

УДК 532.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРОТОЧНОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПЛОСКОГО ТИПА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СТЕПЕНИ ПЕРЕКРЫТИЯ ПОТОКА

© 2023 г. С. Р. Ганиев<sup>а</sup>, А. И. Крюков<sup>а,\*\*</sup>, В. П. Рудаков<sup>а,\*</sup>, О. В. Шмырков<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: v.p.rudakov@mail.ru

\*\*E-mail: lle@bk.ru

Поступила в редакцию 06.04.2022 г.

После доработки 24.09.2022 г.

Принята к публикации 20.10.2022 г.

Представлены результаты исследований течения за цилиндрическими телами обтекания в проточном гидродинамическом генераторе плоского типа, полученные на гидродинамическом стенде экспериментальной базы НЦ НВМТ ИМАШ РАН при степени перекрытия потока телами обтекания  $S_l/S_0 = 10\text{--}82\%$ , числах  $Re = (0.5\text{--}5) \times 10^5$ , давлении на входе  $P_{вх} = 0.1\text{--}0.9$  МПа. Получено, что при определенных величинах отношения входного к выходному давлению, которые являются постоянными для каждого значения степени перекрытия потока, на частотах 0.5–5 кГц возникают мощные пики давления резонансного типа с амплитудой, более чем в 4–5 раза превышающей максимальное значение входного давления.

*Ключевые слова:* гидродинамика, вихри, амплитуда, частота, резонанс, нелинейные волны, тела обтекания

**DOI:** 10.31857/S0568528122100176, **EDN:** NSNGTU

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 высоко турбулентные, срывные, вихревые потоки жидкости. В генераторах этого типа при размещении в проточной части тела обтекания одновременно протекают и нелинейно взаимодействуют между собой гидродинамические и волновые процессы. Это, по-видимому, явилось следствием отсутствия достаточного количества экспериментальных и достоверных расчетных 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  $Re = 7 \times 10^4\text{--}1.9 \times 10^5$ , степени перекрытия потока телами обтекания 20–30%, при скоростях набегающего потока  $V = 5\text{--}23$  м/с, было показано, что с тела обтекания периодически срываются вихри. Пики переменного давления, замеренные малоинерционным датчиком, вызываются периодически срывающимися вихрями. 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 определенных значениях входного давления возникают режимы автоколебаний с амплитудой, сравнимой с входным давлением. Показана кинетика срывных каверн. В работах [11–13] приведены результаты экспериментального исследования проточного генератора плоского типа с различными телами обтекания, степень перекрытия потока в канале которыми составляла 45%. В этих

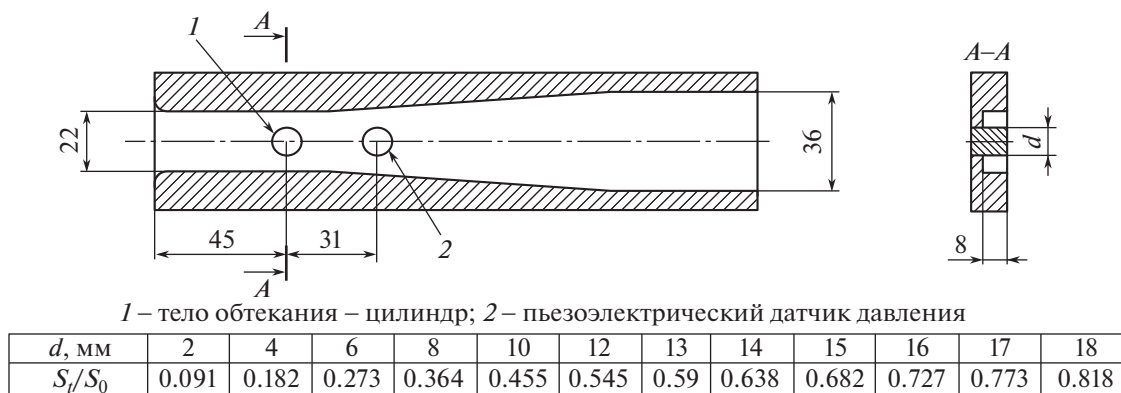


Рис. 1. Принципиальная схема проточного канала генератора плоского типа.

