



УДК 532.5, 548.52, 534.2

Д.А. Сергеев¹, В.И. Родченков¹, Д.А. Касьянов², М.С. Дерябин²

¹ Институт прикладной физики РАН, Россия

603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru

² Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород, Россия
603950, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В СФОКУСИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Методом PIV впервые исследованы процесс развития и структура установившихся акустических течений в фокальной области сферического ультразвукового концентратора. Сопоставлением реологических и акустических измерений показано, что техника PIV может быть эффективным средством экспресс - диагностики пространственно-неоднородного акустического поля. Исследования проведены в целях совершенствования техники скоростного роста солевых монокристаллов.

АКУСТИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ, УЛЬТРАЗВУК, PIV-МЕТОД

ВВЕДЕНИЕ

Ранее [1, 2] была показана принципиальная возможность значительного ускорения роста солевого кристалла за счет генерации на его поверхности течения Шлихтинга. Течение вызывалось падающим на границу кристалла неоднородным акустическим полем, создаваемым сферическим концентратором. Для получения целевого эффекта в экспериментах, описанных в [1, 2], потребовалось создание весьма интенсивных Шлихтинговских течений на гетерогенной границе. Как известно, скорость пограничных акустических течений определяется как пространственным градиентом поля, так и его амплитудой ($v_x \sim du/dx \times u$, где v_x – скорость течения, а u – амплитуда колебательной скорости, см., например, [3]). Таким образом, при достаточно острой фокусировке, на поверхности кристалла в экспериментах [1, 2] достигалась значительная интенсивности ультразвука (амплитуда звукового давления на поверхности воздействия достигала 5×10^5 Па). Технические возможности используемой экспериментальной техники позволяли значительно увеличить акустическое поле на кристаллической поверхности, однако дальнейшее увеличение поля оказалось нецелесообразным ввиду нагрева поверхности кристалла и, даже часто её механического повреждения.

По-видимому, применение варианта интенсификации ростового процесса, связанного с созданием мелкомасштабных акустических потоков на растущей границе имеет ограничение по интенсивности падающего на границу неоднородного акустического поля.

Возможным вариантом акустической интенсификации ростового процесса может являться импульсное воздействие масштабного течения Экарта, возникающего в фокальной перетяжке. В таком варианте зону с наибольшей интенсивностью ультразвука можно позиционировать над целевой поверхностью. В данном случае не будет тепловых ограничений, так как изменение температуры среды за счет поглощения звука в свободном объеме на порядок меньше, чем на поверхности раздела фаз [4].

Работа посвящена исследованию особенностей, проявляющихся при возникновении течения Экарта в сфокусированном акустическом поле, экспериментально определяются время его установления и стационарная структура.

СХЕМА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика исследования развивающихся масштабных течений обрабатывалась на модельном объекте – изучался нестационарный процесс в фокальной области сферического концентратора с точно известным пространственным распределением поля. В двух сериях экспериментов были проведены прямое измерение линейного поля акустического давления и поля скоростей течений в плоскости сечения, содержащей акустическую ось. В качестве источника сфокусированного ультразвука использовался пьезокерамический излучатель ($f = 1,4$ МГц), представляющий собой сегмент сферы с хордой 54 мм и фокусным расстоянием 50 мм. Эксперименты проводились на установке, аналогичной описанной в [1, 2], но дополненной техникой акустических измерений.

Акустические измерения

Схема исследования поля акустического давления показана на рис. 1. Цифровым генератором AFG3022 формировалась последовательность радиоимпульсов: частота заполнения $f_p = 1360$ кГц, период следования 20 мс, длительность импульса выбиралась такой, чтобы пространственный размер акустического сигнала превосходил характерный линейный масштаб фокальной области. Сигнал с генератора подавался на широкополосный усилитель Amplifier Research 800A3, затем сигнал подавался на пьезокерамический излучатель. Амплитуда напряжения сигнала накачки выбиралась таким образом, чтобы возможные нелинейные искажения, возникающие в акустических трактах и в среде распространения, не превышали единиц процентов от первичного поля. Контроль напряжения на излучателе осуществлялся с помощью цифрового осциллографа TDS3032B. При амплитуде напряжения сигнала накачки в 7 В амплитуда акустического давления в волновом фокусе излучателя составляла 130 кПа.

