

УДК 53.05:534-8

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ РЕКОНСТРУКТИВНАЯ ТОМОГРАФИЯ СТАЦИОНАРНЫХ, ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И БИНАРНЫХ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ, ПОЛУЧЕННАЯ НА ОСНОВАНИИ СИГНАЛОВ ОТ МНОГОКАНАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

<sup>1,2</sup>Кутлубаева Ю.И., <sup>2,3</sup>Крутянский Л.М., <sup>1,2</sup>Пыльнов Ю.В.

<sup>1</sup>Московский государственный университет информационных технологий,  
радиотехники и электроники, Москва;

<sup>2</sup>Международная Ассоциированная Лаборатория LICs/LEMAs, IEMN UMR CNRS 8520;

<sup>3</sup>Научный центр волновых исследований Института общей физики  
им. А.М. Прохорова РАН, Москва, e-mail: musrosjk@gmail.com

Методами ультразвуковой реконструктивной томографии проведён анализ фазово-неоднородных сред. Использована новая схема с прямоугольной экспериментальной кюветой, в состав которой входят 4 линейные акустические антенны (по 16 пьезоэлементов в каждой антенне). Разработана мультиэлементная сканирующая система по сбору и обработке ультразвуковых сигналов. Как и во многих других методах томографирования, объект пересекается рядом лучей, дающих обзор на 360°. Благодаря разработанной мультиэлементной сканирующей системе заменяется механическое вращение приёмо-излучателей вокруг объекта на электронное переключение элементов, окружающих интересующую область. Проведена серия экспериментов со статическими и динамическими объектами, такими как объекты круглых форм с диаметрами 5 и 15 мм, бинарные жидкости и вихревой поток однородной жидкости. Полученные экспериментальные данные совпадают с результатами математического моделирования.

**Ключевые слова:** ультразвуковая реконструктивная томография, визуализация, фазовые объекты, информационно-измерительная система, математическое моделирование

## ULTRASONIC RECONSTRUCTIVE TOMOGRAPHY OF STATIC AND DYNAMIC OBJECTS AND BINARY IMMISCIBLE LIQUIDS BASED ON MULTI-CHANNEL ANTENNA SIGNALS

<sup>1,2</sup>Kutlubaeva Y.I., <sup>2,3</sup>Krutynskiy L.M., <sup>1,2</sup>Pylnov Y.V.

<sup>1</sup>Moscow State University of Information Technologies, Radioengineering and Electronics, Moscow;

<sup>2</sup>Joint International Laboratory LICs/LEMAs, IEMN UMR CNRS 8520;

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, e-mail: musrosjk@gmail.com

Analysis of phase-inhomogeneous media was carried out by ultrasonic reconstructive tomography. The new scheme of the experimental cell, which consists of 4 linear acoustic antennas (16 piezoelectric elements in each), and the multi-element scanning system for acquisition and processing of the ultrasonic signals was developed and used. As in many other conventional tomography procedures, an object is crossed by a set of rays giving a 360° array of projections. With a multi-element scanning system it is possible to replace mechanical rotation of emitters-receivers around the object by electronic switching of the elements, surrounding the area of interest. A series of experiments with static and dynamic objects, such as circular objects with diameters of 5 and 15 mm, binary fluid and vortex flow of a homogeneous fluid was carried out. The obtained results have a good agreement with the results of numerical simulation.

**Keywords:** ultrasonic reconstructive tomography, visualization, phase objects, information-measuring system, numerical simulation

Методы акустической диагностики широко используются в современных системах интроскопии и позволяют получать информацию о пространственном распределении внутренних параметров объектов исследования, а также о протекании изучаемых процессов [9, 5]. В последнее время в ультразвуковых диагностических системах все большую роль играют методы реконструктивной томографии [6]. Это связано с прогрессом в области IT технологий, увеличением скорости обработки данных и объемов хранимой информации.

До недавнего времени большую конкуренцию томографическим методам оказывали традиционные методы ультразвуковой диагностики, основанные на методах эхолокации, при обработке данных в режиме яркостного сканирования (B-scanning) [13]. Эти методы получили широкое распространение в медицинской диагностике (УЗИ) и неразрушающем контроле (НРК), благодаря простоте алгоритмов обработки данных и методов отображения диагностической информации [13, 2]. Для получения данных эхолокации внутренние области

объекта должны иметь большое различие акустических импедансов с четкими границами раздела. Именно такое строение исследуемого объекта позволяет получить уверенную регистрацию отраженного ультразвукового сигнала, которая необходима для контрастного восстановления его внутренней структуры.

