

УДК 534.8:543.3

ã Н. Н. Князьков, Е. Д. Макарова, А. Д. Рабижанович

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПРОТОЧНОЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ
ЧАСТИЦ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ.****2. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ОДНОКОМПОНЕНТНЫХ ЧАСТИЦ РАЗНОЙ
ПРИРОДЫ И НЕОДНОРОДНЫХ (ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ) ЧАСТИЦ.
ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗДЕЛЕНИЯ**

Создана модель проточного ультразвукового (УЗ) фракционирования и определены условия ее адекватного применения для фракционирования одно- и двухкомпонентных частиц взвешенного вещества природных вод с неорганическими компонентами разной природы. Выполнено численное моделирование процесса фракционирования по размерам неорганических и гетерогенных частиц (неорганический компонент + гуминовые вещества) при параллельном наложении УЗ поля и потока в вертикально расположенной камере при разных схемах организации потока для широкого диапазона параметров поля ($1\div 4.5$ МГц, $1\div 20$ Дж·м⁻³). Расчеты выполнены для частиц с плотностью $1200\div 9000$ кг·м⁻³ при объемном содержании неорганической основы от 1.0 до 0.0, т. е. охватывают весь диапазон реальных составов частиц. Разработаны алгоритмы выбора оптимальных параметров УЗ поля и скоростей потока для фракционирования смесей частиц разной природы и состава по физическим свойствам компонентов. Рассчитаны предельно достижимые параметры разделения частиц по размеру. Показано, что метод можно использовать — в зависимости от условий (параметров поля и схемы организации потока) — для последовательного многоступенчатого разделения частиц по размеру, для одноступенчатого выделения узких фракций частиц, для фракционирования частиц по плотности и по природе. Определены оптимальные условия для решения разных задач фракционирования. Предложен метод интегральной оценки качественного состава природных вод по характеру распределения слоев частиц разной природы в ультразвуковом поле стоячей волны в статическом режиме.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое концентрирование дисперсных фаз и фракционирование дисперсных систем основано на использовании хорошо известного силового действия ультразвука мегагерцового диапазона для целенаправленного позиционирования клеток и микрочастиц в заданных точках ультразвукового (УЗ) поля или объема камеры [1–7]. В последние годы наблюдается значительный рост числа работ, посвященных разработке методов проточного фракционирования с использованием УЗ полей. Основными направлениями работ является моделирование процессов, происходящих в ультразвуковом поле стоячей волны (УЗСВ), и/или оценка возможности применения УЗ полей в микрофлюидных системах для разделения микрочастиц [8–13]. Предложено применять микрофлюидные системы для разделения дисперсной фазы и дисперсионной среды (например, отделения эритроцитов от плазмы крови), разделения по размеру модельных частиц одной природы, разделения частиц липидов и клеток крови или для удаления липидов из крови. Возрастает роль моделирования

при описании и изучении процессов фракционирования, поведения частиц в акустическом поле, акустических течений, при проектировании сепарационных систем — большинство работ содержат результаты такого моделирования. Появляется все больше работ, посвященных разработке стратегии применения УЗСВ, конструкциям УЗ устройств, расширению областей применения и перечня потенциально решаемых задач (пробоподготовка, концентрирование, увеличение чувствительности биоаналитических методов и т. д.).

В отличие от методов мембранной фильтрации, которые позволяют разделять частицы по единственному физическому параметру — размеру частиц, ультразвуковые методы чувствительны к размеру, плотности и сжимаемости частиц. Это обстоятельство обеспечивает универсальность и гибкость метода, позволяя проводить фракционирование по нескольким параметрам разделения в случае модельных частиц или частиц с хорошо известными свойствами, однако является уязвимым местом при работе с частицами неизвестного или изменяющегося в широких пределах состава.

В реальных 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 необходимо оценить взаимное влияние на результаты разделения схем организации потоков, свойств частиц и параметров ультразвукового поля. В предыдущем сообщении [14] было подробно рассмотрено влияние на результаты фракционирования основных характеристик неорганических частиц разной природы и способа организации процесса. С помощью модельных расчетов показано, что метод ультразвукового проточного фракционирования может быть использован для последовательного фракционирования неорганических частиц, плотность которых меняется в широком диапазоне ($1700\text{--}9000\text{ кг/м}^3$), при оптимальных параметрах ультразвукового поля.

В данном сообщении проанализирована возможность применения ультразвукового проточного фракционирования для разделения по размерам и по природе неоднородных частиц, состоящих из неорганических компонентов разной природы и органической части (гуминовых веществ). Такие частицы, как правило, образуются в природных водах вследствие взаимодействия гуминовых веществ, являющихся основными органическими компонентами природных вод, с взвешенными частицами. Приведены алгоритмы, расчетные формулы и результаты модельных расчетов, позволяющие оценить предельные параметры разделения и выбрать оптимальные условия фракционирования смесей одно- и двухкомпонентных частиц. Рассмотрено влияние способа организации проточного режима на эффективность применения ультразвукового метода разделения для фракционирования частиц по размеру, по природе и по составу частиц.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ПРОТОЧНОГО ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

Рассмотрен случай вертикального расположения ультразвуковой камеры при двух способах подачи анализируемого потока: сверху—вниз и снизу—вверх. Предполагается, что частицы имеют сферическую форму, профиль потока является плоским, концентрация взвешенных частиц мала настолько, что их взаимным влиянием можно пренебречь. Условия остановки частицы, движущейся с потоком через ультразвуковое поле, направление действия которого совпадает с направлением движения частиц, подробно рассмотрены в работе [14] и определяются из условия равенства всех сил, действующих на частицу.

- Радиационной силы F_R

$$F_R = \frac{8}{3} p^2 \frac{1}{c_0} f E R^3 \Phi \sin 4\pi x / l, \quad (1)$$

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]; $l = c_0 / f$ — длина звуковой волны [м]; Φ — фактор акустического контраста (ФАК), т. е. безразмерный параметр, учитывающий сжимаемость и плотность среды и материала частиц,

$$\Phi = \frac{5r - 2r_0}{2r + r_0} - \frac{b}{b_0}, \quad (2)$$

где r , r_0 — плотности частиц и среды соответственно [$\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$]; b , b_0 — сжимаемости частиц и среды соответственно [Па^{-1}].

- Силы Стокса F_S , обусловленной движением жидкости,

$$F_S = 6\pi h R u, \quad (3)$$

где h — динамическая вязкость среды [$\text{Н}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$]; u — линейная скорость потока [$\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$].

- Результирующей силы F_B , обусловленной действием силы тяжести и поддерживающей силы среды,

$$F_B = \frac{4}{3} p g R^3 (r - r_0), \quad (4)$$

где g — ускорение свободного падения ($g = 9.81\text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$).

При вертикальном расположении камеры и $F_R = \text{max}$ условия остановки частиц, движущихся в потоке через УЗСВ, могут быть записаны следующим образом:

$$1) F_S + F_B \leq F_R \text{ — при подаче суспензии частиц сверху;} \quad (5)$$

$$2) F_S - F_B \leq F_R \text{ — при подаче суспензии частиц снизу.} \quad (6)$$

В соответствии с этими условиями и выражениями (1), (3), (4) максимально допустимое значение скорости потока u_M определяется по уравнениям:

$$1) u_M = \frac{2}{9} h^{-1} R^2 [2p c_0^{-1} f E \Phi - g(r - r_0)] = \frac{2}{9} h^{-1} R^2 [A_R - A_G], \quad (7)$$

$$2) u_M = \frac{2}{9} h^{-1} R^2 [2p c_0^{-1} f E \Phi + g(r - r_0)] =$$

$$= \frac{2}{9} h^{-1} R^2 [A_R + A_G], \quad (8)$$

где

$$A_R = 2p c_0^{-1} f E \Phi \quad \text{и} \quad A_G = g(r - r_0). \quad (9)$$

Таким образом, при пропускании через ультразвуковую камеру суспензии частиц разных размеров и разной природы с потоком должны уходить частицы с радиусами, меньшими некоторых предельных величин $R_i < R_i^*$.

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.

В соответствии с уравнениями (7) и (8), абсолютные значения минимальных радиусов удерживаемых частиц равны

$$R_i^* = \sqrt{\frac{9}{2} u h (A_R \pm A_G)^{-1}}; \quad (10)$$

знак минус используется при подаче исследуемой пробы сверху, знак плюс — при подаче пробы снизу.

