



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B06B 1/06 (2016.11)

(21)(22) Заявка: 2015116893, 13.09.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
13.09.2013

Дата регистрации:
29.03.2018

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
02.10.2012 US 61/708,641;
15.03.2013 US 13/844,754

(43) Дата публикации заявки: 27.11.2016 Бюл. № 33

(45) Опубликовано: 29.03.2018 Бюл. № 10

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 05.05.2015

(86) Заявка РСТ:
US 2013/059640 (13.09.2013)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2014/055219 (10.04.2014)

Адрес для переписки:
129090, Москва, ул. Б. Спасская, 25, стр. 3, ООО
"Юридическая фирма Городисский и Партнеры"

(72) Автор(ы):

ЛИПКЕНС Барт (US),
ДИОНН Джейсон (US),
ПРЕС Мл. Уолтер (US),
КЕННЕДИ Ш Томас Дж. (US)

(73) Патентообладатель(и):

ФЛОУДИЗАЙН СОНИКС, ИНК. (US)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 20110123392 A1, 26.05.2011. US
2011278218 A1, 17.11.2011. Bart Lipkens,
Michael Costolo, Edward Rietman. The Effect
of Frequency Sweeping and Fluid Flow on
Particle Trajectories in Ultrasonic Standing
Waves // IEEE SENSORS JOURNAL, VOL.
8, NO. 6, JUNE 2008 (стр. 667-677). US 5355048
A1, 11.10.1994. RU 2445748 C1, 20.03.2012. US
4583018 A1, (см. прод.)

(54) ТЕХНОЛОГИЯ СЕПАРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ АКУСТОФЕРЕЗА, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ МНОГОМЕРНЫЕ СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

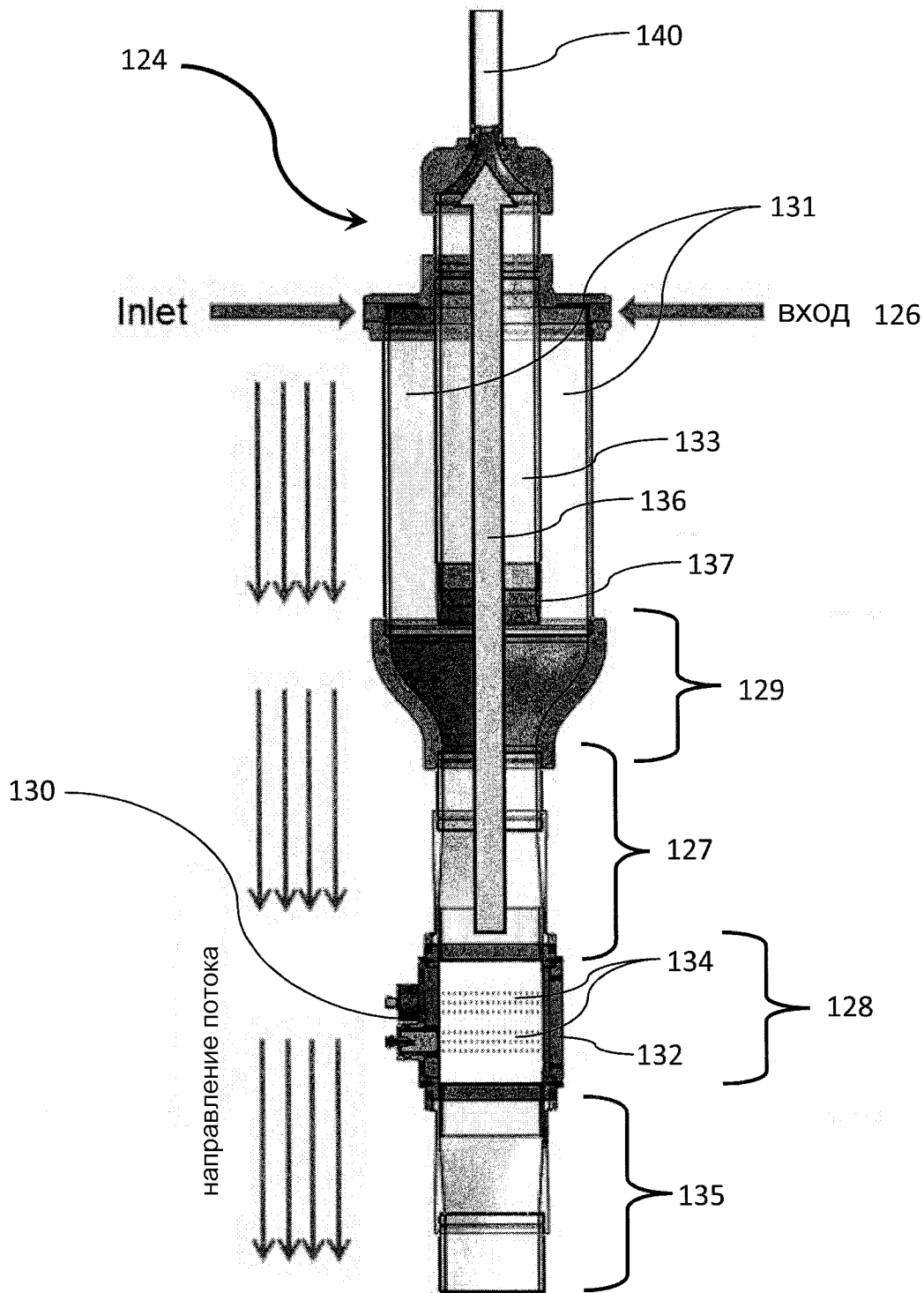
(57) Реферат:

Изобретение относится к акустике, в частности к акустическим средствам сепарации. Устройство для сепарации с помощью акустофереза содержит проточную камеру, имеющую вход и выход, ультразвуковой преобразователь, расположенный на стенке проточной камеры, причем преобразователь включает в себя пьезоэлектрический материал, приводимый в действие сигналом напряжения с возможностью создания многомерной стоячей волны в проточной камере, причём многомерная стоячая

волна включает в себя аксиальный компонент и боковой компонент, которые имеют одинаковый порядок величины, отражатель, расположенный на стенке на противоположной стороне проточной камеры от ультразвукового преобразователя. Ультразвуковой преобразователь содержит корпус, имеющий верхний конец, нижний конец и внутренний объем, кристалл на нижнем конце корпуса, имеющий подвергающуюся воздействию внешнюю поверхность и внутреннюю поверхность, причём

кристалл способен колебаться при приведении в действие с помощью сигнала напряжения, слой подложки, контактирующий с внутренней поверхностью кристалла, причем слой подложки выполнен из по существу акустически

прозрачного материала. Акустически прозрачный материал представляет собой бальзовое дерево, пробку или поролон. Технический результат – повышение эффективности сепарации. 6 н. и 33 з.п. ф-лы, 4 табл., 68 ил.



Фиг. 27А

(56) (продолжение):

15.04.1986. US 6818128 B2, 16.11.2004. US 7489066 B2, 10.02.2009. US 5355048 A1, 11.10.1994. WO 2009071733 A1, 11.06.2009. US 20080185350 A1, 07.08.2008. US 20090188800 A1, 30.07.2009. US 7108137 B2, 19.09.2006. US 20120152858 A1, 21.06.2012. US 20120163126 A1, 28.06.2012. RU 2067079 C1, 27.09.1996.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
B06B 1/06 (2016.11)

(21)(22) Application: **2015116893, 13.09.2013**

(24) Effective date for property rights:
13.09.2013

Registration date:
29.03.2018

Priority:

(30) Convention priority:
02.10.2012 US 61/708,641;
15.03.2013 US 13/844,754

(43) Application published: **27.11.2016 Bull. № 33**

(45) Date of publication: **29.03.2018 Bull. № 10**

(85) Commencement of national phase: **05.05.2015**

(86) PCT application:
US 2013/059640 (13.09.2013)

