
**ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРИБОРЫ, МОДЕЛИ
И МЕТОДЫ АНАЛИЗА**

УДК 534.8: 543.3

© Н. Н. Князьков, Е. Д. Макарова, С. А. Морев

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПРОТОЧНОЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ
ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ.
1. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ**

В работе представлена теоретическая модель, позволяющая оценить характеристики акустического проточного фильтра для фракционирования микрочастиц и основанная на анализе совместного действия акустической радиационной силы, силы Стокса и силы тяжести на удерживание частиц в ультразвуковом поле. Рассмотрен случай вертикально установленной ультразвуковой камеры при наложении ультразвукового поля параллельно направлению потока. Согласно данной модели, можно обеспечить фракционирование природных неорганических частиц, плотность которых меняется в широком диапазоне ($1500\div 9000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$), отклонение размеров частиц от заданных значений в случае подачи раствора сверху не превышает $\pm 5\%$. Отмечается, что существует потенциальная возможность применения метода для фракционирования частиц не только по размеру, но и по плотности.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое концентрирование дисперсных фаз и фракционирование дисперсных систем основано на использовании хорошо известного силового действия ультразвука мегагерцового диапазона [1–4] для целенаправленного позиционирования клеток и микрочастиц, т. е. концентрирования и/или удерживания в заданных точках ультразвукового поля или объема камеры в статических условиях или в проточном режиме. Создание концентраторов частиц и разделительных систем возможно на основе нескольких принципиально отличающихся подходов, рассмотренных в работах [5, 6]:

1) озвучивание суспензии и последующее осаждение агломератов частиц под действием силы тяжести;

2) расслоение потока суспензии полем стоячей ультразвуковой волны (УЗСВ), направленным перпендикулярно потоку, и послойный отбор фракций;

3) расслоение суспензии со смещением слоев за счет периодического пошагового изменения частоты ультразвука и последующий сбор концентрата;

4) проточное ультразвуковое селективное удержание, обеспечиваемое селективным удерживанием частиц в УЗСВ, которое накладывается параллельно движущемуся потоку суспензии.

Проточное фракционирование и концентрирование клеток при параллельном наложении УЗСВ и потока впервые осуществлено Князьковым [7, 8]. На примере суспензий, содержащих клетки разной природы и микрочастицы (дрожжевые

клетки, эритроциты, латексы и др.), была экспериментально показана эффективность применения этого подхода для концентрирования и разделения дисперсной фазы по фракциям в соответствии с размером и/или сжимаемостью частиц при условии, что плотности среды и частиц близки по величине [6–8].

Во многих водных системах (природных или сточных водах, технологических растворах и суспензиях) характеристики частиц могут меняться в очень широких пределах. Поэтому для развития теории и выбора оптимальных режимов проточного фракционирования частиц по размерам в реальных природных системах необходимо оценить влияние на результаты разделения схем организации потоков, свойств частиц и параметров ультразвукового поля [9].

Целью данной работы является оценка возможности применения ультразвукового проточного фракционирования (при параллельном наложении УЗСВ и потока) для разделения по размерам микрочастиц разной природы, свойства которых (плотность и сжимаемость) меняются в широком диапазоне.

В сообщении рассмотрено влияние на результаты фракционирования основных характеристик неорганических частиц и способа организации процесса. Приведены алгоритм и результаты модельных расчетов, позволяющие оценить предельные параметры разделения неорганических частиц по размерам и выбрать оптимальные условия проточного ультразвукового фракционирования. Табулированы значения основных параметров, необходимые для выбора частоты и средней плотности

акустической энергии УЗ-поля при решении задачи фракционирования неорганических частиц, имеющих любой заданный набор плотностей в диапазоне $1500 \div 9000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОТОЧНОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

Основной принцип организации процесса, изложенный в работах [6, 8], сводится к следующему: при наложении поля УЗСВ на двигающуюся ламинарным потоком суспензию на каждую частицу суспензии будет действовать сила радиационного давления F_R , направленная в зону, соответствующую минимуму потенциальной энергии частиц, и меняющая направление действия с периодичностью $\lambda/4$ (λ — длина звуковой волны, м):

$$F_R = (8/3)\pi^2(f/c_0)ER^3\Phi_{\rho\beta}\sin 4\pi x/\lambda, \quad (1)$$

где f — частота вынужденных колебаний, с^{-1} ; c_0 — скорость звука в среде, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; E — средняя плотность акустической энергии, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}$; R — радиус частицы, м; x — расстояние от узла давления, м; $\lambda = c_0/f$; $\Phi_{\rho\beta}$ — безразмерный фактор, учитывающий сжимаемость и плотность среды и материала частиц.

$$\Phi_{\rho\beta} = [(5\rho - 2\rho_0)/(2\rho + \rho_0) - \beta_i/\beta_0] = (\Phi_\rho - \Phi_\beta), \quad (2)$$

где ρ_0 и ρ — плотность среды и частиц соответственно, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; β_0 и β_i — сжимаемость среды и частиц соответственно, Па^{-1} ; $\Phi_\rho = (5\rho - 2\rho_0)/(2\rho + \rho_0)$; $\Phi_\beta = \beta_i/\beta_0$. Знак $\Phi_{\rho\beta}$ определяет направление движения частицы в УЗСВ: при $\Phi_{\rho\beta} > 0$ частицы двигаются по направлению к узлам давления, при $\Phi_{\rho\beta} < 0$ — к пучностям давления (узлам колебательной скорости).

Линия действия силы F_R совпадает с линией действия на частицу силы F_S , обусловленной движением жидкости:

$$F_S = 6\pi\eta Rv, \quad (3)$$

где η — динамическая вязкость среды, $\text{Н}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$; v — линейная скорость потока, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Как показано в работе [6], частицы удерживаются в УЗСВ при условии $F_R > F_S$ (если плотности частиц и среды близки по величине). Линейная скорость ламинарного потока суспензии, при которой выполняется это условие, определяется уравнением

$$v \leq (2/9)kER^2\Phi_{\rho\beta}/\eta, \quad (4)$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

В тех случаях, когда плотности и размеры частиц в суспензии изменяются в широком диапазоне значений, необходимо дополнительно учитывать вклады силы тяжести F_G и поддерживающей силы F_{GO} :

$$F_G = (4/3)\pi R^3\rho g, \quad (5)$$

где g — ускорение свободного падения ($g = 9.807 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$);

$$F_{GO} = (4/3)\pi R^3\rho_0 g. \quad (6)$$

Результирующее действие всех сил (F_R , F_S , F_G , F_{GO}) на частицу зависит от расположения камеры относительно поверхности и от направления потока (сверху вниз или снизу вверх). Рассмотрим случай вертикального расположения ультразвуковой камеры при двух способах подачи анализируемого раствора — сверху вниз и снизу вверх. Условия остановки частицы, движущейся в потоке через УЗСВ, при $F_R = \text{MAX}$ могут быть записаны следующим образом.

