

УДК 532.5

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАВИТАТОРА И СОПЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ

© 2023 г. С. А. Очеретяный<sup>а,\*</sup>, В. В. Прокофьев<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup>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 22.12.2022 г.

После доработки 13.04.2023 г.

Принята к публикации 06.06.2023 г.

Для создания генератора периодических импульсных струй используется режим кавитационных автоколебаний в гидравлической системе, содержащей вентилируемую каверну с отрицательным числом кавитации. Исследовано влияние параметров кавитатора и выходного сопла генератора на интенсивность ударного воздействия истекающей жидкости на экран, расположенный перпендикулярно направлению истечения струй. Получено, что увеличение длины сопла может значительно увеличить эффективность генератора, а плавное сужение канала перед кавитатором может способствовать увеличению рабочего диапазона генератора в сторону больших поддувов газа. Показано, что имеет место масштабный эффект — с ростом давления напора жидкости относительная интенсивность автоколебаний падает, однако имеет тенденцию к выходу на горизонтальную асимптоту.

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

**DOI:** 10.31857/S1024708422600981, **EDN:** OGFLMM

Исследования течений жидкости в присутствии вентилируемой каверны с отрицательным числом кавитации, проведенные в Институте механики МГУ [1–3], показали, что при определенных условиях в гидравлической системе возникают кавитационные автоколебания с высокой интенсивностью пульсаций давления, как в каверне, так и в области выше по течению. Этот режим может быть использован при создании генератора импульсных струй. Наиболее очевидное применение такой генератор может найти в технологиях водоструйной разработки полезных ископаемых. Современные исследования показывают, что производительность водоструйных технологий быстро возрастает при увеличении давления воды. Однако получение стационарных струй с высокими параметрами сопряжено с большими техническими трудностями. Все большее распространение получают пульсирующие и импульсные струи жидкости высокого давления, эффективность которых значительно превышает стационарные струи. В монографии [4] приводится обзор исследований задачи импульсной генерации высоконапорных струй. Для получения струй с очень высокими параметрами обычно применяют импульсные водометы (жидкость получает импульс за счет удара ускоряемого пороховыми газами поршня) и гидропушки (жидкость в стволе ускоряется вместе с поршнем). Отметим, что наиболее близкое отношение к рассматриваемой в настоящей статье теме имеет схема безпоршневого импульсного водомета — жидкая масса ускоряется непосредственно газом. Расчеты и эксперимент [4, 5] показали, что скорость таких струй может достигать 1600 м/с при достаточно большой дальности при истечении, как в воздух, так и в затопленное водой пространство. Отметим, что применение такого способа для создания режима периодических импульсных струй затруднительно из-за сложности “перезарядки” устройства.

При более умеренных скоростях высоконапорные гидроструи находят применение при разработке полезных ископаемых, таких как уголь, руда. Исследования способов разрушения материалов струями, проводимые различными научными коллективами (см. [6]), показали, что их эффективность сильно зависит от характера прилагаемых нагрузок: статические (непрерывные) или динамические (пульсирующие), которые создаются струей жидкости, воздействующей на разрушаемый объект. Исследования [6] показали, что происходит заметный рост производи-

тельности струйных установок, использующих пульсирующие технологии, а также снижение удельной энергоемкости разрушения материалов и снижение потребления воды, что обеспечивает допустимую влажность добываемого полезного ископаемого. Для успешного применения гидроимпульсного способа разрушения, обеспечивающего создание повторно-переменных нагрузок, необходимы эффективные и удобные в эксплуатации устройства, формирующие импульсные струи требуемых параметров. В [6] приводится обзор устройств, способных обеспечивать пульсационный режим работы струйных установок. В том числе описывается воздушный пульсатор, где прерывистость течения создается за счет периодического введения порций воздуха в струю жидкости. Как правило, в таких установках для организации пульсирующих режимов работы используются механические устройства.

В настоящее время известны примеры струйного течения в гидравлической системе, где имеют место устойчивые интенсивные кавитационные автоколебательные режимы при постоянных параметрах, подаваемых в систему воды и воздуха, без каких-либо механических систем, возбуждающих колебания [2, 7]. При определенных условиях реализуется развитый автоколебательный режим, близкий к прерывистому течению с весьма малым потреблением жидкости, который может быть использован для организации генерации периодических импульсных струй.

Изучение механизма автоколебаний показало, что важным фактором является фазовый сдвиг колебаний давления в форкамере и каверне; так, на осциллограмме перепада давления на кавитаторе на каждом периоде формируются два импульса — положительный импульс способствует истечению дискретной жидкой массы, благодаря отрицательному импульсу истечение прекращается или даже имеет место выброс газа из каверны в форкамеру (описание и схему установки см. ниже, в п. 1). В настоящей работе исследуются автоколебательные режимы в гидравлической магистрали, содержащей сопротивление (кавитатор), вентилируемую газовую каверну и сужающийся канал (сопло), через который жидкость и газ истекают в атмосферу. При умеренных поддувах газовая полость удерживается в области за кавитатором, но с ростом поддува воздуха пульсации, а также среднее давление в каверне увеличивается и происходит все более значительный выброс воздуха в область перед кавитатором — при этом автоколебания продолжают, но происходит заметное изменение их параметров. Важным параметром является соотношение гидравлических сопротивлений кавитатора и сопла. При большом сопротивлении кавитатора, когда ширина втекающей в каверну струи меньше ширины минимального сечения сопла, автоколебания наблюдаются только при значительных поддувах воздуха в каверну. При уменьшении сопротивления кавитатора режим колебаний с выбросом газа в подводящую воду магистраль сдвигается в сторону меньших поддувов газа. Было проведено изучение масштабного эффекта в диапазоне давлений напора жидкости от 0.05 до 0.4 МПа. Экспериментальные данные показали, что величина интенсивности пульсаций давления в каверне, отнесенная к давлению напора, уменьшается с ростом напора, однако имеет тенденцию к выходу на горизонтальную асимптоту, что хорошо согласуется с результатами теоретических расчетов.

## 1. ПЛОСКАЯ СТРУЙНАЯ УСТАНОВКА

Схема плоской модели кавитационного генератора импульсных струй показана на рис. 1: струя истекает из форкамеры 1 через зазор  $D = 10$  мм между кромкой кавитатора 2 и прямолинейной стенкой канала. За кавитатором образуется вентилируемая газовая полость 3. Сопло установки состоит из входной части (окружность радиусом 10 мм), канала шириной  $H_0 = 10$  мм 4 и линейно сужающейся части 5 с шириной выходного сечения  $H_e = 6$  мм. Перед кавитатором может стоять конфузор (6), на выходе из сопла коллиматор — насадок постоянного сечения 7. На рис. 1 схематически показано стационарное идеальное течение жидкости с замыканием каверны на твердой стенке. Экспериментальные данные получены при давлении напора жидкости 0.1 МПа. Исследована зависимость интенсивности ударных воздействий на экран от дистанции до экрана, а также от длины сопла (изменялась длина центральной части сопла или длина концевой насадки (коллиматора)). Также проведены исследования влияния формы кавитатора на интенсивности ударного воздействия на экран, установленный перпендикулярно направлению истечения струй из генератора. Проводилась запись осциллограмм пульсаций давления в форкамере, каверне и в угловой точке 8, где происходит ударное взаимодействие струи с плоской стенкой — экраном 9 (описание экспериментальной аппаратуры дано в [8]).