Выражение (10) может быть преобразовано (имея в виду, что $h = 0.001$ при 20°C ; R [мкм]; u [мкм/с]):

$$R_i^* = K_V \sqrt{u}, \quad (11)$$

где

$$K_V = 67.082 \sqrt{(A_R \pm A_G)^{-1}}. \quad (12)$$

По значению K_V легко оценить минимальный удерживаемый размер частиц для разных скоростей потока.

Если в процессе фракционирования параметры ультразвукового поля и скорость потока одинаковы и постоянны, то относительные значения минимальных значений радиусов удерживаемых частиц (R_{rel_i}) могут быть рассчитаны с помощью следующих выражений:

$$R_{rel_i} = \frac{R_i^*}{R_0^*} = \sqrt{\frac{(A_R \pm A_G)_0}{(A_R \pm A_G)_i}} = \frac{K_{V_i}}{K_{V_0}}, \quad (13)$$

где подстрочные индексы 0 и i относятся к частицам, выбранным в качестве стандартных, и исследуемым частицам другой природы, знаки минус и плюс — при подаче пробы сверху и снизу соответственно.

Как следует из приведенных выражений, при постоянных условиях фракционирования значения

R_{rel_i} и, следовательно, предельные параметры разделения зависят от параметров поля и физических свойств частиц. В качестве показателя степени неоднородности использовали параметр g_i , равный отношению максимальных и минимальных значений радиусов удерживаемых частиц разной природы:

$$g_i = R_{\max}^* / R_{\min}^* = [(A_R - A_G)_{\max} / (A_R - A_G)_{\min}]^{1/2} \equiv K_{V_{\max}} / K_{V_{\min}} \quad (14)$$

при подаче суспензии сверху. (При подаче суспензии снизу знак минус заменяют знаком плюс).

На основании соотношения (12) можно дать условную оценку относительной ширины распределения по минимальным радиусам R_i^* удерживаемых частиц разной природы при выделении фракции частиц с размерами $R_i > R_i^*$: $R_i^* = R^* \pm d$, где R^* - заданный минимальный радиус, а величину d (%) рассчитывают по уравнению

$$d_i = \frac{g_i - 1}{g_i + 1} \cdot 100. \quad (15)$$

С помощью приведенных выше уравнений рассчитаны относительные радиусы удерживания одно- и двухкомпонентных частиц при ультразвуковом проточном фракционировании. Целью расчетов являются:

- определение погрешности и возможности фракционирования по размеру частиц взвешенного вещества природных вод при наличии гетерогенных частиц, состоящих из неорганических компонентов разной природы и гуминовых веществ;
- оценка возможности фракционирования частиц по природе и составу.

Для достижения указанных целей определены зависимости радиусов удерживаемых частиц разной природы и разного состава от способов организации потока и значений эффективного энергетического параметра ультразвукового поля fE , введенного нами ранее в работе [14].

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ГЕТЕРОГЕННЫХ (ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ) ЧАСТИЦ

В качестве основного положения при определении характеристик гетерогенных частиц было использовано представление об аддитивности их свойств, в соответствии с которым плотность r_i^* и сжимаемость b_i^* частиц, состоящих из смеси неорганических компонентов разной природы и гуминовых веществ, рассчитывали по следующим

формулам [15]:

$$r_i^* = e r_i + (1 - e) r_{HS}, \quad (16)$$

$$b_i^* = e b_i + (1 - e) b_{HS}, \quad (17)$$

где e — объемная доля неорганического материала; r_i и b_i — плотность и сжимаемость неорганического материала частицы соответственно; r_{HS} и b_{HS} — плотность и сжимаемость гуминовых веществ. Соответствующие характеристики гуминовых веществ были приняты равными таковым для бурого угля ($r_{HS} = 1200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $b_{HS} = 3.5138 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, $\Phi = 0.4071$). (Характеристики углей разного типа приведены в работе [16]). Значения ФАК двухкомпонентных частиц вычисляли по уравнению (2) при подстановке значений r_i^* и b_i^* . Расчеты проводили для неорганических материалов разной природы: двуокиси кремния, гидратированного сульфата кальция, карбоната кальция, двойного силиката (слюды), гидратированной окиси железа, окиси алюминия, окиси железа, бурого железняка, магнетита, гидроокиси свинца, окислов свинца. Эти неорганические соединения присутствуют в природных водах и технологических растворах и имеют известные, но отличающиеся физические и акустические характеристики [14]: диапазон изменения плотности неорганических компонентов составляет $1960 \div 9380 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; диапазон изменения ФАК неорганических компонентов $1.56 \div 2.28$. Значения e варьировали в диапазоне от 1.00 до 0.00 с шагом 0.05. Таким образом, общие рассмотренные диапазоны плотности и ФАК были равны $1200 \div 9380 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ и $0.41 \div 2.28$ соответственно.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА. ПРЕДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ОДНО- И ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРУ

В предыдущем сообщении [14] было показано, что предельные параметры разделения зависят от способа организации потока: сверху—вниз или снизу—вверх, причем первый вариант позволяет достичь минимальных параметров разделения. Поэтому в качестве основного варианта при определении возможности фракционирования смесей одно- и двухкомпонентных частиц был рассмотрен вариант подачи анализируемой пробы сверху.

Из уравнения (7) следует, что при условии постоянства скорости потока u и эффективного энергетического параметра fE удерживание в ультразвуковом поле 2 частиц, имеющих один и тот же радиус, но отличающихся характеристиками (плотность, ФАК), должно происходить при некоторых оптимальных параметрах поля $(fE)^*$,

которые можно определить из равенства

$$A_{R_0} - A_{G_0} = A_{R_x} - A_{G_x}, \quad (18)$$

где индекс 0 относится к некоторой частице, выбранной в качестве стандартной, а индекс x — ко второй частице с известными, но отличающимися характеристиками r^* и Φ^* , определяемыми с помощью соотношений (16)–(17). Из равенства (18) с учетом (9) следует

$$2p c_0^{-1} (fE)^* \Phi_0 - A_{G_0} = 2p c_0^{-1} (fE)^* = \Phi_x - A_{G_x},$$

откуда легко могут быть найдены оптимальные параметры ультразвукового поля:

$$(fE)^* = \frac{c_0 (A_{G_x} - A_{G_0})}{2p (\Phi_x - \Phi_0)}. \quad (19)$$

Для определения предельных параметров разделения двухкомпонентных частиц были использованы два алгоритма расчетов при конкретных условиях: 20°C , $c_0 = 1482.7 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

1. В пробе присутствуют двухкомпонентные частицы, которые состоят из неорганического материала одной природы и содержат органический компонент, объемная доля которого изменяется в широком диапазоне — от 0.0 до 1.0

В этом случае значения $(fE)^*$, требующиеся для выделения частиц одного размера независимо от доли содержащегося неорганического компонента, определяем следующим образом (подстрочный индекс G для упрощения выражений далее опущен, т. е. $A \equiv A_G$):

$$(fE)^* = 2.35979 \times 10^{-4} \frac{[A_{e=1.0} - A_e]_i}{[\Phi_{e=1.0} - \Phi_e]_i}.$$

Для каждого из неорганических компонентов i определяли оптимальные параметры ультразвукового поля, которые необходимы для удерживания одно- и двухкомпонентных частиц, состав которых изменяется в диапазоне от $e = 1.00$ до $e = 0.00$, $e = 0.10$, $e = 0.20$ и т. д. Далее рассчитывали значения K_v по уравнению (12) во всем рассматриваемом диапазоне значений e , варьируемых от 1.00 до 0.00 с шагом 0.05. В соответствии с выражением (14), по отношению рассчитанных максимальных и минимальных значений K_v определяли величину g и по формуле (15) определяли предельные параметры разделения d_i .

Полученные значения оптимальных параметров ультразвукового поля и предельных параметров разделения для разных по природе неорганических компонентов частиц приведены в табл. 1.