работах показано, что за телами обтекания формируется сложная картина течения. При определенном перепаде давления за телами обтекания возникают пики давления. 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 гидродинамических и волновых процессов при изменении в широком диапазоне степени перекрытия потока телами обтекания и определяющих параметров.

## 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭКСПЕРИМЕНТА

Испытания проводились на гидродинамическом стенде, обеспечивающем при давлении на входе  $P_{\text{вх}} = 1.7$  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  $S_i$  к площади поперечного сечения канала  $S_0$  и составляла  $S_i/S_0 = 0.1-0.82$ . В качестве рабочего тела использовалась водопроводная вода при  $t = 15^\circ\text{C}$ . Давление на входе в генератор изменялось в диапазоне  $P_{\text{вх}} = 0.2-1.0$  МПа, давление на выходе в диапазоне  $P_{\text{вых}} = 0.1-0.8$  МПа. Диапазон изменения скорости набегающего потока перед телами обтекания составлял  $V_0 = 9.5-27.5$  м/с, диапазон чисел Рейнольдса  $Re = (V_0 d)/\nu = (0.5-5) \times 10^5$  где  $\nu$  – кинетическая вязкость рабочей среды. Температура потока воды измерялась термопарой поверхностного типа с погрешностью  $0.1^\circ\text{C}$ .

Давление на входе и выходе генератора измерялось манометрами Бурдона класс точности 0.5. Пульсации давления измерялись пьезоэлектрическим датчиком типа 701 К фирмы *Kistler*. Регистрация и обработка полученных данных производились на цифровом осциллографе *Lecroy*. Визуализация картины течения осуществлялась с помощью скоростной цифровой фотокамеры со временем экспозиции  $1/80000$  с.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований моделей гидродинамического генератора плоского типа с цилиндрическими телами обтекания показали, что при повышении входного давления в диапазоне  $P_{\text{вх}} = 0.2-1.0$  МПа и отсутствии противодавления ( $P_{\text{вых}} = 0.1$  МПа) за цилиндрами образуется мощное турбулентное течение, которое создает 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  $P_{\text{д}}$  с увеличением  $P_{\text{вх}}$  вначале резко снижается, затем при  $P_{\text{вх}} \geq 0.3$  МПа выходит на постоянное значение  $P_{\text{д}} = 1-3$  КПа, не зависящие от  $P_{\text{вх}}$ . При этом, как показали картины визуализации течения, за телами обтекания образуется закрытая зона, заполненная периодически возникающими крупными газовыми пузырями, характерными для кипения жидкости при пониженном давлении.

