

---

---

**МЕХАНИКА МАШИН**

---

---

УДК 532.517;534.1

**РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВОЛНОВЫХ ГИДРОМАССАЖЕРОВ**© 2022 г. **Е. И. Велиев<sup>1</sup>, Р. Ф. Ганиев<sup>2</sup>, А. С. Корнеев<sup>2,\*</sup>, Л. Е. Украинский<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Городская клиническая больница им. С.П. Боткина ДЗМ, Москва, Россия*<sup>2</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, Москва, Россия**\*e-mail: korneev47@gmail.com*

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

Принята к публикации 20.10.2021 г.

Для проведения исследований механических периодических воздействий на человека предлагается использовать новый тип массажеров, волновые гидромассажеры, способные создавать в гидродинамических течениях трехмерные (в частности, спиральные) волны с амплитудами и частотами скоростей и давлений широкого спектра, в том числе с зонами разрежения на обрабатываемой поверхности. В статье рассмотрены основные типы волновых гидромассажеров. Представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования волновых гидромассажеров одного из разработанных типов, а именно, струйно-вихревого. Показано, что наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных получается с помощью модели турбулентности крупных вихрей (LES). Полученные данные можно использовать при проектировании волновых гидромассажеров и других гидродинамических генераторов колебаний различного назначения.

*Ключевые слова:* волновые гидромассажеры, эксперимент, расчет, амплитудно-частотные характеристики, модели турбулентности

**DOI:** 10.31857/S0235711922010102

**Постановка задачи.** Периодические воздействия на кожный покров человека могут влиять не только на поверхностные слои кожного покрова и на эпителий, но также на подкожные мышцы, на элементы кровеносной и лимфатических систем, на биохимические превращения, в частности, на насыщение крови связанным кислородом, на внутренние органы, на кровоток и лимфоток, а также на приток крови, лимфы и лекарственных препаратов к внутренним органам. Исследование этого требует широкого диапазона параметров воздействий: давление должно изменяться от нулевых значений (разрежение) до существенных положительных (сжатие), скорости должны иметь все три пульсирующие компоненты, частоты и амплитуды воздействий должны быть управляемыми и находиться в широком диапазоне значений.

Для осуществления периодических воздействий известно большое число массажных устройств разного принципа действия: электромеханические, ультразвуковые, жидкостные струйные и другие. Однако, достаточной широты диапазона изменений параметров как скоростей жидкости, воздействующей на кожный покров, так и давлений они не достигают.

Авторами разработаны гидроволновые устройства [1–6], которые обеспечивают волновое воздействие на кожный покров человека трехмерными (в частности, спиральными) волнами, в широком диапазоне частот и амплитуд. При этом происходит

циклическое вакуум-прессующее многомерное воздействие на кожный покров. Пульсирующие компоненты скоростей жидкости в струе (продольных, поперечных и азимутальных), сопровождаются пульсациями давления, в процессе которых сжатие сменяется разрежением. Разрежение и сжатие обеспечиваются автоколебаниями жидкости, возбуждаемыми в струе жидкости. Механизмы возбуждения автоколебаний обусловлены взаимодействием жидких струй между собой внутри корпуса устройства, либо с образующимися в ней парогазовыми включениями. Частота возбуждаемых автоколебаний поддается регулированию путем изменения расхода жидкости, протекающей через устройство. Усиление автоколебаний обеспечивается резонаторами различной природы. Трехмерный характер течения жидкости в струе обеспечивается волноводными эффектами. В частности, спиральные скорости обеспечиваются генерацией в течении поперечных и азимутальных составляющих скоростей.

Это принципиально отличает данные гидростимуляторы от сертифицированных в Минздраве РФ традиционных гидромассажных устройств, в которых с помощью одномерной водяной струи обеспечивается давящее давление переменной величины, флуктуирующей вокруг значения атмосферного давления, без создания фазы вакуума (фазы “присасывающего”, отрицательного давления) и без поперечных и азимутальных составляющих скорости, обеспечивающих спиралевидное течение. В настоящее время не известны сертифицированные устройства с трехмерными волнами и такими функциональными свойствами.