Однако на практике часто встречаются объекты, имеющие плавную пространственную вариацию внутренних акустических параметров, что не обеспечивает возникновения отраженного сигнала, достаточного для регистрации ультразвуковой диагностической системой. Те же проблемы могут возникать в доплеровских ультразвуковых системах, традиционно основанных на обработке сигналов, отраженных от мелких частиц, движущихся в потоке [1]. Для такого типа объектов информацию о внутренних параметрах можно получить только по характеристикам проходящих УЗ-сигналов.

Более того, используя данные о времени задержки при прямом и обратном прохождении акустического сигнала, можно одновременно получить информацию о нескольких параметрах внутренней структуры исследуемого объекта, например скорости ультразвука в среде и скорости движения среды распространения. Аналогичная информация может быть получена при регистрации фазового сдвига УЗ-волны в прямом и обратном направлениях, в связи с чем объекты с плавным изменением акустических импедансов можно рассматривать в качестве фазовых объектов.

Отметим, что по полученным распределениям скоростей звука в среде распространения УЗ-волны можно построить и распределения других параметров, например, концентраций примесей [3] или локальные флуктуации температуры в однородных средах [12].

Целью данной работы является разработка алгоритма томографической реконструкции статических и динамических фазовых объектов, скоростей потоков однородных жидкостей и проведение экспериментальных исследований, подтверждающих работоспособность данного алгоритма.

### Ультразвуковая томография фазовых объектов

**Алгоритм томографической реконструкции.** Фазовый набег акустической волны или временная задержка УЗ-сигнала являются интегралом от функции групповой скорости волны по длине траектории акустического луча.

$$t(s, \vec{n}) = \int_0^L \frac{dl}{c(\vec{r})}, \quad (1)$$

где  $\vec{r} = (x, y)$  – радиус вектор;  $\vec{n} = (\cos \varphi, \sin \varphi)$  – единичный вектор в направлении УЗ пучка;  $s$  – расстояние от начала координат до луча;  $L$  – длина акустического луча;  $c(x, y)$  – скорость звука в среде распространения.

Уравнение (1) представляет собой набор одномерных проекций временных задержек УЗ сигнала, прошедшего через исследуемый объект под углом наклона  $\varphi$ .

Для восстановления двух параметров среды удобно использовать сумму

$$\sigma t(s, \vec{n}) = \frac{t_{i,j} + t_{j,i}}{T_0} \quad \text{или} \quad \text{разность}$$

$$\delta t(s, \vec{n}) = \frac{t_{i,j} - t_{j,i}}{T_0} \quad \text{времен задержек акусти-$$

ческих сигналов, идущих в прямом и обратном направлениях и нормированных на время распространения сигнала между приемником и излучателем в неподвижной однородной среде  $T_0 = L/c_0$ .

Решение интегрального (1) уравнения возможно с помощью преобразования Радона, используемого в алгоритмах реконструктивной томографии, позволяющего получить двумерные распределения параметров сечений исследуемых объектов [7].

На практике реализация преобразования Радона осуществляется методом обратных проекций (Back Projection), в котором одномерные проекции растягиваются по ортогональной координате  $s$  и суммируются по углу наклона зондирующего УЗ пучка:

$$\begin{aligned} BP\{L \cdot \sigma t\} &= \iint \frac{c_0}{c(\vec{r})} \cdot \delta(\vec{n}\vec{r} - s) dld\varphi = \\ &= \iint \frac{c_0}{c(\vec{r}')} \cdot \frac{d\vec{r}'}{|\vec{r}' - \vec{r}|} = \frac{c_0}{c(r)} \cdot \frac{1}{r}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $BP\{\}$  – оператор обратного проецирования;  $c_0$  – скорость звука в однородной среде, где  $d\vec{r}' = dx'dy'$  – двумерный элемент площади.

Уравнение, получающееся в результате двумерной свертки, легко решается в Фурье-пространстве с применением соответствующего фильтра пространственных частот. В целом метод получил название метода фильтрации обратных проекций (Filtered Back Projection) [11, 15]. Для восстановления пространственного распределения скорости звука в среде для объекта с центральной симметрией имеем

$$\frac{c_0}{c(r)} = FBP\{L \cdot \sigma t\}, \quad (3)$$

где  $FBP\{\}$  – оператор фильтрации обратных проекций.

