данные для второй моды получены с использованием коэффициента 2 в формуле (1). Имеется согласование расчетов по формуле с непосредственными измерениями числа Струхалия для этого случая. По крайней мере, имеется возможность разделить случаи возбуждения различных мод автоколебаний.

Из данных рис. 4 следует, что низкочастотная мода автоколебаний возбуждается для всех испытанных стальных труб, а для дюритовых только длиной меньших 500 мм. Для более длинных дюритовых труб возбуждается вторая мода. Для дюритовой трубы длиной 500 мм вторая мода возникает при умеренных поддувах ($C_q \approx 6$), а при $C_q > 23$ возникает режим первой моды (частоты автоколебаний совпадают с более короткими дюритовыми и со стальными трубами). Для дюрита длиной 1000 мм вторая мода возникает при $C_q > 20$ и происходит переход на первую моду при очень больших поддувах. Кроме того, в этом диапазоне при тех же параметрах может возбуждаться и первая мода (это похоже на явление гистерезиса, описанное в работе [7]). Частота первой моды для 1000 мм дюрита в диапазоне существования двух режимов оказалась несколько выше, чем для других представленных случаев – это пока не нашло объяснения. Ниже будет показано, что на моду колебаний (а не только на амплитуду) влияет и объем каверны. Введем еще один параметр – площадь каверны S_k (для плоского течения), а в качестве характерной величины для истекающей через щель шириной H струи введем площадь HD , безразмерный коэффициент, характеризующий площадь каверны, – $C_k = S_k/HD$. В рассмотренном выше примере $C_k = 16.14$. На рис. 6 и рис. 7 приведены данные, аналогичные рис. 4 и рис. 5 для такого же давления напора $P_0 = 2$ МПа, но с увеличенной шириной щели $H = 54$ мм (длина каверны $L = 104$ мм).

