

С. В. Реука

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет,
кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, ул. Проф. Попова, д. 5
e-mail: ayo@list.ru*

Акустическое поле в гидроволноводе с импедансными стенками

Получена 15.04.2008, опубликована 30.04.2008

Представлены результаты экспериментального исследования акустического поля ультразвукового импульса в гидроволноводе с импедансными стенками условно бесконечной толщины. Для гидроволноводов различного диаметра и длины приведены графики распределения амплитуды колебательной скорости в поперечном сечении волновода. Также приведены временные формы импульса в различных точках поперечного сечения волновода. Результаты сопоставлены с полем импульса в неограниченной среде, а также с данными численного моделирования.

Ключевые слова: ультразвук, жидкостный волновод, гидроволновод.

ВВЕДЕНИЕ

Иммерсионный ввод ультразвука в изделие получил широкое распространение в практике создания автоматизированных установок. Неотъемлемой частью таких систем является иммерсионная ванна, в которую изделие помещается целиком для последующего прозвучивания группой электроакустических преобразователей. Основным недостатком этих установок являются значительные массогабаритные показатели ванны, часто затрудняющие внедрение и обслуживание установки в заводском цехе. Возможным решением этой проблемы становится обеспечение акустического контакта посредством струи жидкости — тогда громоздкую ванну можно заменить сравнительно компактной струйной акустической системой, включающей малогабаритный водосборник.

Проектирование таких систем невозможно без учета особенностей ультразвукового поля в струеобразующих устройствах и струях. В [1, 2] были рассмотрены некоторые основные аспекты теории струйного акустического тракта для случая идеальных граничных условий. Однако практическое значение имеет случай граничных условий импедансного типа, что соответствует струеобразующим устройствам, изготовленным из конструкционных пластмасс. Теория данного частного случая сложна. Представляет интерес экспериментальное исследование структуры акустического поля импульса в гидроволноводе с импедансными стенками. Методика и результаты такого исследования представлены в данной работе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Как было показано в [1, 2], импульс в гидроволноводе распространяется в виде набора волновых мод. Моды представляют собой отдельные ультразвуковые импульсы, имеющие временную форму соответствующую возбуждающему импульсу на входе гидроволновода, однако имеющие различное распределение амплитуды колебаний по фронту. Кроме того, известно, что волновые моды в волноводе распространяются с различными групповыми скоростями, что приводит к разновременности их прихода в выходное сечение гидроволновода. В результате в выходном сечении образуется сложное распределение колебательной скорости, изменяющееся во времени. Была разработана методика численного моделирования формы импульса на выходе волновода. Однако ей была характерна приблизительность, связанная с завышением оценочной длительности конечного импульса. Это было связано с тем, что при использовании коротких импульсов высшие моды возбуждаются менее эффективно, чем было принято в расчете, и при использовании возбуждающих импульсов длительностью 2–3 периода, реально наблюдаются в волноводе моды 2-х – 3-х порядков.

Стенд для изучения акустического поля в гидроволноводе изображен на схеме на рис. 1. На схеме обозначены: ванна 1 с жидкостью (водой), излучающий пьезопреобразователь (ПЭП) 2, приемный пьезопреобразователь 3, микрометрическая система позиционирования приемного пьезопреобразователя 4, трубка, имитирующая гидроволновод с импедансными стенками 5, ультразвуковой дефектоскоп общего назначения с возможностью индикации и документирования радиоимпульсной формы сигналов 6.

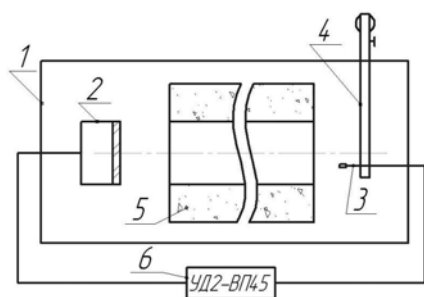


Рис. 1.

Схема экспериментального стенда

Используемый излучающий ПЭП был изготовлен с пьезопластиной диаметром 24 мм на номинальную рабочую частоту 1,25 МГц. Приемный ПЭП, используемый для местного изучения поля излучающего ПЭП, был изготовлен на основе пьезопластины диаметром 2 мм на номинальную частоту 10 МГц.

Гидроволновод имитировался трубкой из полипропилена. Для исключения возникновения стоячих волн в стенках трубки и их влияния на акустическое поле в жидкости внутри трубки, стенки ее были снаружи демпфированы силиконовой резиной, имеющей импеданс, близкий к импедансу полипропилена, и большой коэффициент затухания. Было изготовлено 4 макета гидроволновода — трубки с внутренним диаметром 14 мм, 18 мм (по 200 мм длиной), 27 и 36 (по 250 мм длиной).