В качестве гидравлических характеристик течения использовались осредненные по времени величины давлений в форкамере и каверне, а также измеренные в стационарных условиях расходы в подводящих жидкость и газ магистралях. По осциллограммам давления определялась ведущая частота автоколебаний, а также средняя за период записи осциллограммы интенсивность

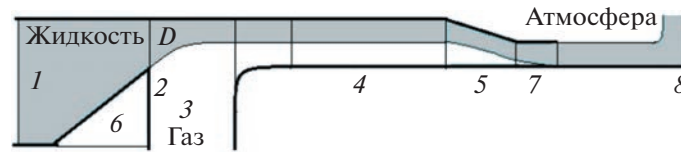


Рис. 1. Схема плоской струйной установки.

пульсаций давления в форкамере  $A_0$ , каверне  $A_k$  и интенсивность ударных импульсов  $A_m$  в угловой точке экрана 8 (см. рис. 1). Средняя амплитуда пульсаций давления определялась следующим образом: на каждом периоде колебаний определялась разность максимального и минимального значений давления, затем находилась средняя величина по всем полным периодам автоколебаний за время записи осциллограммы (время записи и количество точек выбирались из условий, чтобы запись содержала не менее 10 периодов автоколебаний и на каждый импульс приходилось не менее 10 точек записи). Изучались только режимы автоколебаний самой низкой, первой моды (см. [8]).

Основные безразмерные параметры течения: коэффициент давления в каверне  $C_d$ , коэффициент поддува газа в каверну  $C_q$ , число Струхала  $Sh$

$$C_d = \frac{\bar{p}_k - p_a}{\bar{p}_0 - p_a} = \frac{p_k}{P_0}, \quad C_q = \frac{Q_g}{Q_l}, \quad Sh = f \frac{D}{V_\infty}, \quad V_\infty = \sqrt{2P_0/\rho_l}.$$

Здесь верхняя черта означает осреднение величины по времени,  $p_k$  и  $p_0$  — давление в каверне и в форкамере установки,  $p_a$  — атмосферное давление,  $Q_g$  — объемный расход поддуваемого в каверну газа при давлении в каверне,  $Q_l$  — расход жидкости,  $\rho_l$  — плотность жидкости,  $f$  — характерная (ведущая) частота автоколебаний.

Влияние геометрических характеристик сопла и кавитатора изучались при неизменных: ширине щели кавитатора ( $D = 10$  мм), входном сужении (окружность радиусом 10 мм), ширине участка постоянного сечения 10 мм (4 на рис. 1), неизменном сужении сопла 5 с 10 до 6 мм; режимы автоколебаний соответствовали первой (низкочастотной) моде — см. [8]. Эффективность генерации импульсов для различных режимов течения и для различных параметров сопла и кавитатора оценивалась только путем сравнения величин  $A_m/P_0$ .

## 2. ДАЛЬНОБОЙНОСТЬ СТРУИ

На рис. 2 и 3 приведены зависимости  $C_d$ ,  $Sh$  и интенсивности пульсаций давления  $A_k$  и  $A_m$  от коэффициента поддува  $C_q$  для сопла общей длиной 30 мм (входное сужение, участок постоянно-

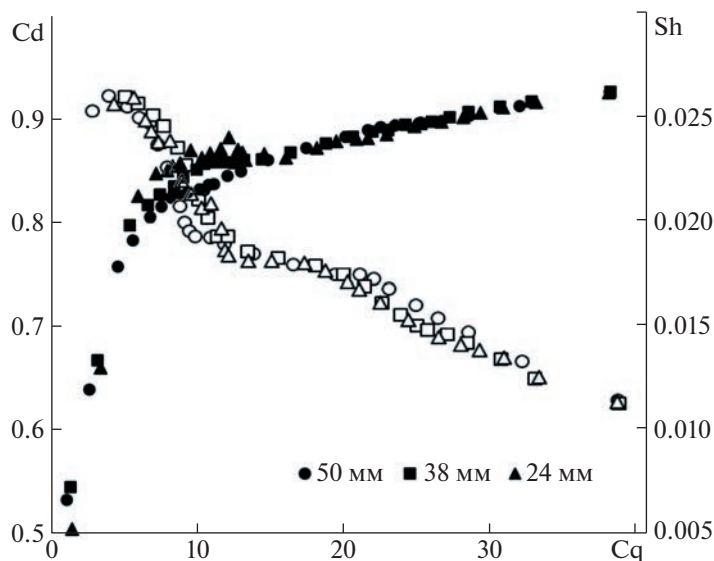
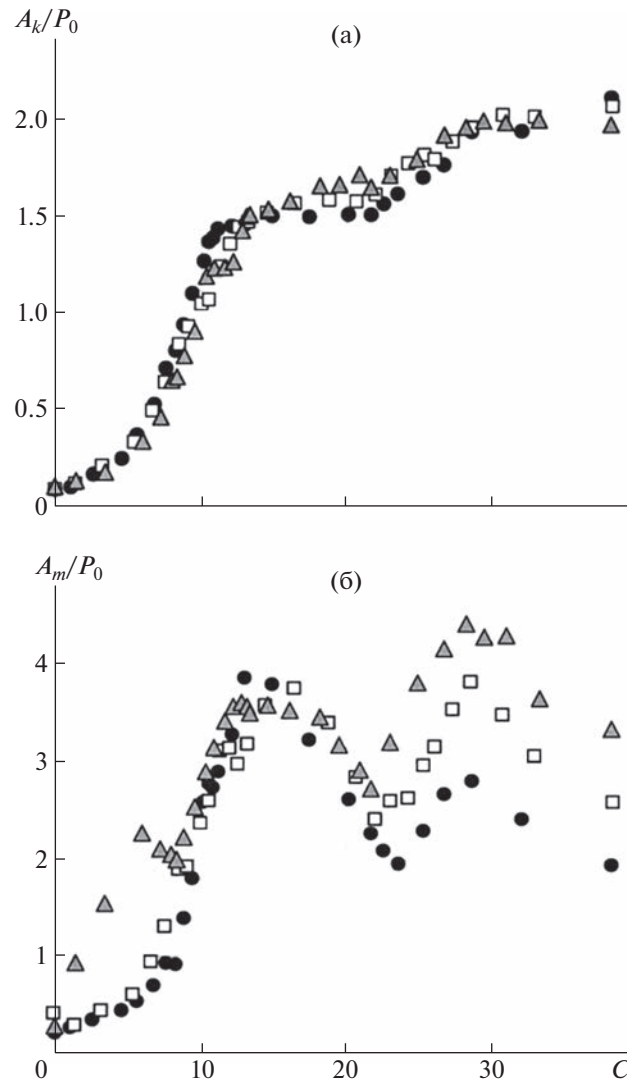