Табл. 1. Оптимальные параметры ультразвукового поля и предельные параметры разделения по размеру одно- и двухкомпонентных частиц, содержащих неорганический компонент только одной природы и гуминовые вещества

Параметр	Неорганический компонент частицы										
	SiO ₂	CaSO ₄ ×2H ₂ O	Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	CaCO ₃	Слюда	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	FeO(OH)	Fe ₃ O ₄	Pb ₂ O(OH) ₂	PbO	PbO ₂
r , кг/м ³	1960	2260	2450	2700	2810	3698	4800	5180	7590	8000	9380
Φ	1.5552	1.6436	1.4710	1.7763	1.8083	1.9566	2.0762	2.1045	2.2223	2.2357	2.2756
Диапазон составов $e = 1.0-0.00$											
$(fE)^* / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	1.532	1.984	2.720	2.536	2.660	3.732	4.993	5.428	8.149	8.609	10.151
$K_{V_{\max}}$	2.603	1.765	1.288	1.370	1.313	1.005	0.824	0.781	0.610	0.591	0.538
$K_{V_{\min}}$	2.226	1.516	1.118	1.144	1.088	0.789	0.615	0.576	0.420	0.404	0.358
d_i , %	7.8	7.6	7.1	9.0	9.4	12.0	14.5	15.2	18.4	18.8	20.1
Диапазон составов $e = 1.00-0.10$											
$(fE)^* / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	1.556	2.034	2.822	2.632	2.770	3.992	5.511	6.055	9.668	10.313	12.542
$K_{V_{\max}}$	2.343	1.587	1.160	1.200	1.142	0.825	0.634	0.589	0.413	0.394	0.342
$K_{V_{\min}}$	2.112	1.438	1.058	1.074	1.018	0.724	0.551	0.511	0.360	0.343	0.299
d_i , %	5.2	4.9	4.6	5.5	5.7	6.5	7.0	7.1	6.8	6.9	6.7
Диапазон составов $e = 1.00-0.20$											
$(fE)^* / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	1.578	2.079	2.917	2.721	2.870	4.219	5.945	6.572	10.821	11.588	14.252
$K_{V_{\max}}$	2.157	1.462	1.069	1.090	1.033	0.728	0.548	0.506	0.348	0.331	0.286
$K_{V_{\min}}$	2.014	1.371	1.007	1.016	0.962	0.674	0.508	0.469	0.325	0.310	0.269
d_i , %	3.4	3.2	3.0	3.5	3.6	3.8	3.8	3.8	3.4	3.3	3.0
Диапазон составов $e = 1.00-0.30$											
$(fE)^* / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	1.600	2.122	3.006	2.802	2.961	4.418	6.313	7.006	11.732	12.576	15.536
$K_{V_{\max}}$	2.015	1.369	1.000	1.012	0.957	0.666	0.497	0.458	0.313	0.299	0.258
$K_{V_{\min}}$	1.927	1.313	0.963	0.969	0.916	0.637	0.476	0.439	0.303	0.288	0.250
d_i , %	2.2	2.1	1.9	2.2	2.2	2.2	2.2	2.1	1.77	1.72	1.57
Диапазон составов $e = 1.00-0.50$											
$(fE)^* / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	1.639	2.199	3.169	2.944	3.120	4.754	6.903	7.693	13.052	14.012	17.338
$K_{V_{\max}}$	1.814	1.237	0.904	0.907	0.856	0.590	0.438	0.404	0.278	0.265	0.230
$K_{V_{\min}}$	1.783	1.218	0.890	0.893	0.844	0.581	0.432	0.399	0.275	0.262	0.228
d_i , %	0.84	0.79	0.79	0.79	0.70	0.77	0.69	0.66	0.54	0.51	0.46

Из полученных результатов следует:

1) Предельные параметры разделения по размеру в случае двухкомпонентных частиц при ультразвуковом проточном фракционировании сильно зависят от природы неорганического компонента частицы. В случае двуокиси кремния, гидратированных сульфата кальция и окиси железа, карбоната кальция и двойного силиката (слюда) возможно выделение фракций частиц с отклонением в минимальных размерах < 10 % в широком диапазоне составов — от чисто неорганиче-

ских частиц до гуминовых веществ. Эти частицы встречаются практически во всех типах природных вод.

2) Увеличение плотности частиц сопровождается увеличением значений универсального энергетического параметра $(fE)^*$ и значительным ухудшением предельных параметров разделения ($d_i = \pm 20$ % для двухкомпонентных частиц, содержащих двуокись свинца с плотностью 9380 кг / м³).

3) При уменьшении объемной доли органического компонента от $(1 - e) = 1.0$ до $(1 - e) = 0.90$

Табл. 2. Предельные параметры разделения δ (%) для суспензии смеси частиц $\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3$ + слюда в различных диапазонах ε

ε	$(fE)^*$		
	$2.802 \times 10^6 \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$	$2.960 \times 10^6 \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$	$3.006 \times 10^6 \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$
1.0–0.1	9.9	11.2	11.7
1.0–0.2	9.9	8.6	8.1
1.0–0.3	9.9	7.8	7.4

зависимость предельных параметров разделения (d_i) от природы неорганического компонента уменьшается, а при $(1 - e) \leq 0.80$ исчезает полностью. При установлении оптимальных для каждого неорганического компонента значений $(fE)^*$ отклонения минимальных радиусов удерживаемых частиц не превосходят 4 %, уменьшаясь при уменьшении доли органического компонента. В диапазоне $e = 1.0 \div 0.3$ значения $d_i \leq 2.2$ %, а при $e = 1.0 \div 0.5$ — $d_i < 1$ %.

4) По значениям K_V можно установить оптимальные скорости потока, необходимые для выделения фракций частиц с радиусами $R_i \geq R_i^*$ (используя соотношение (11)). Так, например, с увеличением плотности частиц значения R^* уменьшаются симбатно увеличению значений $(fE)^*$ от ~ 2 мкм до ~ 0.3 – 0.2 мкм при переходе от одно- и двухкомпонентных частиц двуокиси кремния к одно- и двухкомпонентным частицам двуокиси свинца при одной и той же скорости потока $1 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, оптимальные условия выделения фракций двухкомпонентных частиц с заданными размерами методом ультразвукового проточного фракционирования полностью определены. Этот способ может быть применен к реальным природным и технологическим системам при преимущественном содержании одно- и двухкомпонентных частиц с неорганическим компонентом одной природы. Варьирование скорости потока позволяет проводить фракционирование частиц по размерам независимо от доли органического компонента (вплоть до 80 %) с достаточно высокой точностью ($d_i < 4$ %).

2. В пробе одновременно присутствуют одно- и двухкомпонентные частицы с разной природой неорганического компонента

Необходимо определить оптимальные условия и предельные параметры разделения частиц по размерам.

Вариант А. Выбор оптимальных условий фрак-

ционирования по размеру смеси частиц может быть проведен с помощью результатов, полученных для частиц, содержащих неорганический компонент одной природы. Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что близкие значения параметров ультразвукового поля наблюдаются в случае одно- и двухкомпонентных частиц гидратированной окиси железа, карбоната кальция и двойного силиката (слюды). Поэтому можно предположить, что при фракционировании смеси таких частиц будет достигнута минимальная ширина распределения частиц по размерам (минимальные значения параметра разделения d). Результаты расчетов приведены в табл. 2 и Приложении (табл. П1) для различных значений $(fE)^*$ — 3.006, 2.960 и $2.802 \times 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, отвечающих оптимальным условиям разделения по размерам каждого из типов частиц для диапазона $e = 1.00 \div 0.30$. Для сравнения в этой же таблице (в Приложении) приведены данные для двух типов частиц, наиболее близких к частицам, находящимся в смеси, по своим физическим свойствам (гидратированного сульфата кальция и окислов алюминия/железа; табл. 1).

Как показывают полученные результаты, методом ультразвукового проточного фракционирования можно проводить разделение частиц по размерам и в случае присутствия смеси одно- и двухкомпонентных частиц в широком диапазоне составов. При содержании органического компонента от 0.0 до 90 % предельный параметр разделения ~ 10 % и уменьшается до 8.1 % и 7.4 % при выборе максимального значения $(fE)^* = 3.006 \times 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и при снижении доли органического компонента до 80 и 70 % соответственно.

При заданных значениях универсального энергетического параметра поля на характер зависимости K_V от доли органического компонента (и тем самым на зависимость величины радиуса удерживаемой частицы) сильно влияет природа неорганического компонента частицы. Значения K_V проходят через минимум в случае рассматриваемой смеси частиц и непрерывно увеличиваются для частиц с неорганическим компонентом меньшей

плотности. При увеличении плотности неорганического компонента частицы с низким содержанием органики не удерживаются ультразвуковым полем. При этом интервал составов проскакивающих частиц сильно зависит от выбираемой величины $(fE)^*$. Это позволяет сделать вывод о принципиальной возможности применения метода — в сочетании с методом мембранной фильтрации — для фракционирования частиц не только по природе неорганического компонента, но и по составу частиц. Например, если подать в ультразвуковую камеру фракцию частиц с размерами 1÷2 мкм, полученную методом мембранной фильтрации, то в выходящем потоке будут находиться преимущественно частицы Al_2O_3 и Fe_2O_3 и двухкомпонентные частицы этих соединений с низким содержанием органического вещества. Подбирая условия, можно добиться выделения определенных составов частиц разной природы.

