

УДК 532.5, 548.52, 534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В СФОКУСИРОВАННОМ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

М. С. Дерябин, Д. А. Касьянов, В. И. Родченков*, Д. А. Сергеев*

Научно-исследовательский радиофизический институт, 603950 Нижний Новгород

* Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород

E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru

В целях совершенствования техники скоростного выращивания солевых монокристаллов с использованием PIV-метода впервые проведено исследование процесса развития и структуры установившихся акустических течений в фокальной области сферического ультразвукового концентратора. Путем сопоставления результатов реологических и акустических измерений показано, что PIV-метод может эффективно применяться для экспресс-диагностики пространственно-неоднородного акустического поля.

Ключевые слова: акустические течения, ультразвук, PIV-метод.

Введение. В работах [1, 2] показана возможность значительного ускорения роста солевого кристалла за счет генерации на его поверхности течения Шлихтинга. Течение вызывалось действующим на границу кристалла неоднородным акустическим полем, создаваемым сферическим концентратором. Для получения необходимого эффекта в экспериментах [1, 2] потребовалось создание достаточно интенсивных течений Шлихтинга на межфазовой границе. Известно, что скорость пограничных акустических течений определяется как пространственным градиентом поля, так и его амплитудой ($v_x \sim du/dx \times u$; v_x — скорость течения; u — амплитуда колебательной скорости (см., например, [3])). Таким образом, в экспериментах [1, 2] при достаточно “острой” фокусировке на поверхности кристалла была достигнута значительная интенсивность ультразвука, при этом амплитуда звукового давления на поверхности воздействия составляла $5 \cdot 10^5$ Па. Технические характеристики используемого экспериментального оборудования позволяют значительно увеличить интенсивность акустического поля на кристаллической поверхности, однако это нецелесообразно вследствие нагрева, а часто даже механического повреждения поверхности кристалла.

По-видимому, применение способа ускорения процесса роста, при котором на растущей грани кристалла создаются мелкомасштабные акустические потоки, имеет ограничение по интенсивности падающего на эту грань неоднородного акустического поля.

В качестве возможного варианта акустической интенсификации процесса роста может рассматриваться импактное воздействие масштабного течения Эккарта, возникающего в фокальной перетяжке. В этом случае зону с наибольшей интенсивностью ультразвука можно расположить над поверхностью кристалла. При этом тепловые ограничения отсутствуют, поскольку за счет поглощения звука в свободном объеме величина изменения температуры среды на порядок меньше, чем на поверхности раздела фаз [4].

Данная работа посвящена исследованию особенностей, имеющих место при возникновении течения Эккарта в сфокусированном акустическом поле, время установления и стационарная структура которого определяются экспериментально.

Схема и методика эксперимента. Методика исследования развивающихся масштабных течений отрабатывалась на модельном объекте: изучался нестационарный процесс в фокальной области сферического концентратора с точно известным пространственным распределением поля. В двух сериях экспериментов были проведены прямые измерения 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 длиной 54 мм и фокусным расстоянием 50 мм. Эксперименты проводились на установке, аналогичной описанной в работах [1, 2], но дополненной оборудованием для акустических измерений.

Акустические измерения. Схема исследования поля акустического давления показана на рис. 1. С использованием цифрового генератора AFG3022 формировалась последовательность радиоимпульсов (частота заполнения $f_p = 1360$ кГц, период следования 20 мс, длительность импульса выбиралась таким образом, чтобы пространственный размер акустического сигнала превышал характерный линейный масштаб фокальной области). С генератора сигнал подавался на широкополосный усилитель “Amplifier Research 800A3”, затем на пьезокерамический излучатель. Амплитуда напряжения сигнала накачки выбиралась таким образом, чтобы величина возможных нелинейных искажений, возникающих в акустических трактах и в среде распространения, не превышала нескольких процентов величины первичного поля. Контроль напряжения на излучателе осуществлялся с помощью цифрового осциллографа TDS3032B. При амплитуде напряжения сигнала накачки, равной 7 В, амплитуда акустического давления в волновом фокусе излучателя составляла 130 кПа.