Для компонент скорости потоков в среде распространения ультразвукового сиг-

нала жидкостей необходимо учитывать угол сноса УЗ луча. Значение этого угла может быть найдено из принципа Ферма, согласно которому акустический сигнал распространяется по траектории с минимальной задержкой. Дополнительное уравнение для угла сноса позволяет разделить компоненты скорости движения среды и для потока с центральной симметрией получить (вихря жидкости):

$$\frac{u_x(r)}{c_0} = -FBP\{L \cdot \delta t \cdot \sin \varphi\};$$

$$\frac{u_y(r)}{c_0} = FBP\{L \cdot \delta t \cdot \cos \varphi\}. \quad (4)$$

**Экспериментальная установка.** Для проведения ультразвуковой реконструктивной томографии фазовых объектов была разработана система, представленная на рис. 1. Фазовый объект размещается в плоской кювете прямоугольной формы 90×70 мм и толщиной 25 мм. Стенки кюветы выполнены из прозрачного пластика. На боковых гранях установлены 4 акустические антенны М9060 фирмы «АКС».

Каждая акустическая антенна имеет 16 расположенных в ряд пьезопреобразователей. Общее число каналов, по которым сигнал излучается и принимается, составляет 64; излучение и прием осуществляется многоканальной системой MultiX (производства компании М2М). Работа аппаратной части системы управляется и контролируется подсистемой, в состав которой входит программное обеспечение MultiX

М2М и специальное управляющее программное обеспечение, созданное на базе платформы LabView.

Использование четырех линейных решёток пьезопреобразователей позволяет проводить анализ любого фазового объекта, находящегося в кювете в области пересечения акустических лучей. MultiX осуществляет электронное переключение каналов, окружающих область исследования. Каждый из 64 каналов поочередно излучает УЗ-импульс с центральной частотой 5 МГц, и после прохождения в среде этот импульс регистрируется всеми остальными элементами [4].

**Ультразвуковая томография статических фазовых объектов.** На первом этапе, для оценки адекватности математической модели и методики реконструкции изображения были проведены исследования со стационарными фазовыми объектами различных размеров: точечным и объектом средней величины.

В качестве точечного объекта использовалась трубочка диаметром  $d = 5$  мм из тонкого пластика, что исключало искажение проходящего ультразвукового луча.

Трубочка заполнена жидкостью FC-70 [10], скорость звука в данном веществе составляет  $C = 680$  м/с, акустический импеданс равен  $Z_{FC} = 1,34 \cdot 10^6$  Па·с/м<sup>3</sup>. Концы трубочки запаяны термоклеем, а места спайки закрыты пластилином, что исключает искажения ультразвуковой волны (рис. 2 а). Вся кювета вокруг фазового объекта заполнена водой, акустический импеданс которой принимался равным  $Z_B = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м<sup>3</sup>.

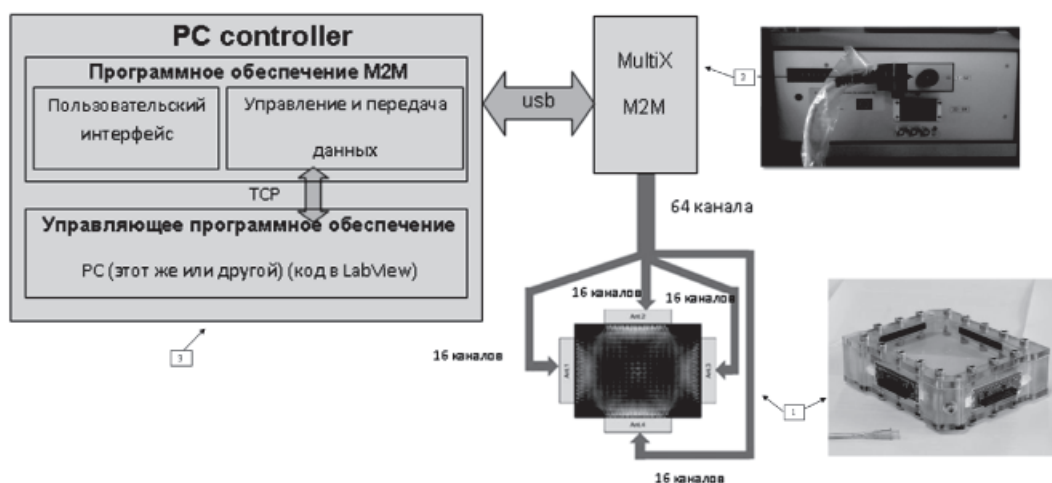


Рис. 1. Измерительная система сбора данных для проведения ультразвуковой реконструктивной томографии фазовых объектов:

1 – кювета; 2 – 64-канальная система MultiX M2M; 3 – управляющий блок

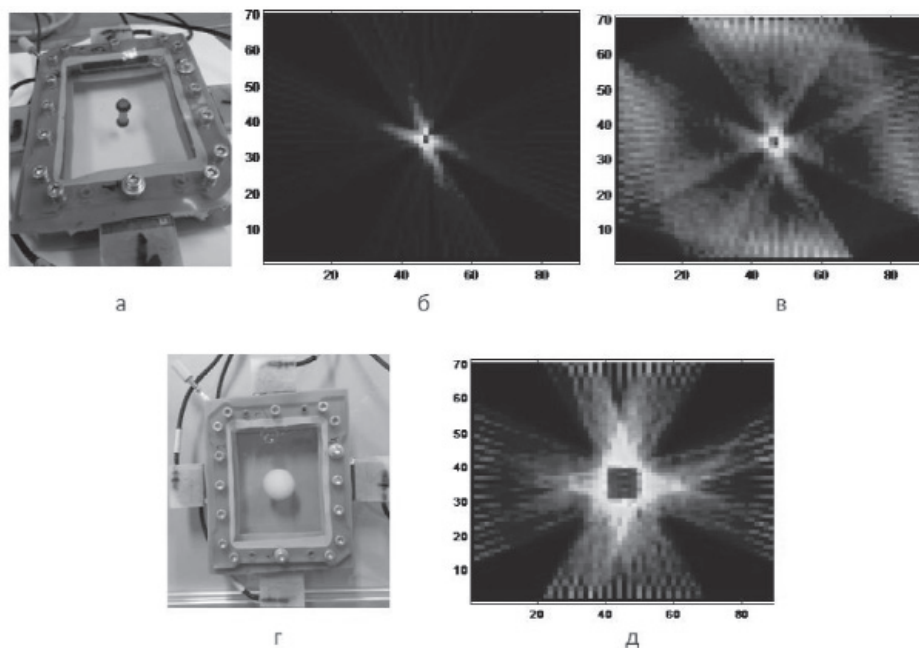


Рис. 2. Эксперименты со статическими фазовыми объектами:  
 а – кювета с точечным объектом – трубочкой  $d = 5$  мм; б – результат моделирования;  
 в – восстановленное изображение; г – кювета с шариком  $d = 15$  мм;  
 д – восстановленное изображение

Численное моделирование осуществлялось методом построения прямых проекций лучей в геометрии кюветы [14]. Восстановление томографических изображений, как для модели, так и для экспериментальных данных, выполнялось методом обратных проекций.

На рис. 2 б представлен результат численного моделирования томографического восстановления изображения малого фазового объекта. На рис. 2 в представлен – экспериментальный результат томографии тонкой трубки, полученный при помощи созданной ультразвуковой системы. Сравнительный анализ отмасштабированных изображений показал, что расхождение не превышает 0,7...1,5% от размера точечного объекта.

Полученные результаты позволяют утверждать, что данная информационно-измерительная система и разработанный математический аппарат для обработки сигналов позволяют восстановить изображение объекта, размеры которого существенно меньше расстояния между излучателями.

В качестве фазового объекта средней величины был выбран шарик диаметром  $d = 15$  мм, наполненный изо-пропанолом (Propanol 2), оболочка которого была выполнена из тонкого латекса, что позволяло ультразвуковым лучам проходить через эту оболочку без искажений. Акустический импеданс изо-пропанола отличается от импеданса воды незначительно, но больше, чем у FC-70 –  $Z_a = 0,93 \cdot 10^6$  Па·с/м<sup>3</sup>. Скорость

звука в изо-пропанолe –  $C_{pr} = 1160$  м/с (в воде  $V_{зв} = 1483$  м/с).

На рис. 2 д представлено восстановленное изображение шарика. Анализ реальных размеров объекта и восстановленного изображения подтверждает, что они практически идентичны (расхождения составляют не более 4%). Это даёт основание полагать, что принятая методика может использоваться и для восстановления статических фазовых объектов средней величины, размеры которых сопоставимы с расстоянием между излучателями.

