

---

---

**МЕХАНИКА МАШИН**

---

---

УДК 552.5.073;532.2;534.143

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ И ДАВЛЕНИЯ НА ВХОДЕ И ВЫХОДЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ВИХРЕВОГО ТИПА**© 2022 г. С. Р. Ганиев<sup>1</sup>, О. В. Шмырков<sup>1</sup>, Д. В. Курмев<sup>1</sup>, А. И. Крюков<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: lle@bk.ru

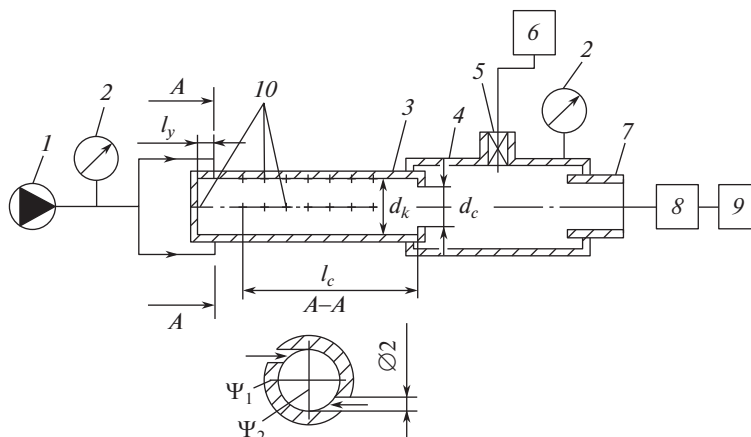
Поступила в редакцию 17.11.2021 г.  
Принята к публикации 11.02.2022 г.

В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния геометрии проточной части рабочей камеры и давления на входе и выходе генератора вихревого типа на интенсивность и характер протекания нелинейных волновых и гидродинамических процессов, картину течения, величину и характер распределения давления в камере генератора.

*Ключевые слова:* волновые процессы, гидродинамика, давление, пульсации, амплитуда, частота

**DOI:** 10.31857/S023571192203004X

Базовой задачей волновой технологии является разработка научных основ проектирования волновых машин и аппаратов. Теоретические основы протекания волновых процессов в многофазных средах изложены в работах [1–3]. Расчетные и экспериментальные исследования в этом направлении ведутся в основном на конкретных типах волновых устройств. В волновой технологии, базирующейся на возбуждении нелинейных колебаний и волн в многофазных средах, важную роль играют проточные гидродинамические генераторы вихревого типа [4]. В таких генераторах колебания давления возбуждаются проходящим высокотурбулентным закрученным и завихренным потоком жидкости, которая одновременно является обрабатываемой и рабочей средой. В ряде работ [5–9], посвященных исследованию течения в проточном гидродинамическом генераторе вихревого типа, было показано, что в проточной части реализуется сложная картина течения. В ней одновременно протекают взаимодействующие между собой гидродинамические, кавитационные и нелинейные волновые процессы. Интенсивность этих процессов существенно зависит от расположения отверстий тангенциальных каналов подачи рабочей среды, давления на входе и выходе, степени закрутки потока, длине и диаметре камеры и сопла генератора. В частности, наибольшая интенсивность кавитации реализуется в донной части генератора. Зависимости интенсивности кавитации от величины смещения подающих тангенциальных каналов и диаметра камеры носят нелинейный характер с наличием четких максимумов. При уменьшении диаметра камеры на выходе генератора в два раза и смещении тангенциальных каналов на расстояние от дна камеры, равное двум калибрам, интенсивность кавитации увеличивается практически на порядок. Однако, как показал анализ, несмотря на важность имеющихся в этих работах расчетных и экспериментальных данных, их оказалось недостаточно для описания реальной картины течения и про-



**Рис. 1.** Принципиальная схема гидродинамического стенда: 1 – плунжерный насос; 2 – манометры; 3 – гидродинамический генератор колебаний вихревого типа; 4 – рабочая камера; 5 – датчик динамического давления; 6 – осциллограф; 7 – дроссель; 8 – расходомер; 9 – регулировочный вентиль; 10 – точки измерения статического давления.