Измерение акустического давления, создаваемого пьезокерамическим излучателем, осуществлялось широкополосным гидрофоном МНА9-150 фирмы “Force Technology” с чувствительностью 501,2 нВ/Па, установленным на двухкоординатном оптическом столе. Размер принимающего элемента гидрофона сопоставим с длиной волны исследуемого акустического сигнала. Поле давления регистрировалось в плоскости размером 50×26 мм, центр которой соответствует геометрическому фокусу излучателя. Шаг измерений в на-

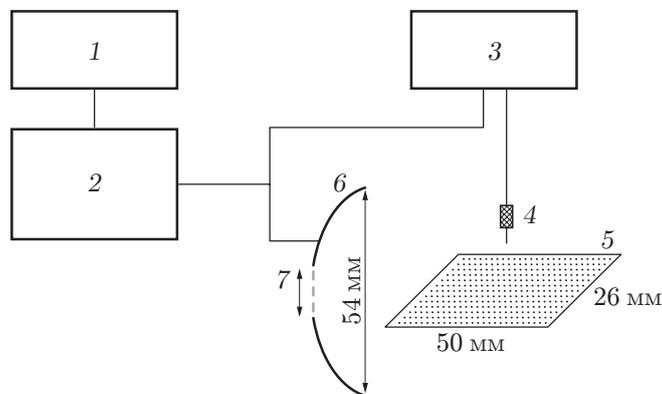


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — генератор AFG3022, 2 — усилитель AR 800A3, 3 — осциллограф TDS3032B, 4 — гидрофон МНА9-150, 5 — плоскость, в которой проводились измерения, 6 — пьезокерамический излучатель, 7 — технологическое отверстие

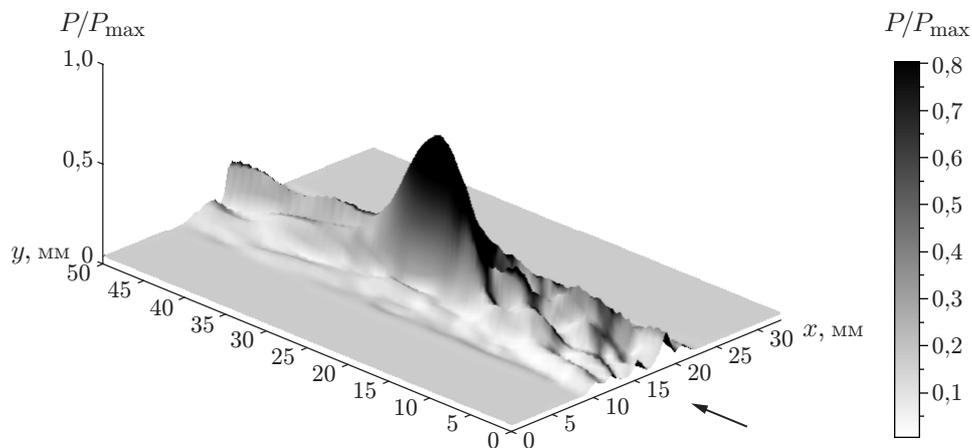


Рис. 2. Линейное поле акустического давления в фокальной области сферического концентратора:
 стрелка — направление звуковой оси

правлении акустической оси равен 1 мм, перпендикулярно акустической оси — 0,5 мм. На рис. 2 показан экспериментально наблюдаемый рельеф модуля звукового давления. (По вертикальной оси отложено звуковое давление, нормированное на максимальное значение.) На рис. 3 представлены распределения звукового давления вдоль акустической оси концентратора и перпендикулярно ей.