**Ультразвуковая томография динамических фазовых объектов.** Возможность восстановления изображения подвижного объекта исследовалась также с использованием шарика с диаметром 15 мм, заполненного изо-пропанолом. Место спайки латекса закрывалось пластилином.

Движение шарика в кювете со скоростью, в пределах 0,02 м/с обеспечивалось плавным наклоном кюветы. Последовательность восстановленных изображений, полученных с интервалом 0,5 с, представлена на рис. 3 б. Анализ изображений подтверждает, что использованный подход и полученные результаты численного моделирования позволяют восстанавливать томографическое изображение малоподвижных фазовых объектов простой формы, т.е. движущихся со скоростью, много меньшей скорости звука в среде.

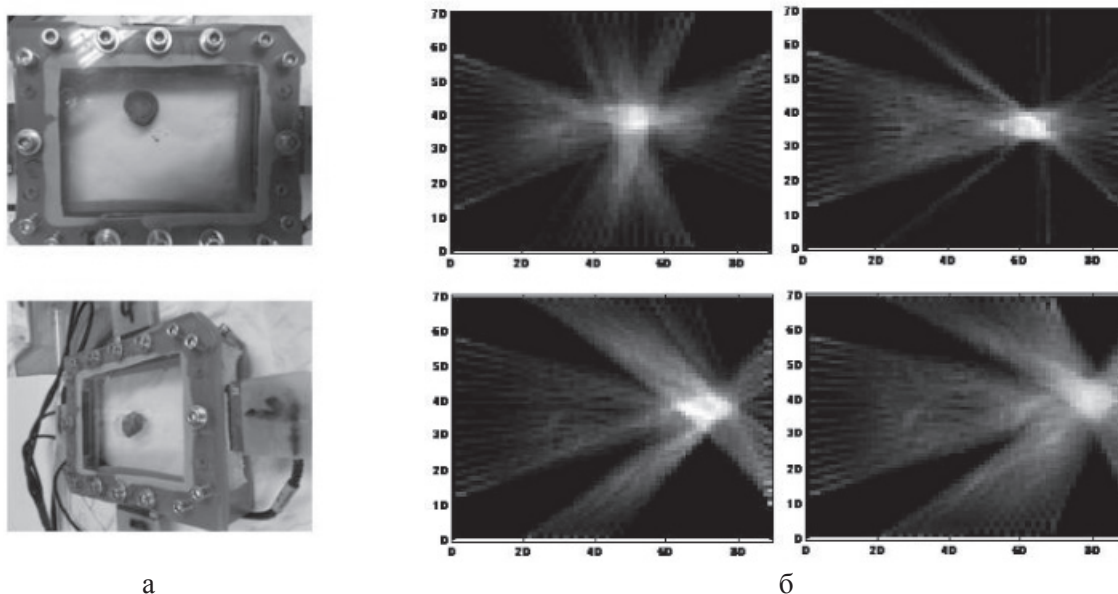


Рис. 3. Эксперимент с динамическим фазовым объектом  $d = 15$  мм:  
а – кювета с объектом; б – восстановленные изображения подвижного шарика с интервалом 0,5 с

**Ультразвуковая томография бинарных жидкостей.** Для томографической реконструкции использовались две несмешиваемые (бинарные) жидкости: вода и силиконовое масло (вязкость 1,5 сСт), имеющие различные физические и акустические свойства. Плотности и вязкости этих жидкостей приблизительно равны, а акустиче-

ские импедансы значительно различаются (таблица).

С этими жидкостями были проведены физический и модельный эксперименты. Результаты представлены на рис. 4 а и б соответственно. На рис. 4 в показан результат восстановления изображения бинарных жидкостей, имеющих границу раздела.

