

УДК 532.528.013

**О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ
АВТОКОЛЕБАНИЙ
В РАЗВИТЫХ ИСКУССТВЕННЫХ КАВИТАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЯХ
И ЗАТОПЛЕННЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЯХ¹**

**КАРЛИКОВ В. П., РЕЗНИЧЕНКО Н. Т., ХОМЯКОВ А. Н.,
ШОЛОВОВИЧ Г. И.**

Течение в хвостовой части так называемых стационарных развитых кавитационных полостей имеет четко выраженный неустановившийся характер. При экспериментальном изучении искусственной кавитации, несмотря на стационарность натекающего на кавитатор потока и режима подачи газа, часто наблюдаются также и нестационарные эффекты, относящиеся к поведению каверн в целом, — разрушение каверн или потеря устойчивости, появление пульсирующих, автоколебательных режимов и т. п. Разрушение каверн, расположенных в окрестности твердой границы, может вызываться заполнением их жидкостью из возвратной струи, как, например, при частичной кавитации на подводном крыле [1]. Нестационарность в целом свободных искусственных кавитационных полостей при больших стационарных подачах газа обычно связана с потерей устойчивости их границ и относительно небольшими колебаниями внутреннего давления, обусловленными механизмом смыкания возмущенных границ каверн при уносе из них газа в виде отдельных пузырей [2, 3]. Из проведенного в линейной постановке на основе использования принципа «независимости» расширения сечений каверны» численного анализа устойчивости и пульсаций осесимметричных кавитационных полостей с учетом такого порционного уноса газа из них следует, в частности, возможность существования установившихся автоколебательных режимов поведения каверн, период которых с ростом коэффициента расхода подаваемого в каверну газа должен расти [4].

В описываемых ниже опытах в широком диапазоне очень больших стационарных подач газа в каверну также была установлена возможность существования автоколебательных режимов, однако период этих колебаний, наоборот, уменьшался с увеличением коэффициента расхода газа.

Оказалось, что механизм возникновения таких режимов отличается от известных и существенно связан со способом подачи газа в каверну.

Анализу этого механизма, описанию физических особенностей и основных закономерностей обнаруженного класса свободных развитых искусственных кавитационных течений и посвящена настоящая работа.

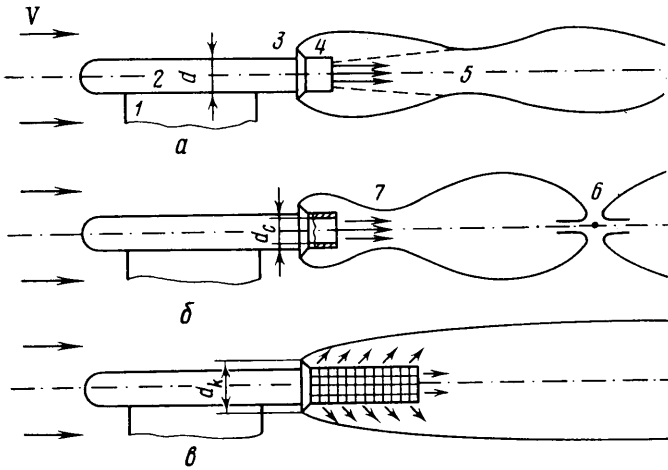
1. Эксперименты проводились в гидродинамической трубе Института механики МГУ в осесимметричном рабочем участке с диаметром 400 мм в диапазоне скоростей потока $V=5-15$ м/с, статических давлений в рабочем участке $P_s=0,9-1,7$ кг/см² и весовых секундных расходов подаваемого в каверну воздуха $G=1-12$ г/с. Здесь $G=\rho_c g V_c \pi d_c^2/4$, V_c , ρ_c и d_c — средние значения скорости, плотности воздуха и диаметр воздушной струи, g — ускорение силы тяжести.

Использовались кавитаторы, представляющие собой (фиг. 1, а) расположенные на боковой державке 1, тела вращения 2 с цилиндрическим участком в хвостовой части со срывными кромками 3 различной формы, а также кавитаторы без срывных кромок. Диаметр срывной кромки d_k менялся от 9 до 18 мм.