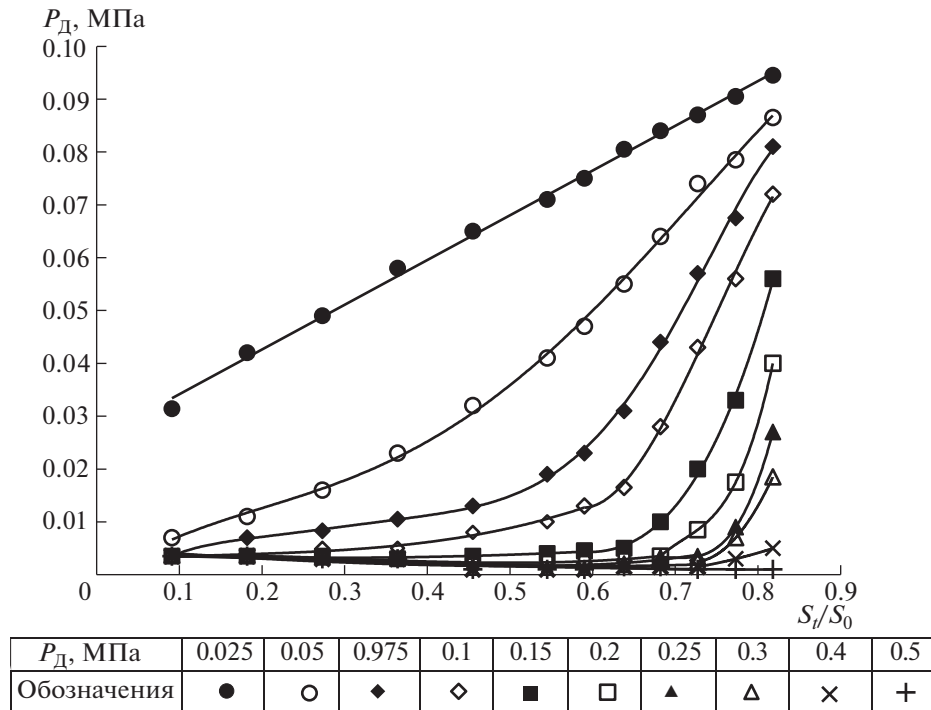


Рис. 2. Зависимости  $P_d = F(S_i/S_0, \Delta P)$  для гидродинамического генератора плоского типа  $P_{\text{ВЫХ}} = 0.1$  МПа,  $P_{\text{ВХ}} = 0.1-0.9$  МПа.

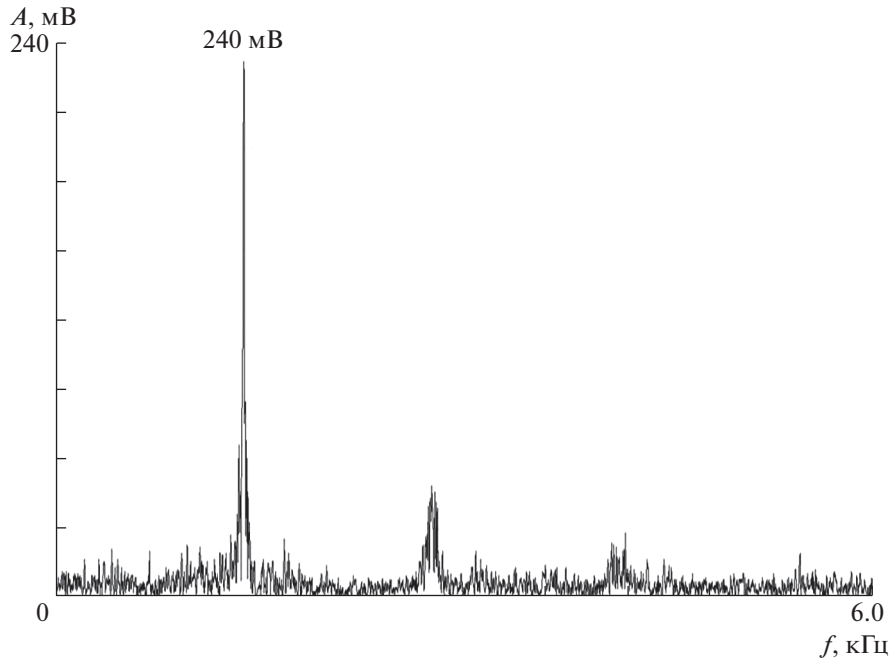
нии. С увеличением степени перекрытия потока в диапазоне  $S_i/S_0 = 0.1-0.82$  величина давления в этой зоне снижается до 1 КПа. Точка выхода зависимости  $P_d = F(\Delta P)$ , где  $\Delta P = P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}$ , на постоянное значение  $P_d$  с увеличением  $S_i/S_0$  смещается в сторону больших значений  $\Delta P$ . В донной области на режимах до возникновения кипения жидкости  $P_d$  с увеличением  $S_i/S_0$  возрастает. Особенно резко рост  $P_d$  происходит при  $S_i/S_0 \geq 0.6$  (рис. 2).

Анализ картин течения показал, что в проточной части гидродинамического генератора плоского типа за цилиндрическими телами обтекания при варьировании величиной перепада давления  $\Delta P = P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}$  возникает известное течение жидкости с отрывом пограничного слоя с поверхности цилиндра и образованием пульсирующих вихревых дорожек, при этом эти дорожки прерывисто заполняют донную область протяженностью 2.5–3 калибра тела обтекания. Анализ результатов измерений пульсаций давления в донной области так же показал, что в проточной части гидродинамического генератора плоского типа за телами обтекания возникают мощные нелинейные волны давления только при определенных значениях отношения  $(P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}})_{\text{РЕЗ}}$ , которое является практически независимым от величины  $P_{\text{ВХ}}$  и постоянной для каждой степени перекрытия. 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.