(87) PCT publication:
WO 2014/055219 (10.04.2014)

Mail address:
129090, Moskva, ul. B. Spasskaya, 25, str. 3, OOO
"Yuridicheskaya firma Gorodisskij i Partnery"

(72) Inventor(s):

LIPKENS Bart (US),
DIONN Dzhejson (US),
PRES Ml. Uolter (US),
KENNEDI III Tomas Dzh. (US)

(73) Proprietor(s):

FLOUDIZAJN SONIKS, INK. (US)

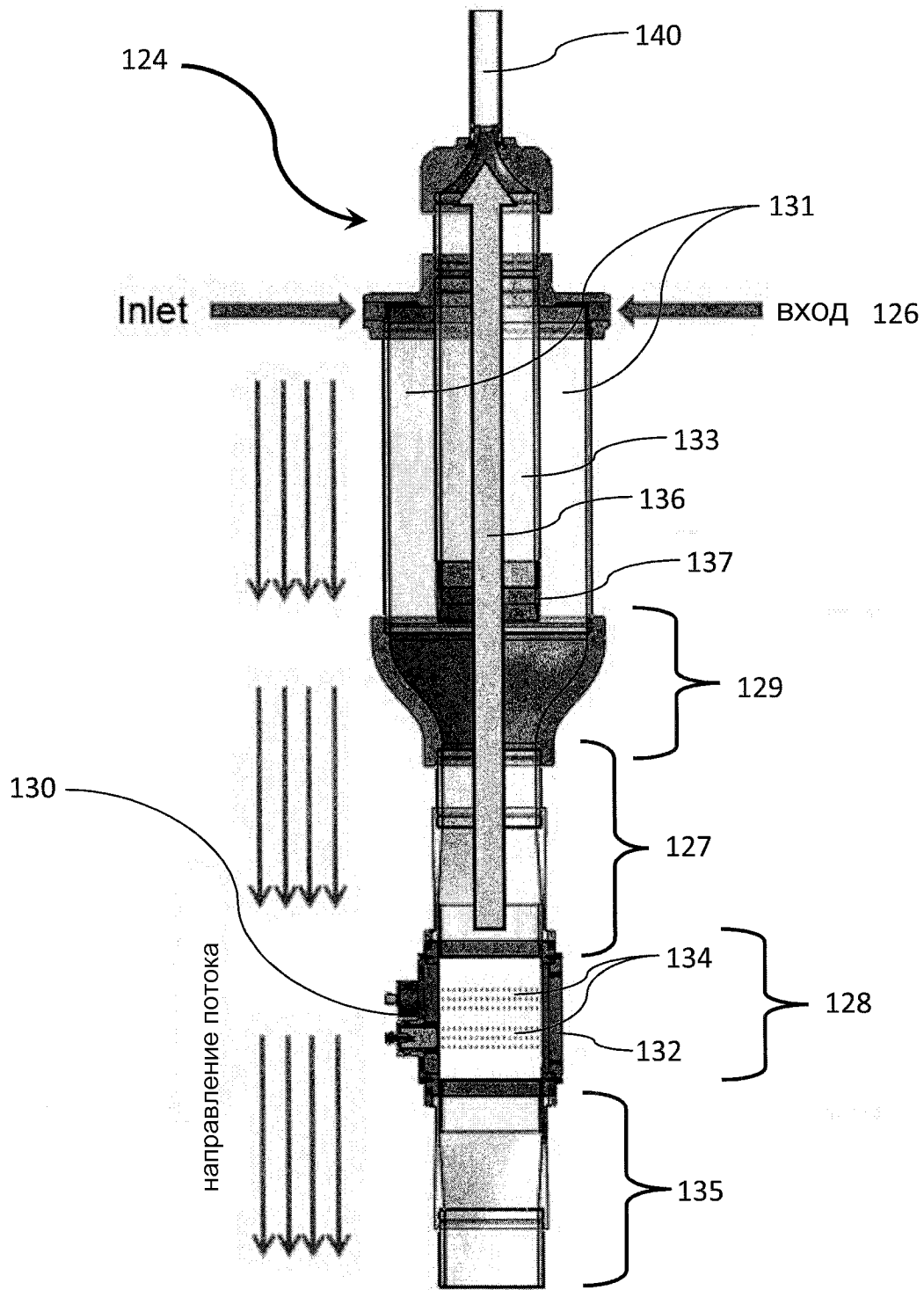
(54) **TECHNOLOGY OF SEPARATION BY MEANS OF ACOUSTOFORESIS USING MULTIDIMENSIONAL STANDING WAVES**