Струя воздуха подавалась в каверну по проходящей через державку и кавитатор трубке, небольшой цилиндрический участок которой с внутренним диаметром d_c располагался за срывной кромкой кавитатора. Подробное описание установки, блок-схемы измерений и управления экспериментом, а также методики проведения опытов содержится в [5] и здесь не приводится.

За каждым кавитатором при умеренных подачах воздуха в каверну, соответствующих значениям коэффициента импульса воздушной струи

¹ Докладывалось на VI Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике, Ташкент, 1986.



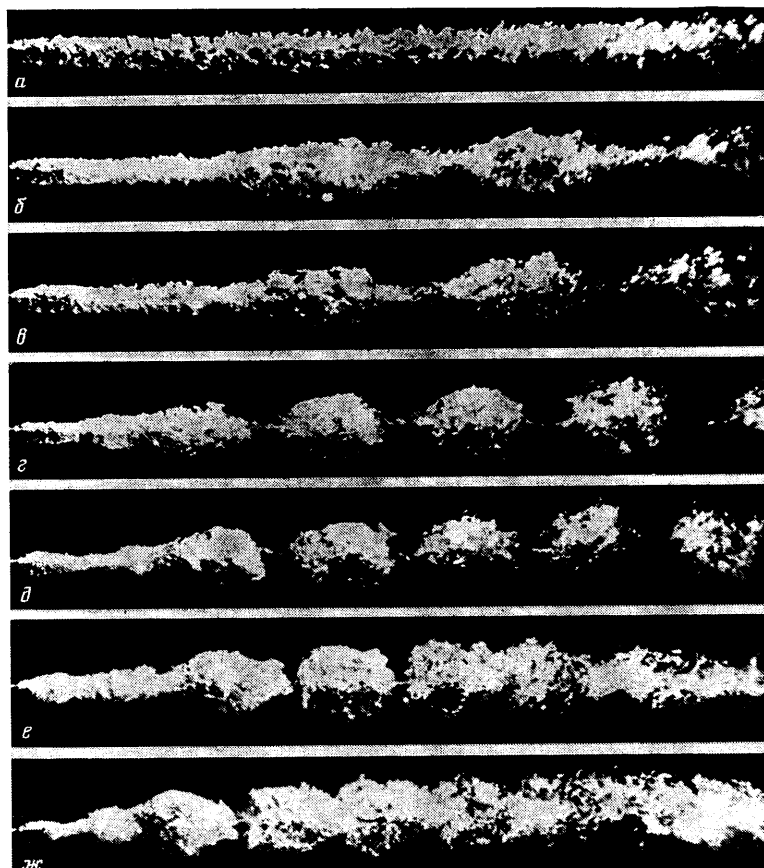
Фиг. 1

$I = \rho_c V_c^2 d_c^2 / \rho V^2 d_k^2$, меньшим некоторого значения I_1 , зависящего от формы кавитатора, образовывались кавитационные полости обычного вида. Их размеры и форма находились в соответствии с известными закономерностями для осесимметричных каверн.

После перехода к значениям $I \cong I_1$ еще существовали стационарные в целом каверны, однако, как показал анализ кинограмм, в окрестности торца трубки подачи воздуха на границе каверн появлялось слабое кольцевое пережатие. Далее в диапазоне $I_1 < I < I_2$ наблюдались вначале временами возникавшие, а затем четко выраженные установившиеся автоколебательные режимы течения с фиксированными частотами отрыва крупных порций газа (пузырей) от присоединенной к кавитатору каверны относительно небольшого размера. Поперечные размеры пузырей при этом в несколько раз превышали максимальный диаметр существовавшей до их возникновения стационарной каверны.