Измерение поля скоростей акустических течений. Методика эксперимента аналогична описанной в работе [1]. Для визуализации течений в жидкость, заполняющую акустическую ванну, в качестве маркеров вводились частицы субмикронного размера (порядка 0,1 мм), приготовленные на основе поливинилацетатного латекса. Фокальная область излучателя просвечивалась по акустической оси горизонтальным лазерным ножом, сформированным цилиндрической линзой из луча лазера NdYag с длиной волны 532 нм и мощностью 200 мВт. Течение, визуализированное рассеиваемым на микрочастицах трассера лазерным излучением, фиксировалось сверху на управляемую компьютером камеру “Видеоскан-415-USB”. Размер области съемки равен 40×20 мм. Камера располагалась таким образом, чтобы геометрический фокус излучателя находился в центре кадра. Звук предельной интенсивности ($P \approx 5 \cdot 10^5$ Па) включался после начала видеозаписи. Путем обработки видеозображения на компьютере с использованием стандартных алгоритмов PIV-метода (particle image velocimetry) [6] получены задаваемые в узлах координатной сетки двумерные поля скорости течений, сформировавшихся в различные моменты времени. Относительная погрешность измерения скорости в фиксированной точке составила 5 %, пространственное разрешение (шаг сетки) — приблизительно 1 мм. На рис. 4 показана начальная стадия развития течения (через 0,2 с после включения ультразвука), на рис. 5 — картина течения, установившегося примерно через 6 с после включения ультразвука. (По вертикальной оси отложены значения модуля скорости, нормированные на максимальное значение.)

На рис. 4 видно, что пространственное распределение скорости акустических течений на начальной стадии развития соответствует распределению линейного акустического поля в фокальной области излучателя, показанному на рис. 2. Этот интересный и несколько неожиданный результат свидетельствует о том, что PIV-метод может эффективно применяться для исследования и экспресс-диагностики пространственно-неоднородного акустического поля. Следует отметить, что для получения линейного поля акустического давле-

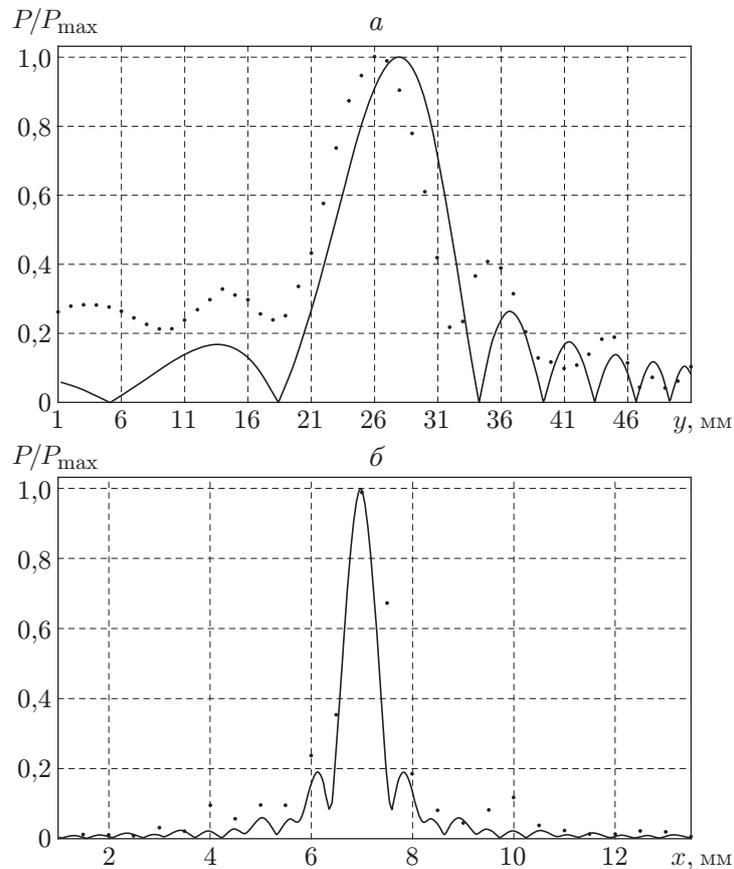


Рис. 3. Распределения звукового давления в продольном (а) и поперечном (б) сечениях: линии — теоретические зависимости, построенные на основе данных работы [5]; точки — результаты измерений