(57) Abstract:

FIELD: acoustics.

SUBSTANCE: invention relates to acoustics particularly to means of acoustic separation. Device for separation by means of acoustophoresis contains the flow chamber that has the inlet and the outlet, the ultrasonic transducer that is located on the wall of the flow chamber, where the transducer includes the piezoelectric material, it is driven by the voltage signal with the possibility of creating the multi-dimensional standing wave in the flow chamber, where the multidimensional standing wave includes the axial component and the lateral component that are of the

same order of magnitude, reflector arranged on the wall on the side of the flow chamber that is opposite to the transducer. Ultrasonic transducer comprises the housing that has the upper end, the lower end and the internal volume, the crystal on the lower end of the housing that has the exposed outer surface and the inner surface, where the crystal is able to oscillate when activated by means of the voltage signal, the substrate layer in contact with the inner surface of the crystal, where the substrate layer is made of the material that is acoustically transparent in fact. Acoustically transparent material made of the balsa tree, the cork or foam rubber.



Фиг. 27А

RU 2649051 C2

RU 2649051 C2

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Настоящая заявка представляет собой частичное продолжение заявки на патент США № 13/844,754, поданной 15 марта 2013 г., которая имеет приоритет на основании предварительной заявки на патент США № 61/611,159, поданной 15 марта 2012 г., и предварительной заявки на патент США № 61/611,240, также поданной 15 марта 2012 г., и предварительной заявки на патент США № 61/754,792, поданной 21 января 2013 г. Эти заявки включены в настоящий документ путем ссылки в полном объеме.

Акустофорез представляет собой сепарацию частиц с использованием высокоинтенсивных звуковых волн. Уже давно известно, что высокоинтенсивные стоячие волны звука могут прикладывать силы к частицам. Стоячая волна имеет профиль давления, который представляется «стоящим» неподвижно с течением времени. Профиль давления в стоячей волне изменяется от областей высокого давления (узлов) до областей низкого давления (пучностей). Стоячие волны производятся в акустических резонаторах. Общие примеры акустических резонаторов включают в себя многие музыкальные духовые инструменты, такие как органные трубы, флейты, кларнеты и валторны.

Необходимы эффективные технологии сепарации для многокомпонентных струй жидкости, которые исключают какие-либо отходы и уменьшают требуемую энергию, тем самым содействуя устойчивой окружающей среде.

РАСКРЫТИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

Настоящее изобретение относится к системам и устройствам для акустофореза предпочтительно в крупном масштабе. Устройства используют один или более уникальных ультразвуковых преобразователей, которые описаны здесь, или массив таких преобразователей. Преобразователь приводится в действие на частотах, которые производят многомерные стоячие волны.