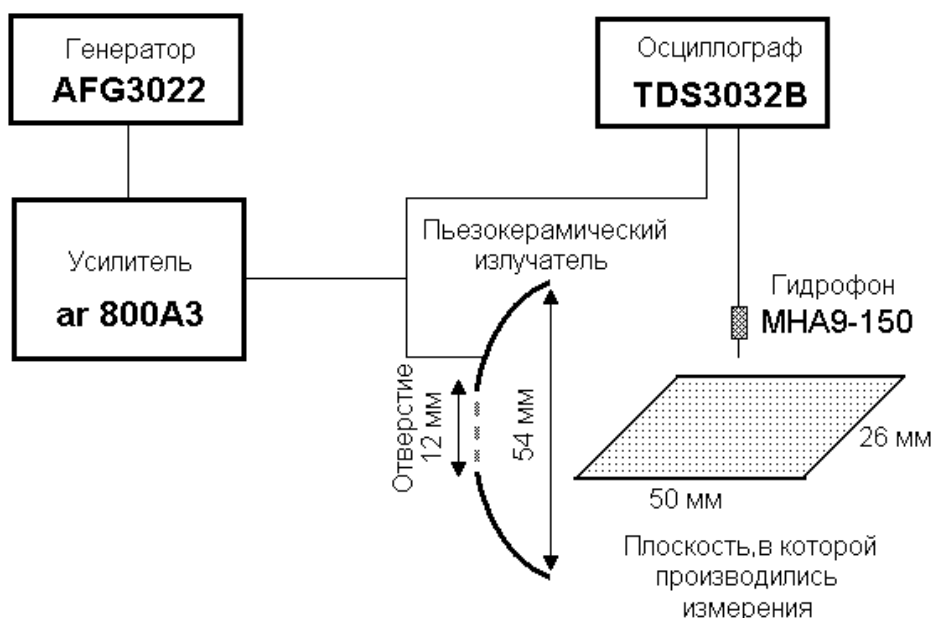


Рис. 1. Схема акустических измерений (в концентраторе имелось отверстие, которое имело технологическое назначение)

Измерение акустического давления, создаваемого пьезокерамическим излучателем, осуществлялось широкополосным гидрофоном MNA9-150 фирмы Force Technology с чувствительностью 501,2 нВ/Па, установленным на двухкоординатном оптическом столе.

Принимающий элемент гидрофона имеет размер, сопоставимый с длиной волны исследуемого акустического сигнала. Поле давления снималось в плоскости $50 \times 26 \text{ мм}^2$. Центр рассматриваемой плоскости соответствует геометрическому фокусу излучателя. Шаг измерений вдоль акустической оси составляет 1 мм, поперек акустической оси – 0.5 мм. На рис. 2 приведен экспериментально наблюдаемый рельеф модуля звукового давления. По вертикальной оси на рисунке отложена величина звукового давления, нормированная на максимальное значение.