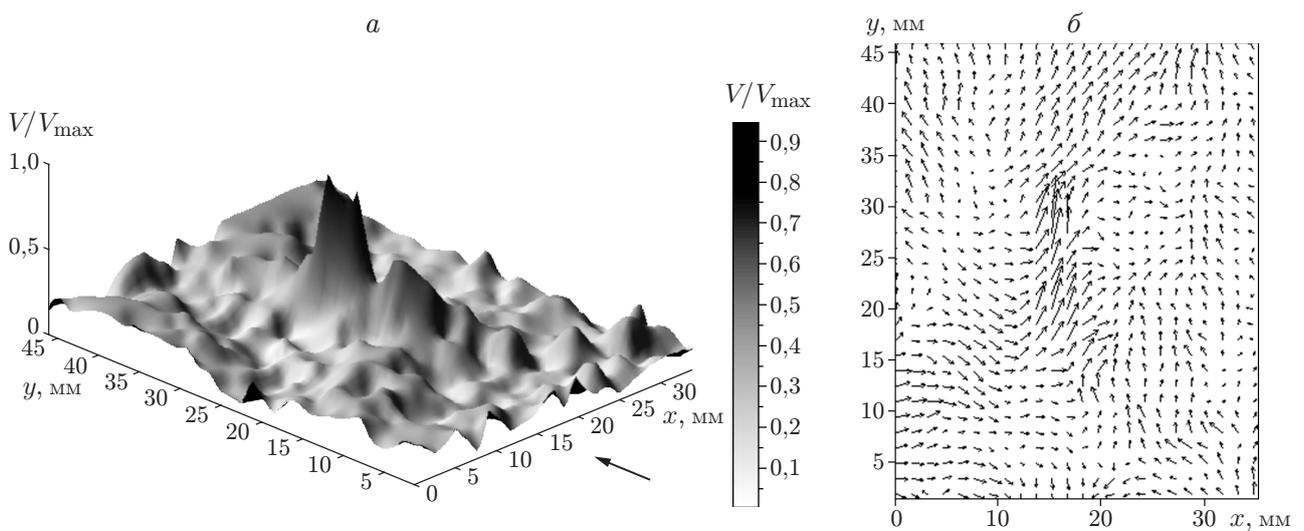


Рис. 4. Пространственное распределение модуля скорости (а) и соответствующее поле скорости (б) акустических течений через 0,2 с после включения ультразвука (начальная стадия течения): стрелка на рис. 4,а — направление звуковой оси; на рис. 4,б минимальная длина стрелки соответствует скорости $V = 0,002 \text{ мм/с}$, максимальная — $V = 3,19 \text{ мм/с}$