1) При подаче раствора сверху (вариант 1)

$$F_S + (F_G - F_{GO}) \leq F_R,$$

и максимально допустимое значение скорости v_M определяется как

$$\begin{aligned} v_M &= (2/9)\eta^{-1}R^2 [2\pi c_0^{-1}fE\Phi_{\rho\beta} - g(\rho - \rho_0)] = \\ &= (2/9)\eta^{-1}R^2 (A_R - A_G), \end{aligned} \quad (7)$$

где $A_R = 2\pi c_0^{-1}fE\Phi_{\rho\beta}$; $A_G = g(\rho - \rho_0)$.

2) При подаче раствора снизу (вариант 2)

$$F_S - (F_G - F_{GO}) \leq F_R,$$

и соответственно

$$\begin{aligned} v_M &= (2/9)\eta^{-1}R^2 [2\pi c_0^{-1}fE\Phi_{\rho\beta} + g(\rho - \rho_0)] = \\ &= (2/9)\eta^{-1}R^2 (A_R + A_G). \end{aligned} \quad (8)$$

Предполагается, что частицы имеют сферическую форму; профиль потока является плоским; концентрация взвешенных частиц мала настолько, что их взаимным влиянием можно пренебречь; режим установившийся; влияние стенок отсутствует.

При пропускании через ультразвуковую камеру суспензии частиц разных размеров с потоком должны уходить частицы с радиусами, меньшими некоторых предельных величин $R_i < R_i^*$, значения которых для конкретных условий рассчитывают по уравнениям:

$$R_i^* = [(9/2)v\eta / (A_R - A_G)]^{1/2} \text{ (вариант 1),} \quad (9)$$

$$R_i^* = [(9/2)v\eta / (A_R + A_G)]^{1/2} \text{ (вариант 2).} \quad (10)$$

Напротив, фракция частиц, имеющих размеры $R_i > R_i^*$, остается (накапливается) в ультразвуковой камере и после достижения заданной степени концентрирования может быть отмыта от первоначальной среды и/или выделена впоследствии при пропускании вытесняющего раствора. (Возможность смены сред при сохранении удерживания частиц была показана экспериментально ранее [6]).

При $(A_R - A_G) < 0$ частицы не удерживаются в УЗСВ и оседают (вариант 1) или всплывают (вариант 2) под действием силы $F = (F_G - F_{GD})$ со скоростью, большей или равной скорости потока в зависимости от размера и плотности частиц.

При фракционировании суспензий следует также иметь в виду, что в разделительную камеру попадают только частицы с радиусами $R_i < R_G^*$, где R_G^* — радиус частиц, скорость всплывания/оседания которых равна или больше скорости потока жидкости. Таким образом, эти варианты являются модифицированным способом седиментационного анализа суспензий в нисходящем/восходящем потоке жидкости с разделением системы на фракции. Величина R_G^* зависит от соотношения скоростей потока и скоростей всплывания/осаждения частиц v_G : $R_G^* = (v/v_G)^{1/2}$.

Таким образом, существует потенциальная возможность последовательного разделения частиц на фракции с заданными диапазонами размеров. Такое фракционирование — дифференциация взвешенных веществ по размерам — применяется, например, при проведении эколого-геохимических исследований [10]. Так, например, "считается, что фильтрация через мембранные ультрафильтры с диаметром пор 300–500 нм или центрифугирование при 7–8 тыс. об/мин обеспечивает отделение взвешенных форм" [11, с. 37]. Согласно [10], при анализе природных вод на ртуть для получения более корректной информации необходимо фракционировать взвешенные вещества с их разделением на "грубую" взвесь ($> 5-10$ мкм) и взвеси с размером частиц $0.45 \div (5-10)$ мкм, т. к. эти фракции существенно отличаются по таким показателям, как ртутная обогатенность, сорбционная способность, миграционная устойчивость. В этой же работе указывается, что "роль частиц размером < 1 мкм в транспорте ртути изучена недостаточно, хотя около 50–80 % токсикантов сорбируются на поверхности именно таких частиц" [10, с. 35].

Применимость рассматриваемого метода зависит от степени влияния природы частиц — характеристик частиц, значимых для УЗ-метода, — на параметры разделения. Поэтому далее рассмотрены и определены параметры, которые могут оказывать влияние на размеры выделяемых фракций, и параметры, которые должны быть использованы при количественной оценке степени однородности получаемых фракций.

В качестве показателя неоднородности размеров удерживаемых частиц используется отношение $\gamma_i = R_{i \max}^* / R_{i \min}^*$, которое отражает влияние природы частиц при определенных заданных условиях — $(fE)_i = \text{const}$, $v = \text{const}$ — и может быть рассчитано следующим образом:

$$\gamma_i = R_{i \max}^* / R_{i \min}^* = [(A_R - A_G)_{\max} / (A_R - A_G)_{\min}]^{1/2} \quad (11)$$

при подаче раствора сверху;

$$\gamma_i = R_{i \max}^* / R_{i \min}^* = [(A_R + A_G)_{\max} / (A_R + A_G)_{\min}]^{1/2} \quad (12)$$

при подаче раствора снизу.

На основании соотношений (11, 12) можно дать условную оценку относительной ширины распределения по минимальным радиусам R_i^* удерживаемых частиц разной природы при выделении фракции частиц с размерами $R_i > R_i^*$:

$$R_i^* = R^* \pm \delta_{\max},$$

где R^* — заданный минимальный радиус; максимальное значение δ_{\max} определяется по (13):

$$\delta_{\max} (\%) = (\gamma_i - 1) / (\gamma_i + 1) \cdot 100. \quad (13)$$

При выборе оптимальных условий (например, скорости потока, необходимой для удерживания в ультразвуковой камере частиц заданного размера) определяющими факторами являются произведение (fE) ("эффективный энергетический параметр") и (при постоянстве параметров УЗ-поля) соотношение величин A_R и A_G (т. е. свойства материала частиц и среды — плотность и сжимаемость).

Использование эффективного энергетического параметра полезно с той точки зрения, что позволяет в обобщенной форме оценить влияние параметров УЗ-поля и выбрать оптимальные значения частоты и/или средней плотности энергии в зависимости от конкретных имеющихся аппаратурных или технических возможностей.