цессов, протекающих в камере генератора и, соответственно, для модернизации существующих физико-математических моделей с целью получения достоверных расчетных данных.

Цель статьи – исследование влияния геометрии проточной части и давления на входе и выходе гидродинамического генератора вихревого типа на интенсивность и характер протекания гидродинамических и нелинейных волновых процессов, величину и характер распределения давления в камере генератора при изменении в широком диапазоне определяющих параметров.

**Методы и средства эксперимента.** Испытание модели проточного гидродинамического генератора вихревого типа проводилось на экспериментальной базе НЦ НВМТ (ИМАШ РАН). Принципиальная схема стенда представлена на (рис. 1). Генератор представлял собой цилиндрический стакан, в боковой стенке которого были выполнены два тангенциальных канала диаметром  $d_y = 2$  мм для подачи жидкости в камеру генератора. Расстояние от плоскости осевого сечения подающих каналов до дна камеры  $l_y = 5$  мм. Диаметр камеры генератора  $d_k = 10$  мм. Камера генератора была выполнена длиной  $l_k = 40$  мм для получения максимальной амплитуды колебаний давления в нем [5].

На выходе камеры устанавливали сопла в виде цилиндрических отверстий с диаметрами  $d_c = 2.5, 3.0, 3.5, 3.7, 4.0, 4.2, 4.5, 5.0, 7.0$  и  $9.0$  мм. В качестве рабочей среды использована водопроводная вода при температуре  $T = 25^\circ\text{C}$ . Давление воды на входе в генератор изменялось в диапазоне  $P_{\text{in}} = 0.1\text{--}5.0$  МПа; на выходе  $P_{\text{out}} = 0.1\text{--}1.0$  МПа. Эти давления измерялись манометрами класса 1, расход и температура воды измерялась датчиками с погрешностью  $\pm 1\%$ . Для измерения пульсаций давления в рабочей части за генератором был установлен пьезоэлектрический датчик типа 701A фирмы “Kistler”. Сигнал с датчика поступал на усилитель-преобразователь “Kistler-5011”, а затем для записи и обработки на осциллограф “Лесрой НРО 66Zi”. Измерение статического давления в центре дна  $P_d$  и на боковой поверхности камеры  $P_k$  генератора проводили манометрами и мановакумметрами класса 0.5.

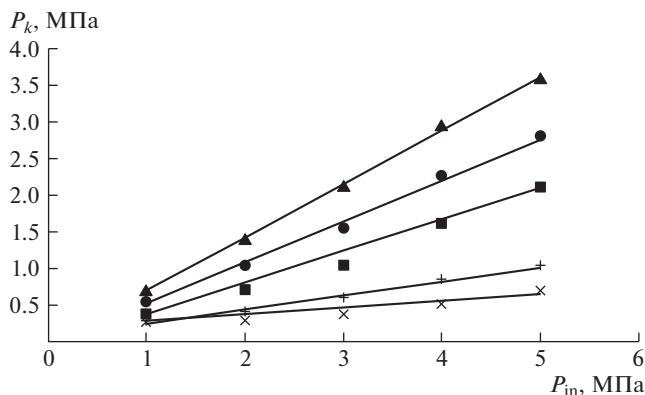


Рис. 2. Зависимость  $P_k = f(P_{in}, d_c/d_k)$  при  $P_{out} = 0.1$  МПа: ▲ —  $d_c/d_k = 0.25$ ; ● —  $d_c/d_k = 0.35$ ; ■ —  $d_c/d_k = 0.4$ ; + —  $d_c/d_k = 0.7$ ; × —  $d_c/d_k = 0.9$ .

**Результаты исследований.** Измерение распределения давления на боковой стенке камеры генератора показало, что величина давления по длине камеры и в плоскостях  $\Psi_1 = 0-180^\circ$  и  $\Psi_2 = 90-270^\circ$  практически не меняются. Вблизи выходных отверстий тангенциальных каналов в плоскости  $\Psi_1 = 0-180^\circ$  давление повышается на 20–30% и при смещении в плоскость  $\Psi_2 = 90-270^\circ$  настолько же снижается. С увеличением входного давления  $P_{in}$  статическое давление на боковой поверхности камеры линейно возрастает при всех исследуемых диаметрах сопла (рис. 2).