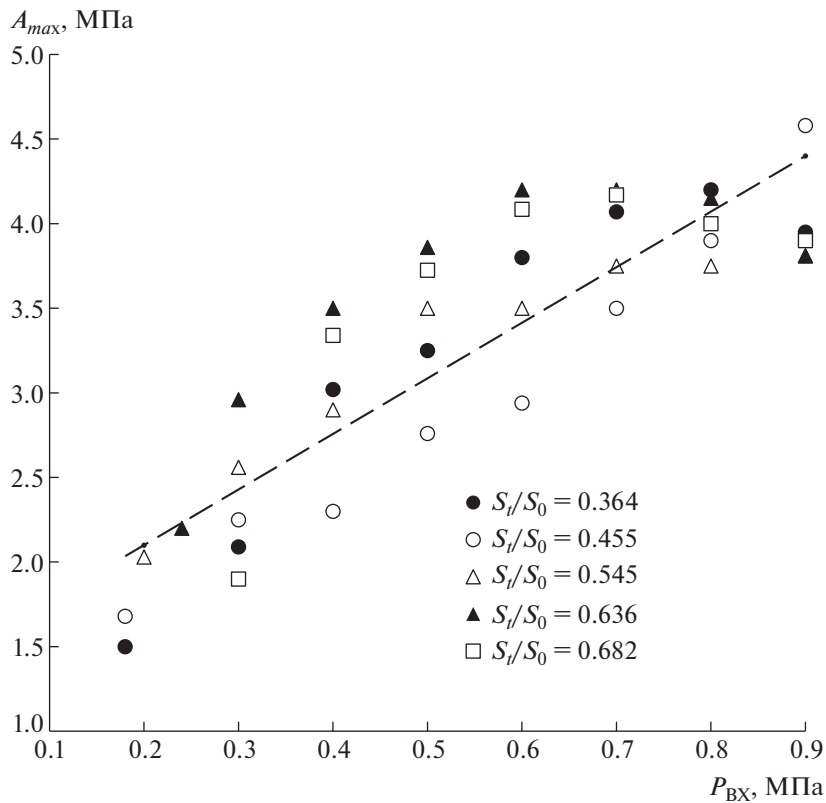
Амплитудно-частотная характеристика мощных нелинейных волн давления и сопровождающих их волн на кратных частотах с небольшими амплитудами (видимо, вследствие резонанса гидродинамических и акустических сил при схлопывании семейства кавитационных пузырьков в вихревых образованиях), показана на (рис. 3).

Амплитуда этих пиков давления  $A_{\text{max}}$ , измеренная пьезодатчиком в единицах давления, с ростом  $P_{\text{ВХ}}$  возрастает для всех значений  $S_i/S_0$  (рис. 4), видимо, вследствие интенсификации процесса схлопывания кавитационных пузырьков при увеличении  $P_{\text{ВЫХ}}$ . При этом величина  $A_{\text{max}}$  может более чем в 4–5 раза превзойти максимальную величину  $P_{\text{ВХmax}}$ .

Частота возникновения резонансных пиков давления  $f$  с увеличением  $P_{\text{ВХ}}$  для всех диаметров тел обтекания линейно возрастает и при  $S_i/S_0 = 0.091$  может достигать  $f = 5$  кГц. При увеличении  $S_i/S_0$  до 0.818 частота пиков давления снижается на порядок (рис. 5.)



**Рис. 3.** Амплитудочастотная характеристика пульсаций давления в потоке жидкости за цилиндрическим телом обтекания на режиме возбуждения мощных нелинейных волн давления в гидродинамическом генераторе плоского типа при степени перекрытия  $S_l/S_0 = 0.4545$ ,  $P_{ВХ} = 0.8$  МПа,  $P_{ВЫХ}/P_{ВХ} = 0.625$ ,  $f_{max} = 1.4$  кГц.



**Рис. 4.** Зависимость  $A_{max} = F(P_{ВХ}, S_l/S_0)$  для режима возбуждения мощных нелинейных волн давления за цилиндрическими телами обтекания в генераторе плоского типа.

