

УДК 534.143

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИИ И СТЕПЕНИ ПЕРЕКРЫТИЯ ПОТОКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ТЕЛАМИ ОБТЕКАНИЯ НА КАРТИНУ ТЕЧЕНИЯ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ПЛОСКОГО ТИПА

С. Р. Ганиев, О. В. Шмырков, В. П. Рудаков*

Представлено академиком РАН Р.Ф. Ганиевым 23.10.2018 г.

Поступило 24.10.2018 г.

Представлены результаты исследований течения за цилиндрическими телами обтекания в проточном гидродинамическом генераторе плоского типа при степени перекрытия потока телами обтекания $S_i/S_0 = 10\text{--}80\%$, числах $Re = (0,5\text{--}5) \cdot 10^5$, давлении на входе $P_{вх} = 0,2\text{--}1,0$ МПа и давлении на выходе $P_{вых} = 0,1\text{--}0,8$ МПа. Получено, что при одном и том же перепаде давления могут реализоваться два различных вида течения за телами обтекания: с развитой кавитационной зоной, внутри которой возникает обширная область пониженного давления, и без неё, но с образованием вихревых структур с наличием в них очагов кавитационных пузырьков. При определённых величинах отношения входного к выходному давлению, которые являются постоянными для каждого значения степени перекрытия потока, на частотах $0,5\text{--}5$ кГц возникают мощные пики давления резонансного типа с амплитудой, в $2\text{--}2,5$ раза превышающей максимальное значение входного давления.

Ключевые слова: гидродинамический генератор плоского типа, кавитация, резонансные волны, пики давления, частота, амплитуда, вихри.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524873252-256>

Основной задачей в волновой технологии, базирующейся на возбуждении нелинейных колебаний в многофазных средах, постановка которой возникла вследствие запросов практики, является создание научных основ проектирования волновых машин и механизмов, теоретическое обоснование которых изложено в работах [1–3]. Среди известных волновых устройств заметное место занимают проточные волновые генераторы, в плоских профилированных каналах которых установлены препятствия различных форм [4]. В этих генераторах для возбуждения мощных колебаний и волн в обрабатываемых средах, являющихся одновременно и рабочей средой, используются высокотурбулентные, срывные, вихревые потоки жидкости и обширные области развитой кавитации. В генераторах этого типа при размещении в проточной части тела обтекания одновременно протекают и нелинейно взаимодействуют между собой гидродинамические, кавитационные и волновые процессы. Это, по-видимому, явилось следствием отсутствия достаточного количества экспериментальных и достоверных расчётных данных,

необходимых для проектирования подобных волновых машин.

В ряде имеющихся работ [5–8], где проводились экспериментальные исследования картины течения при обтекании водой одиночного кругового цилиндра в плоской рабочей камере с ограниченной площадью проходного сечения при числах $Re = 7 \cdot 10^4\text{--}1,9 \cdot 10^5$, степени перекрытия потока телами обтекания $20\text{--}30\%$, при скоростях набегающего потока $V = 5\text{--}23$ м/с, было показано, что с тела обтекания периодически срываются вихри, заполненные множеством кавитационных пузырьков. Максимальная кавитационная эрозия на боковой стенке канала возникает в месте схлопывания скопления кавитационных пузырьков этих вихрей. Пики переменного давления, замеренные малоинерционным датчиком в области максимальной эрозии, вызываются периодически срывающимися вихрями. Амплитуда пиков не превышает входного давления. При этом частота пиков давления точно соответствует числу срывающихся в секунду вихрей.

В работах [9, 10] приведены результаты исследования течения воды в сужающихся и расширяющихся каналах круглого сечения без тела обтекания. Было показано, что в проточной части этих каналов при определённых значениях входного давления

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской Академии наук, Москва
E-mail: v.p.rudakov@mail.ru

возникают развитые кавитационные зоны и режимы автоколебаний с амплитудой, сравнимой с входным давлением. Показана кинетика срывных каверн.