Вариант Б. Оценка возможности применения и выбор оптимальных условий фракционирования частиц по размеру в случае смеси частиц разной природы и разного состава могут быть сделаны с помощью расчета оптимальных величин $(fE)^*$ для заданных значений ε и выбора близких по значению величин $(fE)^*$:

$$(fE)^* = 2.35979 \times 10^{-4} \frac{[A_{ie} - A_{je}]}{[\Phi_{ie} - \Phi_{je}]}.$$

Табл. 3. Оптимальные значения $(fE)^*$, рассчитанные для определения условий удерживания частиц разной природы с одинаковыми радиусами при попарном объединении неорганических компонентов разной природы

Состав смеси частиц (здесь $Fe_2O_{3,aq} = Fe_2O_3 \cdot H_2O$)	Параметр поля $(fE)^* / 10^6$	Пары частиц, которые можно фракционировать при одновременном присутствии
$SiO_2 + CaSO_4$	7.86	+
$CaSO_4 + CaCO_3$	7.68	+
$CaCO_3 + Fe_2O_{3,aq}^*$	1.90	—
Слюда + $CaCO_3$	7.96	+
Слюда + $Fe_2O_{3,aq}$	2.47	—
Слюда + Al_2O_3, Fe_2O_3	13.86	—
$Fe_2O_{3,aq} + Al_2O_3, Fe_2O_3$	5.95	—
$Al_2O_3, Fe_2O_3 + FeO(OH)$	21.33	—
$FeO(OH) + Fe_3O_4$	31.08	—
$Fe_3O_4 + Pb_2O(OH)_2$	47.36	—

Оптимальные величины $(fE)^*$, рассчитанные для значений $\varepsilon = 1.00$ при попарном объединении частиц разной природы, приведены в табл. 3.

Приведенные расчетные данные свидетельствуют, что возможно фракционирование частиц по размеру при одновременном нахождении в суспензии частиц разной природы ($SiO_2 + CaSO_4 + CaCO_3 +$ слюда), однако, поскольку оптимальные условия рассчитывали для частиц, содержащих только неорганический компонент, диапазон составов будет зависеть от характера зависимости величин K_V индивидуальных частиц от объемной доли органического компонента. С увеличением плотности неорганических компонентов частиц оптимальные параметры поля закономерно увеличиваются.

В качестве примера в Приложении (табл. П2) приведены значения K_V и предельные параметры разделения для смеси частиц ($SiO_2 + CaSO_4 + CaCO_3 +$ слюда) и для смеси железосодержащих частиц. Полученные результаты свидетельствуют о возможности фракционирования по размерам смесей одно- и двухкомпонентных частиц, сильно отличающихся по характеристикам неорганических компонентов (табл. 1) и содержащих различные объемные доли органики. При содержании органического компонента вплоть до 50 % предельный параметр разделения равен ~10 % для суспензий смесей частиц ($SiO_2 + CaSO_4 + CaCO_3 +$ слюда) и ($Fe_2O_3 \cdot H_2O + Fe_2O_3 + Al_2O_3 + FeO(OH)$) при значениях $(fE)^*$, равных 7.86×10^6 и 5.95×10^6 Дж·м⁻³·с⁻¹ соответственно. При меньшем количестве неорганических компонентов и/или меньшем содержании органики в частицах предельные параметры разделения уменьшаются. Таким образом, проточное ультразвуковое фракционирование по размерам целесообразно применять при преимущественном содержании в анализируемых пробах определенных типов одно- и двухкомпонентных частиц, т. е. для практического эффективного использования метода желательно иметь информацию о качественном составе фракционируемых сред.

Из уравнений (7) и (9) следует, что плотность частиц оказывает наибольшее влияние на параметры разделения при соизмеримой величине A_R и A_G . Диапазон плотностей неорганических компонентов рассматриваемых частиц крайне велик — $r_{max}/r_{min} = 4.8$. Поэтому, принимая во внимание, что при увеличении fE влияние плотности частиц должно уменьшаться, были рассчитаны значения параметра K_V и относительные минимальные радиусы удерживаемых частиц $R_{rel}^* = R_i^*/R_{SiO_2}^* = K_{Vi}/K_{V_{SiO_2}}$ в широком диапазоне значений fE и значений $\varepsilon = 1.00-0.20$. В качестве стандартных

частиц при каждом значении fE были выбраны частицы двуокиси кремния вследствие их потенциальной доступности. Полученные значения относительных радиусов частиц, удерживаемых в ультразвуковом поле, приведены в Приложении (табл. ПЗ) для различных значений fE и для различной доли неорганического компонента. Для того, чтобы можно было сравнить диапазоны составов частиц, которые можно фракционировать с заданными параметрами разделения ($\pm 5\%$ и $\pm 10\%$), значения относительных радиусов, отвечающих условию $d = \pm 5\%$, выделены шрифтом.

Из данных, приведенных в этой таблице, следует, что в ультразвуковом поле можно проводить фракционирование по размерам смесей одно- и двухкомпонентных частиц с разной природой неорганического компонента и высоким содержанием органики. Для уменьшения ширины распределения минимальных радиусов удерживаемых частиц оптимизация должна проводиться для нескольких групп частиц, которые можно выделить, используя в качестве основного критерия значения плотностей неорганических компонентов. В соответствии с этим признаком частицы можно условно подразделить на частицы "низкой", "средней" и "высокой" плотности. Оптимизация условий фракционирования частиц в широком диапазоне составов достигается соответственно при уменьшении значений fE , в области средних и в области высоких значений fE . Для оптимизации условий лучше всего применять алгоритмы, описание которых дано выше. Кроме того, для работы с реальными объектами неизвестного состава желательно разработать метод, который бы позволял проводить оценку качественного состава анализируемых проб, т. е. позволял бы определять присутствие компонентов, значительно отличающихся по плотности.

Значения относительных минимальных радиусов удерживаемых частиц при изменении способа организации проточного варианта, т. е. при подаче суспензии в ультразвуковую камеру снизу, приведены в Приложении (табл. П4). (Использован тот же способ выделения групп частиц, что и в табл. ПЗ). Приведенные результаты свидетельствуют о том, что этот способ организации потока практически непригоден для фракционирования смесей частиц, значительно различающихся по природе неорганического компонента, состав которых изменяется в широком диапазоне. В этом случае еще сильнее проявляется зависимость ширины распределения минимальных радиусов удерживаемых частиц от их состава. Кроме того, при подаче растворов снизу должен проявляться седиментационный эффект для частиц с высокой плотностью, в результате которого в ультразвуковую камеру будут поступать частицы, размер которых ограничен сверху. Верхние предельные

Табл. 4. Зависимость значений (R_G/R_{US}) частиц, удерживаемых в ультразвуковой камере, от fE и природы неорганического компонента при подаче суспензии снизу (объемная доля неорганических компонентов $\varepsilon = 1.00-0.40$)

Природа неорганического компонента	$fE/10^6, \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$			
	5	10	30	80
SiO ₂	2.12– 2.20	2.82– 2.95	4.68– 4.92	7.54– 7.92
CaSO ₄ ×2H ₂ O	1.95– 2.08	2.57– 2.76	4.23– 4.58	6.78– 7.29
Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	1.78– 1.95	2.32– 2.57	3.76– 4.22	6.00– 6.76
CaCO ₃	1.80– 1.96	2.35– 2.58	3.81– 4.24	6.09– 6.81
Слюда	1.78– 1.93	2.30– 2.55	3.73– 4.18	5.96– 6.70
Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	1.60– 1.78	2.03– 2.31	3.22– 3.74	5.10– 5.96
FeO(OH)	1.48– 1.66	1.83– 2.12	2.84– 3.38	4.46– 5.28
Fe ₃ O ₄	1.44– 1.62	1.78– 2.06	2.74– 3.28	2.74– 3.28

значения этих радиусов (R_G) могут быть рассчитаны по уравнению

$$R_G = R_{US} \left(\frac{A_R + A_G}{A_G} \right)^{1/2}$$

при условии, что величина скорости потока и значение минимальных радиусов частиц (R_{US}), удерживаемых в ультразвуковом поле, определяются уравнением (8). Значения (R_G/R_{US}) , приведенные в табл. 4, показывают, что седиментационный эффект ограничивает возможность применения этого варианта метода для фракционирования смесей частиц, значительно отличающихся по природе неорганического компонента. В то же время этот способ организации потока может быть чрезвычайно удобен и полезен при выделении фракций частиц заданного размера как из суспензий однокомпонентных частиц одной природы, так и из смесей одно- и двухкомпонентных частиц (например, смеси одно- и двухкомпонентных частиц (Fe₂O₃×H₂O + CaCO₃ + слюда)). Диапазон размеров частиц в выделяемых фракциях зависит от величины эффективного энергетического параметра и природы частиц, уменьшаясь с уменьшением fE и увеличением плотности неорганического компонента. Различие значений (R_G/R_{US}) для частиц разной природы может быть использовано при

разделении смеси частиц по природе в сочетании, например, с методом мембранной экстракции. Очевидно, что условия оптимизации должны выбираться непосредственно при решении конкретной актуальной практической задачи.