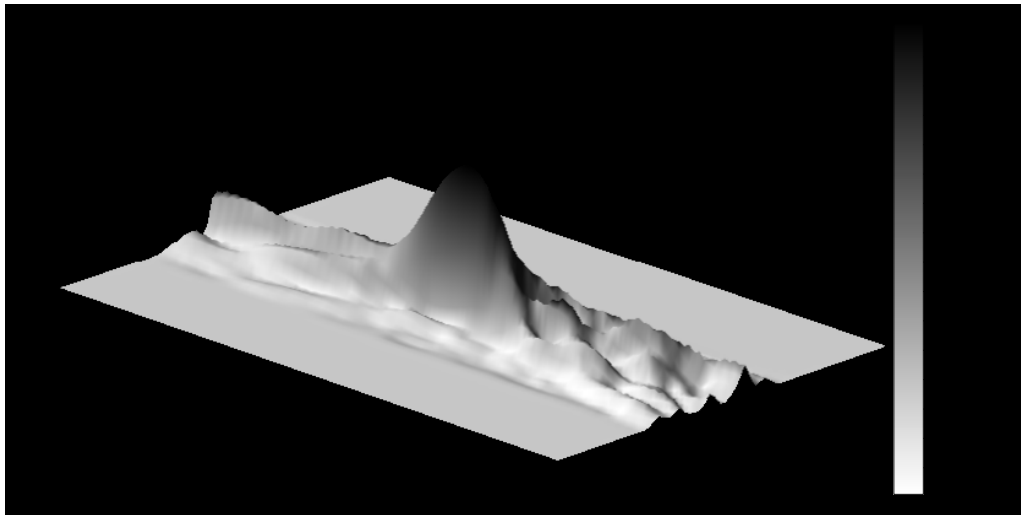


Рис.2. Линейное поле акустического давления в фокальной области сферического концентратора

На рис. 3, 4 для наглядности представлены соответственно распределения звукового давления вдоль акустической оси концентратора и поперечное распределение. Сплошной линией показаны соответствующие теоретические зависимости поля, создаваемого имеющимся концентратором, от координат, построенные исходя из результатов работы [5].

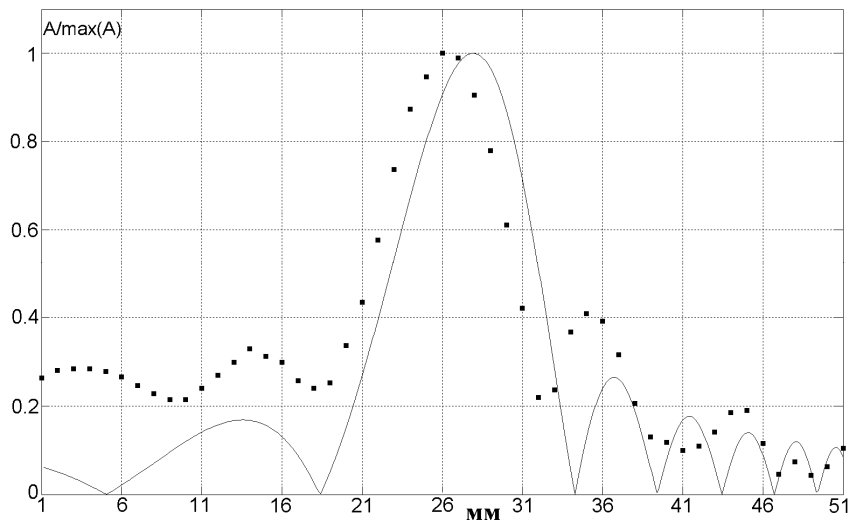


Рис. 3. Распределения звукового давления вдоль акустической оси концентратора. Символы – результаты измерений. Сплошной линией показаны соответствующие теоретические зависимости поля, создаваемого имеющимся концентратором, от координат, построенные исходя из результатов работы [5]