Основные характеристики частиц реальных природных материалов рассмотрены в следующем разделе.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИРОДНЫХ ВОД

Отличительной особенностью взвешенного вещества природных вод является разнообразие химического состава частиц и широкий диапазон размеров частиц. Общеизвестно, что взвешенные вещества по своему составу представлены минеральной и органической составляющими: к минеральной части относят, как правило, глинистые минералы, оксиды, силикаты, карбонаты и другие, тогда как органическая фракция включает трудно-растворимые органические соединения (например, гумусовые вещества), остатки микроорганизмов и растительных материалов (так называемый детрит) и т. п. [11]. К биологическим взвешенным частицам относят бактерии, планктон, продукты их деградации, фекальные остатки водных организмов [10]. Большой вклад в адсорбционные процессы микроэлементов в природных водах вносят гидроксиды железа, марганца, алюминия,

Табл. 1. Плотности (ρ), скорости продольной (c_l) и поперечной (c_s) ультразвуковых волн, адиабатические сжимаемости (β_i) и значения факторов Φ_ρ , Φ_{β_i} , $\Phi_{\rho\beta_i} = (\Phi_\rho - \Phi_{\beta_i})$ различных природных и искусственных материалов. (Условие: среда — вода, 20 °C; $\rho_0 = 998.2 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, $c_0 = 1482.7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, $\beta_0 = 4.5570\cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$)

Материал	ρ , кг·м ⁻³	c_l , м·с ⁻¹	c_s , м·с ⁻¹	$10^{10}\beta_1$, Па ⁻¹	$10^{10}\beta_2$, Па ⁻¹	Φ_ρ	Φ_{β_1}	Φ_{β_2}	$\Phi_{\rho\beta_1}$	$\Phi_{\rho\beta_2}$	$\Phi_{\beta_i} / \Phi_\rho$, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Органические материалы											
Каучук	900	1479	—	5.0795	—	0.895	1.115	—	-0.220	—	124.6
Полиизобутилен низкомолекулярный	830	1495	—	5.3906	—	0.810	1.182	—	-0.373	—	145.9
Полиизобутилен высокомолекулярный	930	1848	—	3.1486	—	0.928	0.691	—	0.237	—	74.5
Полистирол	1060	2350	1120	1.7083	2.4504	1.059	0.375	0.538	0.684	0.521	35.4/50.8
Полистирол [17]	1050	2350	1120	1.7245	2.4737	1.050	0.378	0.543	0.672	0.507	36.0/51.7
Полистирол (ММ 40000)	1050	1500	—	4.2328	—	1.050	0.928	—	0.121	—	88.4
Эпоксидная смола	1160 1250	2580 —	— —	1.2951 1.2018	— —	1.146 1.216	0.284 0.264	— —	0.861 0.952	— —	24.8 21.7
Плексиглас	1180	2670	1121	1.1888	1.5540	1.162	0.261	0.341	0.901	0.821	22.5/29.3
Бурый уголь	1200 1500	1540 —	— —	3.5138 2.8110	— —	1.178 1.376	0.771 0.617	— —	0.407 0.759	— —	65.4 44.8
Этилцеллюлозный этрол	1200 1400	2050 —	— —	1.9829 1.6997	— —	1.178 1.317	0.435 0.373	— —	0.743 0.944	— —	36.9 28.3
Полиэтилентерефталат	1332 1455	2450 —	— —	1.2507 1.1450	— —	1.273 1.351	0.274 0.251	— —	0.998 1.100	— —	21.5 18.6
Брикетированный уголь	1400	3700	2000	0.52176	0.85475	1.317	0.114	0.188	1.202	1.129	8.6/14.3
Неорганические материалы											
Частицы SiO ₂ [17]	1960	5968	3764	0.14325	0.30502	1.587	0.031	0.067	1.556	1.520	2.0/4.2
Гипс (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	2260	4790	2370	0.19285	0.28630	1.686	0.042	0.063	1.644	1.623	2.5/3.7
Известняк 86	2390	4640	2390	0.19434	0.30072	1.723	0.043	0.066	1.680	1.657	2.5/3.8
Бурый железняк (Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O или FeO(OH))	2450	1830	—	1.2188	—	1.738	0.267	—	1.471	—	15.4
Доломит 9	2520	4450	2870	0.20039	0.44992	1.756	0.044	0.099	1.712	1.657	2.5/5.6
Гранит	2620	4450	2780	0.19274	0.40185	1.780	0.042	0.088	1.738	1.692	2.4/4.9
Кварцевое стекло	2600	5570	3515	0.12397	0.26432	1.775	0.027	0.058	1.748	1.717	1.5/3.3
Песчаник	2620	3720	—	0.27581	—	1.780	0.060	—	1.720	—	3.4
Песчаник	2610	4900	—	0.15958	—	1.778	0.035	—	1.743	—	2.0
Гнейс	2660	7870	3010	0.06070	0.07540	1.789	0.013	0.016	1.776	1.773	0.7/0.9
Мрамор (CaCO ₃)	2660	6150	3260	0.09940	0.15894	1.789	0.022	0.035	1.767	1.754	1.2/2.0
Мрамор 26	2680	4950	2890	0.15228	0.27922	1.794	0.033	0.061	1.761	1.733	1.8/3.4
Лабрадорит 44	2680	5450	3370	0.12562	0.25551	1.794	0.028	0.056	1.766	1.738	1.6/3.1
Известняк (CaCO ₃)	2700	6130	3200	0.09856	0.15481	1.798	0.022	0.034	1.776	1.764	1.2/1.9
Диабаз	2790	4970	—	0.14510	—	1.817	0.032	—	1.785	—	1.8
Базальт	2720	5930	3140	0.10455	0.16697	1.802	0.023	0.037	1.779	1.765	1.3/2.0

Табл. 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Базальт	2900	5400	3260	0.11825	0.23004	1.839	0.026	0.050	1.813	1.789	1.4/2.7
Слюда	2810	7760	2160	0.05910	0.06591	1.821	0.013	0.014	1.808	1.807	0.7/0.8
Частицы Al ₂ O ₃ [22]	3698	—	—	—	0.03773	1.965	—	0.008	—	1.956	0.4

причем аморфные гидроксиды железа и марганца постоянно присутствуют в составе взвесей речных вод [11]. В речных взвесах свинец может находиться в виде примесей в аморфных и раскристаллизованных гидроксидах железа и марганца, в силикатах, а также в сорбированном состоянии на поверхности минеральных и органических частиц и реже — в виде дисперсных частиц собственно свинцовых минералов [12]. Ртуть может находиться в сорбированном или химически связанном состоянии на твердых и коллоидных частицах различной природы, а также в виде органических и неорганических соединений техногенного происхождения, атомарной ртути, сульфида ртути [10].

В то же время элементный анализ взвешенного вещества вод и морфологические исследования отдельных частиц показали, что доминирующими в речной воде являются частицы каолина, покрытые гидратированным оксидом Fe (III) и сорбированными гуминовыми веществами [13, 14]. Об образовании двухслойных частиц разной природы, покрытых слоем гумусового вещества, сообщается в работе [11].

Кроме того, вследствие интенсивного промышленного производства наблюдается появление новых видов загрязнений, поступающих со сточными водами и содержащих исходное сырье или продукты производства, причем к наиболее часто встречающимся загрязнениям относят взвешенные вещества, размеры и плотность которых могут изменяться в очень широких диапазонах: $R = 1 \cdot 10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-9}$ м, $\rho = 800$ (для масел) $\div 7000$ кг·м⁻³ (для металлических частиц) [15]. Согласно [10], взвешенные вещества природных и техногенных вод представляют смесь грубо-, средне- и тонкодисперсных частиц, причем тонкодисперсные частицы имеют преимущественно органическое или глинистое происхождение; тяжелые металлы в водотоках могут транспортироваться также в виде мелкодисперсных минеральных форм.