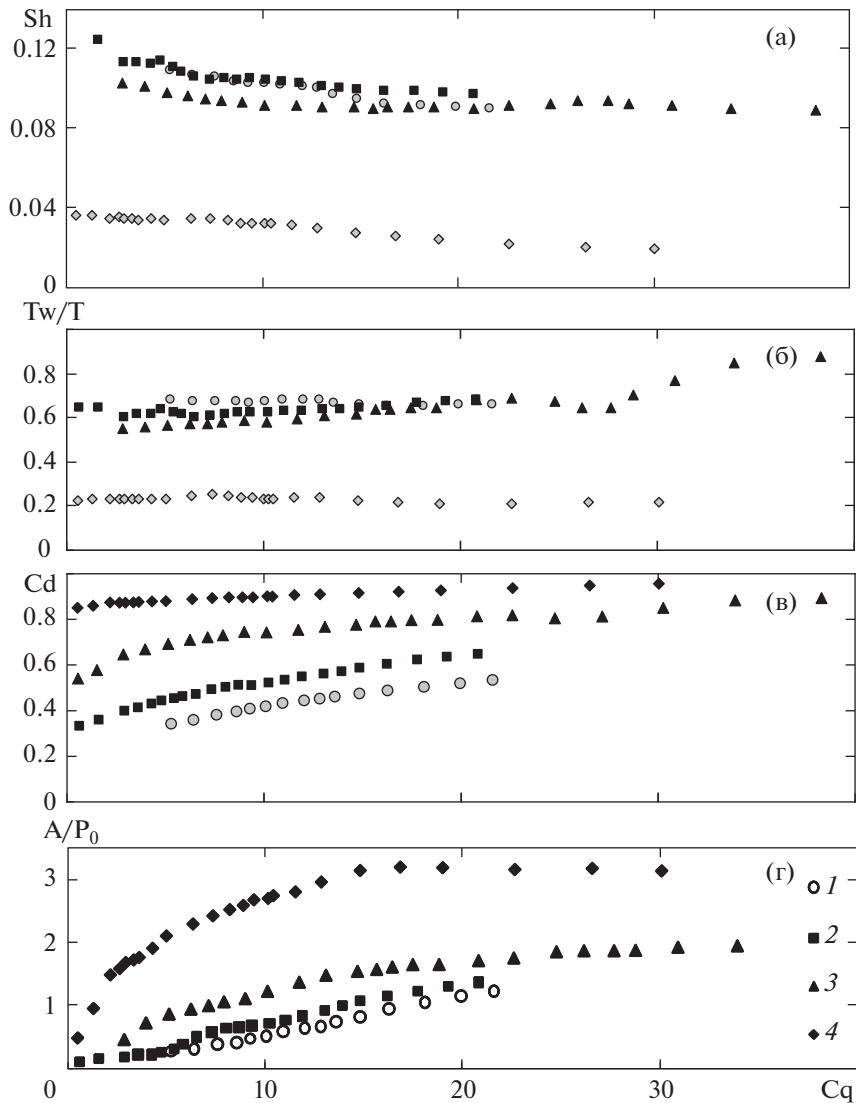


Рис. 9. Зависимости числа Струхала (а), отношения времени прохождения волны к периоду автоколебаний (б), коэффициента давления (в) и относительного размаха пульсаций давления (г) от коэффициента поддува (C_q): $H = 76, 54, 30, 10$ мм (1–4).

В этом случае меняется C_k ($C_k = 11.66$) и значительно уменьшается C_d (сравним рис. 5 и рис. 7). Здесь цифрами обозначено: 1 – эксперимент со стальной вставкой 1230 мм, $C_k = 11.66$; 2 – то же, но $C_k = 7.69$; 3 – эксперимент с дюритовой вставкой 1210 мм, $C_k = 11.66$. Сплошными линиями показаны зависимости, следующие из формулы (1) для 1–4 моды. Имеется значительное качественное отличие от представленного на рис. 4 материала. Видно, что в случае дюритовой подводящей трубы (рис. 6, эксперимент 3) только первая мода возбуждается устойчиво. Для стальной (рис. 6, эксперимент 1) при сравнительно небольших поддувах также возбуждается первая мода, но с ростом поддува ($C_q > 15$) происходит переход на третью моду (при тех же условиях может существовать и вторая мода, и даже четвертая). При уменьшении с помощью вставки площади каверны (рис. 6, эксперимент 2) колебания с той же стальной трубой переходят на вторую моду. Ранее [1] было показано, что объем каверны влияет на интенсивность автоколебаний, оказалось, что он может влиять и на возбуждение различных частотных мод.

Несмотря на качественное различие нестационарных характеристик течения, средние параметры (см. рис. 7) практически не зависят от моды колебаний (отличие не более 6.5%).