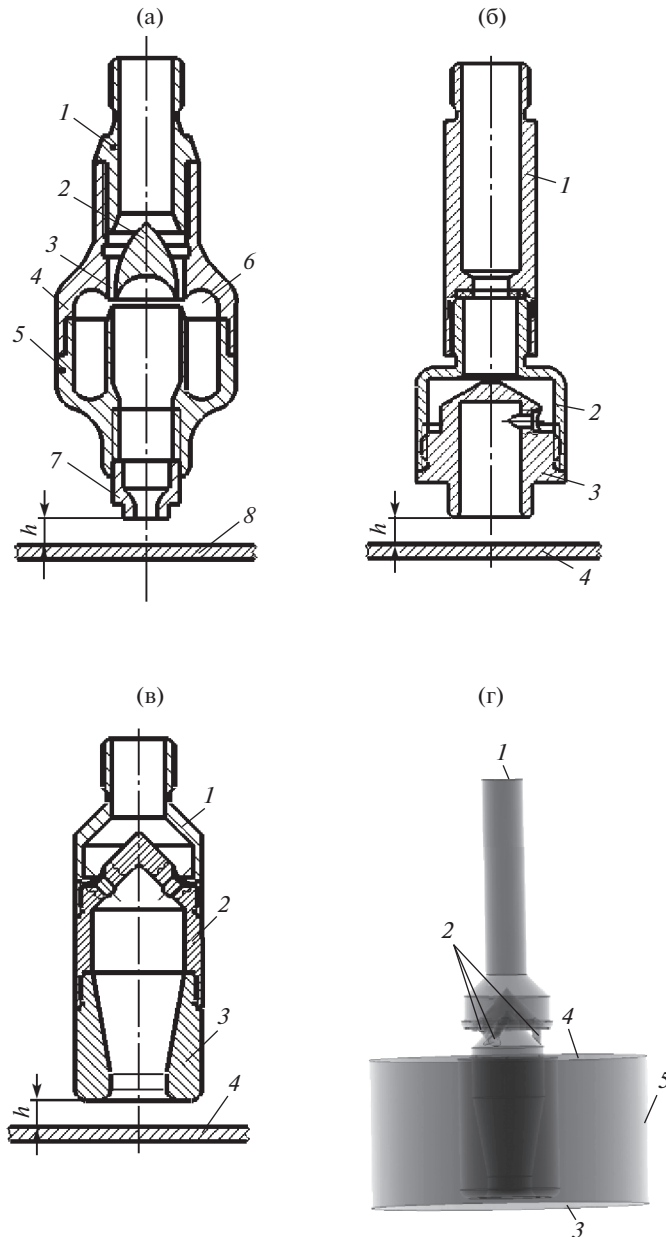
Представляется, что данная уникальная особенность этих гидроволновых массажеров после проведения комплекса клинических исследований может быть использована не только для поведения лабораторных экспериментов, но может привести к разработке прототипов аппаратов для лечебной практики, а также в целях профилактики и реабилитации при широком круге заболеваний бронхолегочной, пищеварительной, мочеполовой систем, а также в спортивной медицине и травматологии.

Конструкции гидроволновых массажеров весьма разнообразны [1–6]. Схемы некоторых из них показаны на рис. 1.

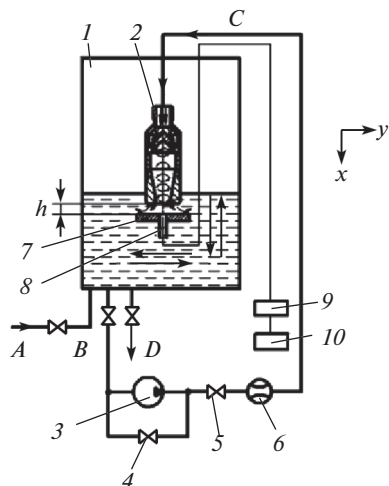
В первом случае (рис. 1а) рабочая жидкость (водопроводная вода) подавалась с помощью гибкого шланга во входной штуцер 1 и с помощью обтекателя 2 через кольцевое сопло 3 направлялась в верхний корпус 4, который совместно с нижним корпусом 5 образовывал тороидальную резонансную камеру 6. Затем вода выходила из массажера через сопло 7 к обрабатываемой поверхности 8. Кольцевой поток воды, выходящий из тороидальной резонансной камеры 6 с определенной частотой, зависящей от частоты собственных колебаний всей системы, прерывал основную кольцевую струю, истекающую из кольцевого сопла 3. Вследствие этого у активной кольцевой кромки тороидальной резонансной камеры 6 генерировались периодические гидродинамические импульсы в виде сжатия и разрежения потока воды. Под воздействием кольцевого потока, выходящего из тороидальной резонансной камеры, под нижней сферической поверхностью обтекателя 2 образовывалась зона разрежения, которая способствовала усилению амплитуды генерируемых волн. Амплитудно-частотные (спектральные) характеристики устройства зависят от площади поверхности и объема резонансной камеры, скорости истечения воды из кольцеобразного сопла и ее расхода. Их можно менять путем взаимного перемещения верхнего 4 и нижнего 5 корпусов.