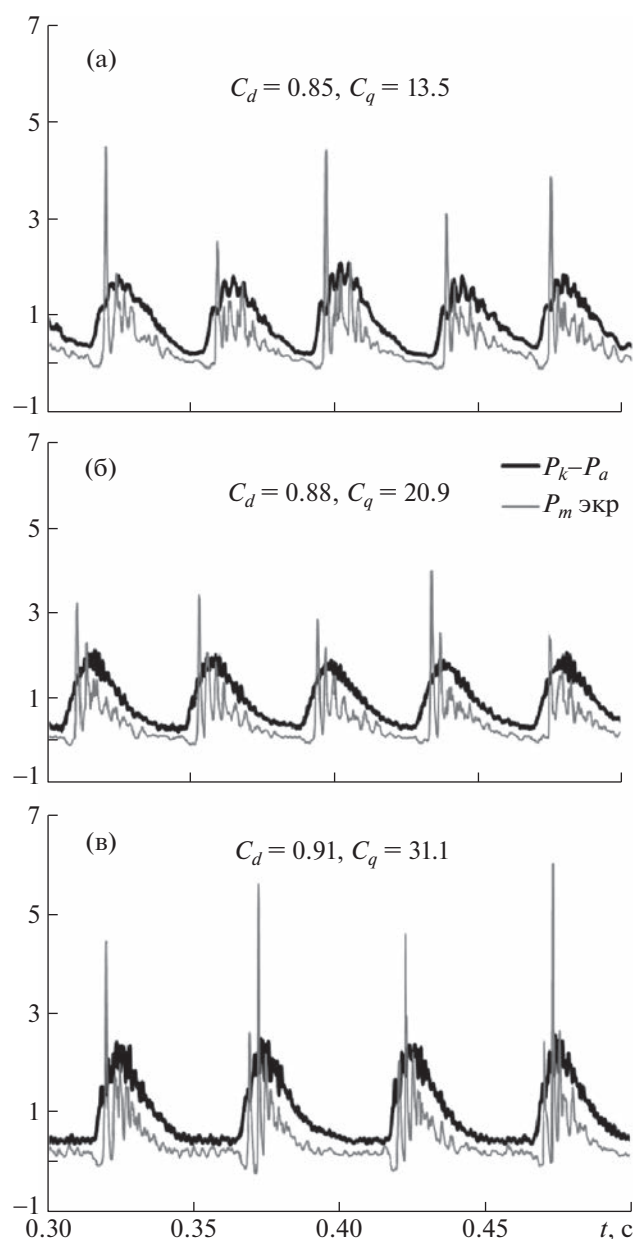
Рис. 2. Зависимости  $C_d$  от  $C_q$  (левая шкала, заливные знаки) и  $Sh$  от  $C_q$  (правая шкала, прозрачные знаки) при длине сопла 30 мм,  $P_0 = 0.1$  МПа, для трех значений расстояния от среза сопла до экрана (24, 38, 50 мм).



**Рис. 3.** Зависимости относительной интенсивности пульсаций давления в каверне (а) и ударных импульсов давления на экране (б) от коэффициента поддува при длине сопла 30 мм,  $P_0 = 0.1$  МПа, для трех значений расстояния от среза сопла до экрана (24, 38, 50 мм). Обозначения точек те же, что и на рис. 2.

го сечения, выходное сужение) при различных величинах расстояния от среза сопла до экрана: 24, 38 и 50 мм.

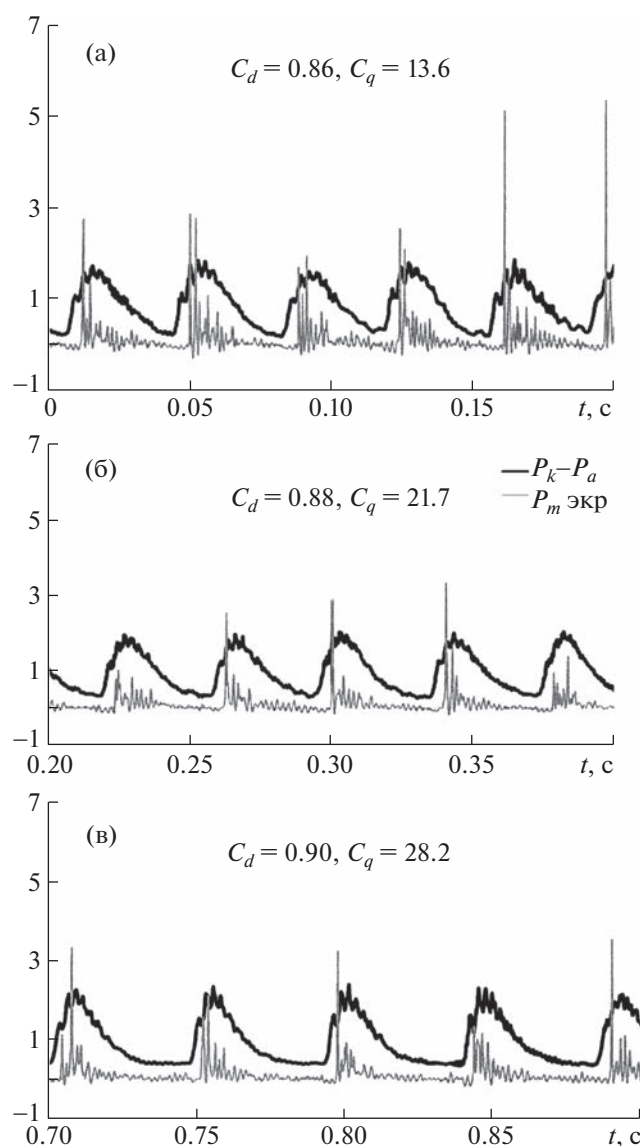
В исследованном диапазоне дистанций до экрана (примерно 4–8 калибров выходного сечения сопла) эта величина практически не влияет на характеристики пульсаций в сопле. В зависимости от величины поддува газа  $C_q$  характер течения меняется существенно. При небольших поддувах ( $C_q \sim 1$ ) струя истекает из щели  $D$  (рис. 1) практически стационарно; с ростом  $C_q$  начинается интенсивный рост давления в каверне (или коэффициента давления  $C_d$ ), а также интенсивности пульсаций давления в каверне (рис. 3а). Частота пульсаций падает (рис. 2), что можно объяснить уменьшением скорости распространения волн вдоль границы каверны с ростом давления [8]. При значениях коэффициента поддува  $C_q$ , больших 10, изменение этих параметров замедляется. При этих поддувах каверна уже не ограничивается плоскостью кавитатора (2, на рис. 1) – начинаются все более интенсивные выбросы газа в область перед кавитатором (в форкамеру 1, рис. 1), что существенно меняет конфигурацию течения. Интенсивность пульсаций давления в каверне (рис. 3а) монотонно растет с ростом  $C_q$ , а вот амплитуда ударного воздействия порций жидкости на экран (в точке 8, рис. 1) имеет два максимума (рис. 3б). Второй максимум находится в области автоколебаний с существенными выбросами газа в форкамеру. Видно, что для дистанции до экрана 25 мм второй максимум больше первого. Это можно объяснить эффек-



**Рис. 4.** Осциллограммы пульсаций давления в каверне (жирная линия) и в угловой точке экрана (тонкая) для сопла длиной 30 мм, при дистанции до экрана 25 мм для различных значений ( $C_d$ ,  $C_q$ ). Давление напора  $P_0 = 0.1$  МПа.