Для оценки возможности применения проточного ультразвукового фракционирования по размерам в случае частиц разной природы необходимо прежде всего оценить диапазоны возможного изменения параметра $\Phi_{\rho\beta}$, определяющего вклад "индивидуального энергетического фактора" $fE\Phi_{\rho\beta}$ в процесс удерживания частиц.

Значения сжимаемости различных материалов (β_i) определяют следующим образом: $\beta_0 = (c_0^2 \rho_0)^{-1}$,

$\beta_1 = (c^2 \rho)^{-1}$ — для жидкостей, $\beta_2 = (c^2 \rho - 4c_s^2 \rho/3)^{-1}$ — для твердых частиц, где c и c_s — скорости продольной и поперечной ультразвуковых волн соответственно [16, 17]. Принимая во внимание, что входящие в расчетную формулу для β_2 значения скорости поперечной ультразвуковой волны известны далеко не всегда, для оценки вклада этой составляющей во всех случаях (независимо от вида материала) были рассчитаны значения как Φ_{β_2} , так и Φ_{β_1} .

Исходные данные и результаты расчетов факторов Φ_{ρ} , Φ_{β} , $\Phi_{\rho\beta}$ для различных природных и искусственных материалов представлены в табл. 1. Значения скорости звука и плотности материалов приведены по данным работ [18, 19]. В тех случаях, когда в литературе скорость звука приводится без указания плотности материалов, использовали значения плотности материалов, табулированные в работах [20, 21]. (Соответствующие значения плотностей в таблице заключены в скобки).

Из полученных результатов следует, что в случае неорганических материалов возможна количественная оценка значений $\Phi_{\rho\beta}$ по данным о плотности частиц с достаточно высокой точностью — $\Phi_{\rho} \approx \Phi_{\rho\beta}$. (Вклад Φ_{β_i} в величину $\Phi_{\rho\beta}$ составляет 1–6 % для большинства материалов, причем, в соответствии с выражением (2), увеличение плотности должно приводить к дальнейшему уменьшению этого вклада для сплошных частиц. Разница в значениях Φ_{β_1} и Φ_{β_2} оказалась незначительна).

Напротив, в случае частиц органического происхождения и полимерных материалов влияние сжимаемости частиц очень велико, причем вклад фактора, учитывающего сжимаемость частиц, Φ_{β_i} существенно зависит от способа расчета: учитывается или нет вклад скорости поперечной ультразвуковой волны, т. е. считается частица твердой или "жидкой" (табл. 1). Для полимерных материалов такое разграничение не всегда очевидно и требует дополнительных исследований. Кроме того, скорость звука в случае высокомолекулярных соединений может зависеть от молекулярной массы (степени полимеризации).

Поэтому оценка возможности проточного ультразвукового фракционирования и влияния способа организации потока на первой стадии работы была проведена только для неорганических

материалов разной природы, которые (по литературным данным) наиболее часто могут встречаться в природных водах (табл. 2).

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗДЕЛЕНИЯ. ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ПРОЦЕССА

Из приведенных в табл. 2 данных следует, что для неорганических частиц характерно практически непрерывное распределение плотностей

в очень широком диапазоне ($\rho_{\max}/\rho_{\min} = 6$), поэтому моделирование проводили для "виртуальных" веществ, единственной характеристикой которых являлась плотность и которые были условно разделены на 2 серии со значениями плотностей в диапазоне от 1500 до 1900 кг·м⁻³ (серия 1) и от 2000 до 9000 кг·м⁻³ (серия 2) при варьировании плотности с постоянным шагом, равным 100 и 500 кг·м⁻³ для серий 1 и 2 соответственно.

Табл. 2. Перечень наиболее распространенных в природе минералов/соединений и их плотность [20, 23]

Элемент	Соединение/минерал	Формула	$\rho/10^3$, кг·м ⁻³	$\rho_{\min}/10^3$, кг·м ⁻³	$\rho_{\max}/10^3$, кг·м ⁻³
—	Песчаник	—	—	1.9	2.5
—	Глина	—	—	1.6	2.9
Кальций	Углекислый	CaCO ₃ ·6H ₂ O	1.77	1.77	2.97
	Арагонит	CaCO ₃	2.97	—	—
Кремний	Окись (опал)	SiO ₂ ·H ₂ O	2.10–2.30	2.1	2.65
	Лешательерит	SiO ₂	2.20	—	—
	Кристаллит	SiO ₂	2.32	—	—
	Кварц	SiO ₂	2.65	—	—
Алюминий	Окись (гиббсит)	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	2.42	2.42	3.9
	Гидроокись (бёмит)	AlO(OH)	3.01	—	—
	Окись (боксит)	Al ₂ O ₃ ·2H ₂ O	2.55	—	—
	Гидроокись (диаспор)	AlO(OH)	3.3–3.5	—	—
	Окись (частицы) [22]	Al ₂ O ₃	3.5–3.9	—	—
Железо	Окись	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	3.4–3.9	2.45–3.4	5.18
	Железный шпат	FeCO ₃	3.8	—	—
	Сернистое	Fe ₂ S ₃	4.3	—	—
	Бурый железняк [18]	—	2.45	—	—
	Бурый железняк	FeO(OH)	4.8	—	—
	Железный колчедан	FeS ₂	5.00	—	—
	Магнетит	Fe ₃ O ₄	5.11; 5.18	—	—
Марганец	Марганцовый шпат	MnCO ₃	3.125	3.1	5.0
	Гидроокись (пирохронит)	Mn(OH) ₂	3.258	—	—
	Гидроокись (манганит)	MnO(OH) ₂	4.2–4.4	—	—
	Браунит	Mn ₂ O ₃	4.500	—	—
	Гаусманит	Mn ₃ O ₄	4.70; 4.856	—	—
	Пиролюзит	MnO ₂	5.026	—	—
Свинец	Красная свинцовая руда	PbCrO ₄	6.12	6.1	9.5
	Галенит	PbS	7.5	—	—
	Гидроокись	Pb ₂ O(OH) ₂	7.59	—	—
	Англезит	PbSO ₄	6.2	—	—
	Церуссит	PbCO ₃	6.6	—	—
	Окись	PbO	8.0; 9.53	—	—
	Двуокись	PbO ₂	9.38	—	—
Ртуть	Сернистая	HgS	7.73	7.7	8.1
	Сернистая (киноварь)	HgS	8.10	—	—

Для всех значений плотностей были рассчитаны значения Φ_ρ , $(A_R - A_G)$ и $(A_R + A_G)$ в широком диапазоне значений энергетического параметра fE от $1 \cdot 10^6$ до $45 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹.

Выбор диапазона эффективного энергетического параметра определялся диапазоном наиболее часто используемых и легко реализуемых практически значений f и E ($f = 1 \div 4.5$ МГц, $E = 1 \div 10$ Дж·м⁻³). В общем случае увеличение E желательно для уменьшения размеров фракционируемых частиц, т. к. позволяет увеличить линейную скорость потока (производительность процесса), согласно уравнениям (7, 8). Однако вместе с тем при большом поперечном сечении камер увеличение E может сопровождаться различными "паразитными" процессами — появлением акустических течений или кавитацией, порог наступления которой понижается с уменьшением частоты вынужденных колебаний [9]. (Для уменьшения вероятности появления акустических течений обычно уменьшают размеры ячеек или используют акустически прозрачные разделительные перегородки [24]). Поэтому выбор параметров ультразвукового поля должен быть оптимизирован и с этой точки зрения.