Во втором случае (рис. 1б) водопроводная вода подавалась с помощью гибкого шланга через корпус 1 и корпус 2 к завихрителю 3. Тангенциально расположенные отверстия в завихрителе обеспечивали создание закрученного потока.

В третьем случае (рис. 1в) рабочая жидкость подавалась с помощью гибкого шланга в корпус 1 и поступала к завихрителю 2. Особое расположение подающих отверстий в завихрителе, показанных на рис. 1в схематично, обеспечивало создание в течении трехмерных струй, имеющих все компоненты скорости: аксиальную, радиальную и тангенциальную. Как показали эксперименты [4], такой способ подачи жидкости поз-



**Рис. 1.** Основные типы волновых гидромассажеров: (а) – струйный [3]: 1 – штуцер входной, 2 – обтекатель, 3 – сопло кольцевое, 4 – корпус верхний, 5 – корпус нижний, 6 – камера резонансная, 7 – сопло, 8 – обрабатываемая поверхность; (б) – вихревой [4]: 1 – ручка, 2 – корпус, 3 – завихритель, 4 – обрабатываемая поверхность; (в) – струйно-вихревой [4]: 1 – корпус, 2 – завихритель, 3 – сопло, 4 – обрабатываемая поверхность; (г) – математическая модель струйно-вихревого гидромассажера: 1 – вход жидкости, 2 – подающие отверстия, 3 – обрабатываемая поверхность, 4, 5 – выходы жидкости.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 – водяной бак, 2 – исследуемый гидромассажер, 3 – гидравлический насос, 4 – вентиль байпаса, 5 – вентиль регулировки расхода, 6 – измеритель расхода, 7 – обрабатываемая поверхность, 8 – датчик давления, 9 – усилитель, 10 – осциллограф.

волил увеличить амплитуду колебаний давления, создаваемых в массажере, в 4–6 раз по сравнению со случаем чисто тангенциальной подачи, при котором подающие отверстия лежат в плоскости, перпендикулярной оси течения [4, 5]. Наличие тангенциальной компоненты скорости обеспечивало закрутку потока. За счет центробежных эффектов в приосевой зоне цилиндрического канала завихрителя 2 и сопла 3 возникали области пониженного давления, что обеспечивало вакуумный эффект. При определенных значениях параметров закрученного течения устанавливался режим автоколебаний, приводящий к появлению трехмерных волн давления, распространявшихся от гидромассажера, корпус которого выступает в данном случае как цилиндрический волновод [7].

В настоящей статье представлены результаты исследований гидромассажера струйно-вихревого типа (рис. 1в).

**Методика проведения экспериментов.** Экспериментальная установка (рис. 2) содержала водяной бак 1, выполненный из органического стекла для обеспечения возможности визуальных наблюдений. Водопроводная вода заливалась в бак по магистрали А. Непрерывная циркуляция воды через гидромассажер 2 осуществлялась при помощи насоса 3 по магистралям В и С. Регулировка расхода воды через гидромассажер осуществлялась с помощью вентиля байпаса 4 и регулировочного вентиля 5. Измерение расхода производилось с помощью расходомера 6 (ротаметра) с точностью  $\pm 5\%$ .

Слив воды по окончании эксперимента осуществлялся через магистраль D. Обрабатываемая поверхность 7 (размером  $150 \times 150$  мм) с датчиком давления 8 имела возможность перемещения в продольном направлении  $x$  и в поперечном направлении  $y$  по отношению к гидромассажеру. Размеры обрабатываемой поверхности в поперечном направлении существенно превышали размеры исследуемой зоны течений, что позволяло путем ее смещения в поперечном направлении от оси симметрии гидромассажера измерять пульсации давления в различных точках на поверхности при заданном расстоянии от гидромассажера без существенного искажения течений в исследуемой области. Проведена серия экспериментов, в результате которых получены

осциллограммы пульсаций давления на обрабатываемой поверхности при различном расстоянии  $y$  от оси симметрии гидромассажера и их частотные спектры.

В экспериментах для измерения пульсаций давления использовался датчик динамического давления PS2001-5-01, усилитель сигнала AS07 (коэффициент усиления 100) производства “ГлобалТест” (Саров, Россия) и осциллограф WaveSurfer MXs-B компании “LeCroy”. Для измерения статического разрежения на обрабатываемой поверхности использовался мановакуумметр EN-837-1 с пределами измерений от  $-100$  до  $+150$  кПа класса 1.0.