том увеличения дистанции разгона порции жидкости за счет пространства, вытесненного газом в форкамере, да и давление газа в каверне здесь выше. Видно, что первый максимум почти не меняется с изменением дистанции от 25 до 50 мм, второй же быстро уменьшается с удалением экрана от среза сопла и при дистанции 50 мм он уже заметно меньше первого. Это говорит о значительном возмущении струйного течения при наличии выбросов в форкамеру, в результате чего дальнобойность струйной установки в режиме отсутствия выбросов в форкамеру гораздо выше, чем при наличии выбросов. Однако с точки зрения увеличения ударного воздействия на экран второй режим имеет перспективу, по крайней мере при использовании небольших дистанций от среза сопла до экрана.

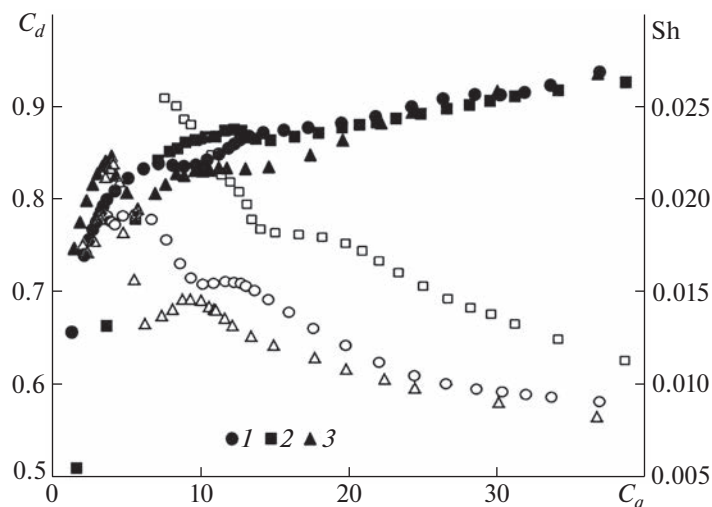
На рис. 4 и 5 приведены фрагменты осциллограмм (длительностью 0.2 с) пульсаций давления в каверне  $p_k$  и в угловой точке экрана  $p_m$  при  $P_0 = 0.1$  МПа для двух дистанций от среза сопла до экрана: 25 и 50 мм. Длительность записи каждого режима составляла 1 с, шаг записи по време-



**Рис. 5.** Осциллограммы пульсаций давления в каверне (жирная линия) и в угловой точке экрана (тонкая) для сопла длиной 30 мм, при дистанции до экрана 50 мм для различных значений ( $C_d$ ,  $C_q$ ). Давление напора  $P_0 = 0.1$  МПа.

ни  $10^{-4}$  с. Видно, что для представленных случаев осцилляции давления в каверне близки к периодическим, импульсы давления на экране имеют ударный характер, а их амплитуда имеет значительный разброс. Представленные на рис. 4 и 5 осциллограммы получены для различных величин поддувов и соответствуют областям первого максимума, минимума и второго максимума осредненной величины амплитуды ударных импульсов (см. рис. 3б). Для дистанции до экрана 25 мм амплитуда пульсаций для второго максимума (рис. 4в, тонкие линии) выше, чем для первого максимума (рис. 4а). Видно, что ударное взаимодействие струи с экраном генерирует целую последовательность коротких импульсов. Для автоколебаний без выбросов газа в форкамеру наибольшую амплитуду имеет первый импульс, за которым следует последовательность затухающих импульсов, при наличии выбросов это не так. Осциллограммы для дистанции 50 мм (рис. 5а) показывают, что характер воздействия струй на экран для режима без выбросов почти не изменился. Для второго режима (рис. 5 в) амплитуда импульсов значительно падает.

Итак, в режиме автоколебаний без выброса газа в форкамеру получают более устойчивые струи жидкости, однако второй режим также заслуживает внимания — так как здесь можно получить более интенсивное воздействие при малых расстояниях до экрана.



**Рис. 6.** Зависимость  $C_d$  от  $C_q$  (левая шкала, залитые знаки) и  $Sh$  от  $C_q$  (правая, прозрачные знаки) для сопел длиной 55, 30 мм, а также длиной 30 мм с коллиматором 25 мм (1, 2 и 3 соответственно). Давление напора  $P_0 = 0.1$  МПа.

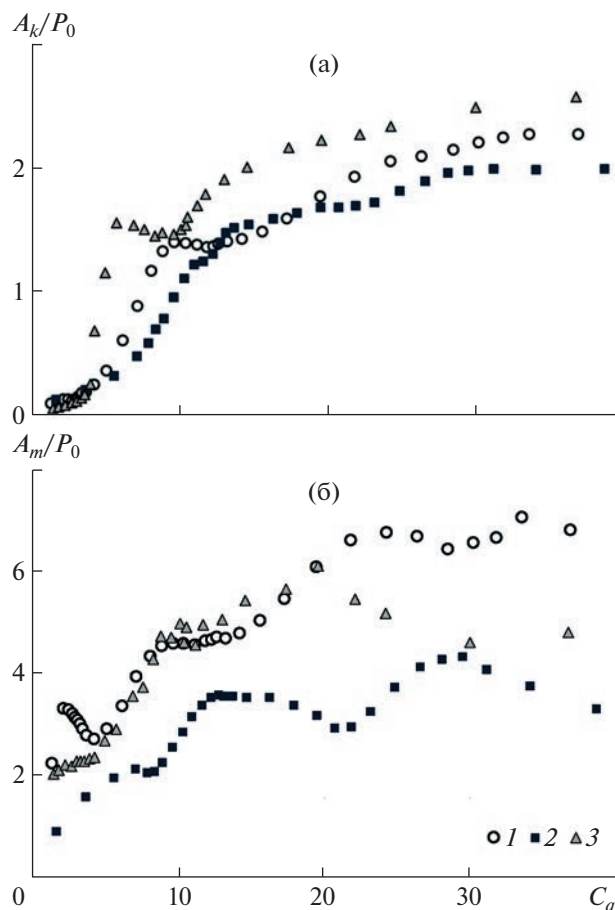
### 3. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ СОПЛА

Проведены сравнительные исследования трех сопел — два сопла длиной 55 и сопло длиной 30 мм (длина менялась за счет изменения длины среднего разгонного участка). Третье сопло имело также длину 55 мм, форма его проточной части совпадала с 30 мм соплом, но за сужением 5 (см. рис. 1) имелся участок постоянного сечения — коллиматор 7 (рис. 1) шириной 6 мм и длиной 25 мм. В работе [5] отмечено полезное влияние коллиматора на интенсивность ударного воздействия на препятствие струи, истекающей из сопла гидропушки.