Для использования этого метода выделения фракций частиц с заданным диапазоном размеров необходимо оценить влияние, которое может оказывать переход от плоского к параболическому профилю скоростей потока на полноту выделения частиц из пробы при наличии указанного выше седиментационного эффекта. Результаты оценки процентного содержания частиц, поступающих в ультразвуковую камеру при различных значениях fE для неорганических компонентов разной природы, приведены в табл. 5. Из приведенных данных следует, что если при проводимом анализе необходимо полное извлечение частиц, то для получения узких фракций необходимо применение циклического режима. Полное извлечение широких фракций частиц достигается при установлении максимально возможных значений эффективного энергетического параметра fE .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА РАССЛАИВАНИЯ СУСПЕНЗИИ ЧАСТИЦ В УЗСВ

Оценка качественного состава (природы материалов) взвешенного вещества природных вод и других суспензий может быть проведена с помощью ультразвукового поля стоячей волны. Условием удерживания частиц в УЗСВ является: $F_R \geq F_B$. При равенстве обеих сил можно рассчитать положение, занимаемое частицами относительно плоскости узла давления, т. е. расстояние смещения частицы от узла давления под действием силы тяжести. Действительно, как показано в работе [17], в этом случае расстояние смещения не зависит от радиуса частиц и определяется только плотностью частиц (r) и фактором акустического контраста (Φ), т. е. типом материала:

$$z = \frac{1}{2k} \sin^{-1} \left[\frac{(r - r_0)g}{kE\Phi} \right]. \quad (20)$$

Эти же авторы предложили использовать гравитационно-акустические поля для определения характеристик частиц, их сепарации, а также для определения пористости частиц силикагеля [17, 18]. По нашему мнению, этот вариант применения комбинированных полей наиболее целесообразно использовать для создания "индикаторных трубок", позволяющих проводить анализ качественного состава частиц природных объектов. Поэтому далее рассмотрено поведение частиц различной природы

Табл. 5. Зависимость относительной доли частиц S [%], поступающих в ультразвуковую камеру, при параболическом профиле скоростей потока от значений fE при подаче суспензии снизу при содержании неорганических компонентов $\varepsilon = 1.00-0.40$

Природа неорганического компонента	$fE/10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹			
	5	10	30	80
SiO ₂	0.78–0.79	0.88	0.95–0.96	0.98
CaSO ₄ ×2H ₂ O	0.74–0.77	0.85–0.87	0.94–0.95	0.98
Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	0.69–0.74	0.81–0.85	0.93–0.94	0.97–0.98
CaCO ₃	0.69–0.74	0.82–0.85	0.93–0.94	0.97–0.98
Слюда	0.68–0.73	0.81–0.84	0.93–0.94	0.97–0.98
Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	0.61–0.68	0.76–0.81	0.90–0.93	0.96–0.97
FeO(OH)	0.54–0.64	0.70–0.78	0.88–0.91	0.95–0.96
Fe ₃ O ₄	0.52–0.62	0.68–0.76	0.87–0.91	0.95–0.96

при совместном присутствии в анализируемой пробе.

После проведения небольших преобразований выражения (20) получаем:

$$z = \frac{c_0}{2 \times 2p f} \sin^{-1} \left(\frac{\Delta r g c_0}{2p f \Phi E} \right) = \frac{l}{4p} \sin^{-1} \left(\frac{\Delta r}{\Phi} \cdot \frac{1}{fE_{ac}} \cdot \frac{g c_0}{2p} \right);$$

$$b = \left(\frac{l}{4} \right) \frac{z}{p} = \frac{1}{p} \sin^{-1} \left(\frac{\Delta r}{\Phi} \cdot \frac{1}{fE} \cdot 2314.954 \right)$$

при $c_0 = 1482.7$ м/с (20 °С), $g = 9.81$ м/с².

Таким образом, основным параметром, определяющим положение частицы в ультразвуковом поле, является величина $(\Delta r / \Phi)$. При выборе оптимальных условий озвучивания (т. е. параметра $(fE)^{**}$), при которых достигается максимальное расстояние между слоями, необходимо решить простейшее уравнение, соответствующее условию

$$\left(\frac{\Delta r}{\Phi} \cdot \frac{1}{fE} \cdot 2314.954 \right) = 1,$$

т. е. $(fE)^{**} = \frac{\Delta r}{\Phi} \cdot 2314.954$.

Табл. 6. Основные характеристики материалов частиц и оптимальные параметры ультразвукового поля, необходимые для максимального смещения частиц разной природы от узла давления

Материал частицы	Основные характеристики частиц			$(fE)^{**} 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹
	Δr , кг/м ³	Φ	$\Delta r / \Phi$, кг/м ³	
Гуминовые вещества	201.8	0.407	495.83	1.148
SiO ₂	961.8	1.555	618.52	1.432
CaSO ₄ ×2 H ₂ O	1261.8	1.644	767.52	1.778
CaCO ₃	1701.8	1.776	958.22	2.218
Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	1451.8	1.471	986.95	2.284
Слюда	1811.8	1.808	1002.10	2.320
Fe ₂ O ₃	2699.8	1.965	1373.94	3.181
Al ₂ O ₃	2699.8	1.957	1379.56	3.194
FeO(OH)	3801.8	2.076	1831.31	4.239
Fe ₃ O ₄	4181.8	2.105	1986.60	4.599
Pb ₂ O(OH) ₂	6591.8	2.222	2966.61	6.868
PbO	7001.8	2.236	3131.40	7.249
PbO ₂	8381.8	2.273	3687.55	8.536

Основные характеристики для некоторых материалов взвешенных частиц природных вод, охватывающие широкий диапазон значений плотностей и акустических характеристик, а также оптимальные значения $(fE)^{**}$ приведены в табл. 6. Материалы расположены в порядке возрастания величины $(\Delta r / \Phi)$.

Таким образом, при наличии в исследуемой пробе взвешенных частиц неорганической природы они должны образовывать слои, располагающиеся на разном расстоянии друг от друга, что позволяет охарактеризовать пробы с помощью своеобразного "штрих-кода", т. е. по количеству и характеру распределения слоев (степени дискретности). В качестве примера в табл. 7 приведены расстояния между слоями частиц разной природы при различных вариантах составов исследуемых проб в зависимости от выбираемых частот и средних плотностей акустической энергии УЗСВ. Совершенно очевидно, что для увеличения разрешения получаемой картины слоев, частота поля должна быть выбрана минимальной, однако ограничивающим фактором в таком случае может выступать предельно достижимая на практике величина средней плотности акустической энергии. Ориентировочная оценка диапазонов плотностей содержащихся в пробе частиц может быть сделана по величине расстояния Δz_{total} между максимально удаленным слоем и слоем, расположенным на минимальном расстоянии от узла давления: $\Delta z_{total} = z_{max} - z_{min}$.

После проведения такой оценки, осуществляе-

мой при максимальном значении средней плотности акустической энергии E , равной отношению величин $(fE)^{**}$ и выбранной частоты вынужденных колебаний f , целесообразно постепенно уменьшать E при сохранении прежней частоты. При этом должно проходить осаждение более тяжелых фракций частиц и значительное увеличение расстояния между остающимися слоями.

Принимая во внимание, что время расслаивания частиц обратно пропорционально квадрату радиуса частицы, произведению $f^2 E$ и величине Φ [19], по времени расслаивания суспензии можно ориентировочно судить о размерах частиц в пробе и об их природе. Толщина образовавшихся слоев может являться качественной характеристикой их концентрации и определять необходимость их разбавления для проведения дополнительного анализа или последующего ультразвукового проточного фракционирования.