**Математическая модель.** Расчеты проводились с помощью коммерческой программы ANSYS Fluent (США) [8, 9]. Использовалась трехмерная модель генератора (рис. 1г). Осуществлялось решение системы уравнений неразрывности и Навье–Стокса [10]. Расчеты проводились с использованием модели турбулентности крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation) [11–13]. Эта модель была выбрана по данным работы [14], в которой были проанализированы восемь моделей турбулентности, реализованных в программе ANSYS Fluent. Для гидродинамического генератора колебаний вихревого типа модель LES показала наилучшее согласие с экспериментальными данными. В качестве граничных условий на входе в канал (рис. 1г, зона 1) задавался объемный расход воды  $Q$ . Количество подающих отверстий (рис. 1г, поз. 2) составляло  $n = 3$ . Расстояние  $h$  от среза сопла гидромассажера до обрабатываемой поверхности (рис. 2) варьировалось в пределах  $h = 1–3$  мм. На поверхностях выхода (рис. 1г, зоны 4 и 5) в качестве граничного условия задавалось давление  $p = 0.1$  МПа.

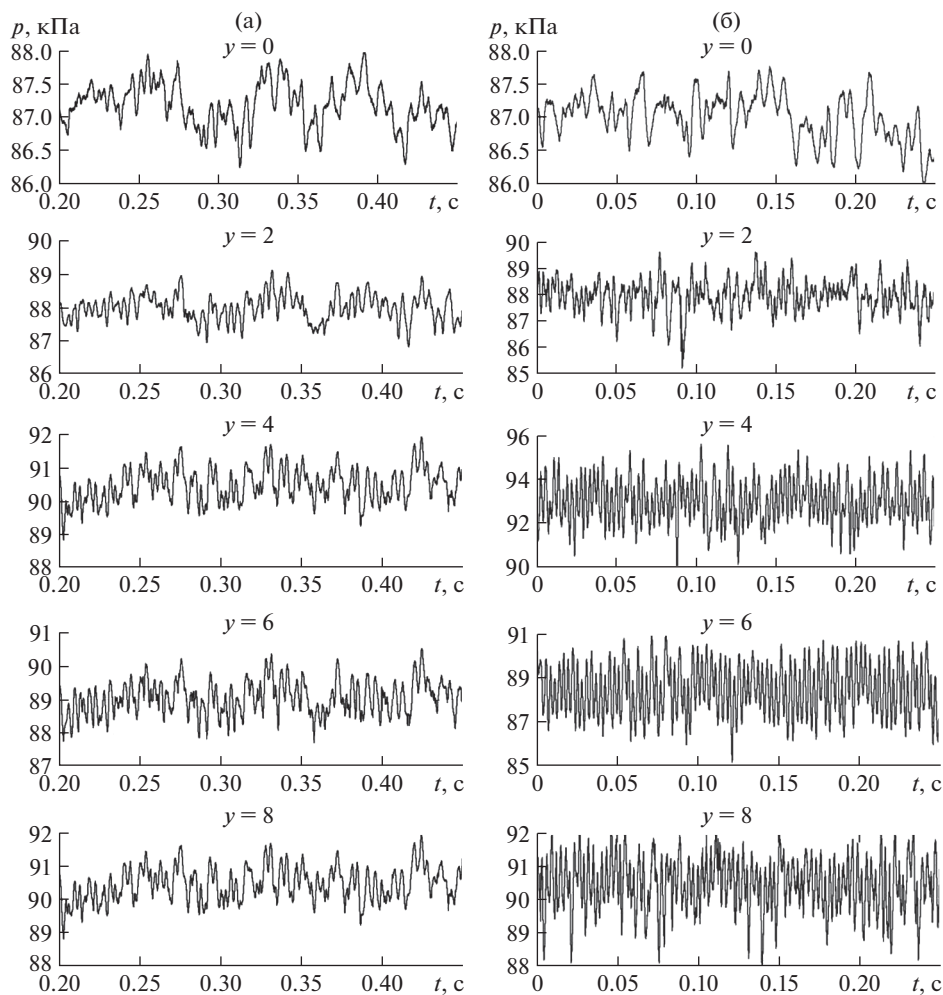
**Результаты исследований.** В результате расчетов были получены зависимости давления от времени на обрабатываемой поверхности на различных расстояниях  $y$  от оси симметрии, представленные на рис. 3а. Соответствующие экспериментальные данные показаны на рис. 3б. В настоящей статье результаты приведены для следующих условий: расход воды  $Q = 12$  дм<sup>3</sup>/мин, расстояние от гидромассажера до обрабатываемой поверхности  $h = 2$  мм. Можно отметить сходный характер, а также близкие диапазоны изменения давления для расчетных и экспериментальных зависимостей, особенно вблизи оси симметрии ( $y = 0$ ). При удалении от оси симметрии (увеличении координаты  $y$ ) на экспериментальных зависимостях появляются высокочастотные колебания, не выявляемые в использованной расчетной модели. Расчетные зависимости  $p(t)$  представлены для участка установившихся колебаний  $t = 0.2–0.45$  с.