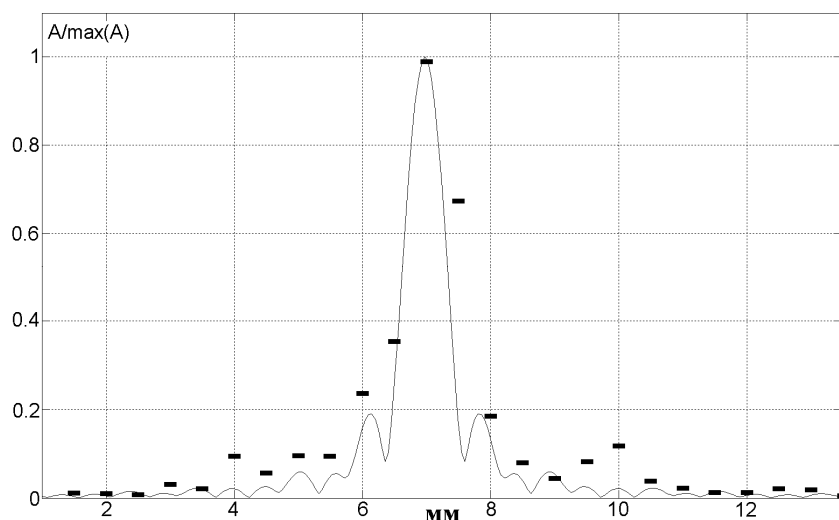


Рис. 4. Распределение звукового давления в поперечном сечении. Обозначения аналогичны рис. 3

Измерение поля скоростей акустических течений

Методика эксперимента аналогична описанной ранее [1]. Для визуализации течений в жидкость, заполняющую акустическую ванну, вводились в качестве маркеров частицы субмикронного размера, приготовленные на основе поливинилацетатного латекса. Фокальная область излучателя просвечивалась по акустической оси горизонтальным лазерным ножом, сформированным цилиндрической линзой из луча зеленого лазера NdYag мощностью 200 мВт. Течение, визуализированное рассеиваемым на микрочастицах трассера лазерным излучением, снималось сверху на управляемую компьютером камеру Видеоскан-415-USB. Размер области съемки – 40×20 мм². Камера позиционировалась таким образом, чтобы геометрический фокус излучателя находился в центре кадра. Звук предельной интенсивности ($P \approx 5 \times 10^5$ Па) включался после начала видеозаписи. Обработкой видеоизображения на компьютере с использованием стандартных алгоритмов метода Particle Image Velocimetry (PIV) [6] получены задаваемые в узлах координатной сетки двумерные поля скорости течений, сформировавшихся к различным моментам времени. Относительная погрешность измерения скорости в фиксированной точке – 5%, пространственное разрешение (шаг сетки) – около 1 мм. На рис. 5 показана начальная стадия развития течения (0,2 с после включения ультразвука), а на рис. 6 – картина стационарного поля скорости, установившегося через ~6 с. По вертикальной оси на рисунках отложена величина модуля скорости, нормированная на максимальное значение.

Из сопоставления рис. 2 и 5 видно, что пространственное распределение скорости акустических течений в начальной стадии его развития показывает адекватную картину распределения линейного акустического поля в фокальной области излучателя. Это интересный, и даже несколько неожиданный результат: техника PIV может быть эффективным средством исследования и экспресс-диагностики пространственно-неоднородного акустического поля. Следует отметить, что для получения картины линейного поля акустического давления с тем же пространственным разрешением (рис. 2) было выполнено ~2000 точечных измерений миниатюрным гидрофоном.