По рассчитанным значениям $(A_R - A_G)$ и $(A_R + A_G)$ и уравнениям (11–13) были количественно оценены основные параметры разделения γ_i и $\delta_{i \text{ макс}}$, а также предельные значения этих параметров при $A_R \gg A_G$: $\gamma_{\text{пред}} = (\Phi_{\rho \text{ макс}} / \Phi_{\rho \text{ мин}})^{1/2}$ и $\delta_{\text{пред}} = (\gamma_{\text{пред}} - 1) / (\gamma_{\text{пред}} + 1) \cdot 100$, %. Полученные результаты приведены в табл. 3 и свидетельствуют о сильном влиянии способа подачи исследуемого раствора (суспензии) на степень неоднородности размеров удерживаемых частиц. При подаче раствора сверху существует оптимальная область значений fE , равная $(20 \div 25) \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹, в которой показатели неоднородности минимальны: $\gamma_i < \gamma_{\text{пред}}$, $\delta_{i \text{ макс}} < \delta_{\text{пред}}$. При подаче раствора снизу значения γ_i , $\delta_{i \text{ макс}}$ закономерно уменьшаются с увеличением fE , достигая минимальных значений $\gamma_{\text{пред}}$, $\delta_{\text{пред}}$ за пределами рассматриваемого диапазона fE . Можно заключить, что вариант подачи раствора сверху является предпочтительным при фракционировании частиц неорганической природы во всем диапазоне плотностей. Значения минимальных радиусов удерживаемых частиц лежат в пределах $R_i^* = R^* \pm 5.7\%$ и $R_i^* = R^* \pm 6.5\%$ при $fE = 20 \cdot 10^6$ и $25.0 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹ соответственно.

Табл. 3. Показатели неоднородности γ_i и $\delta_{i \text{ макс}}$ при проточном ультразвуковом фракционировании по размерам частиц различной природы в зависимости от величин энергетического параметра fE и направления потока

№ серии	$\gamma_{\text{пред}}$	$fE / 10^6$, Дж·м ⁻³ ·с ⁻¹								
		5	10	15	20	25	30	35	40	45
γ_i (подача раствора сверху)										
Серия 1	1.066	1.004	1.037	1.048	1.052	1.055	1.057	1.058	1.059	1.060
Серия 2	1.220	→ ∞	1.845	1.228	1.112	1.098	1.110	1.120	1.129	1.136
Серии (1 + 2)	1.283	→ ∞	1.845	1.228	1.120	1.140	1.155	1.167	1.177	1.185
γ_i (подача раствора снизу)										
Серия 1	1.066	1.110	1.096	1.082	1.078	1.076	1.074	1.073	1.072	1.072
Серия 2	1.220	1.743	1.537	1.448	1.398	1.366	1.344	1.328	1.316	1.306
Серии (1 + 2)	1.283	1.926	1.661	1.551	1.491	1.453	1.427	1.408	1.393	1.382
$\delta_{i \text{ макс}}$, % (подача раствора сверху)										
№ серии	$\delta_{\text{пред}}$, %									
Серия 1	3.2	0.2	1.8	2.3	2.5	2.7	2.8	2.8	2.9	2.9
Серия 2	9.9	→ ∞	29.7	10.2	5.3	4.7	5.2	5.7	6.0	6.4
Серии (1 + 2)	12.4	→ ∞	29.7	10.2	5.7	6.5	7.2	7.7	8.1	8.5
$\delta_{i \text{ макс}}$, % (подача раствора снизу)										
Серия 1	3.2	5.2	4.6	3.9	3.8	3.7	3.6	3.5	3.5	3.5
Серия 2	9.9	27.1	21.2	18.3	16.6	15.5	14.7	14.1	13.6	13.3
Серии (1 + 2)	12.4	31.6	24.8	21.6	19.7	18.5	17.6	16.9	16.4	16.0

Табл. 4. Прогнозируемое распределение минимальных радиусов (R_i^*) частиц различной природы, удерживаемых в ультразвуковом поле при проточном фракционировании, в диапазоне значений $fE = (10 \div 45) \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (заданное значение $R^* = 1.0 \text{ мкм}$)