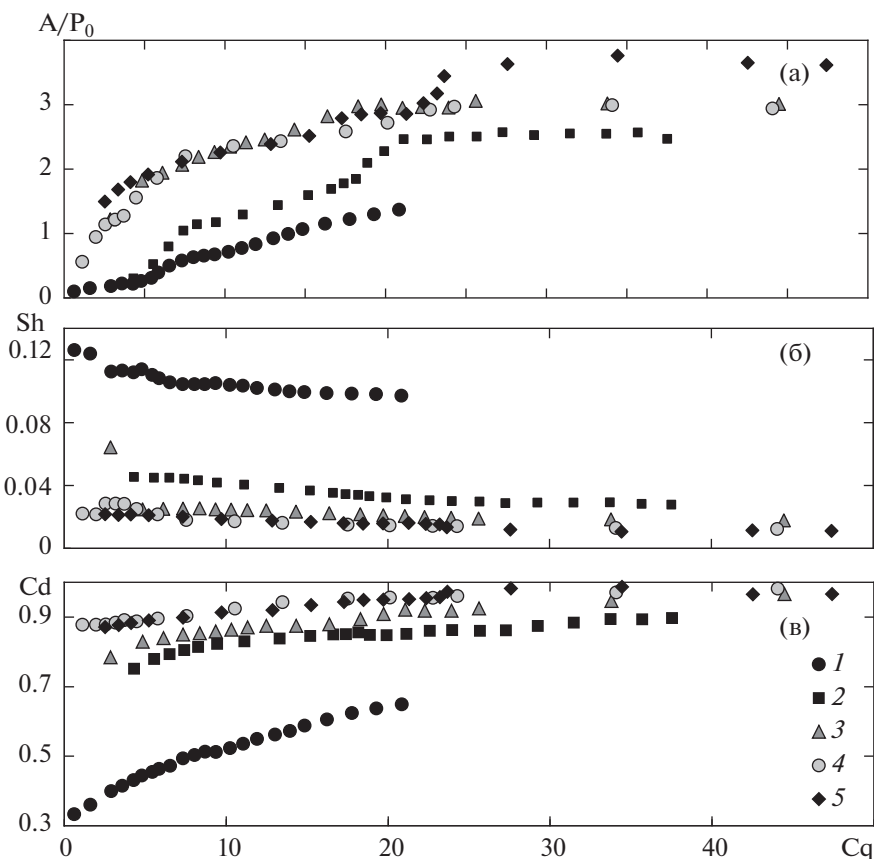


Рис. 10. Зависимости относительного размаха пульсаций давления (а), числа Струхалия (б) и коэффициента давления (в) от коэффициента поддува (C_q): $H_2 = 20, 10, 5, 7$ мм (2–5), 1 – истечение через щель $H = 54$ мм.

Осциллограммы пульсаций давления в форкамере (сплошные линии) и в каверне (штрихи), представленные на рис. 8, показывают структуру автоколебаний при возбуждении различных мод. Здесь избыточное давление отнесено к P_0 , а время к времени распространения волны вдоль длины каверны ($T_w = L/V_k$). Осциллограммы получены для $P_0 = 3$ МПа, $C_q \approx 20$, а для 4-й моды (рис. 5г) для $P_0 = 2$ МПа, $C_q \approx 30$. Видно, что время T_w очень близко к периоду автоколебаний первой моды (рис. 8а). Периоды остальных мод близки к целым долям первой моды. Сравнение кривых, полученных с использованием формулы (1) с экспериментом (рис. 6), показывает неплохое соответствие для рассматриваемого случая. Наибольшая амплитуда колебаний давления в каверне наблюдается при возбуждении первой моды, причем в этом случае колебания давления в каверне и форкамере одинаково интенсивны. Для более высоких мод характерно уменьшение интенсивности колебаний в каверне и относительный рост колебаний давления в напорной магистрале (правда, для 2-й моды наблюдались режимы как с приоритетом колебаний в форкамере, так и в каверне). Если ставить задачу получения наиболее интенсивных струй, истекающих в атмосферу, представляются наиболее подходящими режимы, когда происходит возбуждение первой моды. В дальнейшем будет изучаться именно этот режим.

3. СВЯЗЬ ЧАСТОТЫ И ИНТЕНСИВНОСТИ АВТОКОЛЕБАНИЙ С ПАРАМЕТРАМИ ВЫХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Для изучаемого типа рабочей части (рис. 1) процесс разбивается на две стадии – распространение жидких волн со скоростью V_k от кавитатора до экрана и истечение порций жидкости в атмосферу под действием избыточного давления в каверне. Очевидно, что для увеличения максимальной скорости истечения в атмосферу нужно стремиться к увеличению пульсаций давления в каверне. Были проведены исследования зависимости параметров пульсаций давления в каверне от величины параметра H (с уменьшением H растет гидравлическое сопротивление на выходе,