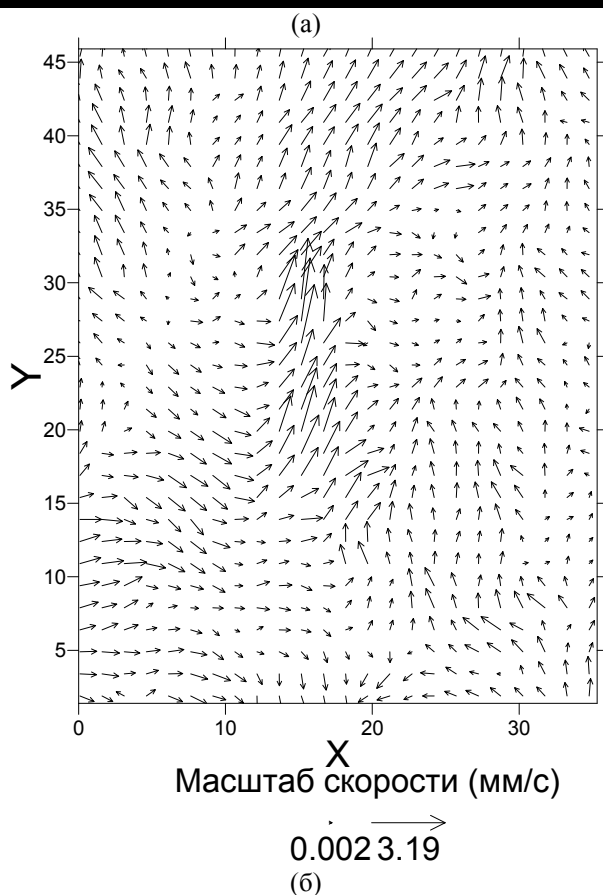
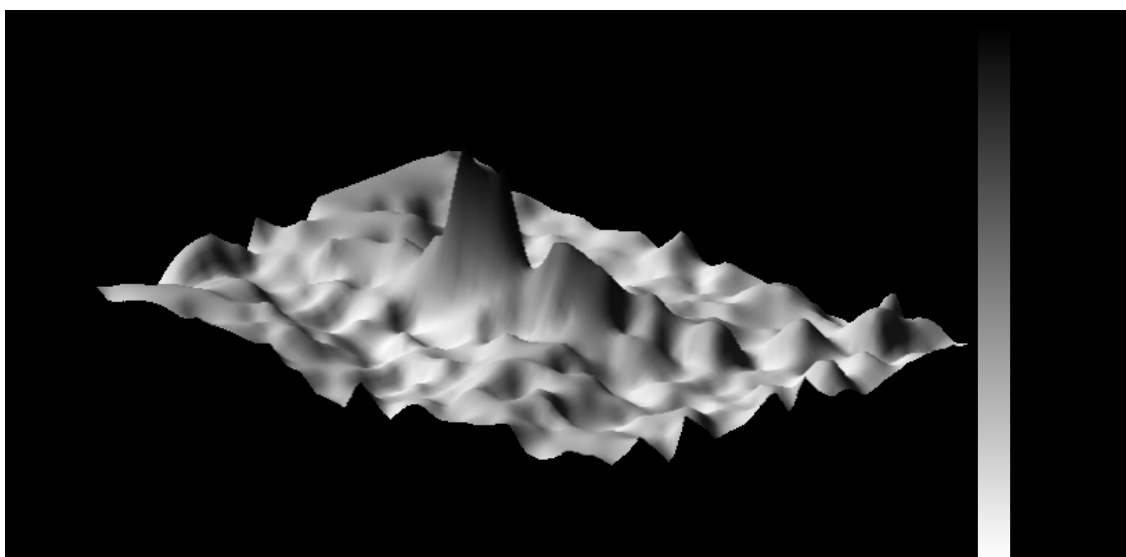


Рис. 5. (а) Пространственное распределение модуля скорости акустических течений через 0,2 с после включения ультразвука (б) поле скорости соответствующего акустического течения

Поле скорости установившегося течения имеет более сложную пространственную структуру по сравнению с начальным моментом (рис. 6). Подобную картину установившегося течения достаточно сложно спрогнозировать, она сильно отличается от картины пространственного распределения акустического поля, вызвавшего это течение. В определённой точке пространства находится максимум скорости течения, в описываемом эксперименте этот максимум находится на расстоянии ~ 15 мм от волнового фокуса. Именно это сечение представляет технический интерес с точки зрения применения масштабного течения для интенсификации межфазового массообмена: по-видимому, в нем целесообразно разместить перпендикулярно акустической оси целевую поверхность для воздействия. Гидродинамическая обстановка в данном сечении исследована нами более подробно. На рис. 7 а показано развитие во времени профиля скорости течения Экарта. Поперечное

распределение скорости качественно соответствует течению, вызываемому интенсивным плоским звуковым пучком с соответствующей апертурой [3]. Временная зависимость скорости течения в точке на акустической оси, где скорость достигает своего максимального значения, показана на рис. 7 б. Как видно из рисунка, время установления стационарного акустического потока составляет порядка 10 секунд. На приведённой на рис. 8 зависимости заметны существенные флуктуации скорости течения. Данные флуктуации связаны с возникновением разномасштабных спорадических вихрей в объёме кюветы во время разгона основного течения. Возникновение этих вихрей наблюдалось в реальном времени на видеозаписи при визуализации процесса.