На рис. 6 и 7 приведены зависимости  $C_d$ ,  $Sh$  и интенсивности пульсаций давления  $A_k$  и  $A_m$  от коэффициента поддува  $C_q$  для сопла длиной 55, 30 мм и длиной 30 мм с коллиматором 25 мм (кривые 1, 2, 3 соответственно). Если сравнить кривые 1 и 2, то видно, что с увеличением длины разгонного участка среднее давление в камере меняется мало, интенсивность пульсаций давления немного увеличивается, частота пульсаций значительно падает (в 1.5–2 раза), а интенсивность ударного воздействия на экран значительно увеличивается. Наличие коллиматора также уменьшает частоту автоколебаний и увеличивает ударное воздействие на экран (если сравнивать кривые 2 и 3 на рис. 7). Причем в режиме отсутствия выбросов газа за кавитатор увеличение длины сопла за счет разгонного участка или коллиматора (кривые 1 и 3 на рис. 11) дает примерно одинаковый эффект увеличения ударного давления на экране, а при наличии выбросов (с увеличением интенсивности поддува) эффективность коллиматора заметно падает.

На рис. 8 представлены расчетные зависимости скорости  $V/V_\infty$  (а) передней границы движущейся в канале сопла порции жидкости и давления в камере  $(p_k - p_a)/P_0$  (б) от координаты этой границы  $X/D$  для тех же трех конфигураций с той же нумерацией кривых, что и на рис. 6. Здесь  $X/D = 0$  — координата входа в сопло,  $X/D = 3$  или 5.5 координата выходного сечения для сопел длиной 30 или 55 мм. Теоретическая модель [8] не учитывает влияние выбросов газа за кавитатор, поэтому для анализа выбрано значение коэффициента расхода газа  $C_q = 15$ , при котором имеют место интенсивные автоколебания, но еще отсутствуют существенные выбросы газа за кавитатор. Соответствующие значения  $C_d$  и  $Sh$ , определяющие начальную скорость порции жидкости и ее массу, выбраны на основании данных рис. 8 и 9. Видно, что скорость передней границы порции жидкости на выходе для сопла длиной 55 мм заметно больше, чем для сопла длиной 30 мм (кривые 1 и 2 на рис. 8а). Из сравнения кривых 1 и 3 того же рисунка видно, что на выходе из коллиматора за счет потерь в узком канале скорость границы жидкости близка к скорости на выходе из короткого сопла. Тем не менее эксперимент показывает, что наличие коллиматора увеличивает ударное воздействие на экран. Возможно, это связано с увеличением массы жидкости, имеющей высокую скорость на выходе из сопла (в нашем случае увеличивается и общая масса жидкой порции в связи с уменьшением частоты автоколебаний, см. рис. 6). На рис. 8б приведены графики роста давления в камере как функции координаты передней границы порции





**Рис. 7.** Зависимость относительной интенсивности пульсаций давления в камере (а) и ударных импульсов давления на экране (б) от коэффициента поддува для тех же условий, что и на рис. 6.

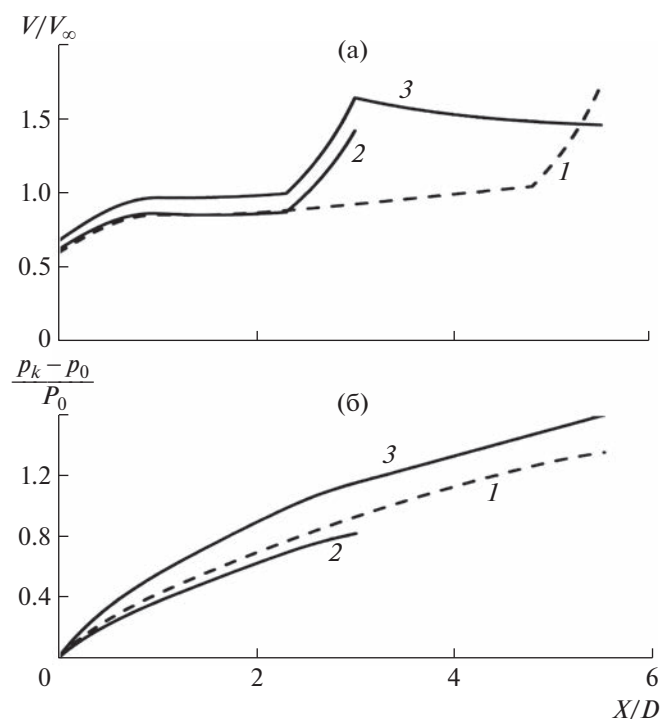
жидкости в сопле. Качественно картина соответствует графикам рис. 7а — самый быстрый рост давления в камере наблюдается в случае сопла с коллиматором. То, что давление в камере в момент достижения границей жидкости выходного сечения сопла на рис. 8б несколько ниже реальной амплитуды пульсаций давления в камере, можно объяснить тем, что процесс расчета останавливался в момент достижения границей жидкой порции среза сопла.

#### 4. ВЛИЯНИЕ КОНФУЗОРА

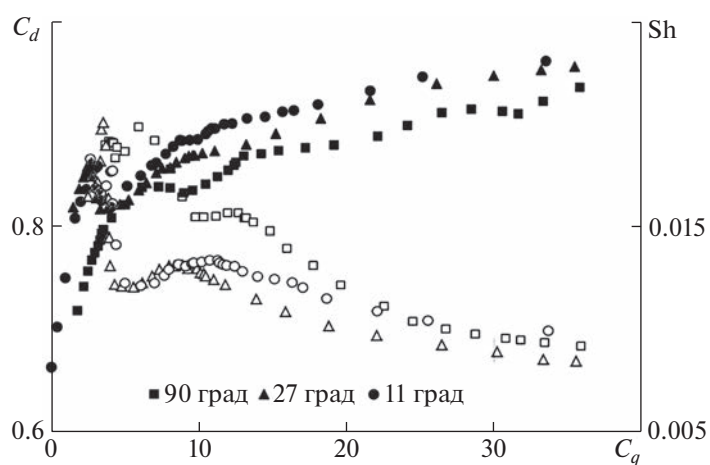
Выше отмечено, что режим течения с выбросом в область перед кавитатором представляет интерес с точки зрения получения максимального ударного воздействия струй на препятствие. Данные рис. 3б свидетельствуют об уменьшении дальности струи в этом режиме. Была проведена серия экспериментов с целью определить влияние линейного конфузора перед кавитатором на формирование импульсных струй. Ширина проточной части между кавитатором и стенкой камеры оставалась неизменной ( $D = 10$  мм), использовалось сопло длиной 55 мм (1 на рис. 6), расстояние от среза сопла до экрана 25 мм. С ростом длины конфузора (уменьшением угла сужения) толщина струи, истекающей в камеру, увеличивается, однако растут потери, связанные с ростом сопротивления конфузора (см. [9]).