Физические параметры воды и силиконового масла

Liquids	Parameters	Скорость звука, м/с	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Акустический импеданс, $\cdot 10^6$ Па·с/м <sup>3</sup>	Вязкость, сСт
Вода		1483	0,998	1,5	1,0
Силиконовое масло		920	0,853	0,78	1,5

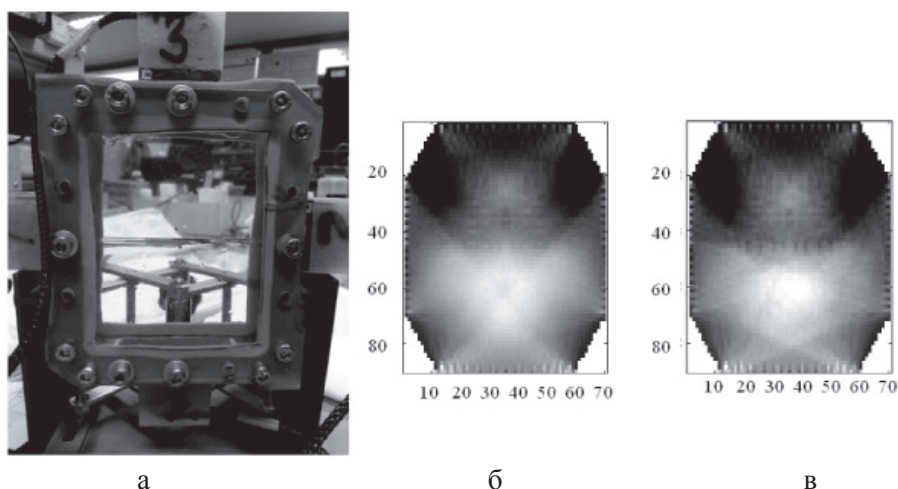


Рис. 4. Определение границы раздела двух жидкостей (воды и силиконового масла):  
а – общий вид установки; б – модельный расчет для условий эксперимента;  
в – восстановленное изображение на основе экспериментальных данных

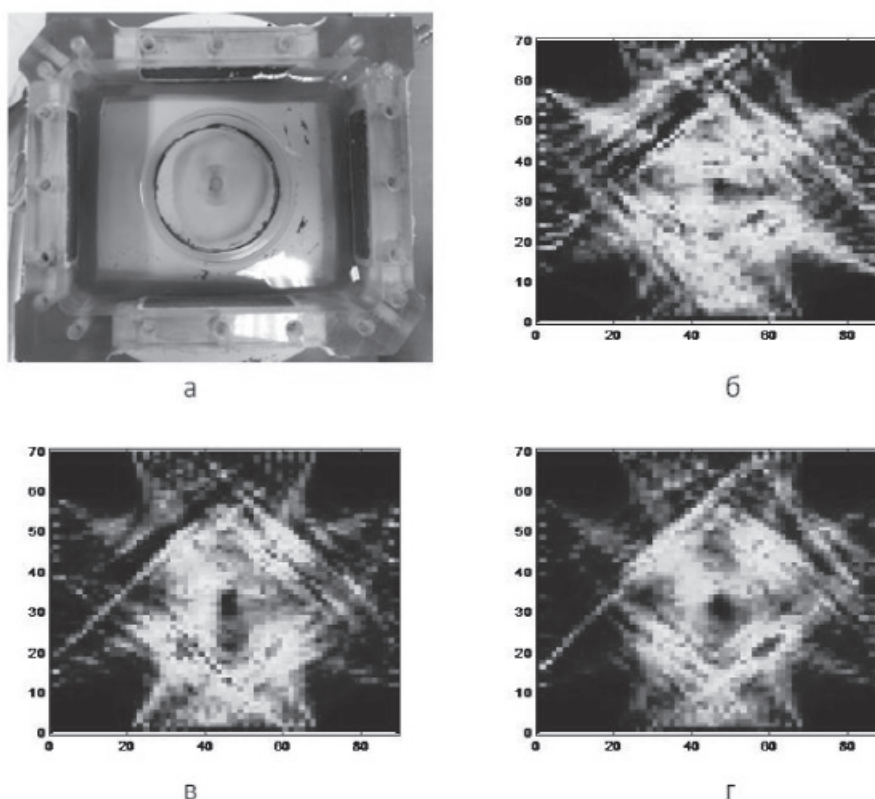


Рис. 5. Томографическая реконструкция вихревого потока:  
 а – общий вид установки; б, в и г – восстановленные изображения распределения модуля скорости вихревого потока с интервалом в 0,5 с

**Ультразвуковая томография вихревого потока однородной жидкости.** На таких объектах также был проведен эксперимент с использованием метода ультразвуковой томографии. Было показано, что и в этом случае методы ультразвуковой томографии позволяют контролировать распределение скорости в потоках однородной жидкости. Для исследования возможности восстановления поля скоростей движущейся однородной жидкости кювета оснащалась магнитным импеллером, размещающимся вне области перекрытия ультразвуковых лучей. Вращение импеллера обеспечивалось генератором магнитного поля BioblockScientific AM3002. Скорость вращения импеллера составляла 1250 об/мин. Данные для томографического восстановления регистрировались с интервалом 0,5 с. На рис. 5 б, в и г чётко выражено различие распределения скоростей в потоке.