Характеристики материалов			$fE / 10^6, \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$								
$\rho, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Материал	Φ_ρ	10	15	20	25	30	35	40	45	
			$R_i^*, \text{ мкм}$								
Серия I											
1500	Глина, песчаник	1.376	1.00 ₃	1.03 ₈	1.06 ₄	1.08 ₃	1.09 ₇	1.10 ₈	1.11 ₈	1.12 ₆	
1600		1.430	0.99 ₁	1.02 ₃	1.04 ₇	1.06 ₅	1.07 ₈	1.08 ₉	1.09 ₈	1.10 ₆	
1700		1.479	0.98 ₁	1.01 ₁	1.03 ₃	1.05 ₀	1.06 ₃	1.07 ₃	1.08 ₂	1.08 ₉	
1800		1.523	0.97 ₃	1.00 ₀	1.02 ₂	1.03 ₇	1.05 ₀	1.05 ₉	1.06 ₈	1.07 ₅	
1900		1.564	0.96 ₇	0.99 ₁	1.01 ₁	1.02 ₆	1.03 ₈	1.04 ₇	1.05 ₅	1.06 ₂	
Серия II											
2000	Соединения кремния, алюминия	1.601	0.96 ₂	0.98 ₄	1.00 ₂	1.01 ₆	1.02 ₈	1.03 ₇	1.04 ₄	1.05 ₁	
2500		1.751	0.95₀	0.96 ₀	0.97 ₃	0.98 ₃	0.99 ₂	0.99 ₉	1.00 ₆	1.01 ₁	
3000		1.858	0.95 ₃	0.95 ₁	0.95 ₈	0.96 ₅	0.97 ₂	0.97 ₈	0.98 ₃	0.98 ₈	
3500	Соединения железа, марганца	1.938	0.96 ₅	0.95₀	0.95 ₁	0.95 ₆	0.96 ₀	0.96 ₄	0.96 ₉	0.97 ₃	
4000		2.001	0.98 ₅	0.95 ₄	0.95₀	0.95 ₁	0.95 ₄	0.95 ₆	0.96 ₀	0.96 ₃	
4500		2.051	1.01 ₀	0.96 ₃	0.95 ₂	0.95₀	0.95 ₁	0.95 ₂	0.95 ₄	0.95 ₆	
5000		2.092	1.04 ₂	0.97 ₅	0.95 ₇	0.95 ₁	0.95₀	0.95 ₀	0.95 ₁	0.95 ₃	
5500		2.126	1.08 ₁	0.98 ₉	0.96 ₄	0.95 ₅	0.95 ₁	0.95₀	0.95₀	0.95 ₀	
6000	Соединения свинца, ртути	2.154	1.12 ₇	1.00 ₇	0.97 ₃	0.96 ₀	0.95 ₄	0.95 ₁	0.95 ₀	0.95₀	
6500		2.179	1.18 ₂	1.02 ₆	0.98 ₄	0.96 ₆	0.95 ₈	0.95 ₃	0.95 ₁	0.95 ₀	
7000		2.200	1.25 ₀	1.04 ₈	0.99 ₆	0.97 ₄	0.96 ₂	0.95 ₇	0.95 ₃	0.95 ₁	
7500		2.219	1.33 ₂	1.07 ₃	1.00 ₉	0.98 ₂	0.96 ₈	0.96 ₀	0.95 ₆	0.95 ₃	
8000		2.236	1.43 ₄	1.10 ₁	1.02 ₃	0.99 ₁	0.97 ₄	0.96 ₅	0.95 ₉	0.95 ₅	
8500		2.250	1.57 ₀	1.13 ₂	1.03 ₉	1.00 ₁	0.98 ₁	0.97 ₀	0.96 ₃	0.95 ₈	
9000		2.264	1.75 ₃	1.16 ₆	1.05 ₆	1.01 ₁	0.98 ₉	0.97 ₅	0.96 ₇	0.96 ₁	
Природные материалы											
1960		Частицы SiO ₂	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.520$	0.98 ₈	1.01 ₀	1.02 ₉	1.04 ₄	1.05 ₅	1.06 ₄	1.07 ₂	1.07 ₉
2260	Гипс	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.623$	0.97 ₆	0.99 ₀	1.00 ₅	1.01 ₇	1.02 ₇	1.03 ₅	1.04 ₂	1.04 ₈	
2390	Известняк 86	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.657$	0.97 ₄	0.98 ₅	0.99 ₉	1.01 ₀	1.01 ₉	1.02 ₇	1.03 ₄	1.03 ₉	
2450	Бурый железняк	$\Phi_{\rho\beta_1} = 1.471$	1.05 ₆	1.06 ₀	1.07 ₀	1.08 ₀	1.08 ₈	1.09 ₅	1.10 ₂	1.10 ₇	
2620	Песчаник (1)	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.720$	0.97 ₀	0.97 ₆	0.98 ₇	0.99 ₆	1.00 ₄	1.01 ₂	1.01 ₈	1.02 ₃	
2660	Гнейс	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.773$	0.95 ₅	0.96 ₁	0.97 ₂	0.98 ₁	0.98 ₉	0.99 ₆	1.00 ₂	1.00 ₇	
2700	Известняк	$\Phi_{\rho\beta_2} = 2700$	0.96 ₁	0.96 ₆	0.97 ₆	0.98 ₅	0.99 ₃	1.00 ₀	1.00 ₅	1.01 ₀	
2810	Слюда	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.807$	0.95 ₅	0.95 ₈	0.96 ₆	0.97 ₅	0.98 ₂	0.98 ₉	0.99 ₄	0.99 ₉	
3698	Частицы Al ₂ O ₃	$\Phi_{\rho\beta_2} = 1.956$	0.97 ₅	0.95 ₄	0.95 ₃	0.95 ₆	0.96 ₀	0.96 ₃	0.96 ₇	0.97 ₀	

Примечание. В расчетных данных табл. 4, 5 третий десятичный знак приведен меньшим размером; полужирным шрифтом выделены минимально допустимые значения радиуса частиц ($R_{i \text{ мин}}^*$), удерживаемых в УЗСВ при максимальной скорости потока (7).

Табл. 5. Прогнозируемое распределение минимальных радиусов (R_i^*) частиц различной природы, удерживаемых в ультразвуковом поле при проточном фракционировании, в диапазоне значений $fE = (18 \div 26) \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹ (заданное значение $R^* = 1.0$ мкм)

Характеристики материалов			$fE / 10^6$, Дж·м ⁻³ ·с ⁻¹								
ρ , кг·м ⁻³	Материал	Φ_ρ	18	19	20	21	22	23	24	25	26
			R_i^* , мкм								
Серия I											
1500	Глина, песчаник	1.376	1.05 ₅	1.06 ₀	1.06 ₄	1.06 ₈	1.07 ₂	1.07 ₆	1.07 ₉	1.08 ₃	1.08 ₆
1600		1.430	1.03 ₈	1.04 ₃	1.04 ₇	1.05 ₁	1.05 ₅	1.05 ₈	1.06 ₂	1.06 ₅	1.06 ₈
1700		1.479	1.02 ₅	1.02 ₉	1.03 ₃	1.03 ₇	1.04 ₀	1.04 ₃	1.04 ₇	1.05 ₀	1.05 ₃
1800		1.523	1.01 ₄	1.01 ₈	1.02 ₂	1.02 ₅	1.02 ₈	1.03 ₁	1.03 ₄	1.03 ₇	1.04 ₀
1900		1.564	1.00 ₄	1.00 ₇	1.01 ₁	1.01 ₄	1.01 ₇	1.02 ₀	1.02 ₃	1.02 ₆	1.02 ₈
Серия II											
2000	Соединения кремния, алюминия	1.601	0.99 ₅	0.99 ₉	1.00 ₂	1.00 ₆	1.00 ₈	1.01 ₁	1.01 ₄	1.01 ₆	1.01 ₉
2500		1.751	0.96 ₈	0.97 ₀	0.97 ₃	0.97 ₅	0.97 ₇	0.97 ₉	0.98 ₁	0.98 ₃	0.98 ₅
3000		1.858	0.95 ₅	0.95 ₆	0.95 ₈	0.95 ₉	0.96 ₁	0.96 ₂	0.96 ₄	0.96 ₅	0.96 ₇
3500	Соединения железа, марганца	1.938	0.95₀	0.95 ₁	0.95 ₁	0.95 ₂	0.95 ₃	0.95 ₄	0.95 ₅	0.95 ₆	0.95 ₇
4000		2.001	0.95 ₀	0.95₀	0.95₀	0.95₀	0.95₀	0.95₀	0.95 ₀	0.95 ₁	0.95 ₂
4500		2.051	0.95 ₅	0.95 ₃	0.95 ₂	0.95 ₁	0.95 ₁	0.95 ₀	0.95₀	0.95₀	0.95₀
5000		2.092	0.96 ₂	0.95 ₉	0.95 ₇	0.95 ₆	0.95 ₄	0.95 ₃	0.95 ₂	0.95 ₁	0.95 ₁
5500		2.126	0.97 ₁	0.96 ₇	0.96 ₄	0.96 ₂	0.95 ₉	0.95 ₇	0.95 ₆	0.95 ₅	0.95 ₄
6000	Соединения свинца, ртути	2.154	0.98 ₂	0.97 ₇	0.97 ₃	0.97 ₀	0.96 ₇	0.96 ₄	0.96 ₂	0.96 ₀	0.95 ₈
6500		2.179	0.99 ₆	0.98 ₉	0.98 ₄	0.97 ₉	0.97 ₅	0.97 ₁	0.96 ₈	0.96 ₆	0.96 ₄
7000		2.200	1.01 ₀	1.00 ₂	0.99 ₆	0.99 ₀	0.98 ₅	0.98 ₀	0.97 ₇	0.97 ₄	0.97 ₁
7500		2.219	1.02 ₇	1.01 ₇	1.00 ₉	1.00 ₂	0.99 ₅	0.99 ₀	0.98 ₆	0.98 ₂	0.97 ₈
8000		2.236	1.04 ₅	1.03 ₃	1.02 ₃	1.01 ₄	1.00 ₇	1.00 ₀	0.99 ₅	0.99 ₁	0.98 ₆
8500		2.250	1.06 ₅	1.05 ₁	1.03 ₉	1.02 ₉	1.02 ₀	1.01 ₃	1.00 ₆	1.00 ₁	0.99 ₆
9000		2.264	1.08 ₇	1.07 ₀	1.05 ₆	1.04 ₄	1.03 ₄	1.02 ₅	1.01 ₈	1.01 ₁	1.00 ₆