При наличии в пробе двухкомпонентных частиц, содержащих наряду с неорганическими компонентами органические вещества, степень дискретности расположения слоев должна уменьшаться, и в пределе может наблюдаться переход к непрерывному распределению частиц между слоями — в областях, определяемых природой неорганического компонента частиц.

Из данных табл. 7 следует также, что степень близости расположения слоев может являться критерием возможности их одновременного ультразвукового проточного фракционирования и облегчать выбор оптимальных параметров ультразвукового поля.

Табл. 7. Расстояния (Δz_i) между слоями частиц различной природы для различных природных материалов в зависимости от выбираемых параметров ультразвукового поля (f , E) при различных оптимальных значениях $(fE)^{**}$, соответствующих разному качественному составу частиц

Параметры		Значения параметров											
$(fE)^{**} 10^6, \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$		2.33	3.20	4.60	8.54	2.33	3.20	4.60	8.54	2.33	3.20	4.60	8.54
f , МГц		0.4				0.5				0.75			
$l/4$, мкм		926.7				741.4				494.2			
$l/8$, мкм		463.3				370.7				247.1			
E , Дж/м ³		5.8	8.0	11.5	21.4	4.7	6.4	9.2	17.1	3.1	4.3	6.1	11.4
Вещество	$\Delta r / \Phi$	$\Delta z_{ij} = z_i - z_j$, мкм											
Гуминовые вещества	495.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
SiO ₂	618.5	43	29	19	10	34	23	15	8	23	15	10	5
CaSO ₄ ×2 H ₂ O	767.5	60	37	24	12	48	29	19	10	32	20	13	6
CaCO ₃	958.2	116	52	32	16	93	42	25	13	62	28	17	8
Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	987.0	34	9	5	2.4	27	7	3.8	1.9	18	4.6	2.5	1.3
Слюда	1002.1	31	5	2.6	1.3	24	3.7	2.1	1.0	16	2.5	1.4	0.7
Fe ₂ O ₃	1373.9	—	192	69	31	—	153	55.4	25	—	102	37	17
Al ₂ O ₃	1379.5	—	14	1.2	0.4	—	11	1.0	0.3	—	7	0.6	0.3
FeO(OH)	1831.3	—	—	119	40	—	—	96	32	—	—	64	21
Fe ₃ O ₄	1986.6	—	—	111	14	—	—	89	12	—	—	59	8
Pb ₂ O(OH) ₂	2966.6	—	—	—	108	—	—	—	86	—	—	—	58
PbO	3131.4	—	—	—	23	—	—	—	19	—	—	—	12
PbO ₂	3687.6	—	—	—	156	—	—	—	125	—	—	—	83
Δz_{total} , мкм													
Оценочный параметр для диапазона плотностей		284	336	382	415	227	269	306	332	151	180	204	221

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана модель проточного ультразвукового фракционирования и определены условия ее адекватного применения для фракционирования одно- и двухкомпонентных частиц взвешенного вещества природных вод с неорганическими компонентами разной природы. Выполнено численное моделирование процесса фракционирования по размерам неорганических и гетерогенных частиц (неорганический компонент + гуминовые вещества) при параллельном наложении УЗ поля и потока в вертикально расположенной камере при разных схемах организации потока для широкого диапазона параметров поля (1÷4.5 МГц, 1÷20 Дж·м⁻³). Расчеты выполнены для частиц с плотностью 1200÷9000 кг·м⁻³ при объемном содержании неорганической основы от 1.0 до 0.0, т. е. охватывают весь диапазон реальных составов частиц.

Показано, что предельные параметры разделения двухкомпонентных частиц по размеру должны сильно зависеть от природы неорганического компонента частицы. В случае двуокиси кремния, гидратированных сульфата кальция и окиси железа, карбоната кальция и двойного силиката (слюды) при выборе оптимальных для каждого неорганического компонента параметров УЗ поля возможно выделение фракций частиц с отклонением в минимальных размерах < 10 % в широком диапазоне составов — от чисто неорганических частиц до гуминовых веществ. Сделан вывод, что УЗ метод фракционирования может быть применен к реальным природным и технологическим водным системам при преимущественном содержании одно- и двухкомпонентных частиц с неорганическим компонентом одной природы.

Результаты моделирования показали, что методом ультразвукового проточного фракционирования

ния можно проводить разделение частиц по размерам и в случае присутствия смеси одно- и двухкомпонентных частиц с неорганическими компонентами разной природы. Приведены конкретные примеры таких смесей и принципы выбора параметров УЗ поля, необходимых для получения минимальной ширины распределения радиусов удерживаемых частиц.

Разработаны алгоритмы выбора оптимальных параметров УЗ поля и скоростей потока для фракционирования смесей частиц разной природы и состава по физическим свойствам компонентов. Рассчитаны предельно достижимые параметры разделения частиц по размеру. Установлено, что метод можно использовать — в зависимости от условий (параметров поля и схемы организации потока) — для последовательного многоступенчатого разделения частиц по размеру, для одноступенчатого выделения узких фракций частиц, для фракционирования частиц по плотности и по природе. Определены оптимальные условия для решения разных задач фракционирования.

Предложен метод интегральной оценки качественного состава природных вод по характеру распределения слоев частиц разной природы в ультразвуковом поле стоячей волны в статическом режиме. Можно предположить, что удерживание неорганических частиц в УЗ поле в потоке может использоваться для изучения их взаимодействия с гуминовыми (и другими высокомолекулярными веществами): если в процессе взаимодействия образуются двухкомпонентные частицы, то их положение в УЗ поле должно измениться вследствие изменения радиуса и физических характеристик частиц. Моделирование такого процесса с оценкой возможности выделения образующихся частиц по размеру и составу из смеси одно- и двухкомпонентных частиц с помощью УЗ фракционирования в проточном режиме в настоящее время проводится в нашей лаборатории.

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

Приложение. ТАБЛИЦЫ П1–П4

Табл. П1. Значения K_V и предельные параметры разделения для смеси частиц и отдельных типов частиц с близкими характеристиками

(fE)*	2.802×10 ⁶ Дж/м ³ с ⁻¹					2.960×10 ⁶ Дж/м ³ с ⁻¹					3.006×10 ⁶ Дж/м ³ с ⁻¹						
e	CaSO ₄ ×2H ₂ O	Суспензия смеси частиц			Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	CaSO ₄ ×2H ₂ O	Суспензия смеси частиц			Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	CaSO ₄ ×2H ₂ O	Суспензия смеси частиц			Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃		
		Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	CaCO ₃	Слюда			Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	CaCO ₃	Слюда			Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	CaCO ₃	Слюда			
	Значения K _V																
1.00	0.794	1.181	1.012	1.103	не уд.	0.739	1.034	0.898	0.957	не уд.	0.725	1.000	0.871	0.925	не уд.		
0.90	0.806	1.142	0.992	1.065	не уд.	0.752	1.014	0.890	0.939	не уд.	0.738	0.984	0.865	0.910	не уд.		
0.85	0.813	1.125	0.985	1.050	не уд.	0.759	1.005	0.887	0.932	не уд.	0.746	0.977	0.864	0.904	не уд.		
0.80	0.820	1.111	0.979	1.037	не уд.	0.767	0.998	0.886	0.926	5.72	0.754	0.972	0.863	0.900	3.08		
0.75	0.829	1.099	0.974	1.025	не уд.	0.776	0.993	0.885	0.921	2.70	0.763	0.972	0.863	0.896	2.18		
0.70	0.838	1.090	0.971	1.016	55.6	0.786	0.989	0.886	0.918	2.04	0.772	0.967	0.865	0.894	1.80		
0.65	0.849	1.081	0.968	1.009	3.051	0.796	0.986	0.887	0.916	1.72	0.785	0.965	0.867	0.894	1.57		
0.60	0.860	1.076	0.968	1.004	2.19	0.808	0.985	0.890	0.916	1.52	0.795	0.963	0.871	0.894	1.422		
0.55	0.873	1.071	0.970	1.000	1.81	0.821	0.985	0.895	0.917	1.392	0.808	0.963	0.876	0.896	1.315		
0.50	0.888	1.070	0.973	1.000	1.59	0.836	0.988	0.901	0.920	1.295	0.822	0.964	0.882	0.900	1.236		
0.45	0.904	1.070	0.979	1.001	1.446	0.852	0.991	0.909	0.925	1.224	0.839	0.967	0.891	0.906	1.176		
0.40	0.922	1.073	0.986	1.006	1.345	0.871	0.998	0.919	0.933	1.169	0.857	0.972	0.902	0.915	1.130		
0.35	0.943	1.078	0.997	1.012	1.273	0.892	1.006	0.932	0.943	1.129	0.899	0.979	0.915	0.925	1.096		
0.30	0.968	1.087	1.012	1.024	1.220	0.916	1.018	0.948	0.957	1.100	0.902	0.988	0.932	0.940	1.071		
0.25	0.996	1.099	1.030	1.039	1.184	0.944	1.033	0.969	0.975	1.081	0.930	1.000	0.953	0.958	1.056		
0.20	1.029	1.116	1.055	1.061	1.162	0.977	1.052	0.993	0.999	1.073	0.963	1.016	0.979	0.982	1.051		
0.15	1.069	1.138	1.086	1.089	1.155	1.016	1.076	1.027	1.029	1.076	1.002	1.036	1.011	1.013	1.056		
0.10	1.118	1.168	1.127	1.128	1.164	1.064	1.108	1.069	1.070	1.094	1.050	1.060	1.054	1.054	1.076		
0.05	1.178	1.205	1.181	1.181	1.194	1.123	1.147	1.124	1.123	1.131	1.109	1.092	1.109	1.108	1.115		
Предельные параметры разделения d (%) для разных диапазонов e																	
e = 1.0–0.1	16.9	9.9			—	—	11.2			—	18.3	11.7			—		
	19.6					20.0					20.2						
e = 1.0–0.2	12.9	9.9				—	8.6				14.1	8.1					
	19.6					17.5					17.7						
e = 1.0–0.3	9.9	9.9			—	7.8			10.9	7.4							
	19.6					16.6					15.9						