На рис. 9–10 приведены зависимости  $C_d$ ,  $Sh$  и интенсивности пульсаций давления  $A_k$  и  $A_m$  от коэффициента поддува газа  $C_q$  для конфузоров с углами сужения  $90^\circ$ ,  $27^\circ$ ,  $11^\circ$ . Данные рис. 9 и 10 показывают, что при наличии конфузора начинается более раннее развитие интенсивных автоколебательных режимов. Частота автоколебаний несколько падает, что может быть связано с увеличением толщины втекающей в камеру струи, а интенсивность автоколебаний растет. Для конфузора с углом сужения  $27^\circ$  заметное увеличение величины средней амплитуды импульсов



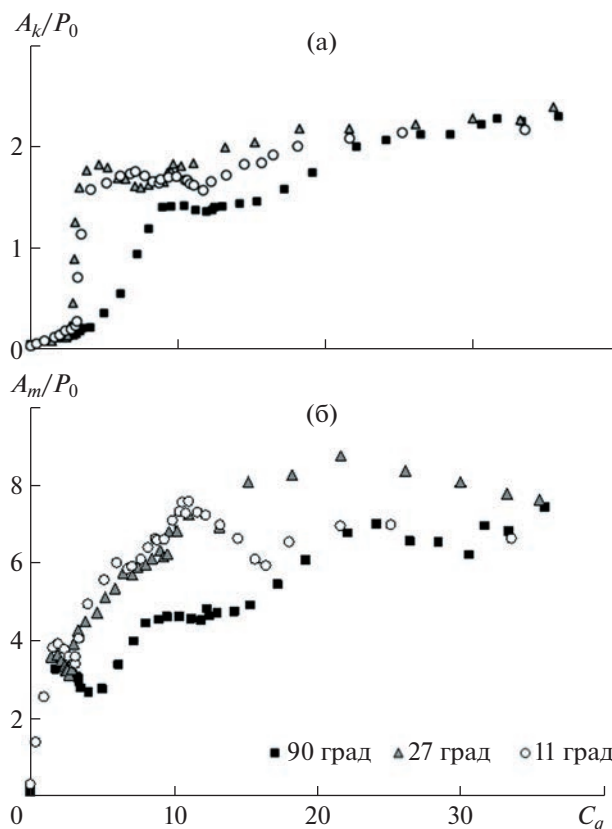


**Рис. 8.** Расчетные зависимости скорости  $V/V_\infty$  (а) и давления  $(p_k - p_0)/P_0$  (б) от координаты  $X/D$  движущейся по каналу сопла передней границы жидкой порции для тех же условий, что и на рис. 6 (с той же нумерацией кривых).



**Рис. 9.** Зависимость  $C_d$  от  $C_q$  (левая шкала, залитые знаки) и  $Sh$  от  $C_q$  (правая шкала, прозрачные знаки) для сопла длиной 55 мм (кривая 1 на рис. 6) при наличии перед кавитатором линейного конфузора с углами сужения 90°, 27°, 11°.

давления на экране по сравнению с кавитатором пластиной (90°) наблюдается практически во всем диапазоне поддува, см. рис. 10б. Для наиболее длинного конфузора (11°) наблюдается увеличение средней амплитуды импульсов давления на экране по сравнению с пластиной только в первом из упомянутых выше режимов. Таким образом, применение кавитатора с плавным сужением (конфузором) может существенно увеличить амплитуду импульсного воздействия генератора на экран.



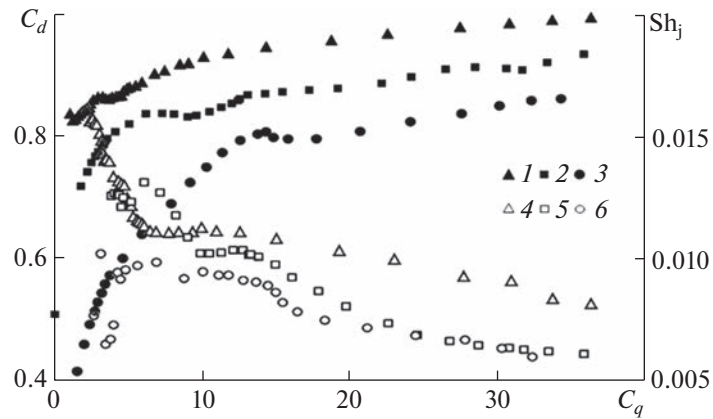
**Рис. 10.** Зависимость относительной интенсивности пульсаций давления в каверне (а) и ударных импульсов давления на экране (б) от коэффициента поддува для тех же условий, что и на рис. 9.

## 5. ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАВИТАТОРА

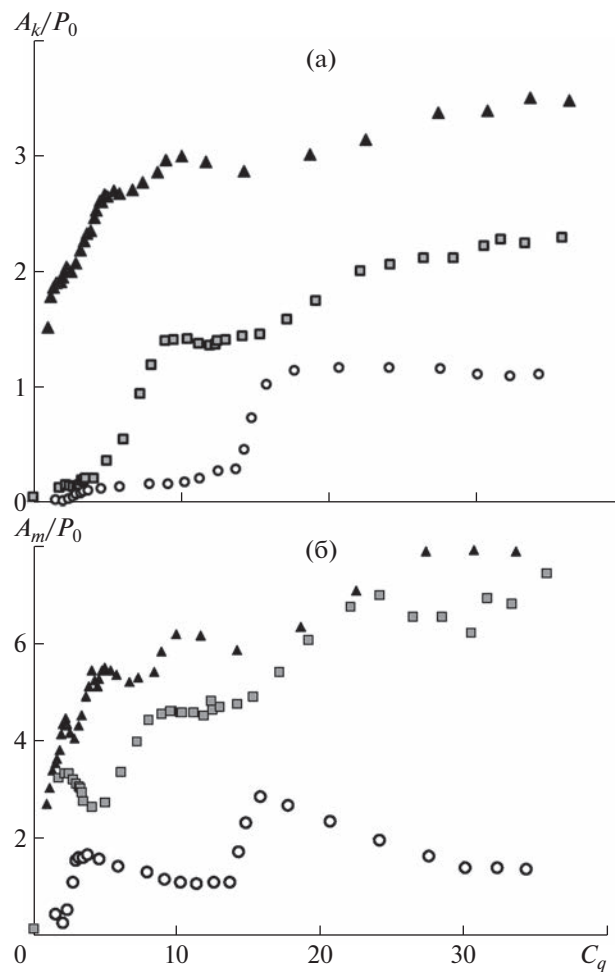
Из показанного выше следует, что с ростом поддува газа в каверну режим работы генератора импульсных струй в некоторый момент переходит в режим автоколебаний с периодическим выбросом выброса газа в область перед кавитатором. Этот момент в первую очередь определяется соотношением гидравлических сопротивлений кавитатора и сопла.