Скорость потока в этом случае, в соответствии с (7), выбирается по правилу $v = (2/9)\eta^{-1}(1 - \delta_{\max})^2 \times (A_R - A_G)_{\max}$.

Прогнозируемое распределение значений R_i^* для случая $R^* = 1.0$ мкм, т. е. значений относительных радиусов, в зависимости от fE и плотности частиц для случая подачи раствора сверху показано в табл. 4 и 5. Рассмотрены диапазоны fE от $10 \cdot 10^6$ до $45 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹ (табл. 4) и более подробно — диапазон от $18.0 \cdot 10^6$ до $26.0 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹ с шагом изменения fE $1.0 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹ (табл. 5). Расчеты проводили для следующих условий: каждому значению fE соответствует своя оптимальная (максимальная) скорость потока, определяемая по уравнению (7) для значений $(A_R - A_G)_{\max}$; максимально допустимое отклонение радиуса частиц от 1.0 принято равным 5 %, т. е. минимальный размер удерживаемых частиц при $(A_R - A_G)_{\max}$ должен быть равен 0.95. Тогда минимальный радиус R^* удерживаемой i -й частицы с другой плотностью равен $R_i = [0.95^2(A_R - A_G)_{\max}/(A_R - A_G)]^{1/2}$.

Из данных, приведенных в табл. 5, следует, что при $v_{\max} = \text{const}$ ($fE = \text{const}$) разброс значений R_i^* не превышает ± 5.0 % в диапазоне $\rho = 1700 \div 9000$ кг·м⁻³ при $fE = (21 \div 25) \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·с⁻¹. В общем случае выбор частоты осуществляется по достижимому (или предпочтительному) значению E при выборе таких значений fE , для которых разброс R_i^* минимален или не превышает заданного значения в требуемом диапазоне плотностей.

Таким образом, существует принципиальная возможность проведения последовательного (многостадийного) ультразвукового проточного фракционирования по размеру неорганических частиц разной плотности с достаточно узким распределением по радиусам $R_i^* = R^* \pm 5.0$ %.

Предельно достижимая узость распределения R_i^* определяется, прежде всего, диапазоном плотностей выделяемых частиц — чем уже этот диапазон, тем уже будет распределение R_i^* . Практически достижимая узость распределения по размерам зависит от точности поддержания постоянства

Табл. 6. Зависимость значений ($A_R - A_G$) для модельных неорганических материалов от fE и плотности ρ

Характеристики материалов			$fE / 10^6, \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$								
$\rho, \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$	Материал	Φ_ρ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
			Значения ($A_R - A_G$)								
Серия I											
1500	Глина, песчаник	1.376	910	6741	12572	18402	24234	30065	35896	41727	47558
1600		1.430	158	6218	12278	18337	24397	30457	36517	42577	48637
1700		1.479	< 0	5653	11920	18188	24456	30723	36990	43258	49526
1800		1.523	< 0	5045	11499	17953	24407	30861	37315	43769	50223
1900		1.564	< 0	4411	11039	17667	24294	30922	37550	44178	50805
Серия II											
2000	Соединения кремния, алюминия	1.601	< 0	3744	10529	17313	24097	30882	37667	44451	51235
2500		1.751	< 0	112	7532	14961	22373	29793	37213	44633	52053
3000		1.858	< 0	< 0	3989	11862	19736	27609	35483	43357	51230
3500	Соединения железа, марганца	1.938	< 0	< 0	103	8315	16528	24741	32953	41166	49378
4000		2.001	< 0	< 0	< 0	4479	12959	21438	29918	38396	46877
4500		2.051	< 0	< 0	< 0	424	9115	17807	26498	35190	43881
5000		2.092	< 0	< 0	< 0	< 0	5080	13945	22810	31676	40541
5500		2.126	< 0	< 0	< 0	< 0	897	9907	18916	27975	36934
6000	Соединения свинца, ртути	2.154	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	5715	14843	23970	33098
6500		2.179	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	1447	10681	19915	29149
7000		2.200	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	6400	15723	25046
7500		2.219	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	2061	11464	20867
8000		2.236	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	7136	16615
8500		2.250	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	2708	12243
9000		2.264	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0	7873

обобщенного энергетического параметра fE и скорости потока. Существование квадратичной зависимости между величиной скорости и радиусом приводит к тому, что изменение на 2 % скорости потока приводит к изменению минимального удерживаемого радиуса на 1 %. Это накладывает, в частности, существенные ограничения на температурный режим при озвучивании и состав среды, т. е. на факторы, влияющие на вязкость растворов. Кроме того, важным направлением дополнительных исследований должно быть изучение влияния пористости и образования гетерогенных слоистых структур на акустические характеристики и плотность частиц. Об этом свидетельствуют результаты, полученные при оценке распределения минимальных радиусов природных материалов (табл. 4): в случае бурого железняка значения R_i^* выходят за пределы ± 5.0 %. Следует отметить, что в работе [18] приведены очень низкие значения плотности (табл. 2) и низкие величины скорости звука по сравнению с остальными материалами. Возможными причинами такого "аномально-

го" поведения могут являться или присутствие в материале значительных количеств песка и органических веществ (что характерно для руд северогерманского или голландского происхождения), или большая оводненность, т. к. бурый железняк может поглощать воду с образованием твердых растворов [23, Т. II].

При значениях fE в диапазоне $(1.0 \div 8.0) \cdot 10^6 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ существуют диапазоны значений плотностей, для которых величина $(A_R - A_G) < 0$ (табл. 6). Следовательно, в этом случае частицы, имеющие соответствующие значения плотностей, не задерживаются УЗ-полем и должны проходить с потоком со скоростью частиц (v_p), равной сумме скоростей потока (v) и скорости оседания (v_{sed}): $v_p = v + v_{\text{sed}}$. Это открывает дополнительную потенциальную возможность фракционирования частиц по плотности (после фракционирования по размерам).