Исследуемая трубка устанавливалась соосно с излучающим преобразователем на определенном расстоянии s , смысл которого был подробно рассмотрен в предыдущих публикациях. Приемный преобразователь перемещался в выходном сечении трубки на расстоянии 1 мм от него с дискретностью 1 мм (для трубок 14 мм и 18 мм) и 2 мм (для трубок 27 мм и 36 мм). В каждой точке фиксировалась амплитуда принятого сигнала.

Кроме того, в определенных точках фиксировалась временная форма принятого импульса: а) на акустической оси гидроволновода; б) вблизи стенки, в) на расстоянии 0,5 диаметра от акустической оси (т.е. посередине между акустической осью и стенкой волновода).

Данные исследования были проведены для каждой трубки трижды — при различных значениях параметра s , равного 0,5, 0,8 и 1,5 ближних зон, что соответствовало расстоянию в жидкости 60 мм, 96 мм и 180 мм. Результаты экспериментальных исследований были сопоставлены с данными, полученными расчетным путем для действительных значений параметров акустического тракта. Анализ результатов представлен ниже.

2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ПО СЕЧЕНИЮ ВОЛНОВОДА

На диаграммах, представленных на рис. 2, приведены распределения амплитуды принятого сигнала в выходном сечении каждого волновода. Кривые нормированы к максимальному значению, наблюдаемому на акустической оси волновода. На каждой диаграмме представлены результаты для одной трубки при различных значениях s .

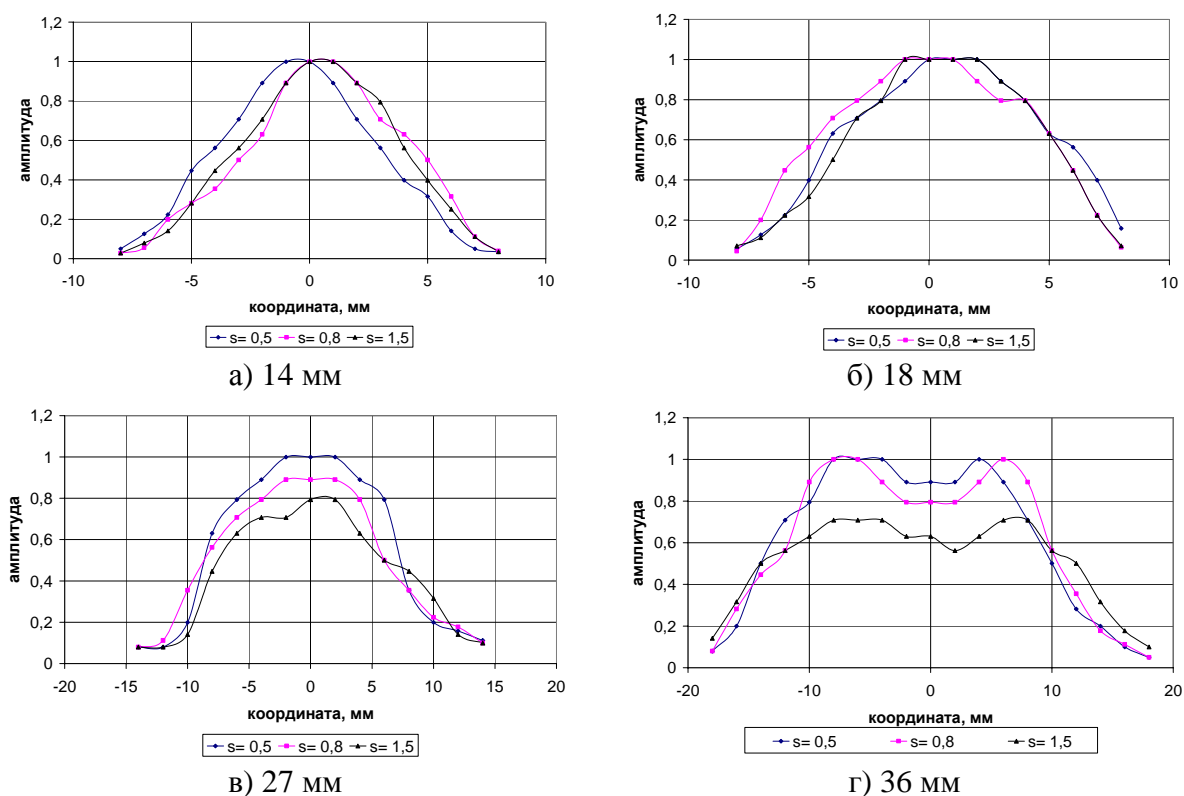


Рис. 2. Распределения амплитуды сигнала в поперечном сечении волновода

Для оценки экспериментальных данных были численно смоделированы формы импульса для каждого исследованного случая (т.е. комбинации диаметра и s). Они приведены на рис. 3–6.