#### Выводы

Результаты выполненных экспериментов показали, что разработанная методика томографической реконструкции, с исполь-

зованием стационарных излучателей ультразвука на плоских поверхностях, позволяет получить полное обзорное (в пределах 360°) изображение фазовых объектов [14].

Используемый алгоритм томографической реконструкции позволяет восстанавливать:

- изображения стационарных фазовых объектов с размерами более 7% от расстояния между излучателями с точностью в пределах 4% от размера объекта;
- изображение динамических фазовых объектов;
- изображение раздела несмешиваемых жидкостей с близкими физическими характеристиками;
- распределение скоростей вихревого потока однородной жидкости.

Следует отметить, что полученные изображения имеют ряд искажений, характерных для томографической реконструкции на первичном этапе обработки, связанных с геометрией эксперимента (в нашем случае с прямоугольным расположением приемно-передающих антенн). Необходимая коррекция обычно достигается применением

адаптивной фильтрации [8], позволяющей уменьшить артефакты томографического изображения.

Поиск фильтра, соответствующего геометрии нашего эксперимента, является предметом дальнейших исследований.

*Работа выполнялась в международной лаборатории LIA LEMAC/LICS в рамках Европейского проекта IRSES «PAS», при поддержке грантов РФФИ 13-02-93105-НЦНИЛ\_а и 13-02-93108-НЦНИЛ\_а.*

### Список литературы

1. Балдев Радж, Раджендран В., Паланичами П. Применение ультразвука, Сер. «Мир физики и техники» // Техносфера. – 2006. – Р. 579.
2. Блинов Н.Н. Методы компьютерной томографии в медицине // Здоровоохранение и медицинская техника. – 2005. – № 3 (17). – С. 10–11
3. Кошелюк С.С., Пыльнов Ю.В., Крутянский Л.М. Моделирование информационно-измерительной системы ультразвуковой томографии // 61 Научно-техническая конференция. Сборник трудов. Ч.3. Технические науки. – Москва, МГТУ МИЭА, 2012. – С. 68–73.
4. Кутлубаева Ю.И., Пыльнов Ю.В., Крутянский Л.М., Ультразвуковая реконструктивная томография статических и динамических фазовых объектов // Нанoeлектроника, нанofотоника и нелинейная физика: тезисы докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых 2–4 сентября 2014. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2014. – С. 89–90.
5. Преображенский В.Л., Перно Ф., Пыльнов Ю.В., Крутянский Л.М., Смагин Н.В., Брысев А.П., Ширковский П.Н. Диагностика неоднородных, нелинейных и движущихся сред с использованием обращения волнового фронта ультразвука // Тр. Ин-та Общей Физики им. А.М. Прохорова. – Т. 69. – С. 86–124.
6. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. – М.: Физматлит, 2004. – 320 с.
7. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. – М.: Мир, 1983. – 352 с.
8. Чесалин А.Н., Пыльнов Ю.В. Адаптивная фильтрация изображений в реконструктивной ультразвуковой томографии // Материалы МНТК «INTERMATIC-2013». – М.: МИРЭА, 2013. – С. 128–131.
9. Acoustical Imaging, Ed. by Andrzej Nowicki Inst. of Fundamental Technological, XIV. – 2012. – Vol. 31. – P. 454.
10. Benson P., Gilmore R. Non-Destructive Imaging Using Scanning Acoustic Microscopy, Final Report, Grant number: MT-2210-0-NC-21 November 15, 2004, P. 10.
11. Braun H. and Hauck A. Tomographic Reconstruction of Vector Fields, IEEE Trans. Signal Proc. 39(2), 464 (1991).
12. Jovanovich Ivana Inverse Problems in Acoustic Tomography: Theory and Applications. PhD These, July 31. – 2008. – P. 123.
13. Mohana Shankar P. Statistics of Boundaries in Ultrasonic B-Scan Images. Ultrasound in Medicine & Biology. – Vol. 41, Issue 1, January 2015. – P. 268–280.
14. Pylnov Y.V., Koshelyuk S.S., Pernod P., Kutlubaeva Y.I. Ultrasonic Tomographic Reconstruction of Liquid Flows Using Phase-Conjugate Waves. // Physics of Wave Phenomena, 2012, Vol. 20, No. 3, pp. 231–234.
15. Rahiman M.F., Rahim R.A., Chan K.S., Nawawi S.W. Non-Invasive Imaging of Liquid/Gas Flow Using Ultrasonic

Transmission-Mode Tomography, Sensors and Actuators A: Physical. 135, 337 (2007).