В работах [11–13] приведены результаты экспериментального исследования проточного гидродинамического генератора плоского типа с различными телами обтекания, степень перекрытия потока в канале которыми составляла 45%. В этих работах показано, что за телами обтекания формируется сложная картина течения, характеризующаяся развитой кавитацией. При определённом перепаде давления за телами обтекания возникают пики давления, при этом в результате схлопывания кавитационных пузырьков на стенках канала образуются очаги эрозии. Частота образования пиков давления линейно зависит от числа Рейнольдса Re , а число Струхала составляет $St = 0,7$. Однако, несмотря на важность представленных в этих работах материалов, они не дают возможности проследить динамику протекания кавитационных, гидродинамических и волновых процессов при изменении в широком диапазоне определяющих параметров и степени перекрытия потока телами обтекания.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния кавитации и степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания на картину течения, гидродинамические и спектральные характеристики проточного гидродинамического генератора плоского типа, базовые основы которого заложены в работах [1–3]. Испытания модели гидродинамического генератора плоского типа с цилиндрическими телами обтекания проводились на гидродинамическом стенде СТ = 3 Научного центра нелинейной волновой механики и технологии ИМАШ РАН, обеспечивающего при максимальном давлении $P_{вх} = 1,7$ МПа расход рабочей жидкости $G = 500$ л/мин. Модель генератора представляла собой плоский канал шириной $b = 22$ мм и высотой $h = 8$ мм (рис. 1).

В центре канала к нижней и верхней поверхности проточной части крепились цилиндры диаметрами $d = 2–18$ мм. Степень перекрытия потока определялась отношением площади поперечного сечения цилиндра S_t к площади поперечного сечения канала S_0 и составляла $S_t/S_0 = 0,1–0,82$. В качестве рабочего тела использовалась водопроводная вода при $t = 15$ °С. Давление на входе в генератор изменялось в диапазоне $P_{вх} = 0,2–1,0$ МПа, давление на выходе в диапазоне $P_{вых} = 0,1–0,8$ МПа. Диапазон изменения скорости набегающего потока перед телами обтекания составлял $V_0 = 9,5–27,5$ м/с, диапазон чисел Рейнольдса $Re = (V_0 d)/\nu = (0,5–5) \cdot 10^5$. Температура потока воды измерялась термопарой поверхностного типа с погрешностью $0,1$ °С. Давление на входе и выходе генератора измерялось манометрами Бурдона кл. 0,5. Пульсации давления измерялись пьезоэлектрическим датчиком типа 701К фирмы “Kistler”. Регистрация и обработка полученных данных производились на цифровом осциллографе Lecroy. Возникновение и развитие кавитационного процесса исследовались с помощью оптической визуализации кавитационных пузырьков в отражённом свете. Визуализационные картины регистрировались с помощью цифровой фотокамеры.

Результаты экспериментальных исследований моделей гидродинамического генератора плоского типа с цилиндрическими телами обтекания показали, что при повышении входного давления в диапазоне $P_{вх} = 0,2–1,0$ МПа и отсутствии противодействия ($P_{вых} = 0,1$ МПа) за цилиндрами образуется развитая кавитационная зона, которая создаёт заметное гидравлическое сопротивление основному потоку. При этом датчик переменного давления, расположенный в этой зоне, фиксирует низкоамплитудные пульсации давления, характерные для потока жидкости с низкой степенью турбулентности. Величина давления в донной области за цилиндрами

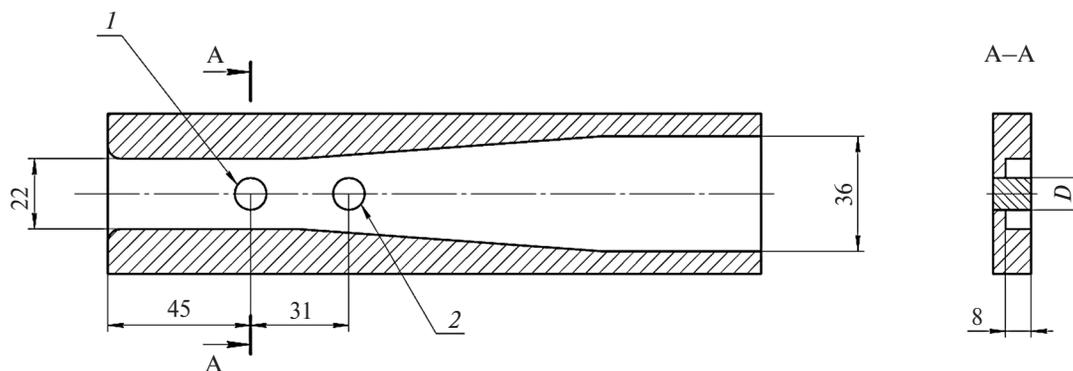


Рис. 1. Принципиальная схема проточного канала генератора плоского типа. 1 — тело обтекания — цилиндр, 2 — пьезоэлектрический датчик давления.