Зависимость  $P_k = f(d_c/d_k)$  носит нелинейный характер. С уменьшением диаметра сопла  $P_k$  возрастает (рис. 3), что, по-видимому, связано с усилением возвратного течения в камере генератора и влиянием вихревой каверны на его гидравлическое сопротивление.

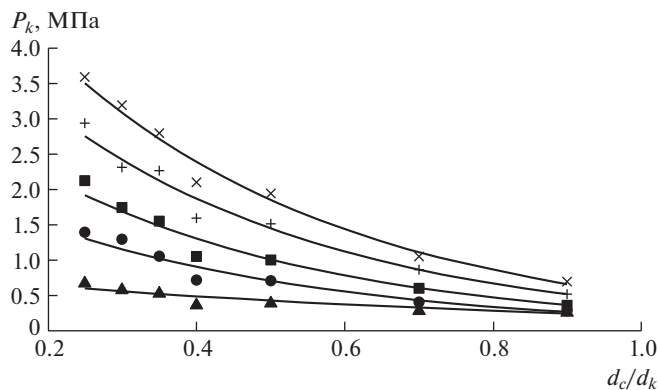
Повышение давления на входе генератора также приводит к росту  $P_k$ . При  $P_{in} = 5.0$  МПа,  $P_{out} = 0.3$  МПа,  $d_c/d_k = 0.25$  давление на боковой поверхности камеры достигает  $P_k = 3.5$  МПа, что составляет 70% от входного давления.

При ступенчатом характере изменения диаметра сопла в диапазоне  $d_c/d_k = 0.3-0.45$  при  $P_{in} = 5.0$  МПа,  $P_{out} = 0.1$  МПа в проточной части генератора на частотах  $f = 4.0-4.3$  кГц возбуждаются пики давления резонансного типа (рис. 4).

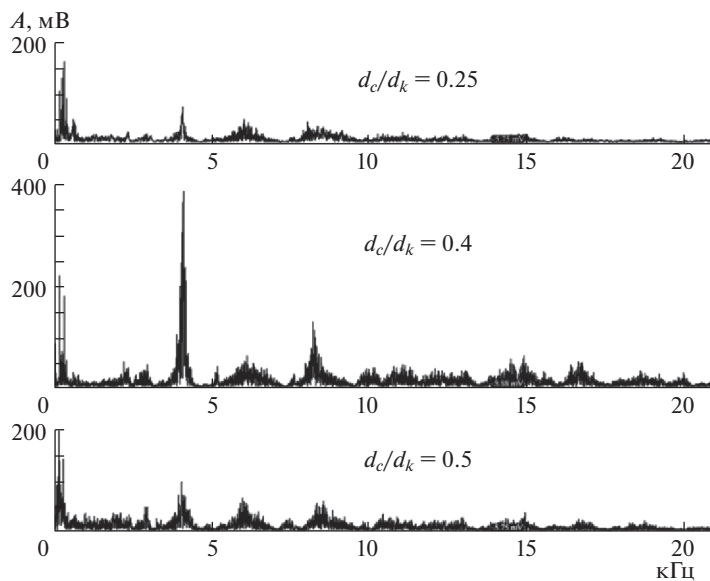
С увеличением гидростатического давления на выходе до  $P_{out} = 0.3$  МПа амплитуда этих пиков пульсации давления возрастает в 5 раз и достигает величины  $A = 0.8$  МПа (рис. 5).

При дальнейшем увеличении давления на выходе до  $P_{out} = 1.0$  МПа амплитуда этих пиков снижается. Зависимость  $A_{max} = f(d_c/d_k)$  является существенно нелинейной с характерным максимумом при  $d_c/d_k = 0.35$ . Эти данные свидетельствуют о резком повышении интенсивности протекания волновых процессов в камере генератора при изменении диаметра сопла в пределах  $d_c/d_k = 0.35-0.45$ . Давление на дне камеры генератора с уменьшением диаметра сопла в пределах  $d_c/d_k = 0.9-0.25$  при  $P_{in} = 5.0$  МПа и  $P_{out} = 0.1$  МПа плавно возрастает с  $P_d = 0.003$  МПа до  $P_d = 1.6$  МПа.