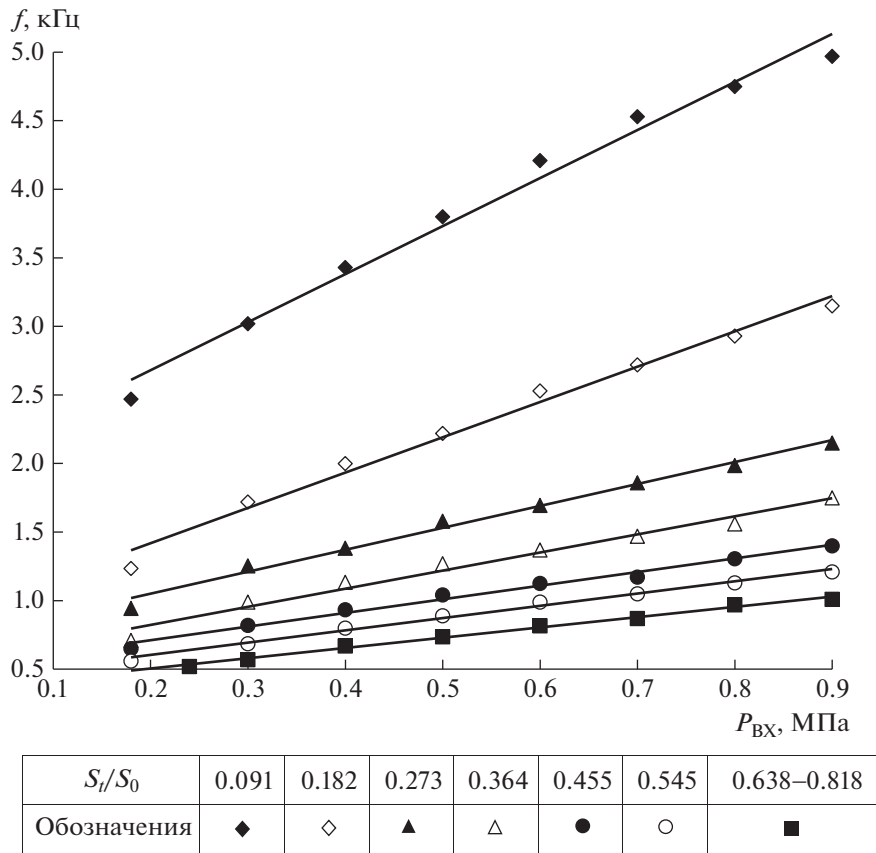


Рис. 5. Зависимости  $f = F(P_{вх}, S_l/S_0)$  для гидродинамического генератора плоского типа на режиме возбуждения за телами обтекания мощных нелинейных волн давления.

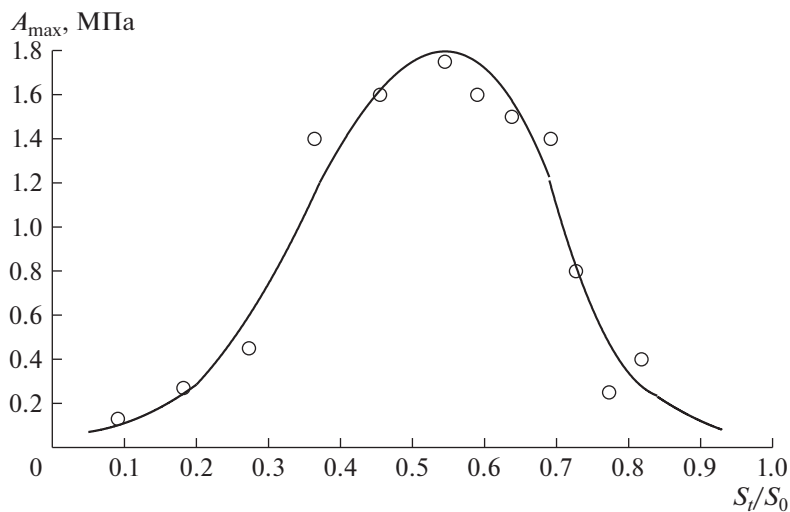


Рис. 6. Зависимость  $A_{max} = F(S_l/S_0)$  для режимов возбуждения нелинейных волн давления при  $\Delta P = P_{вх} - P_{вых} = 0.3$  МПа.