Путем Фурье-преобразования зависимостей  $p(t)$ , представленных на рис. 3а, б, были рассчитаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) колебаний (рис. 4а, б).

На оси симметрии ( $y = 0$ ) положения расчетных и экспериментальных главных максимумов совпадают и соответствуют частоте  $f = 16$  Гц. Их амплитуды отличаются на 15%. Второй расчетный максимум наблюдается на частоте  $f = 96$  Гц, а соответствующий экспериментальный – на  $f = 76$  Гц. Разница в частотах составляет 26%. Амплитуды этих максимумов отличаются на 25%. Следующие группы как расчетных, так и экспериментальных максимумов располагаются в диапазонах частот  $f = 100–220$  Гц, а их амплитуды отличаются приблизительно на 35%.

При удалении от оси симметрии (увеличении координаты  $y$ ) на экспериментальных АЧХ наблюдаются максимумы в диапазонах частот  $f = 16–230$  Гц и  $f = 348–360$  Гц. На расчетных АЧХ максимумы расположены в диапазонах  $f = 16–230$  Гц и 320 Гц. При этом во втором из указанных диапазонов экспериментальные амплитуды заметно превышают расчетные. Это указывает на существование резонансных явлений, не выявляемых в использованной математической модели.

Были также произведены расчеты по нескольким другим моделям турбулентности, реализованным в программе ANSYS Fluent. Расчеты по стандартной (*Standard*) модели привели к нереально высоким средним значениям давления на обрабатываемой поверхности (в десятки раз выше, чем экспериментальная величина на входе). Расчеты по реализуемой (*Realizable*) модели привели к затуханию колебаний давления по вре-