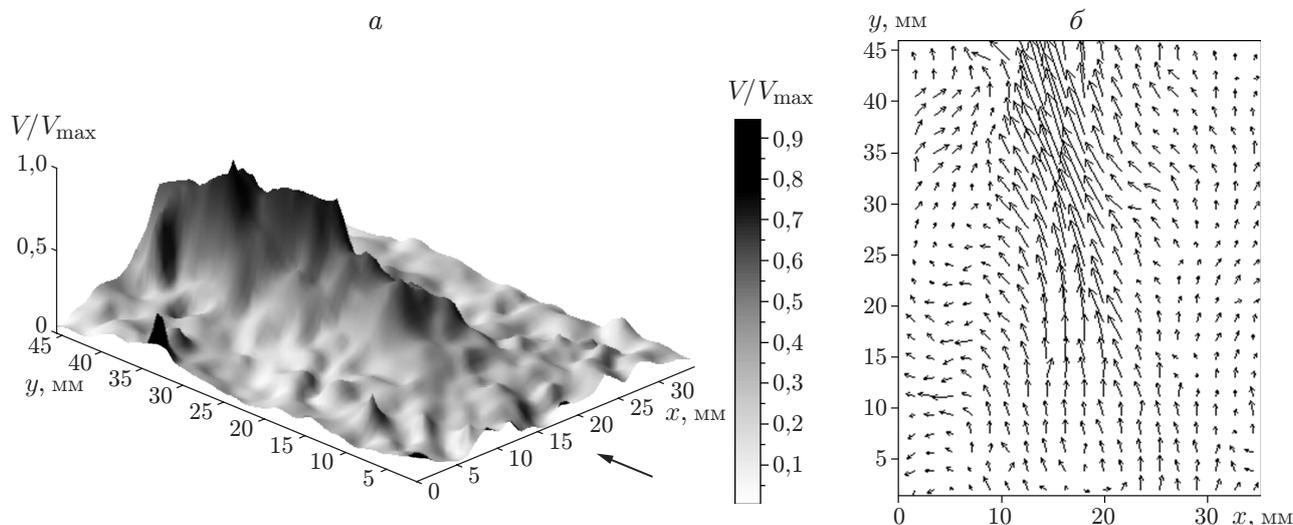


Рис. 5. Пространственное распределение модуля скорости (а) и соответствующее поле скорости (б) акустических течений через 6 с после включения ультразвука (установившееся течение):

стрелка на рис. 5,а — направление звуковой оси; на рис. 5,б минимальная длина стрелки соответствует скорости $V = 0,006$ мм/с, максимальная — $V = 5,48$ мм/с

ния с тем же пространственным разрешением (см. рис. 2) с использованием миниатюрного гидрофона было выполнено приблизительно 2000 точечных измерений.

Поле скорости установившегося течения имеет более сложную пространственную структуру по сравнению с полем скорости в начальный момент развития течения (см. рис. 5). Подобную картину установившегося течения достаточно сложно спрогнозировать, поскольку она существенно отличается от пространственного распределения акустического поля, вызвавшего это течение. В определенной точке пространства скорость течения становится максимальной, в описываемом эксперименте этот максимум находится на расстоянии примерно 15 мм от волнового фокуса. Именно это сечение представляет интерес с точки зрения применения масштабного течения для интенсификации межфазового массообмена: по-видимому, в данном сечении целесообразно разместить перпендикулярно акустической оси поверхность для воздействия акустического поля. Исследуем гидродинамическую ситуацию в данном сечении более подробно. На рис. 6 показано изменение во времени профиля скорости течения Эккарта. Видно, что поперечное распределение скорости качественно соответствует полю скорости течения, вызываемого интенсивным плоским звуковым пучком с соответствующей апертурой [3]. Зависимость скорости течения от времени в точке на акустической оси, в которой скорость достигает максимального значения, показана на рис. 7. Видно, что время установления стационарного акустического потока составляет порядка 10 с. На приведенной на рис. 7 зависимости наблюдаются существенные флуктуации скорости течения, появление которых обусловлено возникновением разномасштабных спорадических вихрей в объеме кюветы во время разгона основного течения (возникновение этих вихрей наблюдалось в реальном времени на видеозаписи при визуализации процесса).

В рассматриваемом случае распределение средней силы, действующей со стороны акустического поля на жидкость, существенно неоднородно. Вызываемое этой силой течение неоднородно, причем для изучаемых течений в фокальных областях фокусирующих акустических систем характерное гидродинамическое число Рейнольдса может составлять