Примечание. Сокращение "не уд." — частицы не удерживаются.

Табл. П2. Зависимость значений K_V от объемной доли неорганического компонента и предельные параметры разделения для смеси частиц ($\text{SiO}_2 + \text{CaSO}_4 + \text{CaCO}_3 + \text{слюда}$), гидратированной двуокиси железа и для смеси железосодержащих частиц

e	$(fE)^* / 10^6, \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$								
	7.86					5.95			
	Смесь частиц				$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	Смесь частиц		FeO(OH)	Fe_3O_4
	SiO_2	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	CaCO_3	Слюда		$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3$		
1.00	0.326	0.326	0.326	0.326	0.360	0.444	0.444	0.547	0.611
0.90	0.337	0.336	0.334	0.334	0.368	0.453	0.447	0.533	0.583
0.85	0.343	0.341	0.339	0.338	0.373	0.458	0.449	0.527	0.571
0.80	0.349	0.347	0.344	0.344	0.378	0.463	0.451	0.521	0.560
0.75	0.356	0.353	0.350	0.349	0.383	0.469	0.454	0.517	0.551
0.70	0.363	0.360	0.356	0.355	0.389	0.475	0.458	0.513	0.543
0.65	0.371	0.368	0.362	0.361	0.396	0.482	0.461	0.510	0.536
0.60	0.380	0.376	0.369	0.368	0.402	0.490	0.466	0.508	0.530
0.55	0.389	0.384	0.377	0.376	0.410	0.498	0.471	0.507	0.526
0.50	0.399	0.394	0.386	0.384	0.419	0.508	0.477	0.507	0.523
$d_{e=1.0-0.5, \%}$	10.1				7.6	6.7		3.8	7.8
	12.5					10.4			
						15.8			
$d_{e=1.0-0.7, \%}$	5.4				3.9	3.4		3.2	5.9
	8.8					10.4			
						15.8			

Табл. П3. Относительные минимальные радиусы R_{rel}^* частиц с различным содержанием неорганических компонентов разной природы и гуминового вещества, удерживаемых в ультразвуковом поле при различных значениях fE при подаче суспензии сверху. Параметры разделения $d = \pm 5\%$ (выделены курсивом жирным шрифтом) и $d = \pm 10\%$

$fE / 10^6, \text{ Дж/м}^3\text{с}^{-1}$	Неорганический компонент частицы	Объемная доля неорганического компонента частицы, e															
		1.00	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
5.00	SiO_2	1.00	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.16	1.18	1.22	—	—	—	—	—	—
	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	1.02	1.05	1.07	1.08	1.10	1.12	1.14	1.17	1.19	1.22	—	—	—	—	—	—
	CaCO_3	1.06	1.08	1.09	1.10	1.12	1.14	1.16	1.17	1.19	1.22	—	—	—	—	—	—
	Слюда	1.07	1.09	1.08	1.11	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22	—	—	—	—	—	—
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	1.18	1.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10.0	SiO_2	1.00	1.04	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	1.17	1.20	—	—	—	—	—	—	—
	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	0.99	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	1.18	1.20	—	—	—	—	—	—
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	1.08	1.11	1.13	1.14	1.16	1.18	1.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CaCO_3	0.98	1.01	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.11	1.15	1.17	1.20	—	—	—	—	—
	Слюда	0.98	1.01	1.02	1.04	1.06	1.07	1.10	1.12	1.14	1.17	1.20	—	—	—	—	—
	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	1.00	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.17	1.20	—	—	—	—
	FeO(OH)	1.06	1.07	1.07	1.08	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.15	1.17	1.19	—	—	—	—
	Fe_3O_4	1.08	1.09	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	1.17	1.19	—	—	—	—
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	1.08	1.11	1.13	1.14	1.16	1.18	1.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15.0	SiO_2	1.00	1.03	1.05	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17	—	—	—	—	—	—	—	—
	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	0.98	1.02	1.04	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	1.17	—	—	—	—	—	—	—
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	1.06	1.09	1.11	1.12	1.14	1.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CaCO_3	0.96	0.99	1.01	1.03	1.04	1.06	1.08	1.11	1.14	1.16	—	—	—	—	—	—
	Слюда	0.96	0.99	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.13	1.16	—	—	—	—	—	—
	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	0.96	0.98	0.99	1.00	1.02	1.04	1.05	1.07	1.09	1.12	1.15	—	—	—	—	—
	FeO(OH)	0.97	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.05	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	1.15	—	—	—
	Fe_3O_4	0.98	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.17	—	—	—
	$\text{Pb}_2\text{O(OH)}_2$	1.08	1.08	1.08	1.08	1.09	1.09	1.09	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.16	—	—	—
	PbO	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12	1.12	1.13	1.14	1.16	—	—	—
	PbO_2	—	—	1.17	1.17	1.16	1.16	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.16	1.17	—	—	—
	SiO_2	1.00	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	$\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$	0.98	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.12	1.14	—	—	—	—	—	—	—	—
	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$	1.05	1.08	1.10	1.12	1.14	1.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CaCO_3	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.13	—	—	—	—	—	—	—
	Слюда	0.95	0.98	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.12	1.15	—	—	—	—	—	—
	$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	0.94	0.96	0.97	0.99	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	—	—	—	—	—
	FeO(OH)	0.94	0.96	0.97	0.98	0.99	1.01	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.13	—	—	—	—
	Fe_3O_4	0.94	0.96	0.97	0.98	1.00	1.01	1.02	1.04	1.05	1.07	1.10	1.12	1.15	—	—	—
	$\text{Pb}_2\text{O(OH)}_2$	0.99	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.10	1.12	1.15	—	—
	PbO	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.10	1.12	1.14	—	—
	PbO_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Табл. ПЗ (продолжение)

$fE / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	Неорганический компонент частицы	Объемная доля неорганического компонента частицы, ϵ															
		1.00	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
30	SiO ₂	1.00	1.03	1.05	1.07	1.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CaSO ₄ ×2H ₂ O	0.98	1.01	1.03	1.05	1.07	1.09	1.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	1.04	1.07	1.09	1.11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	CaCO ₃	0.95	0.98	1.00	1.01	1.03	1.05	1.07	1.10	—	—	—	—	—	—	—	—
	Слюда	0.94	0.97	0.99	1.00	1.02	1.04	1.06	1.09	1.11	—	—	—	—	—	—	—
	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	0.92	0.95	0.96	0.97	0.99	1.01	1.02	1.05	1.07	1.09	—	—	—	—	—	—
	FeO(OH)	0.92	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	—	—	—	—
	Fe ₃ O ₄	0.91	0.93	0.94	0.96	0.97	0.98	1.00	1.01	1.03	1.05	1.08	1.10	—	—	—	—
	Pb ₂ O(OH) ₂	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.02	1.03	1.05	1.07	1.09	—	—	—
	PbO	0.94	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.02	1.03	1.05	1.07	1.09	—	—	—
	PbO ₂	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.06	1.08	1.10	—	—