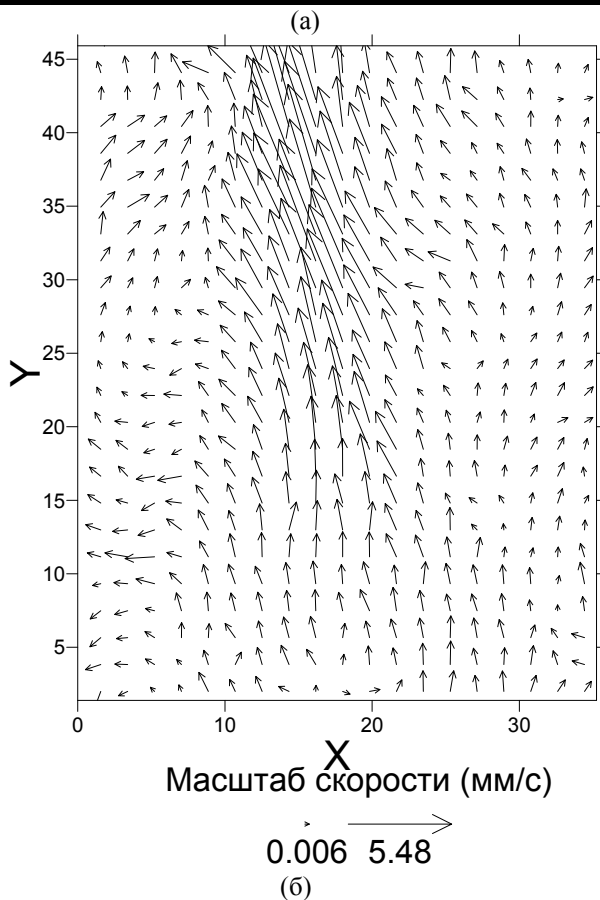
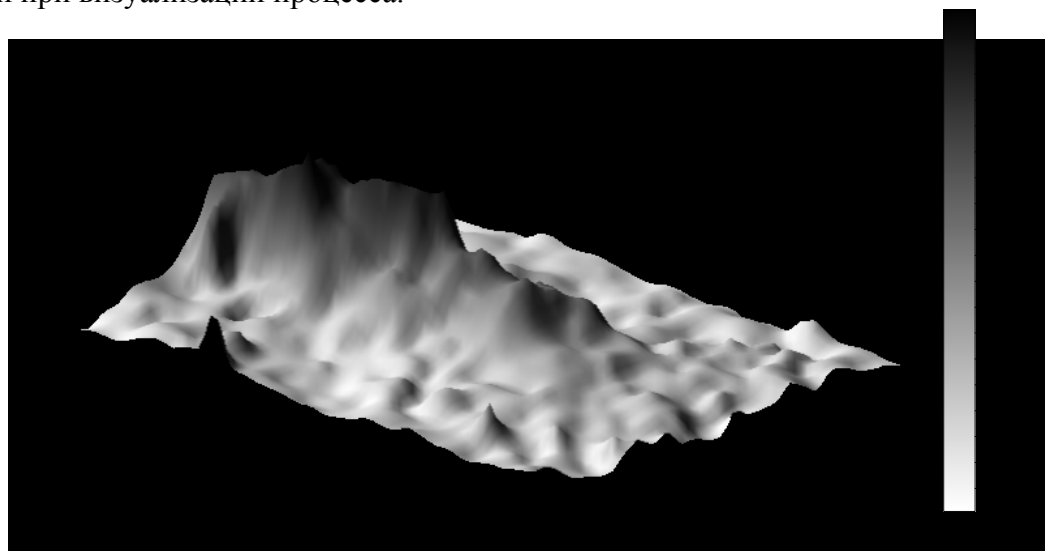