На рис. 11, 12 представлены характеристики течения в генераторе импульсных струй при фиксированных параметрах сопла (длина 55 мм, аналогично 1 на рис. 6), и расстоянии от среза сопла до экрана 25 мм при различных сопротивлениях кавитатора. Это достигалось в основном путем изменения ширины зазора  $D = 23, 10, 5$  мм, в первых двух случаях использовался кавитатор пластина (угол  $90^\circ$ ), в последнем линейный конфузор с углом наклона  $33.7^\circ$ . Здесь за характеристику втекающей в каверну через зазор  $D$  струи удобно принять ее ширину  $H_j$  вдали от кавитатора, которая вычислялась, в рамках теории идеальной жидкости, по измеренным расходу жидкости и давлению в каверне при стационарном режиме течения без поддува газа. Кривые 1–3 на рис. 11, 12 соответствуют  $H_j = 15.1, 6.6, 4.4$  мм.

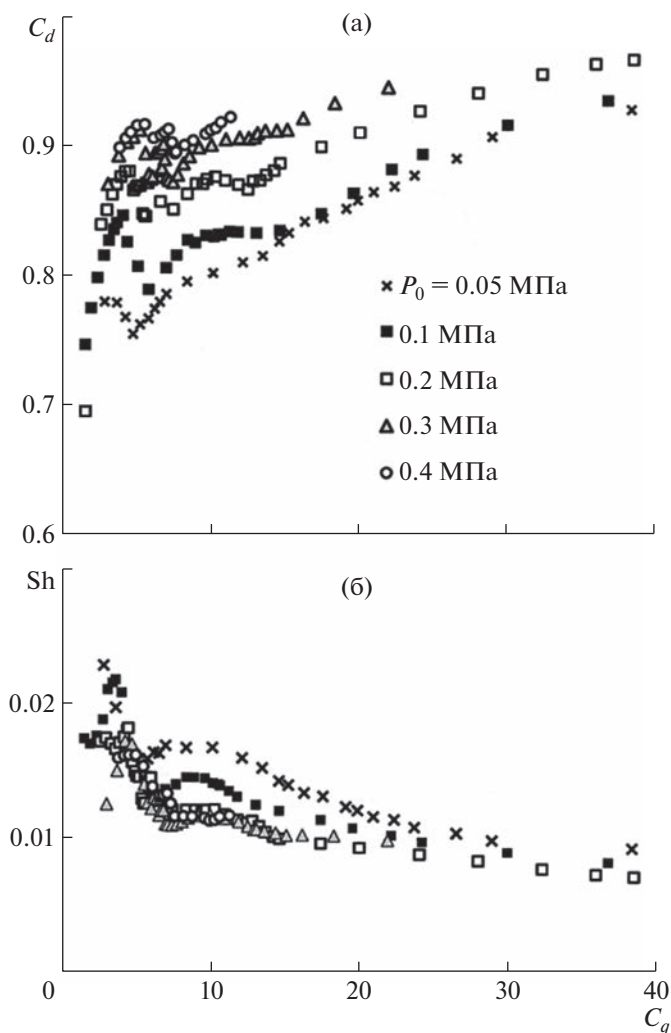
Рост сопротивления кавитатора приводит к затягиванию перехода к режиму с выбрасыванием газа в область перед кавитатором, при этом в каверну истекает более тонкая струя. При  $H_j = 4.4$  мм (кривая 3 на рис. 11, 12) ширина струи меньше минимальной ширины сопла (может происходить истечение без взаимодействия со стенками сопла), однако развитие колебаний все же начинается, но при больших расходах газа, а амплитуда колебаний  $A_k$  и ударных импульсов  $A_m$  гораздо меньше, чем в других случаях. При  $H_j = 6.6$  мм (кривая 2) — ширина струи несколько превосходит минимальную ширину сопла. Здесь пульсации давления в каверне и амплитуда ударных давлений на экране значительно возрастают, по сравнению с более тонкой струей. При дальнейшем увеличении ширины струи (1, на рис. 12) выбросы газа за кавитатор начинаются еще при меньших поддувах, пульсации давления в каверне увеличиваются, а вот амплитуда ударных



**Рис. 11.** Зависимость  $C_d$  от  $C_q$  (левая шкала, залитые знаки) и  $Sh_j$  от  $C_q$  (правая шкала, прозрачные знаки) для сопла длиной 55 мм (без коллиматора), дистанция до экрана 25 мм для различных величин  $D$  и различных характерных величин ширины истекающей в каверну струи  $H_j = 15.1, 6.6, 4.4$  мм (кривые 1–3 и 4–6 соответственно).



**Рис. 12.** Зависимость относительной интенсивности пульсаций давления в каверне (а) и ударных импульсов давления на экране (б) от коэффициента поддува для тех же условий, что и на рис. 11.



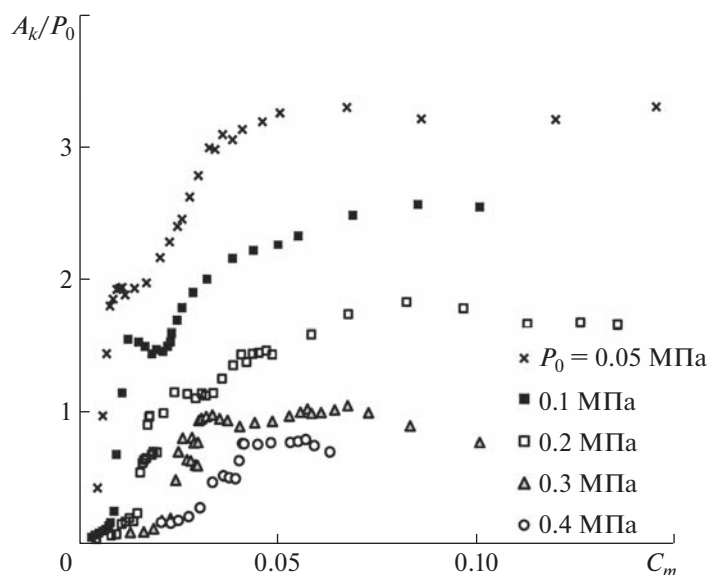
**Рис. 13.** Зависимости  $C_d$  (а) и  $Sh$  (б) от  $C_q$  для сопла общей длиной 55 мм (с коллиматором длиной 25 мм), при различных величинах давления напора  $P_0$ .

импульсов  $A_m$  растет незначительно (см. рис. 12). На рис. 11 представлены графики для числа  $Sh_j$ , где в качестве характерной длины используется характерная ширина струи  $H_j$ . Близость значений этого числа в области развитых автоколебаний ( $C_q = 8–15$ ) для всех трех случаев (см. рис. 11) показывает, что частота здесь примерно обратно пропорциональна ширине струи  $H_j$ .