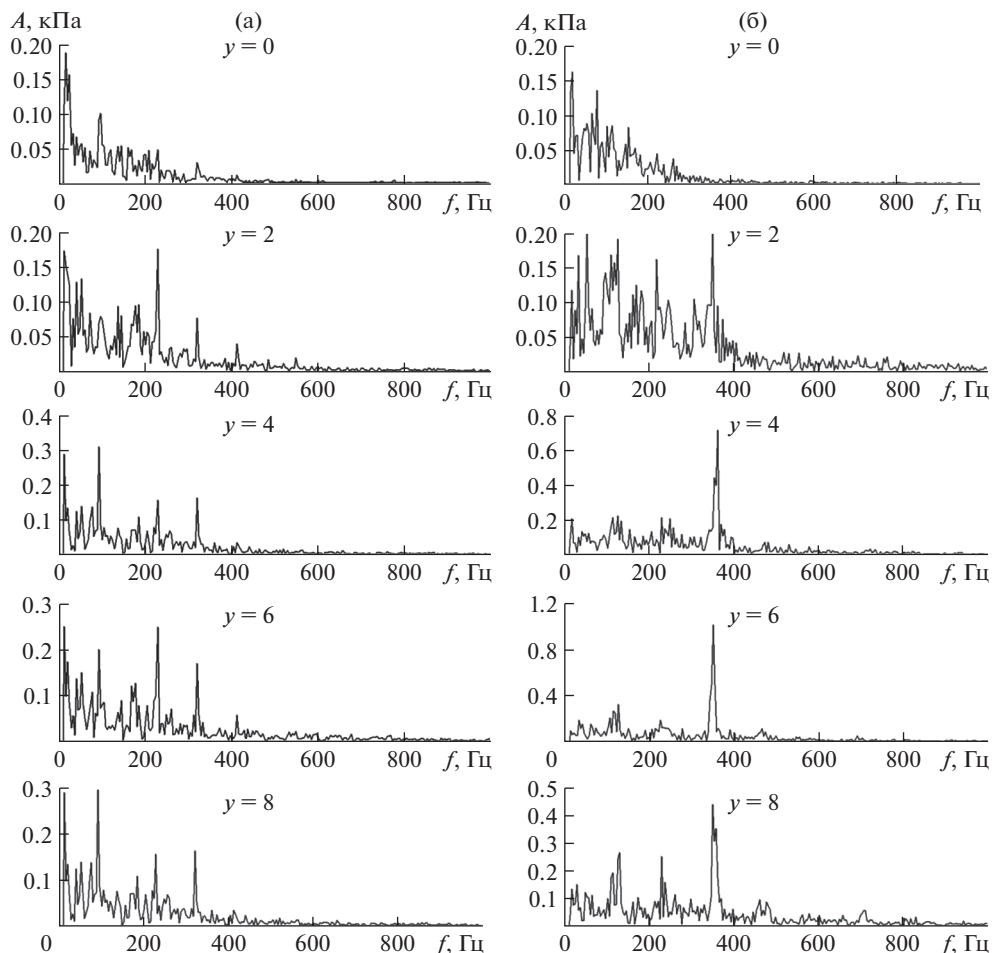


**Рис. 3.** Расчетные (а) и экспериментальные (б) зависимости давления от времени на обрабатываемой поверхности на различных расстояниях  $y$  (в миллиметрах) от оси симметрии.

мени, а в экспериментах наблюдались незатухающие колебания. Модель напряжений Рейнольдса (*RSM*) дала только одну гармонику колебаний на частоте 192 Гц, что не согласовывалось с видом экспериментальных АЧХ. Остальные модели турбулентности, имеющиеся в ANSYS-Fluent, были проанализированы ранее в работе [14] и показали неадекватность для гидродинамических генераторов колебаний вихревого типа. Таким образом, только модель крупных вихрей (*LES*) можно использовать для расчета АЧХ подобных устройств, которые в определенной степени согласуются с экспериментальными данными.

Структура течения в канале исследуемого устройства иллюстрируется рис. 5.

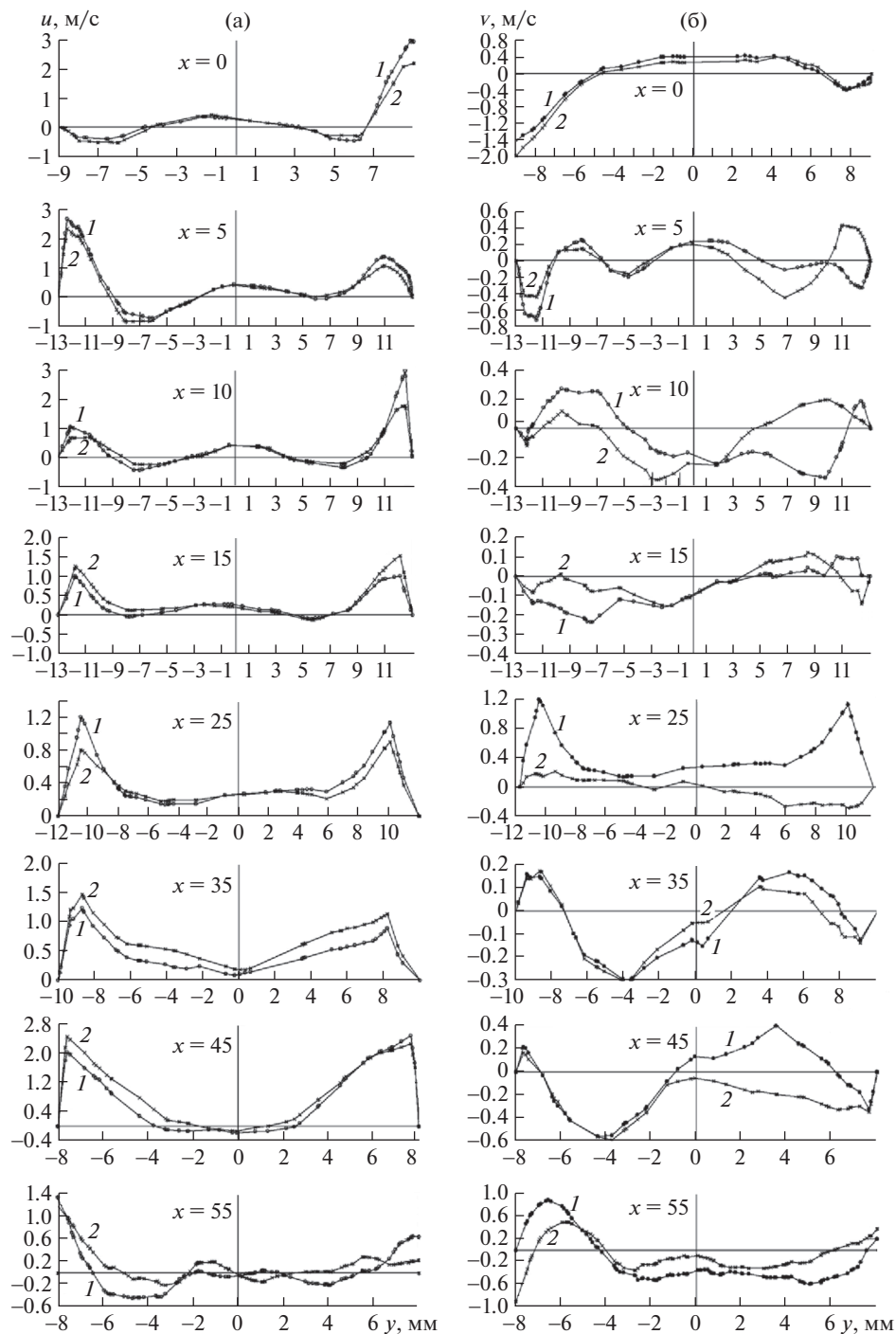
Расчетные профили продольной (параллельной оси  $Ox$ )  $u(y)$  и поперечной (параллельной оси  $Oy$ )  $v(y)$  компонент скорости в различных сечениях канала для момента времени  $t = 0.31328$  с, соответствующего минимуму давления в центре обрабатываемой поверхности ( $x = 56$  мм,  $y = z = 0$  мм) и для момента  $t = 0.32485$  с, соответствующего