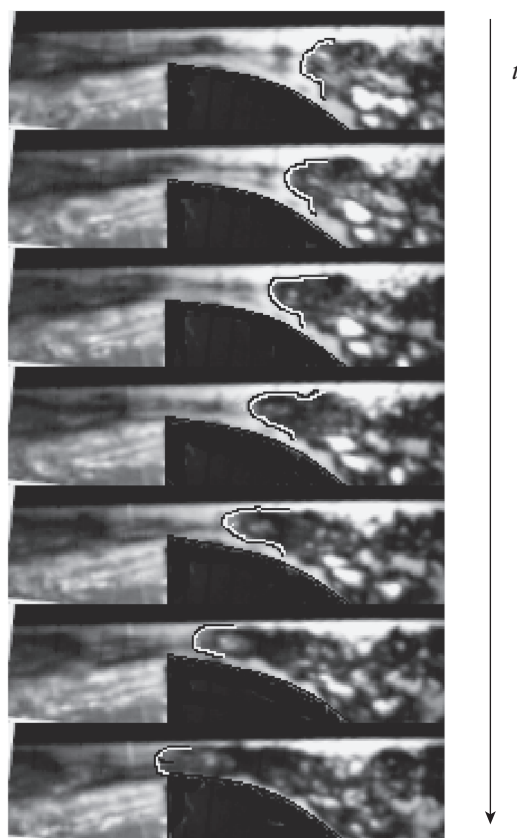


Рис. 11. Видеограмма истечения порции жидкости через плоское сопло: $H_2 = 5$ мм; шаг кадров 0.27 мс; t – время.

увеличивается среднее давление в каверне) при одинаковых прочих геометрических характеристиках. На рис. 9 (а–г) представлена обработка экспериментов, проведенных при $P_0 = 3$ МПа, $D = 25$ мм, свесе щита 50 мм и $H = 76, 54, 30, 10$ мм (точки 1–4 соответственно). С увеличением H растёт длина каверны, но и увеличивается коэффициент давления C_d – из формулы (1) следует, что имеется максимум частоты в зависимости от H (изменение C_d в зависимости от H может быть оценено теоретически для стационарного течения). По этой причине частоты при $H = 76$ и 54 мм практически совпадают (см. рис. 9а) – это фактически максимальные частоты в зависимости от H . При уменьшении H имеется монотонное уменьшение частоты. На рис. 9б представлены зависимости отношения времени прохождения волны вдоль каверны к периоду автоколебаний $\tau = T_w/T$. Видно, что эта величина везде меньше 1. Сильное уменьшение τ при $H = 10$ связано не столько с уменьшением скорости V_k при высоких величинах C_d (см. рис. 9в), сколько с увеличением интенсивности пульсаций давления в каверне (см. рис. 9г) и, как следствие, появлением эффекта прорыва воздуха из каверны в форкамеру, что приводит к значительному увеличению эффективной длины каверны. Данные рис. 9г показывают, что относительный размах пульсаций давления в каверне $A' = A/P_0$ (A – осредненная по времени наблюдения разность максимума и минимума давления за период колебания) действительно растёт с уменьшением H , как и среднее давление в каверне. При $H = 10$ мм размах пульсаций давления более чем в 3 раза превосходит средний перепад давления P_0 в гидравлической системе (рис. 9г), максимум пульсаций здесь достигается при C_d больше 15. С возрастанием поддува коэффициент давления C_d приближается к 1 и воздух из каверны начинает проникать в напорную магистраль. Однако, с точки зрения получения наибольшей скорости выброса порций жидкости наружу, этот предельный режим представляется наиболее подходящим. Отметим, что при истечении наружу через щель (как это показано на рис. 1) струи на выходе не получается – происходит интенсивное разбрызгивание жидкости.