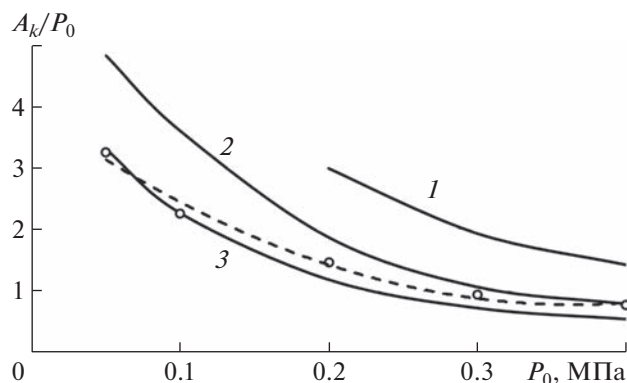
## 6. МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ

Все представленные выше экспериментальные данные получены для давления напора  $P_0 = 0.1$  МПа. Ранее было показано [8], что в зависимости от скорости течения имеет место масштабный эффект, т.е. безразмерные параметры автоколебаний  $A_k/P_0$  зависят от  $P_0$ . Были проведены исследования зависимости безразмерных характеристик пульсаций давления от  $P_0$  для сопла общей длиной 55 мм (сопло длиной 30 мм и коллиматор длиной 25 мм) в диапазоне давлений напора  $P_0$  от 0.05 до 0.4 МПа.

Масштабный эффект виден уже на рис. 13, где показаны зависимости  $C_d$  и  $Sh$  от  $C_q$ . С увеличением давления напора  $P_0$ , коэффициент давления при фиксированном  $C_q$  растет (см. рис. 13а). Тем самым переход автоколебаний к режиму с выбросом газа за кавитатор будет происходить при меньших значениях коэффициента объемного расхода  $C_q$ . Однако с ростом  $P_0$  масштабный эффект уменьшается. Данные для числа Струхала (рис. 13б) показывают, что для  $P_0$  больших 0.2 МПа изменение становится незначительным. Более сильно масштабный эффект влияет на



**Рис. 14.** Зависимость относительной интенсивности пульсаций давления в каверне для сопла общей длиной 55 мм (с коллиматором длиной 25 мм), при различных величинах давления напора  $P_0$ .



**Рис. 15.** Теоретические зависимости  $A_k/P_0$  от давления напора  $P_0$  при  $C_m = 0.05$  для начального объема каверны  $2 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-3}$ ,  $4 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup> (1, 2 и 3 соответственно). Сравнение с экспериментальными данными (штрихи).

величину относительных пульсаций давления  $A_k/P_0$ , которая уменьшается с ростом  $P_0$ , см. рис. 14. Кроме того, измерения интенсивности колебаний давления в каверне показали, что диапазон существования автоколебаний, если его оценивать в терминах  $C_q$ , с ростом  $P_0$  существенно уменьшается. На рис. 14 вместо относительного объемного расхода  $C_q$  по горизонтальной оси отложены значения относительного массового расхода газа  $C_m = M_g/M_l = (\rho_{gk}/\rho_l)C_q$  ( $M_g$ ,  $\rho_{gk}$  — массовый расход газа и плотность газа при среднем давлении в каверне,  $M_l$ ,  $\rho_l$  — массовый расход и плотность жидкости в установке). В терминах коэффициента массового расхода  $C_m$  диапазон существования устойчивых автоколебаний с ростом напора сохраняется, что может свидетельствовать о том, что с ростом  $P_0$  будут сохраняться автоколебательные режимы при сохранении относительного массового расхода газа и жидкости. Кроме того, с ростом  $P_0$  снижение относительной величины пульсаций давления в каверне замедляется.

На рис. 15 приведены теоретические зависимости относительной интенсивности пульсаций давления в каверне от давления напора для различных величин начального объема каверны

( $2 \times 10^{-3}$ ,  $3 \times 10^{-3}$ ,  $4 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup> – 1, 2 и 3 соответственно). Была использована одномерная модель помпажного режима [8]. За максимальное давление в каверне принимался максимум давления в интервале времени, ограниченном сверху моментом достижения передней границей жидкой порции выходного сечения сопла. Начальная скорость и масса жидкой порции в расчетах задавались по измеренным в эксперименте  $C_d$  и  $Sh$  при  $C_m = 0.05$ . Кроме того, на рис. 15 приведены измеренные значения интенсивности пульсации давления в каверне при  $C_m = 0.05$  при объеме каверны  $\sim 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Видно качественное соответствие экспериментальных и расчетных кривых. Теория и эксперимент показывают эффект снижения относительных пульсаций давления в каверне с ростом давления напора  $P_0$ , однако теоретические расчеты показали (см. [8]), что при  $C_d = \text{const}$  зависимости выходят на горизонтальную асимптоту. Видно (рис. 15), что тенденция выхода на горизонтальную асимптоту имеет место и на практике. Впрочем, вопрос о работе генератора при больших напорах требует дальнейшего изучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования автоколебательных режимов течения в гидравлической магистрали, содержащей сопротивление (кавитатор), вентилируемую газовую каверну и сужающийся канал (сопла), через который жидкость и газ истекают в атмосферу. Показана возможность использования режима автоколебаний для создания периодических импульсных струй. В отличие от известных импульсных установок, периодический режим прерывистого истечения жидкости реализуется здесь при постоянных параметрах, подаваемых в систему жидкости и газа, без применения каких-либо механических устройств.

Выяснено, что в области развитых автоколебаний существуют два различных режима течения – режим, где каверна в процессе пульсаций ограничена сечением кавитатора (при умеренных поддувах) и, при увеличении поддува, возникает режим с интенсивными выбросами газа в область перед кавитатором (в форкамеру). Показано, что дальнобойность истекающей из сопла в атмосферу импульсной струи заметно падает в этом режиме, по сравнению с режимом без выбросов за кавитатор. Однако на небольших дистанциях (до 4-х калибров выходного сечения сопла) интенсивность импульсов давления на экране во втором режиме превосходит режим без выбросов газа в область перед кавитатором. Показано, что плавное сужение канала перед кавитатором может способствовать существенному увеличению амплитуды импульсов давления на экране. Исследования показали, что увеличение длины сопла (рассматривалось увеличение длины как за счет центральной вставки, так и за счет применения коллиматора на выходе из сопла) способствует увеличению амплитуды ударных импульсов на экране.

Было проведено изучение масштабного эффекта в диапазоне давлений напора жидкости от 0.05 до 0.4 МПа. Экспериментальные данные показали, что величина интенсивности пульсаций давления в каверне, отнесенная к давлению напора, уменьшается с ростом напора, однако имеет тенденцию к выходу на горизонтальную асимптоту, что согласуется с результатами теоретических расчетов.

### 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. Очеретяный С.А., Прокофьев В.В. Влияние сужения сопла на работу генератора периодических импульсных струй // Изв. РАН МЖГ. 2022. № 2. С. 14–26.
4. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокой скорости и их применение: монография / Под общ. ред. А.Н. Семко. Донецк: ДонНУ. 2014. 370 с.
5. Atanov G.A., Semko A.N. Numerical Analysis of the Jet Flows of Compressible Water // Proc. of International Summer Scientific School “High Speed Hidrodynamics”. June 2004, Cheboksary. Computational Publications. Russia. 2004. P. 39–44.

6. *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.
7. *Шкапов П.М., Благовещенский И.Г., Гартиг Е.Б., Дорошенко С.А.* О гистерезисном характере развития автоколебаний в гидрролинии с ограниченной искусственной газовой каверной на выходе // Наука и образование. Электронное науч.-техн. изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 10. С. 1–10.
8. *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.
9. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. И.Е. Идельчик. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1960. 464 с.