**Рис. 4.** Расчетные (а) и экспериментальные (б) амплитудно-частотные характеристики колебаний на обрабатываемой поверхности на различных расстояниях  $y$  (в миллиметрах) от оси симметрии.

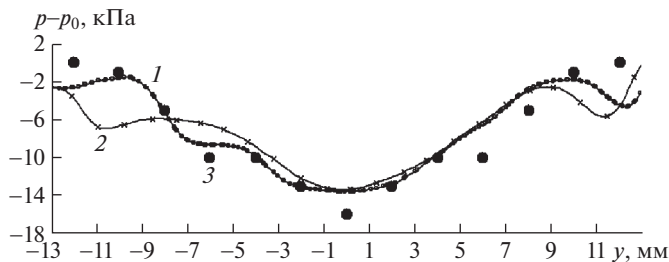
шего максимуму давления в рассматриваемой точке, представлены на рис. 5а, б. Значение продольной координаты  $x = 0$  соответствует сечению выходных кромок подающих отверстий, значение  $x = 56$  мм – положению обрабатываемой поверхности. При  $x = 0$  наблюдается существенная несимметричность профиля продольной скорости (рис. 5а,  $x = 0$ ).

Здесь левая граничная точка ( $y = -9$  мм) находится на твердой поверхности, где все компоненты скорости равны нулю. Правая граничная точка ( $y = 9$  мм) располагается внутри подающего отверстия, поэтому скорость в этой точке максимальна. При  $x = 5$  мм область максимальных продольных скоростей перемещается к левой стенке, при  $x = 10$  мм – снова к правой стенке. Симметричность профиля продольной скорости устанавливается на расстоянии  $x = 45$  мм от выходного сечения подающих отверстий. Различия в профилях продольной скорости между моментами времени, соответствующими минимуму давления (1) и максимуму давления (2) внутри канала



**Рис. 5.** Профили продольной (а) и поперечной (б) компонент скорости на различных расстояниях  $x$  (мм) от подающих отверстий для моментов времени, соответствующих минимуму (1) и максимуму (2) давления в центре обрабатываемой поверхности.





**Рис. 6.** Профили статического давления на обрабатываемой поверхности ( $x = 56$  мм) для моментов времени, соответствующих минимуму (1) и максимуму (2) давления в центре: линии 1 и 2 — расчет, точки 3 — эксперимент.

( $x = 0-45$  мм) незначительны. Они становятся заметными только в зазоре между гидромассажером и обрабатываемой поверхностью ( $x = 55$  мм).