В некоторых вариантах выполнения раскрыто устройство, которое включает в себя проточную камеру с по меньшей мере одним входом и по меньшей мере одним выходом, через которые протекает смесь основной текучей среды и по меньшей мере одной из второй текучей среды и частицы. По меньшей мере один ультразвуковой преобразователь встроен в стенку указанной проточной камеры или расположен снаружи стенки проточной камеры и приводится в действие сигналом колебательного, периодического, модулированного или импульсного напряжения ультразвуковых частот, который приводит преобразователь в действие в моде более высокого порядка колебания с возможностью создания многомерных стоячих волн в проточном канале. Преобразователь включает в себя керамический кристалл или другой пьезоэлектрический материал, имеющий определенные характеристики колебания. Твердый или гибкий отражатель, который может иметь неплоскую поверхность, расположен на стенке на противоположной стороне проточной камеры от преобразователя. Устройство может дополнительно включать в себя вход устройства, который снабжает кольцеобразную камеру, а также два выхода, расположенные на различных стенках устройства.

В других вариантах выполнения раскрыт способ сепарации основной текучей среды от по меньшей мере одной из второй текучей среды и/или частицы. Способ содержит этап, на котором пропускают основную текучую среду в проточную камеру, имеющую резонатор и сборное гнездо или отверстие, и приводят преобразователь в действие с помощью сигнала колебательного, периодического, модулированного или импульсного напряжения с возможностью создания стоячих волн многомерного свойства с резонатором и сбора по меньшей мере одной из второй текучей среды и/или частицы

в сборном гнезде.

В еще других вариантах выполнения устройство содержит проточную камеру с по меньшей мере одним входом и по меньшей мере одним выходом, через которые протекает смесь основной текучей среды и по меньшей мере одной из второй текучей среды и частицы. Множество ультразвуковых преобразователей встроены в стенку указанной проточной камеры или расположены снаружи стенки проточной камеры. Каждый из преобразователей включает в себя керамический кристалл или другой пьезоэлектрический материал, приводимый в действие сигналом колебательного, периодического, модулированного или импульсного напряжения ультразвуковых частот, который приводит преобразователи в действие в режиме более высокого уровня колебания с возможностью создания многомерных стоячих волн в проточном канале. Твердый или гибкий отражатель расположен на стенке на противоположной стороне проточной камеры от преобразователей. Устройство может дополнительно включать в себя вход устройства, который снабжает кольцеобразную камеру, а также два выхода, расположенные на различных стенках устройства.

Эти и другие неограничивающие характеристики более конкретно описаны ниже.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

Ниже приводится краткое описание чертежей, которые представлены для целей иллюстрации примерных вариантов выполнения, раскрытых здесь, а не для целей их ограничения.

Фиг. 1А представляет собой изображение, иллюстрирующее функционирование акустофоретического сепаратора, со второй текучей средой или частицей, менее плотной, чем основная текучая среда.

Фиг. 1В представляет собой изображение, иллюстрирующее функционирование акустофоретического сепаратора, со второй текучей средой или частицей, более плотной, чем основная текучая среда.

Фиг. 2А показывает распределение размера клеток, производимое анализатором размера частиц Jorin ViPA при отсутствии акустического поля. Горизонтальная ось представляет собой класс размера в мкм, а вертикальная ось представляет собой процент частиц, отобранных по объему.

Фиг. 2В показывает распределение размера клеток, производимое анализатором размера частиц Jorin ViPA при наличии акустического поля. Горизонтальная ось представляет собой класс размера в мкм, а вертикальная ось представляет собой процент частиц, отобранных по объему.

Фиг. 3 показывает акустофоретический сепаратор, имеющий множество преобразователей.

Фиг. 4А представляет собой подробный вид рассеивателя, используемого в качестве входа в сепараторе на Фиг. 3.

Фиг. 4В представляет собой подробный вид рассеивателя альтернативного входа, который может использоваться с сепаратором на Фиг. 3.

Фиг. 5 представляет собой изображение поперечного сечения традиционного ультразвукового преобразователя.

Фиг. 6 представляет собой пластину износа традиционного преобразователя.

Фиг. 7А представляет собой изображение поперечного сечения ультразвукового преобразователя настоящего изобретения. Внутри преобразователя имеется воздушный зазор, а слой подложки или пластина износа отсутствуют.