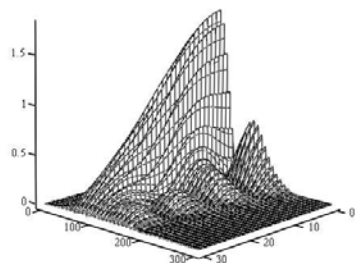
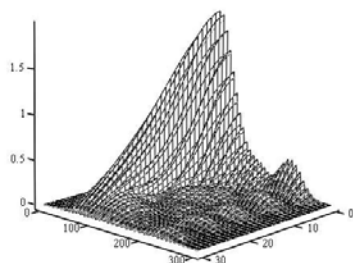
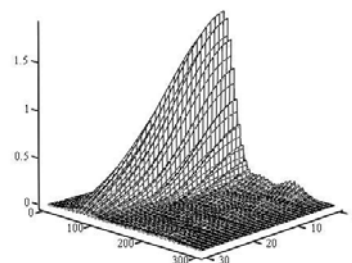
а) $s = 0,5$ б) $s = 0,8$ в) $s = 1,5$

Рис. 3. Трубка 14 мм

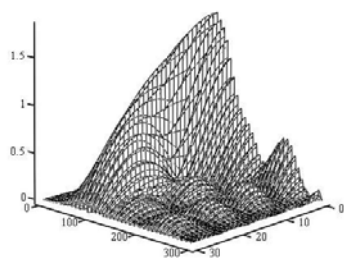
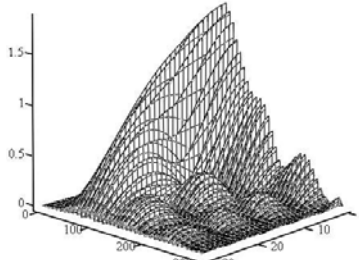
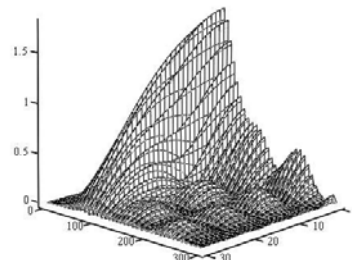
а) $s = 0,5$ б) $s = 0,8$ в) $s = 1,5$

Рис. 4. Трубка 18 мм

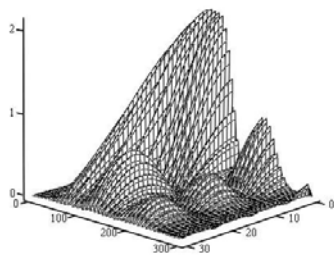
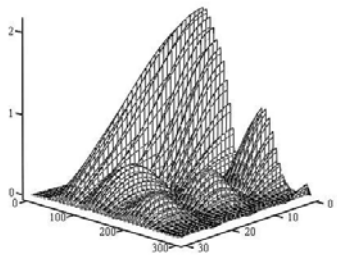
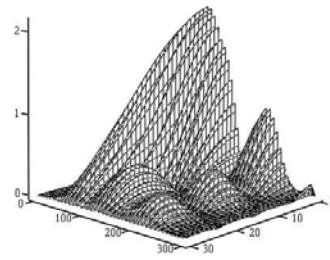
а) $s = 0,5$ б) $s = 0,8$ в) $s = 1,5$

Рис. 5. Трубка 27 мм

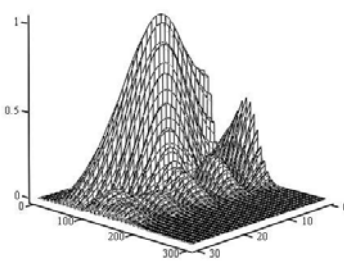
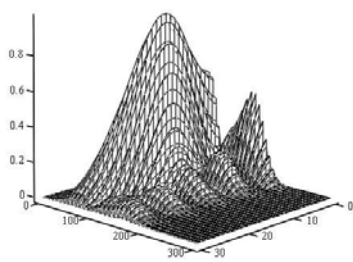
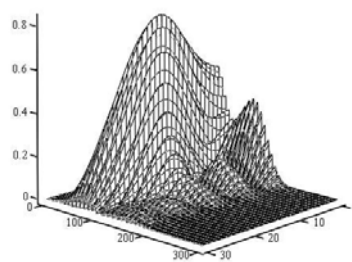
а) $s = 0,5$ б) $s = 0,8$ в) $s = 1,5$

Рис. 6. Трубка 36 мм

Эксперимент подтверждает теоретическое предположение, что акустическое поле сосредоточено вблизи акустической оси. Чем трубка тоньше, тем более плотно сосредоточена энергия, тем распределение «острее». С увеличением диаметра трубки эта концентрация звуковой энергии становится менее выраженной. Более того, для трубки диаметром 36 мм максимум амплитуды наблюдается по сторонам от геометрической оси трубки, на самой же оси существует локальный минимум. Это хорошо прослеживается на расчетных зависимостях. При дальнейшем увеличении диаметра трубки поле в ней будет приближаться к полю в неограниченной среде. Согласно расчету уже при увеличении диаметра трубки до величины двух диаметров преобразователя, ширина зоны «равномерного» распределения амплитуды колебательной скорости составит 80% диаметра трубки.