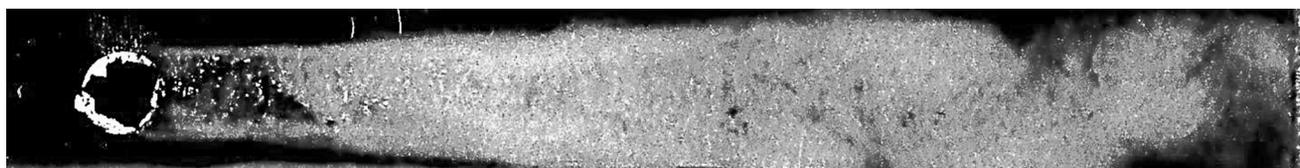
P_d с увеличением $P_{вх}$ вначале резко снижается, затем при $P_{вх} \geq 0,3$ МПа выходит на постоянное значение $P_d = 1-3$ КПа, не зависящее от $P_{вх}$. При этом, как показали визуализационные картины течения за телами обтекания в кавитационной области, образуется закрытая зона, заполненная периодически возникающими крупными газовыми пузырями, характерными для “режима кипения жидкости при пониженном давлении”. С увеличением степени перекрытия потока в диапазоне $S_i/S_0 = 0,1-0,82$ величина давления в этой зоне снижается с 3 до 1 КПа, что значительно ниже давления насыщенных паров воды (при температуре $t = 15$ °С), при котором происходит разрыв сплошности среды и образования кавитационных пузырьков. Точка выхода зависимости $P_d = F(\Delta P)$, где $\Delta P = P_{вх} - P_{вых}$, на постоянное значение P_d с увеличением S_i/S_0 смещается в сторону больших значений ΔP . В донной области на режимах до возникновения кипения жидкости P_d с увеличением S_i/S_0 возрастает, стремясь к значению $P_d = 100$ КПа. Особенно резко рост P_d происходит при $S_i/S_0 \geq 0,6$. При повышении $P_{вых}$ кавитационная зона, сформировавшаяся при $P_{вх} = 0,8$ МПа и $P_{вых} = 0,1$ МПа, сокращается и при определённых значениях ΔP практически исчезает, а за телами обтекания возникает известное течение жидкости с отрывом пограничного слоя с поверхности цилиндра и образованием вихревых дорожек.

Анализ визуализационных картин течения показал, что в проточной части гидродинамического генератора плоского типа за цилиндрическими телами обтекания при одном и том же перепаде давления могут реализоваться два различных вида течения: с развитой кавитационной зоной и без неё, но с образованием вихрей (рис. 2).

В последнем случае внутри вихревых образований возникают очаги с кавитационными пузырьками, которые при смещении вихревых дорожек вниз по потоку схлопываются, оставляя следы эрозии материала на контрольных вставках из свинца. Измерение пульсаций давления в донной области показало, что за телами обтекания при повышении $P_{вых}$ и исчезновении кавитационной зоны при определённых значениях ΔP возникают мощные пики давления, видимо, вследствие резонанса гидродинамических и акустических сил. Отношение $P_{вых}/P_{вх}$, при котором возникают пики давления для каждого значения S_i/S_0 , как показал анализ полученных данных, является постоянной величиной. С увеличением степени перекрытия потока в диапазоне $S_i/S_0 = 0,1-0,82$ величина этого отношения плавно уменьшается с 0,7 до 0,28. Амплитуда этих пиков давления $A_{рез}$ с ростом ΔP линейно возрастает для всех значений S_i/S_0 , видимо, вследствие интенсификации процессов схлопывания кавитационных пузырьков при увеличении $P_{вых}$ и, как показали данные при обработке осциллограмм, могут в 2,5 раза превышать максимальное значение $P_{вх}$ (рис. 3).

Зависимость $A_{рез} = F(S_i/S_0)$ является существенно нелинейной с наличием характерного максимума при $S_i/S_0 = 0,5$. Видно, что наибольшая интенсивность волновых процессов реализуется в исследуемом генераторе при установке цилиндрических тел обтекания, диаметры которых лежат в диапазоне $D = 8-13$ мм ($S_i/S_0 = 0,35-0,6$). Частота возникновения резонансных пиков давления f с увеличением ΔP для всех диаметров тел обтекания линейно возрастает, но производная роста с увеличением S_i/S_0 снижается. При увеличении S_i/S_0 до 82% частота пиков давления снижается на порядок (рис. 4).