Рис. 6. (а) Установившееся пространственное распределение модуля скорости акустических течений (б) поле скорости соответствующего акустического течения

Распределение средней силы, действующей со стороны акустического поля на жидкость, в рассматриваемом случае, существенно неоднородно. Вызываемое этой силой течение неоднородно, причём характерное гидродинамическое число Рейнольдса R для изучаемых течений в фокальных областях фокусирующих акустических систем – десятки, в нашем случае $R \sim 20$, акустическое число Рейнольдса $Re \sim 15$, акустическое число Маха в фокальной области $M \sim 2 \cdot 10^{-4}$. Аналитическое описание таких течений, даже их стационарной фазы, практически, невозможно. Оценки реально сделать для плоских течений, вызываемых акустическими полями с квазиплоскими фронтами, см., например, [7]. Таким образом, исследование течений, генерируемых сильно неоднородными акустическими полями, возможно лишь экспериментальными средствами и метод PIV, в данном случае незаменим. Более того, с помощью PIV можно изучать особенности фазы установления течений в неоднородных акустических полях. Так при рассмотрении рис. 5 можно констатировать, что при резкой неоднородности акустического поля, скорость течения, им вызываемого, быстрее всего нарастает в областях с максимальным пространственным градиентом поля.

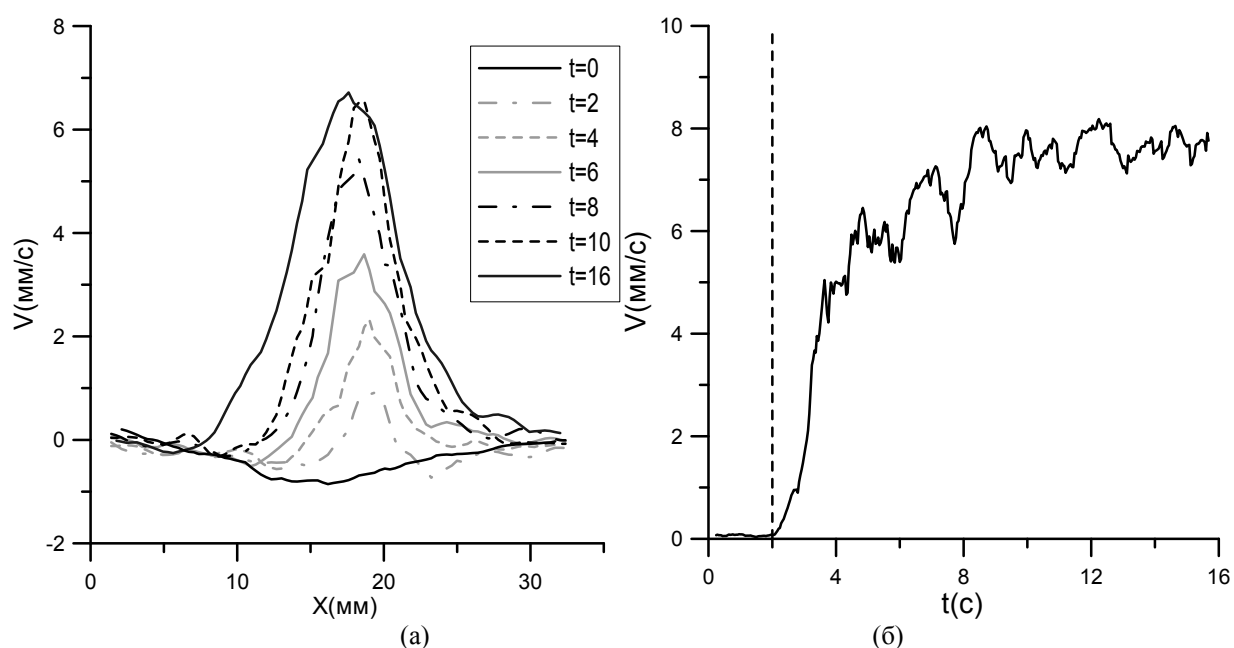


Рис. 7. (а) Изменение профиля скорости течения Экарта во времени. (б) Временная зависимость максимальной скорости течения Экарта