Изменение расстояния s не приводит к заметному изменению формы распределения, однако для трубок большого диаметра приводит к общему снижению амплитуды.

3. ВРЕМЕННАЯ ФОРМА ИМПУЛЬСА В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛНОВОДА

При отсутствии в акустическом тракте гидроволновода получен исходный импульс на расстоянии между излучающим и приемным ПЭП, равным 240 мм (2 близких зоны). Его форма и спектр приведены на рис. 7.

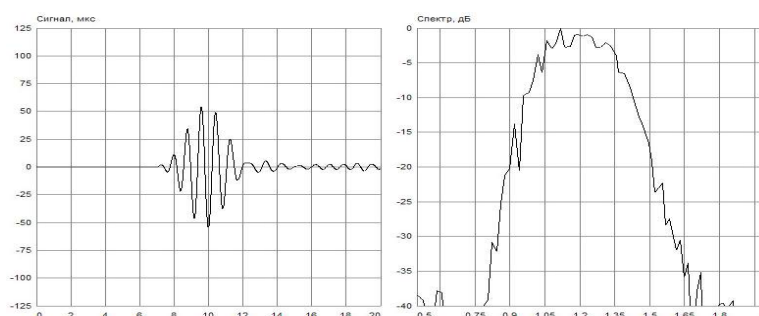


Рис. 7. Форма и спектр импульса, излученного и принятого в неограниченной среде

На рис. 8–19 приведены формы импульса, измеренные при различных s в различных точках выходного сечения гидроволноводов разных диаметров.

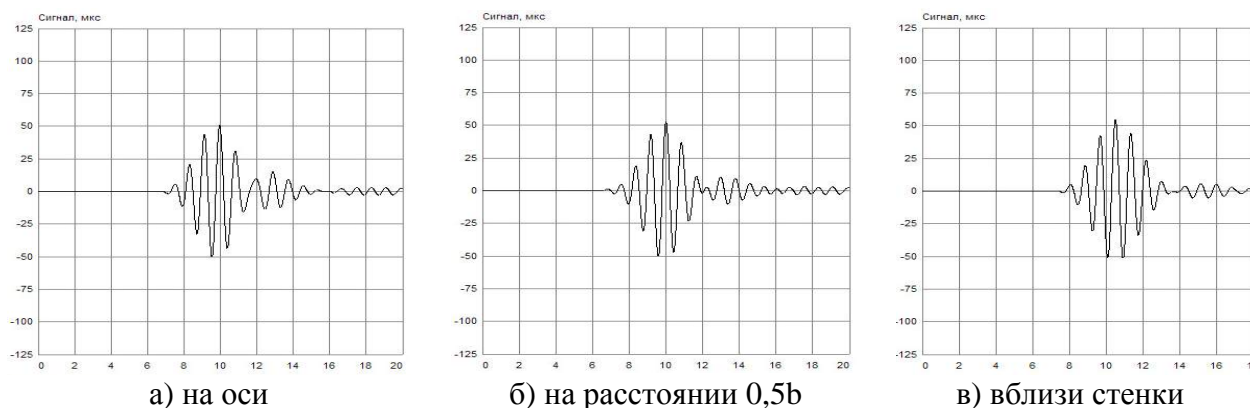
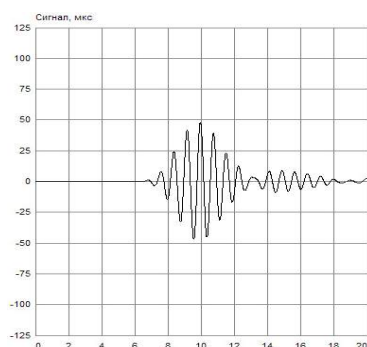
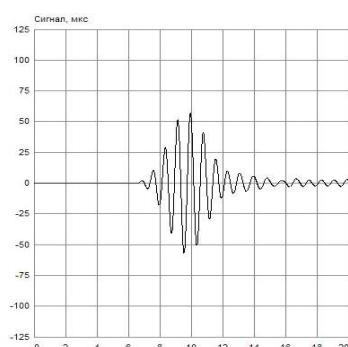