### References

1. Baldev Radzh, Radzhendran V., Palanichami P. Prime-neniya ultrazvuka, Ser. Mir fiziki i tekhniki, Tekhnosfera, 2006, pp. 579.
2. Blinov N.N. Metody kompyuternoy tomografii v meditsine, Zdravookhraneniye i meditsinskaya tekhnika no. 3 (17) 2005 pp. 10–11
3. Koshelyuk S.S., Pylnov Y.V., Krutyanskiy L.M. Modelirovaniye informatsionno-izmeritelnoy sistemy ultrazvukovoy tomografii // 61 Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya. Sbornik trudov. Ch.3. Tekhnicheskije nauki. /Moskva, MGTU MIEA, 2012, pp. 68–73.
4. Kutlubaeva Y.I., Pylnov Y.V., Krutyanskiy L.M., Ultrazvukovaya rekonstruktivnaya tomografiya staticheskikh i dinamicheskikh fazovykh obektov. // Tezisy dokladov IX Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh «Nanoelektronika, nanofotonika i nelineynaya fizika» 2–4 sentyabrya 2014 g., g. Saratov – Izd-vo Saratovskogo universiteta, 2014g. pp. 89–90.
5. Preobrazhenskiy V.L., Perno F., Pylnov Y.V., Krutyanskiy L.M., Smagin N.V., Brysev A.P., Shirkovskiy P.N., Diagnostika neodnorodnykh, nelineynykh i dvizhushchikhsya sred s ispolzovaniem obrashcheniya volnovogo fronta ultrazvuka. Tr. In-ta Obshchey Fiziki im. A.M. Prokhorova Tom 69, pp. 86–124.
6. Tereshchenko S.A. Metody vychislitelnoy tomografii. M.: Fizmatlit, 2004. 320 p.
7. Khermen G. Vosstanovleniye izobrazheniy po proektsiyam: Osnovy rekonstruktivnoy tomografii. M.: Mir, 1983. 352 p.
8. Chesalin A.N., Pylnov Y.V. Adaptivnaya filtratsiya izobrazheniy v rekonstruktivnoy ultrazvukovoy tomografii. Materialy MNTK «INTERMATIC-2013», Moskva, MIREA, pp. 128–131.
9. Acoustical Imaging, Vol. 31, Ed. by Andrzej Nowicki Inst. of Fundamental Technological, XIV, 2012, pp. 454.
10. Benson P., Gilmore R. Non-Destructive Imaging Using Scanning Acoustic Microscopy, Final Report, Grant number: MT-2210-0-NC-21 November 15, 2004, pp. 10.
11. Braun H. and Hauck A. Tomographic Reconstruction of Vector Fields, IEEE Trans. Signal Proc. 39(2), 464 (1991).
12. Jovanovich Ivana Inverse Problems in Acoustic Tomography: Theory and Applications. PhD These, July 31, 2008, pp. 123.
13. Mohana Shankar P. Statistics of Boundaries in Ultrasonic B-Scan Images. Ultrasound in Medicine & Biology, Volume 41, Issue 1, January 2015, pp. 268–280.
14. Pylnov Y.V., Koshelyuk S.S., Pernod P., Kutlubaeva Y.I. Ultrasonic Tomographic Reconstruction of Liquid Flows Using Phase-Conjugate Waves. // Physics of Wave Phenomena, 2012, Vol. 20, no. 3, pp. 231–234.
15. Rahiman M.F., Rahim R.A., Chan K.S., Nawawi S.W. Non-Invasive Imaging of Liquid/Gas Flow Using Ultrasonic

### Рецензенты:

Романов М.П., д.т.н., профессор, директор института кибернетики, Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, г. Москва;

Карп В.П., д.т.н., профессор кафедры информационных систем, Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники, г. Москва.