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования, связанные с изучением основных масштабных и скоростных характеристик течения типа Экарта, возникающих в сфокусированном акустическом поле, дают возможность продолжить исследования по акустической интенсификации скоростного роста водорастворимых монокристаллов. Направление этих исследований связано с использованием потенциала струйных течений, генерируемых сфокусированным ультразвуком.

Как известно, скорость установившегося масштабного течения квадратично зависит от основных параметров действующего поля: $v_x \sim u^2 (kr)^2$, где r – характерный размер фокального пятна, $k=2\pi/\lambda$ – волновое число. Поэтому представляется понятным как создать необходимые пространственные масштабы акустического воздействия. Здесь возможно использование подвижных излучателей для механического сканирования сфокусированным ультразвуковым полем по целевой поверхности. Реально также применение более длиннофокусных фокусирующих систем, что даст увеличение площади сканируемой

поверхности, при этом возможно, некоторое повышение частоты и интенсивности ультразвука.

Развитая экспериментальная база исследования течений в акустических полях позволит с большой степенью точности предсказать развитие гидродинамической ситуации на целевых поверхностях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (09-02-01239, 11-08-97067)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Родченков В.И., Сергеев Д.А.** Исследование течений в жидкости, индуцированных сфокусированным ультразвуковым полем и опыт их применения для воздействия на рост монокристаллов // ПМТФ, 2009, № 4, (принято к печати).
2. **Ершов В.П., Касьянов Д.А., Родченков В.И., Сергеев Д.А.** Исследование процессов растворения и роста солевых монокристаллов в неоднородных акустических полях. // П. Сфокусированное акустическое поле, Кристаллография, 2008 том 53, № 2, с. 370-376.
3. **Зарембо Л.К.** Введение в нелинейную акустику / Зарембо Л.К., Красильников В.А., М.: Наука, 1966.
4. **Физика и техника мощного ультразвука** / под ред. Л.Д. Розенберга, Т. 3, Физические основы ультразвуковой технологии, М.: Наука, 1970.
5. **Lucas B.G., Muir T.G., The field of focusing source** // J. Acoust. Soc. Amer., 1982, v.72, № 4, p. 1289.
6. **Adrian R.J.** Particle Imaging techniques for experimental fluid mechanics // Annu. Rev. Fluid Mech. 1991. V 23. P. 261-304.
7. **Руденко О.В., Солуян С.И.**, Теоретические основы нелинейной акустики, М., Наука, 1975, 288 с.

D. A. Sergeev¹, V. I. Rodchenkov¹, M. S. Deryabin², D. A. Kas'yanov²

¹*Institute of applied physics RAS, Russia,
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st, 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

²*Radiophysical Research Institute, Russia
603950, Nizhny Novgorod, Bolishaya Pecherskaya, 25/12a.*

EXPERIMENTAL STUDY OF ACOUSTIC FLOWS IN A FOCUSED ULTRASOUND FIELD

The development and structure of steady-state acoustic flows in the focal region of a spherical ultrasonic concentrator is first studied using the particle image velocimetry (PIV) method in order to improve the technology of rapid growth of salt single crystals. By comparing the results of rheological and acoustic measurements, it is shown that the PIV method can be effectively used for rapid diagnostics of a spatially inhomogeneous acoustic field.

ACOUSTIC FLOW, ULTRASOUND, PIV METHOD