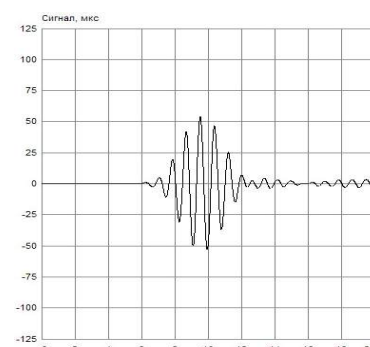
Рис. 8. Трубка $\varnothing 14$ мм, $s = 0,5$



а) на оси

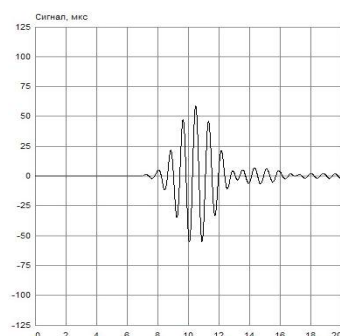


б) на расстоянии $0,5b$

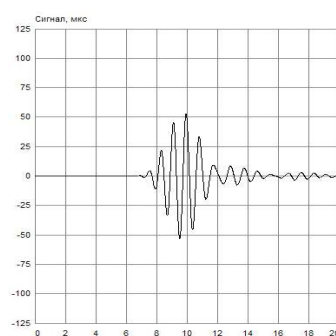


в) вблизи стенки

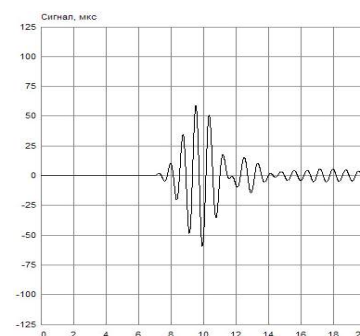
Рис. 9. Трубка $\varnothing 14$ мм, $s = 0,8$



а) на оси

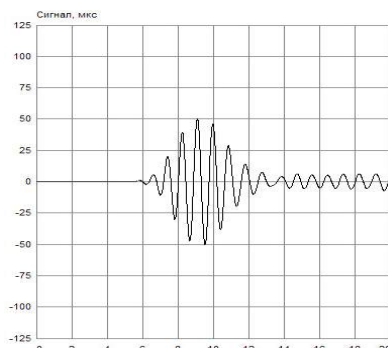


б) на расстоянии $0,5b$

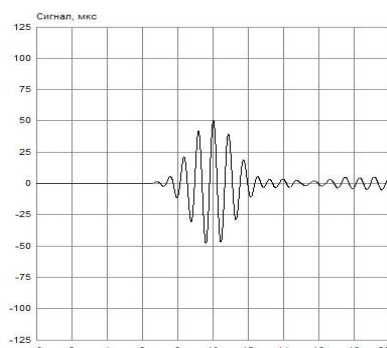


в) вблизи стенки

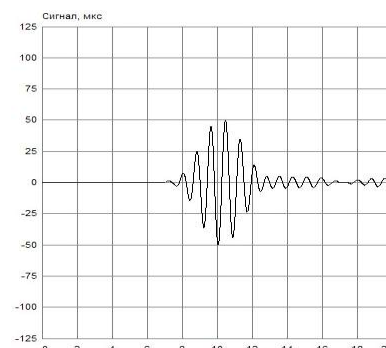
Рис. 10. Трубка $\varnothing 14$ мм, $s = 2$



а) на оси

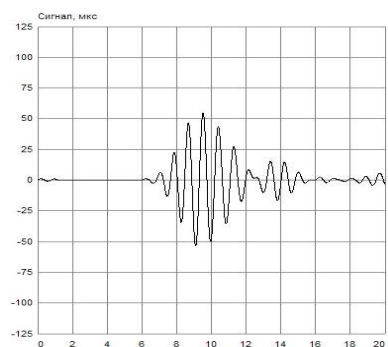


б) на расстоянии $0,5b$

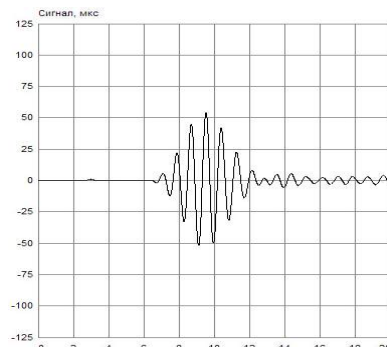


в) вблизи стенки

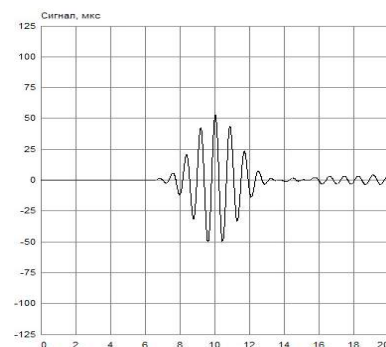
Рис. 11. Трубка $\varnothing 18$ мм, $s = 0,5$