(а)



(б)



Рис. 2. Фотографии картин течения в волновом генераторе плоского типа за телом обтекания — цилиндр $D = 10$ мм при $\Delta P = 0,2$ МПа ($S_i/S_0 = 0,455$). а — $P_{вх} = 0,3$ МПа, $P_{вых} = 0,1$ МПа; б — $P_{вх} = 0,5$ МПа, $P_{вых} = 0,3$ МПа.

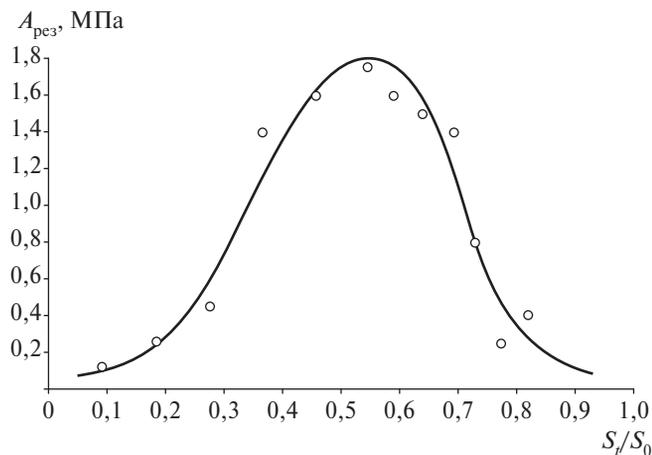


Рис. 3. Зависимость $A_{рез} = F(S_i/S_0)$ при $\Delta P = 0,3$ МПа.

Зависимость $f = F(Re)$ для каждого значения S_i/S_0 носит линейный характер и описывается выражением $f = kRe$, где $k = df/dRe$ — постоянная величина для каждого значения S_i/S_0 . С увеличением S_i/S_0 производная роста зависимости $f = F(Re)$ существенно снижается. Зависимость числа Струхала St от степени перекрытия потока $St = F(S_i/S_0)$ в исследуемом диапазоне чисел $Re = (0,5-5) \cdot 10^5$ также носит линейный характер. С ростом S_i/S_0 величина St при $S_i/S_0 = 0,82$ достигает значения $St = 1,2$. Экстраполяция этой зависимости в сторону значений $S_i/S_0 < 0,1$ показывает, что число St стремится к величине $St = 0,2$, полученной для полубесконечного обтекания цилиндра при числах $Re = 10^4-10^5$.

В результате проведённых исследований получено:

в проточной части гидродинамического генератора плоского типа за цилиндрическими телами обтекания при одном и том же перепаде давления могут реализоваться два различных вида течения: с развитой кавитационной зоной и без неё, но с наличием попеременно образующихся вихрей, возникающих в результате отрыва пограничного слоя с поверхности тел обтекания;

внутри вихревых образований возникают крупные очаги кавитационных пузырьков, которые при смещении вихревых дорожек вниз по потоку схлопываются, при этом при определённых значениях перепада давления за телами обтекания возникают мощные пики давления резонансного типа, амплитуда которых в 2–2,5 раза превышает максимальное значение входного давления;

отношение $P_{вых}/P_{вх}$, при котором возникают пики давления, для каждого значения S_i/S_0 являются постоянной величиной, которая с ростом S_i/S_0 медленно падает;

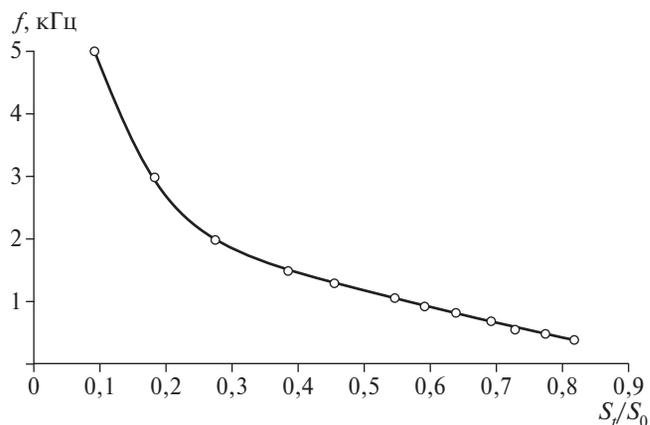


Рис. 4. Зависимость $f = F(S_i/S_0)$ при $\Delta P = 0,3$ МПа.