Представление о таком развитии течения в этом диапазоне I с ростом расхода подаваемого в каверну воздуха дает показанная на фиг. 2 подборка фотоснимков картин течения в следе за кавитатором, сделанных с экспозицией 10^{-5} с. С ростом расхода воздуха частота автоколебаний росла. Область течения, занятая цепочкой изолированных крупных пузырей, разделенных участками воды, простиралась за кавитатор на расстоянии, превышавшее пределы видимости через окно рабочего участка гидротрубы, т. е. длина этой области более чем в 50 раз превышала диаметр кавитатора. Количество пузырей в зоне видимости с ростом I увеличивалось. При дальнейшем росте поддува длина цепочки четко видимых пузырей и расстояния между ними начинали сокращаться. За этим участком следа за кавитатором становилась видимой область, заполненная плотно примыкающими друг к другу пузырями и заканчивающаяся участком, представлявшим, по-видимому, зону неупорядоченного перемешивания воды с воздухом. При таких режимах четкая периодичность образования новых пузырей временами нарушалась. Наконец, начиная с некоторого значения I , пузыри исчезали, а начало указанной зоны перемешивания достигало среза кавитатора, после чего течение приобретало вид, характерный для затопленных газовых струй в спутном потоке воды с большим числом мелкомасштабных возмущений на границе без четко выраженной периодической структуры.

Такая последовательность развития течений имела место для всех типов кавитаторов в каждом из указанных выше диапазонов режимных параметров. Показанные на фиг. 2 картины течения с автоколебаниями наблюдались за кавитатором, имевшим диаметр срывной кромки $d_k = 9$ мм,



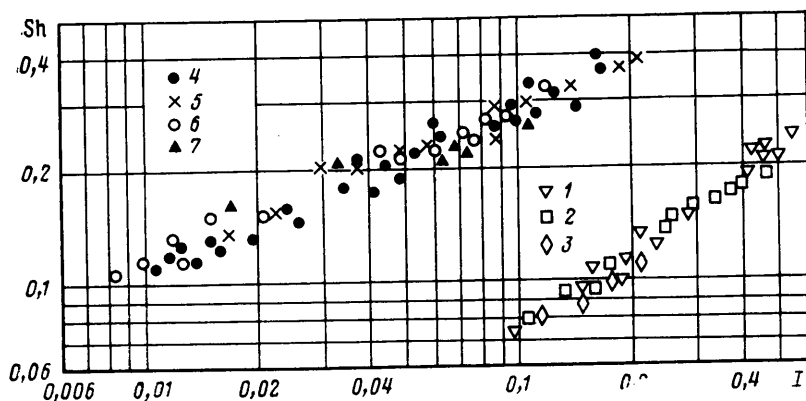
Фиг. 2

в диапазоне коэффициентов импульса воздушной струи $I=0,09-0,5$. Начальный диаметр струи воздуха $d_c=5,5$ мм, скорость потока $V=6$ м/с, а статическое давление в рабочем участке трубы $P_s \approx 1$ кг/см². Частота автоколебаний f соответствовала диапазону чисел Струхала $Sh=f d_k/V=0,072-0,25$.

Частота f отрыва пузырей от присоединенной к кавитатору каверны была определена для всех испытанных кавитаторов в диапазонах значений I , соответствующих четко выраженным автоколебательным режимам течения. Значения частоты находились из анализа результатов измерения давления в присоединенной каверне (на срезе трубки подачи газа) датчиком ДМИ с использованием анализатора спектра СКЧ-72.2 и были проконтролированы с помощью расшифровки записей давления на ленте осциллографа и визуальных наблюдений картин течения при стробоскопическом освещении.

На рис. 3 представлена в логарифмических координатах полученная для указанного выше кавитатора с $d_k=9$ мм (диаметр цилиндрической части кавитатора $d=7,5$ мм) при различных значениях режимных параметров зависимость числа Струхала от коэффициента импульса воздушной струи $Sh=f(I)$. Экспериментальные точки 1, 2, 3 соответствуют скоростям натекающего потока $V=6, 10, 15$ м/с. С ростом I частота отрыва пузырей возрастает.

В пределах точности экспериментов эта зависимость, очевидно, может быть изображена в логарифмических координатах прямой линией, что свидетельствует о степенном характере зависимости числа Струхала от



Фиг. 3

коэффициента импульса воздушной струи $Sh = CI^n$, где C и n — постоянные величины.