а) на оси

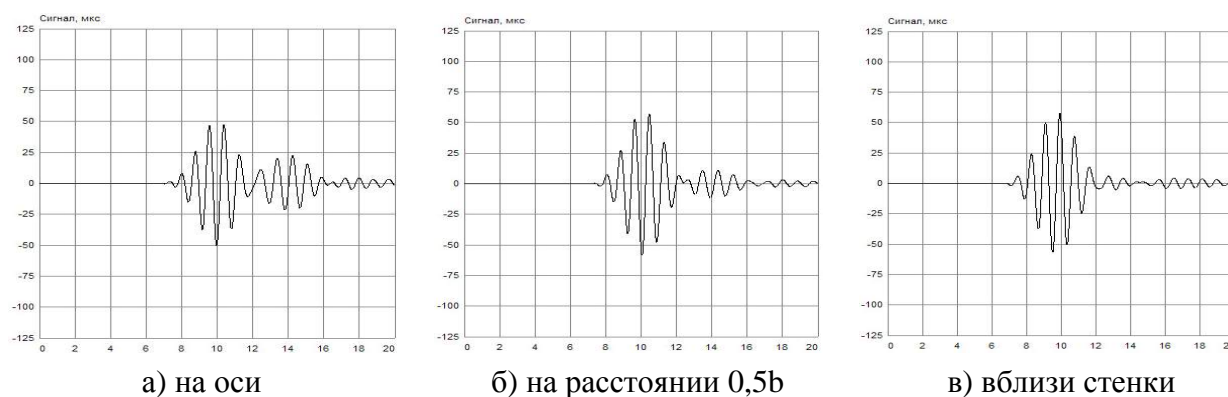
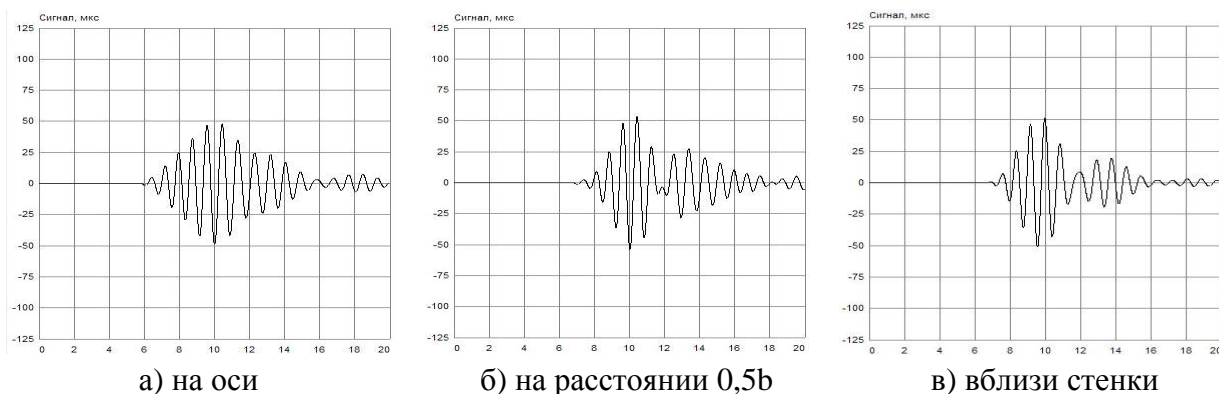
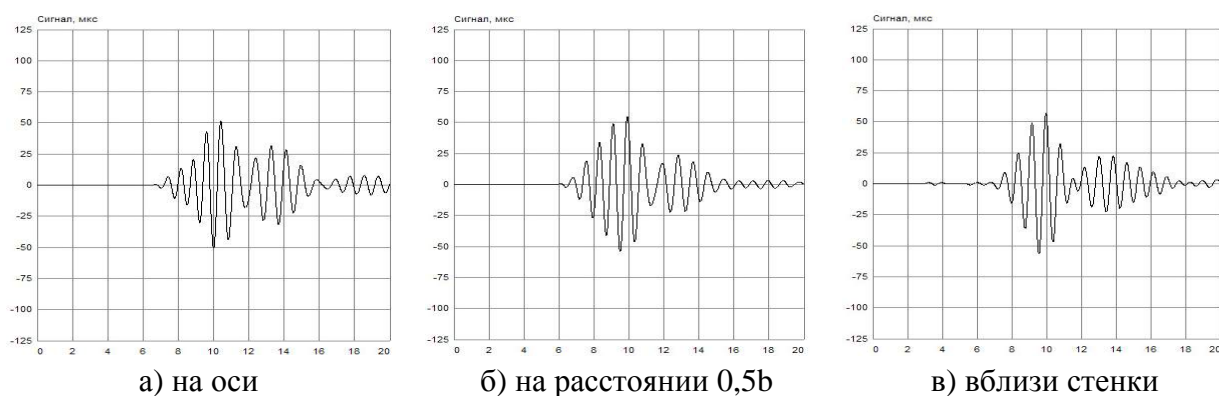
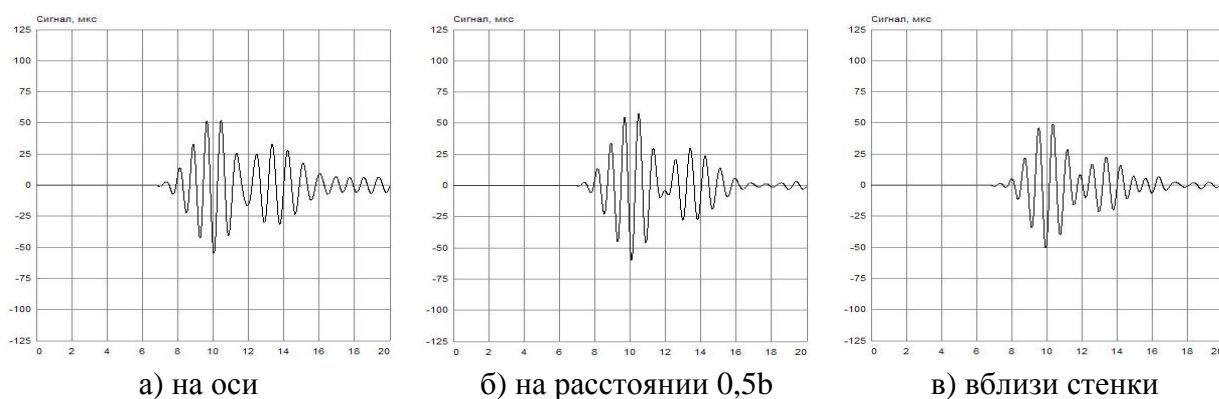