Табл. П4. Относительные минимальные радиусы R_{rel}^* частиц с различным содержанием неорганических компонентов разной природы и гуминового вещества, удерживаемых в ультразвуковом поле при различных значениях fE при подаче суспензии снизу. Параметры разделения $d = \pm 5\%$ (выделены курсивом жирным шрифтом) и $d = \pm 10\%$

$fE / 10^6$, Дж/м ³ с ⁻¹	Основа	Объемная доля неорганической основы, ϵ											
		1.00	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
5.0	SiO ₂	1.00	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	—	—	—	—	—
	CaSO ₄ ×2H ₂ O	0.95	0.98	1.00	1.02	1.04	1.07	1.09	1.12	1.15	—	—	—
	Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	0.97	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.16	—	—	—
	CaCO ₃	—	—	—	0.95	0.97	0.99	1.02	1.05	1.08	1.11	1.14	—
	Слюда	—	—	—	—	0.96	0.98	1.00	1.03	1.06	1.09	1.13	—
	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	0.96	0.99	1.03	1.07
	FeO(OH)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.98
	Fe ₃ O ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.96
10.0	SiO ₂	1.00	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	—	—	—	—	—
	CaSO ₄ ×2H ₂ O	0.96	0.99	1.01	1.03	1.05	1.08	1.10	1.13	1.16	—	—	—
	Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	0.99	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.16	—	—	—	—
	CaCO ₃	—	—	—	0.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.09	1.13	1.16	—
	Слюда	—	—	—	0.96	0.98	1.00	1.02	1.05	1.08	1.11	1.15	—
	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	0.98	1.00	1.03	1.06	1.10
	FeO(OH)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.96	0.99	1.02
	Fe ₃ O ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.97	1.00
30.0	SiO ₂	1.00	1.04	1.05	1.07	1.10	1.12	1.15	1.18	—	—	—	—
	CaSO ₄ ×2H ₂ O	0.97	1.01	1.02	1.04	1.06	1.09	1.11	1.14	1.16	—	—	—
	Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	1.02	1.05	1.07	1.08	1.10	1.13	1.15	1.18	—	—	—	—
	CaCO ₃	—	—	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	1.08	1.11	1.14	1.18	—
	Слюда	—	—	—	0.98	1.00	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	—
	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.99	1.01	1.03	1.06	1.09	1.12
	FeO(OH)	—	—	—	—	—	—	—	—	0.98	1.01	1.03	1.06
	Fe ₃ O ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.99	1.01	1.05
80.0	SiO ₂	1.00	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14	1.17	—	—	—	—
	CaSO ₄ ×2H ₂ O	0.97	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13	1.16	—	—	—
	Fe ₂ O ₃ ×H ₂ O	1.02	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.18	—	—	—	—
	CaCO ₃	1.02	1.05	1.07	1.09	1.11	1.13	1.15	1.18	—	—	—	—
	Слюда	—	—	0.97	0.98	1.00	1.03	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	—
	Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃	—	—	—	—	—	0.97	0.99	1.02	1.04	1.13	1.10	1.13
	FeO(OH)	—	—	—	—	—	—	—	0.97	0.99	1.07	1.04	1.07
	Fe ₃ O ₄	—	—	—	—	—	—	—	—	0.98	1.02	1.03	1.06

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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). Пушино, 1981. С. 174.
2. Князьков Н.Н., Шильников Г.В. Ультразвуковое концентрирование клеток культур тканей // Бюл. эксперим. биол. и мед. 1996. № 3. С. 312–314.
3. Coakley W.T. Ultrasonic Separations in Analytical Biotechnology // Trends in biotechnology. 1997. V. 15. P. 506–511.
4. Gröschl M. Ultrasonic Separation of Suspended Particles. Part I. Fundamentals // Acta acustica (Acustica). 1998. V. 84. P. 432–447.
5. Gröschl M. Ultrasonic Separation of Suspended Particles. Part II. Design and Operation of Separation Devices // Acta acustica (Acustica). 1998.

- V. 84. P. 632–642.
6. Coakley W.T., Hawkes J.J., Sobanski M.A. et al. Analytical Scale Ultrasonic Standing Wave Manipulation of Cells and Microparticles // *Ultrasonics*. 2000. V. 38. P. 638–641.
 7. Князьков Н.Н. и др. Методологические основы применения ультразвукового поля стоячей волны для проточного фракционирования частиц различной природы // *Научное приборостроение*. 2006. Т. 16, № 1. С. 23–34.
 8. Wiklund M., Spegel P., Nilsson S., Hertz H.M. Ultrasonic-Trap-Enhanced Selectivity in Capillary Electrophoresis // *Ultrasonics*. 2003. V. 41. P. 329–333.
 9. Petersson F., Nilsson A., Jönsson H., Laurell T. Carrier Medium Exchange through Ultrasonic Particle Switching on Microfluidic Channels // *Anal. Chem.* 2005. V. 77, N 5. P. 1216–1221.
 10. Kapishnikov S., Kantsler V., Steinberg V. Continuous Particle Size Separation and Size Sorting Using Ultrasound in a Microchannel // *J. Stat. Mech.* 2006, January. P01012. 14 p.
 11. Townsend R.J. Modeling of a Microfluid Ultrasonic Particle Separator // *PhD Thesis*. 2006. 261 p.
 12. Laurell T., Petersson F., Nilsson A. Chip Integrated Strategies for Acoustic Separation and Manipulation of Cells and Particles // *Chem. Soc. Rev.* 2007. V. 36, N 3. P. 492–506.
 13. Neild A., Oberti S., Dual J. Design, Modeling and Characterization of Microfluidic Devices for Ultrasonic Manipulation // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2007. V. 121, N 2. P. 452–461.
 14. Князьков Н.Н., Макарова Е.Д., Морев С.А. Ультразвуковое проточное фракционирование частиц различной природы. I. Предельные параметры фракционирования неорганических частиц // *Научное приборостроение*. 2007. Т. 17, № 1. С. 3–14.
 15. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
 16. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы. М.—Л.: Энергия, 1965. 248 с.
 17. Masudo T., Okada T. Ultrasonic Radiation — Novel Principle for Microparticle Separation // *Anal. Sci.* 2001. V. 17, Suppl. (ICAS2001). P. i1341–i1344.
 18. Masudo T., Okada T. Particle Characterization and Separation by a Coupled Acoustic — Gravity Field // *Anal. Chem.* 2001. V. 73. P. 3467–3471.
 19. Limaye M.S., Coakley W.T. Clarification of Small Volume Microbial Suspensions in an Ultrasonic Standing Wave // *J. Appl. Microbiology*. 1998. V. 84. P. 1035–1042.

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Материал поступил в редакцию 17.01.2008.

ULTRASONIC FLOW-THROUGH FRACTIONING OF PARTICLES OF DIFFERENT KINDS. II. PHILOSOPHY OF SELECTING OPTIMAL CONDITIONS FOR FRACTIONATING ONE-COMPONENT DIFFERENT-NATURE PARTICLES AND HETEROGENEOUS (TWO-COMPONENT) PARTICLES. ULTIMATE SEPARATION PARAMETERS

N. N. Knyazkov, E. D. Makarova, A. D. Rabizhanovich

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg

A model of ultrasonic (US) flow fractionation has been elaborated and conditions have been revealed, under which the model can be adequately used to fractionate one- and two-component particles of natural water suspensions containing inorganic components of different natures. Size sorting of inorganic and heterogeneous particles (inorganic component + humic substances) have been simulated for the cases of parallel superposition of US field and flow in a vertically installed chamber for various schemes of flow organization in a broad range of field parameters ($1\div 4.5$ MHz; $1\div 20$ J·m⁻³). Calculations were performed for particles with densities of $1200\div 9000$ kg·m⁻³; volumetric content of inorganic base was 1.0 to 0.0; i.e., the calculations covered the entire range of natural particulate matters. Algorithms for selecting optimal US field parameters and flow velocities for fractionating mixtures of particles of different natures and compositions according to physical properties of

the components have been developed. Ultimate size sorting parameters have been estimated. We have shown that this technique can be used in various ways depending on specific conditions, such as ultrasonic field parameters, flow velocity and flow direction, for sequential multi-stage size sorting of particles, single-stage extraction of narrow fractions of particles, fractionation of particles by density and nature. Optimal conditions for solving various fractionation problems have been determined. A method for integral qualitative estimation of natural water composition according to relative distribution of different-nature particles layers in stationary standing wave US field is proposed.