амплитуда резонансных пиков давления $A_{рез}$ с увеличением ΔP линейно возрастает; зависимость $A_{рез} = F(S_i/S_0)$ является существенно нелинейной с наличием характерного максимума при $S_i/S_0 = 0,5$; наибольшая интенсивность волновых процессов реализуется при установке тел обтекания, диаметры которых лежат в диапазоне $D = 8-13$ мм ($S_i/S_0 = 0,35-0,6$);

частота возникновения пиков давления резонансного типа для каждого значения S_i/S_0 с увеличением ΔP линейно возрастает, а с увеличением S_i/S_0 в диапазоне 0,1–0,82 снижается на порядок;

зависимость числа Струхала от степени перекрытия потока $St = F(S_i/S_0)$ в исследуемом диапазоне чисел $Re = (0,5-5) \cdot 10^5$ носит линейный характер; с ростом S_i/S_0 величина St увеличивается и при $S_i/S_0 = 0,82$ достигает значения $St = 1,2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. М.: Науч.-изд. центр РХД, 2008. 712 с.
2. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию). М.: Науч.-изд. центр РХД, 2008. 192 с.
3. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. М.: Науч.-изд. центр РХД, 2013. 592 с.
4. Патент 2 306 972 МПК В01F 5/00 Устройство для гомогенизации и приготовления смесей / Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. и др. // Бюл. 2007. № 27.
5. Шальнев К.К. Критерий возникновения срывной кавитации круглого профиля // ДАН. 1948. Т. 61. № 5. С. 799–802.
6. Шальнев К.К. Кинетическая структура срывной кавитации круглого профиля // ДАН. 1954. Т. 97. № 5. С. 785–788.

7. Шальнев К.К. Давление и эрозия в области срывной кавитации круглого профиля // Изв. АН СССР. ОТН. 1954. В. 6. С. 111–119.
8. Шальнев К.К. Условия интенсивности кавитационной эрозии // Изв. АН СССР. ОТН. 1956. В. 1. С. 3–20.
9. Эпштейн Л.А. Динамика каверн при течениях жидкости в трубке с пережатием. М., 1972. 20 с.
10. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания. Киев: Наук. думка, 1989. 314 с.
11. Шмырков О.В., Юшков Н.Б., Кормилицын В.И. Исследование характеристик плоского генератора проточного типа с различными телами обтекания // Инж. журн. 2013. № 2. С. 12–19.
12. Юшков Н.Б., Шмырков О.В., Кормилицын В.И. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 83–87.
13. Кормилицын В.И., Шмырков О.В., Юшков Н.Б. Особенности течения жидкости в плоском канале переменного сечения при высокой загроможденности препятствиями различного вида // ДАН. 2015. Т. 461. № 3. С. 277–280.

THE INFLUENCE OF CAVITATION AND THE DEGREE OF OVERLAP OF THE FLOW OF CYLINDRICAL FLOW BODIES ON THE FLOW PATTERN, HYDRODYNAMIC AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A FLAT-TYPE HYDRODYNAMIC GENERATOR

S. R. Ganiev, O. V. Shmyrkov, V. P. Rudakov

*Institute of Machines Science named after A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS R.F. Ganiev October 23, 2018

Received October 24, 2018

The paper presents the results of studies of flow behind cylindrical flow bodies in a flat-flow hydrodynamic generator, obtained on the hydrodynamic bench of the experimental base of the National Scientific Center NBMТ RAS with the degree of flow blocking by flow bodies $S_f/S_0 = 10\text{--}80\%$, Re numbers $(0,5\text{--}5) \cdot 10^3$, PVH inlet pressure = 0,1–0,8 MPa. It was found that with the same pressure drop two different types of flow can be realized behind the flow bodies: with a developed cavitation zone, within which there is an extensive low pressure area and without it, but with the formation of vortex structures with the presence of centers of cavitation bubbles in them. At a certain value of input to output pressure, which is constant for each value of the degree of overlap of the flow, powerful pressure peaks of the resonant type arise with an amplitude of 2–2,5 times the maximum value of the input pressure. The frequency of occurrence of these pressure peaks increases linearly with increasing pressure drop, and decreases by an order of magnitude with an increase in the degree of overlap of flow up to 80%. The frequency dependence of the number Re for each value of S_f/S_0 is linear. The value of the Strouhal number St with an increase in S_f/S_0 increases linearly with $S_f/S_0 = 0,82$ and the value $St = 1,2$.

Keywords: flat-type hydrodynamic generator, cavitation, resonance waves, pressure peaks, frequency, amplitude, vortices.