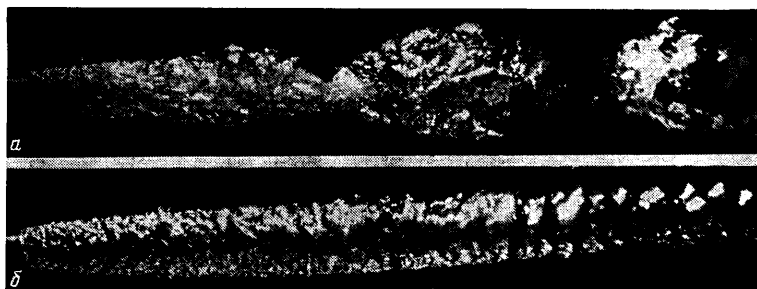
Такой же характер зависимости $Sh = f(I)$ был установлен и для всех других испытанных кавитаторов. В пределах точности экспериментов значения постоянных C и n оказались зависящими главным образом от формы кавитатора. Кавитаторам с меньшим кавитационным сопротивлением при фиксированном значении числа кавитации и отсутствии автоколебаний соответствовали меньшие значения n и большие значения постоянной C .

Анализ результатов большой серии экспериментов со стационарной подачей воздуха в каверны позволил получить представление о механизме формирования автоколебательных режимов. Поясним его на примере кавитатора, изображенного на фиг. 1, а, б.

Наличие достаточно интенсивной струи воздуха, вытекающей из кавитатора при большой стационарной подаче, приводит к эжектированию воздуха из области каверны 4, расположенной за срывной кромкой кавитатора, и падению давления в этом месте. Резкое понижение давления вызывает соответствующую деформацию границы каверны вблизи срывной кромки — образование усиливающегося со временем пережатия 7 (фиг. 1, б). Скорость смыкания горловины пережатия 5 (фиг. 1, а) после достижения ею границы струи воздуха и внедрения в нее существенно возрастает из-за сильного роста скорости и понижения давления в этом, ставшем теперь минимальным сечении воздушного потока. Проявление такого эффекта, называемого далее эффектом сжатия струи, или струйным эффектом, приводит к «ударному» смыканию границ каверны с образованием критической точки и двух направленных в противоположные стороны кумулятивных струй 6 (фиг. 1, б). Следовательно, в момент отрыва пузыря имеет место «запирание» присоединенной к кавитатору каверны, что в условиях продолжающейся подачи газа вызывает резкое повышение давления в ней и последующее ее расширение или даже инерционное «перерасширение» после чего вновь проявляется эффект эжекции и описанный процесс повторяется.

Можно констатировать, таким образом, что в основе механизма возбуждения автоколебаний лежат следующие четыре динамических эффекта: эжекционный, сжатия газовой струи (струйный эффект), ударное смыкание границ каверны, вызывающее запирание присоединенной к кавитатору каверны, и инерционное перерасширение каверны.

Интенсивность проявления указанных динамических эффектов, очевидно, связана с величиной расхода газа в эжектирующей струе, скоростью натекающего потока и значениями геометрических параметров, характеризующих размеры и конструктивные особенности кавитатора и системы подачи газа. В частности, опыты показали, что сокращение



Фиг. 4

длины расположенного в каверне участка трубки для подачи газа в каверну изменяет диапазон значений коэффициента импульса струи газа, в котором наблюдаются автоколебания, и частоту отрыва пузырей, но качественная сторона явления остается прежней. Опыты подтвердили, что даже полная ликвидация этого участка не исключает эжекционного эффекта, если подаваемая из кавитатора струя газа достаточно интенсивна и имеет диаметр, меньший диаметра срывной кромки кавитатора.

Обнаруженный характер изменения частоты отрыва пузырей, растущей с ростом импульса струи газа, находится в соответствии с описанным механизмом развития автоколебаний. Действительно, рост скорости в струе газа, подаваемого в каверну, должен приводить к усилению эжекции газа из области каверны за кромкой кавитатора и, следовательно, к более интенсивному процессу образования и последующего смыкания пережатий на поверхности каверны.