При подаче растворов снизу величина $\delta_{i \text{ макс}}$ превышает 13 % даже при максимальном значении fE (табл. 3). К другому недостатку этого способа

организации процесса следует отнести возможность изменения максимальных размеров попадающих в УЗ-камеру частиц, т. е. изменения фракционного состава самой пробы вследствие уже упоминавшегося эффекта седиментационного фракционирования в восходящем потоке. Максимальный размер частиц в этом случае зависит не только от соотношения скоростей оседания и выбираемой скорости потока, но и от конструктивных особенностей установки и поэтому трудно предсказуем. (Этот же эффект должен проявляться при подаче раствора сверху для частиц, плотность которых меньше плотности среды, однако для частиц с большей плотностью он не должен иметь места).

Влияние пористости, гетерогенности и концентрации частиц будет рассмотрено в следующем сообщении, равно как и возможность фракционирования органических частиц и смесей органических и неорганических частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модельные расчеты поведения частиц при движении с потоком через ультразвуковое поле стоячей волны, наложенное параллельно потоку, показали, что предложенный подход может быть использован для последовательного фракционирования неорганических частиц. Предельно достижимая узость распределения минимальных радиусов удерживаемых частиц R_i^* определяется диапазоном плотностей материала частиц и зависит, кроме того, от направления потока для вертикально расположенной ультразвуковой камеры. В широком диапазоне плотностей ($1700 \div 9000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$) и при оптимальных значениях "эффективного энергетического параметра" $fE = (21 \div 25) \cdot 10^6 \text{ Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ расчетные значения отклонений R_i^* от R^* составляют $\pm 5 \%$ при подаче раствора сверху вниз.

Показано, что существует принципиальная возможность применения метода для фракционирования неорганических частиц не только по размеру, но и по плотности, однако для определения параметров и условий разделения должны быть выполнены дополнительные расчеты. Табулированные значения основных параметров и приведенные зависимости позволяют выбирать оптимальные значения частоты и/или средней плотности акустической энергии УЗ-поля для решения задач фракционирования неорганических частиц, имеющих любой заданный набор плотностей из рассмотренного диапазона, и прогнозировать величину отклонений радиусов удерживаемых частиц от заданного значения.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, грант № 05-03-33108.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King L.V. On the acoustic radiation pressure on spheres // Proc. Roy. Soc. London, 1934. V. A147. P. 212–240.
2. Yosioka K., Kawasima Y. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere // Acustica. 1955. V. 5. P. 167–173.
3. Горьков Л.П. О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости // ДАН СССР. 1961. Т. 120, № 1. С. 88–91.
4. Ter Haar G., Wyard S.I. Blood cell banding in ultrasonic standing wave fields: A physical analysis // Ultrasound in Med. & Biol. 1978. V. 4, N 2. P. 111–123.
5. Мирошников Ф.И., Фомченков В.М., Габурев Н.С., Чеканов В.А. Разделение клеточных суспензий. М., 1977. 108 с.
6. Князьков Н.Н., Шильников Г.В. Ультразвуковое концентрирование клеток культур тканей // Бюлл. эксперим. биол. и мед. 1996. № 3. С. 312–314.
7. Волоцкой М.П., Гаврилюк Б.К., Елецкий В.С., Князьков Н.Н. Способ концентрирования частиц жидкой дисперсной системы. А. С. СССР, № 893880. 1980.
8. Князьков Н.Н., Волоцкой М.П. Использование ультразвука для концентрирования и разделения клеток в суспензии // Тезисы докладов симпозиума УБИОМЕД-V "Ультразвук в биологии и медицине". Пущино, 1981. С. 174.
9. Князьков Н.Н., Макарова Е.Д., Морев С.А., Стиваков Б.Я., Шкинев В.М. Методологические основы применения ультразвукового поля стоячей волны для проточного фракционирования частиц различной природы // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 1. С. 23–34.
10. Лапердина Т.Г. Определение ртуты в природных водах. Новосибирск: Наука, 2000. 222 с.
11. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 130 с.
12. Свинец в окружающей среде / Под ред. В.В. Добровольского. М.: Наука, 1987. 280 с.
13. Hiraide M., Arima Y., Mizuike A. Selective desorption and analysis of humic substances on suspended particles in river waters // Microchim. Acta. 1988. V. 111. P. 231–238. (Цит. по [14]).
14. Терлецкая А.В. Развитие в 1988 г. методов анализа вод // Химия и технология воды. 1989. Т. 11, № 12. С. 1075–1109.
15. Пономарев В.Г. Основы моделирования сооружений механической очистки сточных вод // Вода и экология: проблемы и решения. 2004. № 3. С. 47–55.

16. *Whitworth G., Coakley W.T.* Particle formation in a stationary ultrasonic field // *J. Acoust. Soc. Am.* 1992. V. 91, N 1. P. 79–85.
17. *Thomas N.E., Sobanski M.A., Coakley W.T.* Ultrasonic enhancement of coated particle agglutination immunoassays: influence of particle density and compressibility // *Ultrasound in Med. & Biol.* 1999. V. 25, N 3. P. 443–450.
18. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. 2-е изд. М.: ИЛ, 1957. 726 с.
19. *Бражников Н.И.* Ультразвуковые методы. М.—Л.: Энергия, 1965. 248 с.
20. *Справочник химика.* 2-е изд. Т. II. М.—Л.: Химия, 1965. 1168 с.
21. *Энциклопедия полимеров.* Т. 1–3. М.: Советская энциклопедия, 1977.
22. *Masudo T., Okada T.* Particle Characterization and Separation by a Coupled Acoustic – Gravity Field // *Anal. Chem.* 2001. V. 73. P. 3467–3471.
23. *Ремю Г.* Курс неорганической химии. Т. I, II. Пер. с нем. М.: Мир, 1974. Т. I — 874 с. Т. II — 775 с.
24. *Spengler J., Jekel M.* Ultrasound conditioning of suspensions — studies of streaming influence on particle aggregation on a lab- and pilot-plant scale // *Ultrasonics.* 2000. V. 38. P. 624–628.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 11.12.2006.

ULTRASONIC FLOW-THROUGH FRACTIONING OF PARTICLES OF DIFFERENT KINDS. 1. LIMITING PARAMETERS OF INORGANIC PARTICLES FRACTIONING

N. N. Knyazkov, E. D. Makarova, S. A. Morev

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

The paper presents a theoretical model promoting estimation of characteristics of an acoustic flow-through filter used for particle fractioning; the model is constructed based on the analysis of joint action of the acoustic radiation force, Stokes force, and gravity on retaining the particles within the ultrasonic field. A case of a vertically installed ultrasonic chamber with ultrasonic field superimposed in parallel to the flow direction has been considered. Simulation with this model showed that it is possible to fractionize natural inorganic particles whose densities vary in the wide range (1500 to 9000 kg·m⁻³) and particle sizes differ from the preset values by no more than ± 5 % (in case the solution is supplied from above). Notice that it is potentially possible to fractionize particles not only by size but also by density.