Зависимость  $P_d = f(P_{in}, d_c/d_k)$ , (рис. 6) носит сложный нелинейный характер. Так при  $d_c/d_k > 0.7$  донное давление при всех  $P_{in}$  ниже атмосферного и с увеличением  $P_{in}$  до 5 МПа плавно снижается до  $P_d = 0.003$  МПа. При  $d_c/d_k \leq 0.7$  с увеличением  $P_{in}$  донное



**Рис. 3.** Зависимость  $P_k = f(P_{in}, d_c/d_k)$  при  $P_{out} = 0.1$  МПа:  $\blacktriangle$  –  $P_{in} = 1$  МПа;  $\bullet$  –  $P_{in} = 2.0$  МПа;  $\blacksquare$  –  $P_{in} = 3.0$  МПа;  $+$  –  $P_{in} = 4.0$  МПа;  $\times$  –  $P_{in} = 5.0$  МПа.



**Рис. 4.** Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления в проточном гидродинамическом генераторе вихревого типа при  $P_{in} = 5.0$  МПа,  $P_{out} = 0.3$  МПа.

давление вначале плавно снижается ниже атмосферного, а затем при определенной величине  $P_{in}$  для конкретного диаметра сопла начинает резко возрастать до величины, заметно превышающей атмосферное давление, при этом наиболее существенно с уменьшением диаметра сопла.

Это связано с тем, что при уменьшении диаметра сопла в конце камеры образуется кольцевая площадка перпендикулярная оси генератора. По-видимому, это приводит к возникновению обратного течения части основного потока от сопла к днищу камеры. Наличие вращательной составляющей потока может приводить к появлению торои-

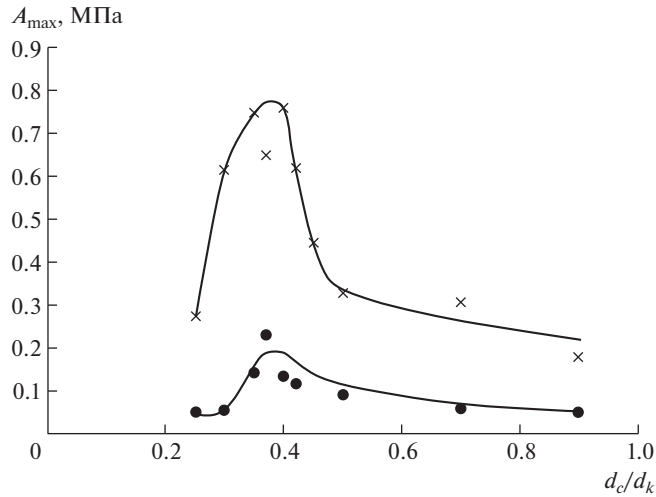


Рис. 5. Зависимость  $A_{\max} = f(d_c/d_k, P_{\text{out}})$  при  $P_{\text{in}} = 5.0$  МПа: ● –  $P_{\text{out}} = 0.1$  МПа; × –  $P_{\text{out}} = 0.3$  МПа.