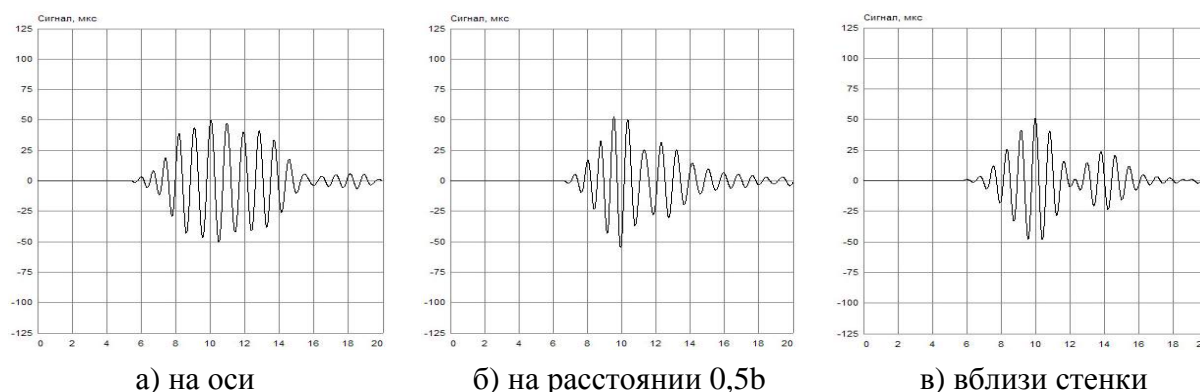
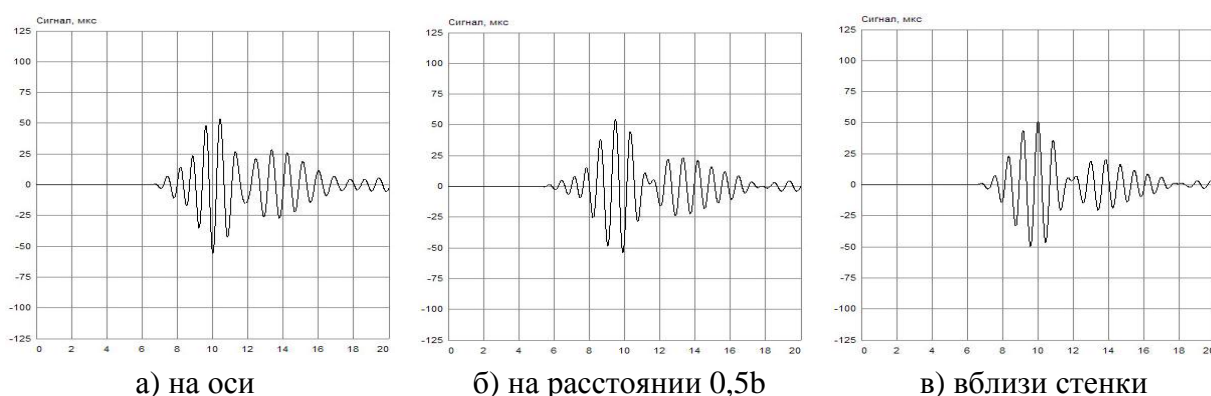
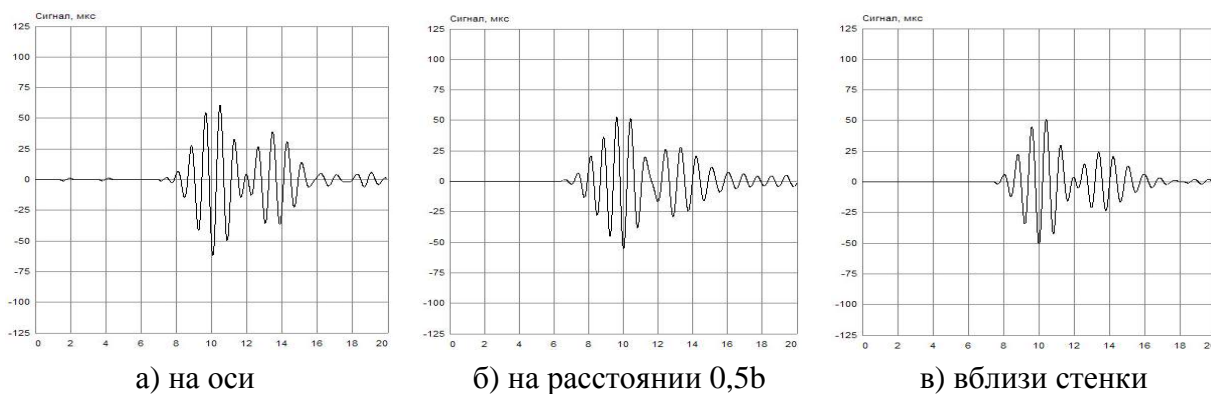
б) на расстоянии $0,5b$