Фиг. 7В представляет собой изображение поперечного сечения ультразвукового преобразователя настоящего изобретения. Внутри преобразователя имеется воздушный

зазор и имеются слой подложки или пластина износа.

Фиг. 8 представляет собой компьютерную модель акустофоретического сепаратора, смоделированного для создания Фиг. 9 и Фиг. 11-17.

Фиг. 9А-9D показывают имитации воздействия сил на частицу в акустофоретическом сепараторе. Фиг. 9А показывает аксиальную силу для одной стоячей волны. Надпись 5
вверху шкалы справа представляет собой « $x 10^{-11}$ ». Фиг. 9В показывает боковую силу для одной стоячей волны. Надпись вверху шкалы справа представляет собой « $x 10^{-13}$ ». Фиг. 9С показывает аксиальную силу с многомодовым возбуждением. Надпись вверху 10
шкалы справа представляет собой « $x 10^{-10}$ ». Фиг. 9D показывает боковую силу с многомодовым возбуждением. Надпись вверху шкалы справа представляет собой « $x 10^{-11}$ ». Для всех чертежей горизонтальная ось представляет собой положение по оси X на Фиг. 8 внутри камеры в дюймах, а вертикальная ось представляет собой положение по оси Y на Фиг. 8 внутри камеры в дюймах. Шкала справа каждого чертежа выражена 15
в Ньютонах.

Фиг. 10 представляет собой изображение смоделированного кристалла, показывающее смещение формы моды в кристалле. Надпись для оси x читается как « $x 10^{-3}$ ». Надпись для оси z включает в себя « $x 10^{-3}$ » и « $x 10^{-4}$ ».

Фиг. 11-17 представляют собой дополнительные имитации воздействий сил на частицу 20
в акустофоретическом сепараторе. Горизонтальная ось представляет положение по оси X на Фиг. 8 внутри камеры в дюймах, а вертикальная ось представляет собой положение по оси Y на Фиг. 8 внутри камеры в дюймах. Шкала справа выражена в Ньютонах (Н) для всех чертежей, за исключением Фиг. 13. На Фиг. 13 шкала справа 25
выражена в Паскалях (Па).

Надпись вверху шкалы справа на Фиг. 11 представляет собой « $x 10^{-10}$ ».

Надпись вверху шкалы справа на Фиг. 12 представляет собой « $x 10^{-10}$ ».

Надпись вверху шкалы справа на Фиг. 13 представляет собой « $x 10^6$ ». Надпись вверху 30
около указывающего вверх треугольника читается как « $2,5166 \times 10^6$ ». Надпись внизу около указывающего вниз треугольника читается как «507,16». Эти два треугольника показывают максимальное и минимальное значения, изображенные на этом чертеже.

Надпись вверху шкалы справа на Фиг. 14 представляет собой « $x 10^{-12}$ ». Надпись 35
вверху около указывающего вверх треугольника читается как « $4,3171 \times 10^{-10}$ ». Надпись внизу около указывающего вниз треугольника читается как « $-4,3171 \times 10^{-10}$ ». Эти два треугольника показывают максимальное и минимальное значения, изображенные на этом чертеже.

Надпись вверху шкалы справа на Фиг. 15 представляет собой « $x 10^{-11}$ ». Надпись 40
вверху около указывающего вверх треугольника читается как « $2,0156 \times 10^{-9}$ ». Надпись внизу около указывающего вниз треугольника читается как « $2,0058 \times 10^{-9}$ ». Эти два треугольника показывают максимальное и минимальное значения, изображенные на этом чертеже.

Надпись вверху шкалы справа на Фиг. 16 представляет собой « $x 10^{-12}$ ». Надпись 45
вверху около указывающего вверх треугольника читается как « $1,4606 \times 10^{-10}$ ». Надпись внизу около указывающего вниз треугольника читается как « $-1,4604 \times 10^{-10}$ ». Эти два

треугольника показывают максимальное и минимальное значения, изображенные на этом чертеже.