Профили поперечной  $v(y)$  компоненты скорости (рис. 5б) существенно перестраиваются между моментами времени, соответствующими минимуму давления (1) и максимуму давления (2). В некоторых сечениях канала ( $x = 5-45$  мм) изменяется знак поперечной скорости  $v(y)$  между рассматриваемыми моментами времени. Это означает, что изменяется направление течения вдоль оси  $Oy$ . Поток ударяется об одну цилиндрическую стенку, затем отражается от нее, ударяется о противоположную стенку, снова отражается и этот процесс повторяется, приводя к возникновению пульсаций давления, создаваемых гидромассажером. Таким образом, возможными механизмами возникновения колебаний давления в гидродинамических генераторах рассмотренного типа являются поперечные пульсации потока жидкости, а также пульсации тороидальных вихрей в продольном направлении.

Уровень вакуума, создаваемого гидромассажером на обрабатываемой поверхности, характеризуется рис. 6, где линии — результаты расчетов для моментов времени, соответствующих минимуму (1) и максимуму (2) давления в центре этой поверхности, точки 3 — экспериментальные данные, представляющие собой средние по времени значения,  $p_0 = 100$  кПа — нормальное атмосферное давление. Расчетные и экспериментальные распределения согласуются между собой.

**Заключение.** Расчеты с помощью программы ANSYS-Fluent показали, что модель турбулентности крупных вихрей (LES) позволяет рассчитывать амплитудно-частотные характеристики гидродинамических генераторов колебаний струйно-вихревого типа, которые в определенной степени согласуются с экспериментальными данными. Выполненные расчеты позволили выявить некоторые из механизмов возникновения колебаний давления в таких устройствах — поперечные пульсации потока жидкости, а также пульсации тороидальных вихрей в продольном направлении. Расчетные распределения давления вдоль обрабатываемой поверхности согласуются со средними по времени экспериментальными значениями. Как расчетные, так и экспериментальные данные показали, что наибольшая амплитуда колебаний давления возникает не на оси симметрии, а на некотором расстоянии от нее.

Таким образом, теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что предложенные устройства одновременно создают трехмерные волны автоколебательного характера, в том числе спиральные, и вакуумный эффект. Частоты и амплитуды генерируемых колебаний скоростей и давлений имеют широкий спектр. Это позволяет рассматривать его как перспективное устройство для физиотерапии нового класса для широкого использования в медицине. Полученные данные могут быть использованы при проектировании волновых гидромассажеров и других гидродинами-

ческих генераторов колебаний, а также для выбора оптимальных режимов и методов использования таких устройств.

Рекомендации по их применению можно будет дать после проведения клинических испытаний.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена по программе ФНИ государственных академий наук на 2013–2020 гг., пункт программы № 26, тема “Развитие фундаментальных основ волнового машиностроения. Научные основы волновых технологий получения композитных материалов с уникальными свойствами и новых средств функциональной диагностики”. № гос. регистрации 01201359375.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ганиев Р.Ф., Васильев Р.Х., Муфазалов Р.Ш. и др.* Устройство для гидромассажа. РФ Патент 2010559, 1994.
2. *Ганиев Р.Ф., Муфазалов Р.Ш., Васильев Р.Х. и др.* Устройство для физиотерапии. РФ Патент 2012319, 1994.
3. *Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р. и др.* Гидроволновой массажер для физиотерапевтического лечения заболеваний мочевого пузыря. РФ Патент 189154, 2019.
4. *Ганиев Р.Ф., Корнеев А.С.* Волновые гидромассажеры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 4. С. 99.
5. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Ганиев О.Р. и др.* Волновой гидродинамический генератор для гидромассажных процедур: РФ Патент 124564, 2013.
6. *Велиев Е.И., Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., и др.* Гидроволновой массажер для лечения сексуального расстройства. РФ Патент 189155, 2019.
7. *Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е.* Нелинейная волновая механика и технологии. М.: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. 780 с.
8. ANSYS Fluent Release 12.1. ANSYS, Inc., Canonsburg, USA, 2009. <http://www.ansys.com>.
9. ANSYS Fluent 12.0. Theory Guide. ANSYS, Inc., 2009. 816 с.
10. *Batchelor G.K.* An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press, Cambridge, England, 1967. 615 p.
11. *Smagorinsky J.* General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment // Monthly Weather Review. 1963. V. 91. P. 99.
12. *Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.K., et al.* A Hybrid RANS-LES Approach With Delayed-DES and Wall-Modelled LES Capabilities // Int. J. Heat and Fluid Flow. 2008. V. 29. P. 1638.
13. *Piomelli U., Moin P., Ferziger J.H.* Model Consistency in Large-Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow // Physics of Fluids. 1988. V. 31. P. 1884.
14. *Корнеев А.С., Шмырков О.В.* Влияние закрутки потока на характеристики гидродинамических генераторов колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 5. С. 27.