Верхней гранью для множества значений коэффициента I , при которых еще наблюдаются автоколебания с отрывом пузырей, можно, очевидно, ориентировочно считать, что и подтверждается результатами опытов, значение I , соответствующее равенству скоростных напоров потоков воздуха и воды, хотя и при больших значениях этого коэффициента «ударное» смыкание границ каверны может также в принципе осуществляться в связи с нестационарностью процесса соударения потоков жидкости.

Для подтверждения высказанных соображений о роли эжекционного эффекта в возбуждении автоколебаний были внесены изменения в способ подачи воздуха в каверну. С целью исключения эжекции цилиндрический участок трубки подачи газа, находящийся в каверне, был заменен цилиндрическим колпачком из сетки с отверстиями $0,3 \times 0,3$ мм (фиг. 1, в). Эта система обеспечивала подачу газа непосредственно за кромку кавитатора и существенно уменьшала неравномерность распределения давления в каверне в этом ее участке. Опыты с большой стационарной подачей газа в каверну были повторены при наличии сетки в системе подачи воздуха. На фиг. 4 показан пример сопоставления картин течения в опытах без сетки (верхний снимок) и с сеткой (нижний снимок) при одинаковом значении коэффициента импульса струи воздуха, подаваемого в каверну $I=0,11$. Экспозиция при съемке равнялась 10^{-5} с. В опытах с сеткой, как видно, режим с периодическим отрывом пузырей не наблюдается, а без сетки имеет место. О повышении давления в присоединенной каверне в моменты времени, следующие за ее «запиранием», т. е. после отрыва очередного пузыря, свидетельствует уже отмеченная выше хорошо видимая на снимках существенно бóльшая величина поперечных размеров отделившихся пузырей по сравнению с максимальным поперечным размером стационарных каверн при тех же коэффициентах расхода воздуха.

Следует высказать ряд соображений, объясняющих, почему описанные в настоящей работе автоколебательные режимы не были обнаружены ранее, несмотря на то, что опыты с большой стационарной подачей газа в кавитационные полости проводились многими авторами.

В известных опытах с «пульсирующими» кавернами, например [2], также наблюдался периодический отрыв порций газа, но только от хвостовой части весьма протяженных каверн. Такие режимы были зафиксированы лишь в свободных струях или гидрлотках со свободной поверхностью. Причиной их возникновения являлась потеря устойчивости границы каверны, образование на ней бегущих волн, смыкание которых в конце каверны и создавало условия для отрыва пузырей с частотой, уменьшающейся с ростом поддува. Эти опыты, однако, проводились в существенно более ограниченном диапазоне коэффициентов весовых секундных расходов газа $G^* = (G/\rho_a g V d_k^2) \leq 0,7$, чем в наших опытах, где имелись $G^* \leq 5$. Здесь ρ_a — приведенная к атмосферному давлению плотность газа.

Выход на обнаруженные автоколебательные режимы при больших стационарных подачах газа в гидродинамических трубах с закрытой рабочей частью не был, по-видимому, замечен другими исследователями, поскольку при визуальном наблюдении этих течений невооруженным глазом они могли восприниматься как стационарные из-за достаточно высокой частоты автоколебаний.

Кроме того, возникновение таких режимов противоречило имеющимся представлениям о характере развития с ростом поддува кавитационных течений, создаваемых в гидродинамических трубах с закрытой рабочей частью. Хорошо известно, что рост подачи газа должен приводить к достижению стационарного режима, соответствующего предельному значению числа кавитации для имеющегося загромождения рабочего участка. Опыты с расходами газа, существенно превышавшими необходимые для достижения предельного режима, могли считаться лишними смысла.

Наконец, как было установлено, механизм возникновения изученных автоколебательных режимов существенно связан со способом подачи газа в каверну. Он предполагает наличие интенсивной струи, вытекающей из кавитатора в каверну, чего могло не быть во многих экспериментах рассматриваемого класса.