Зависимость  $A_{max} = F(S_l/S_0)$  (рис. 6.) является существенно нелинейной, с наличием характерного максимума при  $S_l/S_0 \approx 0.5$ . Видно, что наибольшая интенсивность волновых процессов реализуется в настоящем генераторе при установке цилиндрических тел обтекания, диаметры которых лежат в диапазоне  $d = 8-13$  мм ( $S_l/S_0 \approx 0.35-0.6$ ).

Зависимость  $f = F(\text{Re})$  для каждого значения  $S_f/S_0$  носит линейный характер и описывается выражением  $f = k\text{Re}$ , где  $k = df/d\text{Re}$  – постоянная величина для каждого значения  $S_f/S_0$ . С увеличением  $S_f/S_0$  производная роста зависимости  $f = F(\text{Re})$  существенно снижается. Зависимость числа Струхала  $St$  от степени перекрытия потока  $St = F(S_f/S_0)$  в исследуемом диапазоне чисел  $\text{Re} = (0.5-5) \times 10^5$  так же носит линейный характер. С ростом  $S_f/S_0$  величина  $St$  при  $S_f/S_0 = 0.82$  достигает значения  $St = 1.2$ . Экстраполяция этой зависимости в сторону значений  $S_f/S_0 < 0.1$  показывает, что число  $St$  стремится к величине  $St = 0.2$ , полученной для полубесконечного обтекания цилиндра при числах  $\text{Re} = 10^4-10^5$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получено в проточной части гидродинамического генератора проточного типа за цилиндрическими телами обтекания при определенных значениях отношения  $P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$ , являющихся постоянной величиной для каждого значения  $S_f/S_0$ , реализуется течение с наличием попеременно образующихся вихрей, возникающих в результате отрыва пограничного слоя с поверхности тел обтекания и порождающих мощные пики давления резонансного типа, амплитуда которых более чем в 4–5 раза превышает максимальное значение входного давления;

– амплитуда резонансных пиков давления  $A_{\text{max}}$  с увеличением  $P_{\text{ВХ}}$  линейно возрастает;

– зависимость  $A_{\text{max}} = F(S_f/S_0)$  является существенно нелинейной с наличием характерного максимума при  $S_f/S_0 = 0.5$ , таким образом, наибольшая интенсивность волновых процессов реализуется при установке тел обтекания, диаметры которых лежат в диапазоне  $d = 8-13$  мм ( $S_f/S_0 = 0.35-0.6$ );

– частота возникновения максимальных пиков давления резонансного типа для каждого значения  $S_f/S_0$  с увеличением  $P_{\text{ВХ}}$  линейно возрастает, в то время как с увеличением  $S_f/S_0$  в диапазоне  $0.1-0.82$  снижается на порядок;

– зависимость числа Струхала от степени перекрытия потока  $St = F(S_f/S_0)$  в исследуемом диапазоне чисел  $\text{Re} = (0.5-5) \times 10^5$  носит линейный характер. С ростом  $S_f/S_0$  величина  $St$  увеличивается и при  $S_f/S_0 = 0.82$  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. Науч.-изд. Центр РХД, 2013. 592 с.
4. Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. и др. Патент 2 306 972 МПК В01F 5/00. Устройство для гомогенизации и приготовления смесей. 2007. Бюл. № 27.
5. Шальнев К.К. Критерий возникновения срывной кавитации круглого профиля // ДАН СССР. Гидромеханика. 1948. Т. LXI. Вып. 5. С. 799–802.
6. Шальнев К.К. Кинетическая структура срывной кавитации круглого профиля // ДАН СССР. Гидромеханика. 1954. Т. ХСVII. Вып. 5. С. 785–788.
7. Шальнев К.К. Давление и эрозия в области срывной кавитации круглого профиля // Изв. АН СССР. ОТН. 1954. Вып. 6. С. 111–119.
8. Шальнев К.К. Условия интенсивности кавитационной эрозии // Изв. АН СССР, ОТН. 1956. Вып. 1. С. 3–20.
9. Daily J.W. Cavitation Characteristics and Infinites Aspect – Ratio Characteristics of a Hydrofoil Section. Trans // ASME. 1949. V. 70. № 3.
10. Эпштейн Л.А. Динамика каверн при течениях жидкости в трубке с пережатием // Тр. ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. 1972.
11. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания. Киев: Наукова Думка, 1989. 314 с.
12. 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.
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.