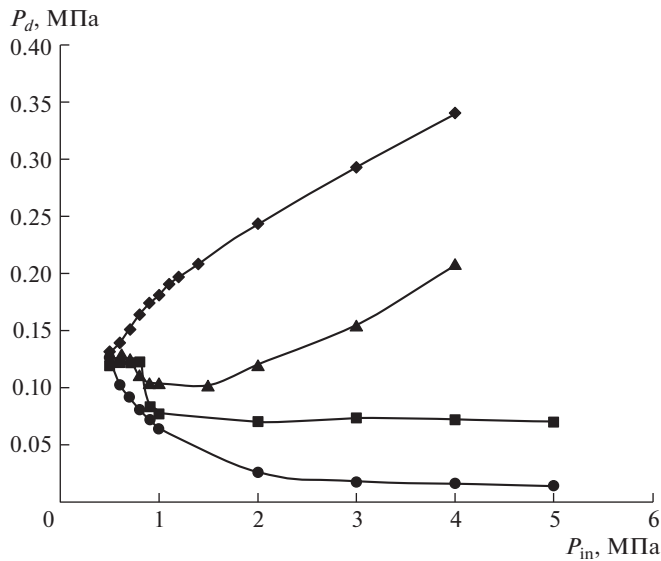


Рис. 6. Зависимость  $P_d = (P_{\text{in}}, d_c/d_k)$  при  $P_{\text{out}} = 0.1$  МПа: ◆ –  $d_c/d_k = 0.35$ ; ▲ –  $d_c/d_k = 0.5$ ; ■ –  $d_c/d_k = 0.7$ ; ● –  $d_c/d_k = 0.9$ .

дальних вихрей, размеры которых возрастают по мере уменьшения диаметра сопла. Это приводит к повышению донного давления. Вихревая кавитационная каверна, возникающая в приосевой области камеры генератора при  $P_{\text{in}} = 5.0$  МПа,  $P_{\text{out}} = 0.1$  МПа,  $d_c/d_k = 0.9$  [6] отрывается от дна и по мере уменьшения диаметра сопла смещается к нему. При  $d_c/d_k = 0.3-0.45$  возникает неустойчивое положение вихревой каверны от-

носителем сопла. Она возникает то перед соплом, то за ним, при этом периодически частично перекрывает проходное сечение сопла, в результате чего возбуждаются мощные пики давления. Причем этот процесс носит автоколебательный характер, и повышение давления на выходе  $P_{\text{out}}$  генератора лишь усиливает этот процесс.

**Заключение.** В результате проведенных исследований было выявлено следующее: при изменении геометрии проточной части камеры гидродинамического генератора вихревого типа происходит резкое повышение интенсивности протекания волновых и гидродинамических процессов. Так, при изменении диаметра сопла в пределах  $d_c/d_k = 0.3-0.45$  в проточной части генератора при  $P_{\text{in}} = 5.0$  МПа и  $P_{\text{out}} = 0.3$  МПа в диапазоне частот  $f = 4.0-4.3$  кГц возбуждаются мощные нелинейные волны, амплитуда которых достигает 0.8 МПа. Донное давление в камере генератора с уменьшением диаметра сопла в диапазоне  $d_c/d_k = 0.9-0.25$  при  $P_{\text{in}} = 5.0$  МПа и  $P_{\text{out}} = 0.1$  МПа возрастает с 0.003 МПа до 1.6 МПа (почти в 500 раз). Давление на боковой поверхности камеры генератора с увеличением  $P_{\text{in}}$ ,  $P_{\text{out}}$  и уменьшением диаметра сопла также возрастает и при  $P_{\text{in}} = 5.0$  МПа,  $P_{\text{out}} = 0.3$  МПа,  $d_c/d_k = 0.25$  достигает величины  $P_k = 3.5$  МПа, что составляет 70% от максимальной величины входного давления.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию). М.: Науч.-изд. центр РХД, 2008. 192 с.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. М.: Науч.-изд. центр РХД, 2008. 712 с.
3. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. М.: Науч.-изд. Центр РХД, 2013. 592 с.
4. Авдудевский В.С., Ганиев Р.Ф., Калашиников Г.А., Костров С.А., Муфазалов Р.Ш. РФ Патент 2015749, 1994.
5. Ганиев Р.Ф., Шмырков О.В., Жебынев Д.А., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Фельдман А.М. Исследование влияния геометрических размеров гидродинамического вихревого генератора колебаний давления на спектральные характеристики // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 5. С. 15.
6. Шмырков О.В. Исследование кавитации в вихревом генераторе проточного типа // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 3. С. 22.
7. Корнеев А.С., Шмырков О.В. Влияние закрутки потока на характеристики гидродинамических генераторов колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 5. С. 27.
8. Корнеев А.С., Шмырков О.В. Влияние геометрических параметров на характеристики гидродинамических генераторов колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 4. С. 46.
9. Ганиев Р.Ф., Корнеев А.С., Шмырков О.В. Амплитудно-частотные характеристики гидродинамических генераторов колебаний // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 2. С. 1.