Надпись сверху шкалы справа на Фиг. 17 представляет собой « $x 10^{-11}$ ». Надпись
5
сверху около указывающего вверх треугольника читается как « $4,0239 \times 10^{-10}$ ». Надпись
внизу около указывающего вниз треугольника читается как « $-4,4353 \times 10^{-10}$ ». Эти два
треугольника показывают максимальное и минимальное значения, изображенные на
этом чертеже.

Фиг. 18 представляет собой график, показывающий отношение силы акустического
10
излучения, силы плавучести и силы сопротивления Стокса к размеру частицы.
Горизонтальная ось выражена в микрометрах (мкм), а вертикальная ось выражена в
Ньютонах (Н).

Фиг. 19 представляет собой снимок квадратного преобразователя и круглого
преобразователя для использования в акустофоретическом сепараторе.

Фиг. 20 представляет собой график амплитуды полного электрического
15
сопротивления в зависимости от частоты для квадратного преобразователя,
приводимого в действие на различных частотах.

Фиг. 21А иллюстрирует конфигурацию линий захвата для семи из максимальных
амплитуд на Фиг. 20 от направления, ортогонального к потоку текучей среды.

Фиг. 21В представляет собой вид в перспективе, иллюстрирующий сепаратор.
20
Показаны направление потока текучей среды и линии захвата.

Фиг. 21С представляет собой вид из входа текучей среды в направлении потока
текучей среды (стрелка 114) на Фиг. 21В, показывающий узлы захвата стоячей волны,
где частицы будут улавливаться.

Фиг. 21D представляет собой вид в разрезе через поверхность преобразователей на
25
конфигурации линий захвата по стрелке 116, которая показана на Фиг. 21В.

Фиг. 22 представляет собой снимок конфигурации девяти линий захвата стоячей
волны, созданной многомодальным смещением преобразователя для водонефтяной
эмульсии.

Фиг. 23 представляет собой увеличенный снимок Фиг. 22, показывающий верхние
30
три линии захвата конфигурации девяти линий захвата.

Фиг. 24 представляет собой компьютерную имитацию амплитуды акустического
давления (правая шкала в Па) и смещения преобразователя вне плоскости (левая шкала
35
в метрах). Надпись сверху левой шкалы читается как « $x 10^{-7}$ ». Надпись сверху левой
шкалы около указывающего вверх треугольника читается как « $1,473 \times 10^{-6}$ ». Надпись
внизу левой шкалы около указывающего вниз треугольника читается как « $1,4612 \times 10^{-10}$ ».
Надпись сверху правой шкалы читается как « $x 10^6$ ». Надпись сверху правой шкалы
40
около указывающего вверх треугольника читается как « $1,1129 \times 10^6$ ». Надпись внизу
правой шкалы около указывающего вниз треугольника читается как «7,357».

Треугольники показывают максимальное и минимальное значения, изображенные на
этом чертеже, для заданной шкалы. Горизонтальная ось представляет собой положение
внутри камеры по оси X на Фиг. 8 в дюймах, а вертикальная ось представляет собой
45
положение внутри камеры по оси Y на Фиг. 8 в дюймах.

Фиг. 25 и Фиг. 26 показывают конфигурации массива преобразователей.

Фиг. 27А показывает акустофоретический сепаратор для сепарации плавучих
материалов для использования с преобразователями на Фиг. 23 и 24.

Фиг. 27В представляет собой увеличенный вид потока текучей среды вблизи

пересечения стенки 129 профилированного сопла и сборного канала 137.

Фиг. 28 представляет собой компьютерную имитацию амплитуды акустического давления ультразвуковых волн, формируемых массивом преобразователей.

5 Фиг. 29 представляет собой снимок, показывающий линии захвата для капель нефти в ультразвуковых волнах, формируемых массивом преобразователей.