2. В проведенной серии опытов особый интерес представляют опыты с кавитаторами, изображенными на фиг. 1, а, б, но без срывных кромок ($d = d_k$). Опыты показали, что при большой стационарной подаче газа за такие кавитаторы также реализуются автоколебательные режимы течения. Найденная в экспериментах в диапазоне скоростей воды $V = 5-15$ м/с зависимость $Sh = f(I)$ для таких кавитаторов показана на фиг. 3. Экспериментальные точки 4-7 соответствуют $\delta = (d - d_c)/2 = 3,75; 2,25; 0,75; 0,1$ мм.

Очевидно, что ответственное за возникновение автоколебаний эжектирование газа осуществляется в этом случае из области каверны, находящейся непосредственно за кольцевым участком торцевого сечения кавитатора, имеющим ширину δ и расположенным вокруг вытекающей из кавитатора струи газа.

Существенно, что автоколебательные режимы с последовательным отрывом пузырей наблюдались даже для кавитаторов, у которых δ весьма незначительно и составляет, например, всего 0,1 мм при общей длине кавитатора ~ 100 мм.

Поскольку такие опыты уже могут рассматриваться по существу как исследование затопленных газовых струй в спутных потоках жидкости, то из них следует очевидно вывод о возможности существования в таких струях периодических структур, в основе механизма возникновения которых лежат эжекционный и другие описанные выше динамические эффекты.

3. Установленная в опытах высокая скорость протекания динамических процессов, связанных с эжекцией, позволила сделать вывод о том, что эжекционный эффект мог сказаться и на результатах выполненных ранее на той же установке экспериментов с нестационарными кавернами [5]. Эти каверны возникали из стационарных после очень сильного возмущения их путем резкого, но кратковременного увеличения расхода подавае-

мого в них газа. Рассматривались 100-кратное увеличение объемного расхода по сравнению со стационарным и длительности дополнительной подачи газа, имеющие порядок сотых долей секунды. Было установлено, что указанные изменения режима подачи газа вызывают интенсивную деформацию границ кавитационных полостей и существенно влияют на механизм уноса газа. Эти опыты также выявили эффекты инерционного перерасширения каверн и последующего ударного запираания их, во многом аналогичные описанным выше.

По указанным причинам прежние опыты с длительностями импульсов дополнительной подачи газа $\tau=0,02$ и $0,05$ с были повторены на установке с сетчатым цилиндром за кавитатором в системе подачи газа (фиг. 1, в). Оказалось, что если в случае $\tau=0,02$ динамика изменения формы границы каверн и зависимости избыточного давления в каверне от времени в новых и прежних опытах оказались практически одинаковыми, то уже при $\tau=0,05$ выявились существенные различия между ними, имеющие не только количественный, но и качественный характер [5, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
2. *Silberman E., Song C. S.* Instability of ventilated cavities // J. Ship Res. 1961. V. 5. № 1. P. 13–23.
3. *Michel J. M.* Ventilated cavities // В кн.: Неустановившиеся течения воды с большими скоростями: Тр. междунар. симпоз. в Ленинграде. 1971. М.: Наука, 1973. С. 343–360.
4. *Парышев Э. В.* Численное моделирование пульсаций вентилируемых каверн // Тр. ЦАГИ. 1985. Вып. 2272. С. 19–28.
5. *Карликов В. П., Резниченко Н. Т., Хомяков А. Н., Шоломович Г. И.* Исследование нестационарных кавитационных течений // В кн.: Гидродинамика больших скоростей. Чебоксары: Изд. Чуваш. ун-та. 1985. С. 66–76.
6. *Карликов В. П., Резниченко Н. Т., Хомяков А. Н., Шоломович Г. И.* Динамика искусственных кавитационных полостей с переменными режимами подачи газа // В кн.: Аннот. докл. 6-го Всесоюз. съезда по теорет. и прикл. мех. Ташкент: Изд-во АН УзССР. 1986. С. 332–333.

Москва

Поступила в редакцию
27.XI.1986