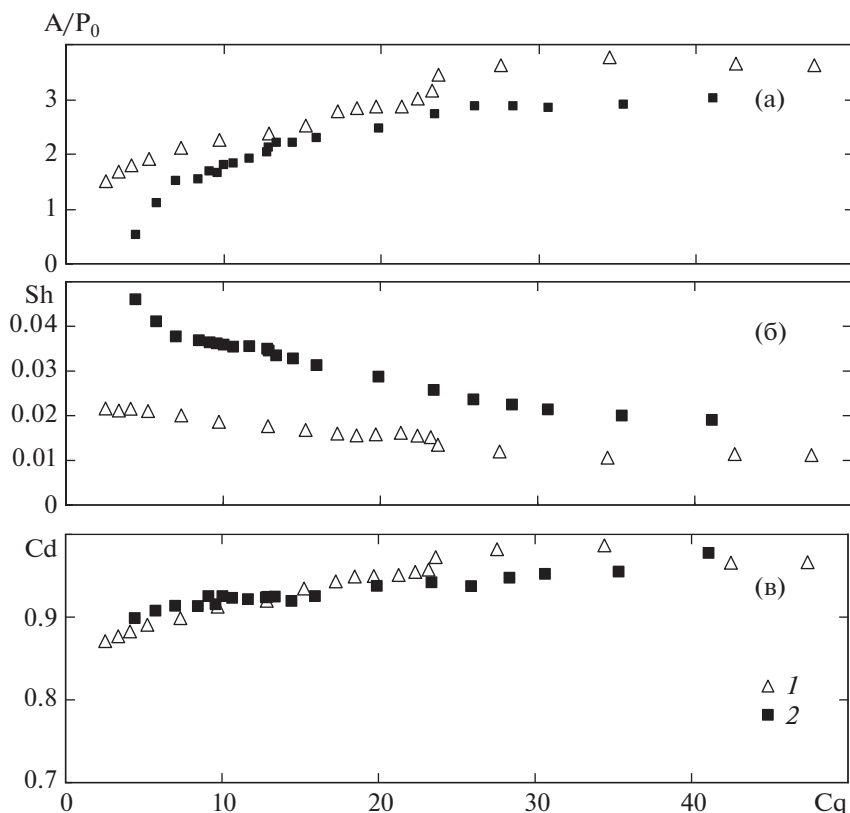


Рис. 12. Зависимости относительного размаха пульсаций давления (а), числа Струхала (б) и коэффициента давления (в) от коэффициента поддува (C_q). Сравнение гидродинамических характеристик течения для двух сопел с одинаковыми $H_2 = 7$ мм, но с различной ориентацией: 1 – как на рис. 1; 2 – параллельно линии свеса.

4. АВТОКОЛЕБАНИЯ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ СОПЛО ВОЙЦЕХОВСКОГО

С целью получения на выходе в атмосферу пульсирующей струи было использовано сопло Войцеховского. В [8] предложена теория гидропушки, построенная в предположении, что жидкость идеальна и несжимаема, ее движение квазиодномерное, предполагается, что давление при выстреле остается постоянным. Была найдена необходимая форма профиля сопла и получены распределения скорости и давления в сопле – при этом ускоряется только передняя часть втекающей в сопло воды, а основная масса воды тормозится, передавая свою энергию передним частицам жидкости. Здесь проявляется пространственное перераспределение энергии при нестационарном движении жидкости.

Эта теория была использована для выбора профиля плоского сопла. Полагалось, что выбрасываемая наружу за один акт масса жидкости соответствует массе, протекающей за один период, начальная скорость массы равна V_k . Считалось, что истечение жидкости через щель, образуемую кромкой кавитатора и вертикальным щитом (первое сопротивление), квазистационарно с коэффициентом расхода 0.611. Использовалась та же рабочая часть (рис. 1), одна из стенок сопла – плоский горизонтальный экран 7, криволинейная часть сопла пристыковывалась к выходной кромке вертикального свеса 3.

Тогда форма сопла описывается следующим образом:

$$H(x) = H_1 \exp(-bx), \quad b = \frac{0.611(L + H_1)}{DH_1} \quad (2)$$

Здесь x – координата, отсчитываемая от входного сечения 4 вдоль горизонтального экрана, $H(x)$ – текущее расстояние между криволинейной границей сопла и экраном, $H_1 = 50$ мм – входное сечение сопла, длина сопла определялась заданием ширины выходного сечения H_2 . Данные для 4 значений H_2 представлены на рис. 10 (а–в) при $P_0 = 3$ МПа. Здесь (также как и при истече-

нии через щель) можно видеть увеличение параметра C_d при уменьшении величины H_2 . Когда $H_2 = 5$ мм, среднее давление в каверне столь близко к среднему давлению в форкамере. Это в процессе пульсаций происходит прорыв воздуха из каверны в форкамеру (а в этом случае даже в напорный трубопровод), что снижает пульсации уже при умеренных поддувах. Максимальная амплитуда наблюдалась при ширине выходного сечения $H_2 = 7$ мм при коэффициентах поддува, больших 20 (кривая 5 на рис. 10а). Интенсивность пульсаций достигает того же уровня, что и для щели 10 мм (кривая 4, рис. 9г). Для сравнения представлены данные при истечении через щель 54 мм (кривая 1 на рис. 10).