в) вблизи стенки

Рис. 12. Трубка $\varnothing 18$ мм, $s = 0,8$

Рис. 13. Трубка $\varnothing 18$ мм, $s = 2$ Рис. 14. Трубка $\varnothing 27$ мм, $s = 0,5$ Рис. 15. Трубка $\varnothing 27$ мм, $s = 0,8$ Рис. 16. Трубка $\varnothing 27$ мм, $s = 2$

Рис. 17. Трубка $\varnothing 36$ мм, $s = 0,5$ Рис. 18. Трубка $\varnothing 36$ мм, $s = 0,8$ Рис. 19. Трубка $\varnothing 36$ мм, $s = 2$

Видно, что увеличение длительности импульса более выражено на оси волновода, чем вблизи его стенки. В волноводах малого диаметра (14 и 18 мм) благодаря преимущественному возбуждению нулевой моды при соотношении $b/a < 1$, импульс испытывает незначительное увеличение длительности. В волноводах большого диаметра наблюдается заметное разбиение исходного импульса на два, частично накладывающихся друг на друга. С одной стороны это объясняется возбуждением нулевой и первой мод на сопоставимом уровне. Разделение импульса на два, приходящих последовательно, можно объяснить и другим образом: часть энергии

импульса приходит от излучателя к приемнику напрямую по кратчайшему расстоянию (вдоль оси волновода). Второй импульс образуется боковыми лучами диаграммы направленности и приходит на приемник за счет переотражения от стенок волновода, в результате чего его путь удлиняется. Этот механизм переотражения и ведет к образованию первой моды.

Расстояние s , согласно экспериментальным данным, не проявляет существенного влияния на длительности импульсов, хотя в отдельных случаях большее расстояние s соответствует меньшим длительностям импульса на выходе волновода.

Выводы по эксперименту качественно соответствуют расчетным данным (рис. 3–6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных экспериментальных исследований демонстрируют качественное соответствие расчетным данным. На основании полученных результатов можно сформулировать следующие практические рекомендации: при конструировании действующих акустических систем преобразователи диаметра большего, чем диаметр струеобразующего устройства в 1,5 ... 2 раза и располагать их на расстоянии 0,5 ... 1 ближних зон от входного сечения струеобразующего устройства. Это позволит получить импульсы максимальной амплитуды и приемлемой длительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Реука. Особенности прохождения ультразвуковым импульсом гидроволновода с неоднородными граничными условиями. Электронный журнал «Техническая акустика», <http://ejta.org>, 2008, 5.
2. С. К. Паврос, С. В. Реука. Исследование распространения ультразвукового импульса в струйном неоднородном волноводе. Дефектоскопия, 2008, №3