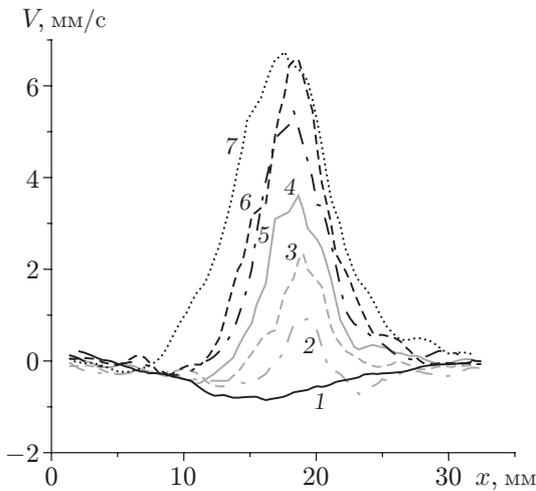


Рис. 6

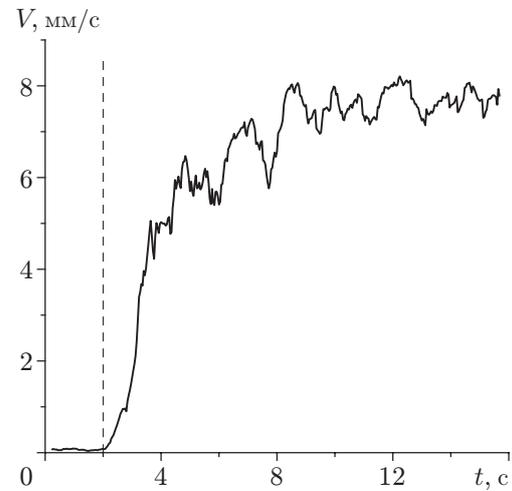


Рис. 7

Рис. 6. Профиль скорости течения Эккарта в различные моменты времени: 1 — $t = 0$, 2 — $t = 2$ с, 3 — $t = 4$ с, 4 — $t = 6$ с, 5 — $t = 8$ с, 6 — $t = 10$ с, 7 — $t = 16$ с

Рис. 7. Зависимость максимальной скорости течения Эккарта от времени: штриховая линия — момент возникновения акустического поля

десятки единиц, в рассматриваемом случае $Re_h \approx 20$, акустическое число Рейнольдса $Re_a \approx 15$, акустическое число Маха в фокальной области $Ma \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Аналитическое описание таких течений, даже их стационарной фазы, практически невозможно. Реально выполнить оценки для плоских течений, вызываемых акустическими полями с квазиплоскими фронтами (см., например, [7]). Таким образом, возможно лишь экспериментальное исследование течений, генерируемых существенно неоднородными акустическими полями, и PIV-метод в данном случае незаменим. Более того, с использованием PIV-метода можно изучать особенности фазы установления течений в неоднородных акустических полях. Так, из рис. 4 следует, что в случае существенно неоднородного акустического поля скорость вызываемого им течения наиболее быстро увеличивается в областях с максимальным пространственным градиентом поля.

Заключение. Проведенные исследования основных масштабных и скоростных характеристик течения типа течения Эккарта, возникающего в сфокусированном акустическом поле, позволяют продолжить изучение способов акустической интенсификации скоростного роста водорастворимых монокристаллов. Направление этих исследований обусловлено использованием струйных течений, генерируемых сфокусированным ультразвуком.

Поскольку скорость установившегося масштабного течения квадратично зависит от основных параметров действующего поля: $v_x \sim u^2(kr)^2$ (r — характерный размер фокального пятна; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число), для создания необходимых пространственных масштабов акустического воздействия можно использовать подвижные излучатели с целью механического сканирования рассматриваемой поверхности сфокусированным ультразвуковым полем, а также более длиннофокусные фокусирующие системы, позволяющие увеличить площадь сканируемой поверхности и при этом несколько повысить частоту и интенсивность ультразвука.

Имеющаяся база данных экспериментального исследования течений в акустических полях позволяет с большой степенью точности предсказать развитие гидродинамической ситуации на рассматриваемых поверхностях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Родченков В. И., Сергеев Д. А.** Исследование течений в жидкости, индуцированных сфокусированным ультразвуковым полем, и их применение для воздействия на рост монокристаллов // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 4. С. 11–17.
2. **Ершов В. П., Касьянов Д. А., Родченков В. И., Сергеев Д. А.** Исследование процессов растворения и роста солевых монокристаллов в неоднородных акустических полях. 2. Сфокусированное акустическое поле // Кристаллография. 2008. Т. 53, № 2. С. 370–376.
3. **Зарембо Л. К.** Введение в нелинейную акустику / Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. М.: Наука, 1966.
4. **Физика** и техника мощного ультразвука. Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга. М.: Наука, 1970.
5. **Lucas B. G., Muir T. G.** The field of focusing source // J. Acoust. Soc. Amer. 1982. V. 72, N 4. P. 1289–1296.
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.** Теоретические основы нелинейной акустики / О. В. Руденко, С. И. Солуян. М.: Наука, 1975.

*Поступила в редакцию 11/III 2009 г.,
в окончательном варианте — 29/IX 2009 г.*