С помощью скоростной видекамеры Motion BLITZ при скорости 3700 кадр/с удалось получить картину перемещения переднего фронта порции жидкости в сопле Войцеховского с шириной выходного сечения $H_2 = 5$ мм (рис. 11). Условия истечения таковы: характерная скорость истечения $V_\infty = 10$ м/с, $C_d = 0.93$, $C_q = 8$, частота $f = 8$ Гц. Последовательность семи кадров (шаг по времени 27 мс) иллюстрируют процесс истечения очередной порции жидкости из сопла. На кадрах черный цвет внизу – плоский профиль сопла Войцеховского, сверху плоский экран. Головная часть порции выбрасываемой жидкости выделена черно-белой линией. Обработка видеogramм для нескольких периодов показывает, что скорость передней части порции жидкости превосходит примерно в 3.5 раза скорость стационарного истечения. Это фактор увеличивает воздействие на препятствие. Здесь главное – это возможность организовать периодический выброс отдельных масс, который при взаимодействии с препятствием может сопровождаться явлением гидроудара со значительно большим давлением, чем при стационарном взаимодействии. Такой результат обнадеживает, тем более, что предложенная геометрия течения отнюдь не является оптимальной – при развороте на 90° жидкая масса сначала ударно взаимодействует с экраном, а потом выбрасывается через сопло. На рис. 12а–12в представлены результаты для двух различных ориентаций сопла с одинаковой шириной выходного сечения 7 мм, одно с разворотом струи на 90° (рис. 12, кривые 1), во 2-м случае (рис. 12, кривые 2) плоский экран расположен вдоль направления течения струи (экран соприкасается с горизонтальной границей полости каверны по окружности). Вертикальный свес 3 (рис. 1) тот же, но сопло ориентировано относительно нового положения экрана. В связи с изменением границы полости, уменьшился объем каверны, и уменьшилась характерная ее длина L . Итак, на рис. 12а – в цифрой 1 помечены данные для сопла, повернутого на 90° к линии свеса 3 (рис. 1), цифрой 2 – для сопла, ориентированного параллельно свесу. Среднее давление в форкамере P_0 для обоих опытов 4 МПа.

Видно, что C_d для этих двух случаев весьма близки, что свидетельствует о близости выходных сопротивлений. Амплитуды пульсаций немного отличаются, но также близки. Различие в частотах можно объяснить изменением эффективной длины каверны

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано течение с образованием каверны с отрицательным числом кавитации за гидравлическим сопротивлением (кавитатором), длина каверны ограничена вторым гидравлическим сопротивлением (щель или сопло). Обнаружено, что при одинаковых гидравлических условиях возникающие автоколебания различны в зависимости от свойств подводящей трубы и объема каверны. Частота колебаний определяется свойствами кавитационного течения, а акустика напорного трубопровода и объем каверны могут влиять на возбуждение различных частотных мод.

Показано, что наличие на выходе экспоненциального сопла Войцеховского не нарушает автоколебательного характера течения. Показана возможность использования сопла для формирования периодических импульсных струй.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-01-00040.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. *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 МЖГ. 2016. № 2. С. 32–43.
3. *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.
4. *Курзин В.Б.* Низкочастотные собственные акустические колебания в проточной части гидротурбин // ПМТФ. 1993. № 2. С. 96–105.
5. *Толоконников С.Л.* Истечение жидкости через щель в плоской стенке при наличии источника переменной интенсивности на плоскости симметрии течения // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика. Механика. 2017. № 3. С. 40–45.
6. *Козлов И.И., Очеретяный С.А., Прокофьев В.В.* Экспериментальные исследования автоколебательных режимов при истечении жидкой струи в плоский вентилируемый канал // Изв. РАН. МЖГ. № 4. 2011. С. 47–58.
7. *Шкапов П.М., Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Дорошенко С.А.* О гистерезисном характере развития автоколебаний в гидрوليнии с ограниченной искусственной газовой каверной на выходе // Наука и образование. Электронное науч.-техн. изд. 2013. № 10.
8. *Войцеховский Б.В., Лаврентьев М.А., Антонов Э.А.* Вопросы теории и практики импульсных водяных струй. СО АН СССР. Ин-т гидродинамики, 1960. 26 с.