Фиг. 30 представляет собой снимок, показывающий линии захвата для капель нефти в ультразвуковых волнах, формируемых массивом преобразователей.

Фиг. 31 представляет собой компьютерную имитацию амплитуды акустического давления.

10 Фиг. 32 показывает изображение симметричных волн Лэмба и антисимметричных волн Лэмба.

Фиг. 33 показывает смещение в плоскости и вне плоскости кристалла, где имеются составные волны.

15 Фиг. 34 иллюстрирует моду колебаний (1, 1) прямоугольной пластины. Фиг. 34А представляет собой вид в перспективе. Фиг. 34В представляет собой вид по длине пластины. Фиг. 34С представляет собой вид по ширине пластины. Фиг. 34D показывает смещение в плоскости прямоугольной пластины, колеблющейся на моде (1, 1).

20 Фиг. 35 иллюстрирует моду колебаний (1, 2) прямоугольной пластины. Фиг. 35А представляет собой вид в перспективе. Фиг. 35В представляет собой вид по длине пластины. Фиг. 35С представляет собой вид по ширине пластины.

Фиг. 36 иллюстрирует моду колебаний (2, 1) прямоугольной пластины. Фиг. 36А представляет собой вид в перспективе. Фиг. 36В представляет собой вид по длине пластины. Фиг. 36С представляет собой вид по ширине пластины.

25 Фиг. 37 иллюстрирует моду колебаний (2, 2) прямоугольной пластины. Фиг. 37А представляет собой вид в перспективе. Фиг. 37В представляет собой вид по длине пластины. Фиг. 37С представляет собой вид по ширине пластины.

30 Фиг. 38 иллюстрирует моду колебаний (3, 3) прямоугольной пластины. Фиг. 38А представляет собой вид в перспективе. Фиг. 38В представляет собой вид по ширине пластины. Фиг. 38С представляет собой вид по длине пластины. Фиг. 38D показывает смещение в плоскости прямоугольной пластины, колеблющейся на моде (3, 3).

Фиг. 39 показывает поле давления, создаваемое в воде на моде колебаний (1, 1). Фиг. 39В показывает поле давления, создаваемое в воде на моде колебаний (2, 2). Фиг. 39С показывает поле давления, создаваемое в воде на моде колебаний (3, 3).

35 Фиг. 40А показывает разобранный вид акустофоретического сепаратора, используемого в биофармацевтических применениях.

Фиг. 40В показывает разобранный вид укомплектованного акустофоретического сепаратора с двумя акустическими камерами.

40 Фиг. 41А представляет собой график, показывающий эффективность удаления клеток из среды при использовании анализатора жизнеспособности клеток Beckman Coulter для одного эксперимента.

Фиг. 41В представляет собой график, показывающий эффективность удаления клеток из среды при использовании анализатора жизнеспособности клеток Beckman Coulter для другого эксперимента.

ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

45 Настоящее изобретение может быть более легко понято при обращении к нижеследующему подробному описанию желаемых вариантов выполнения и примеров, включенных в настоящий документ. В нижеследующем описании и формуле изобретения, которые следуют далее, будут упоминаться несколько терминов, которые следует

определять как имеющие следующие значения.

Формы единственного числа включают в себя формы множественного числа кроме тех случаев, когда контекст явно указывает на другое.

5 Выражение «содержащий», которое используется в описании и в формуле изобретения, может включать в себя варианты выполнения «состоящий из» и «состоящий по существу из».

10 Числовые значения следует понимать как включающие в себя числовые значения, которые являются одинаковыми при приведении к одинаковому количеству значащих цифр, и числовые значения, которые отличаются от изложенного значения менее, чем на экспериментальную погрешность традиционной технологии измерения, относящейся к типу, описанному в настоящей заявке, для определения значения.

15 Все диапазоны, раскрытые здесь, включают в себя перечисленную конечную точку и являются независимо комбинируемыми (например, диапазон «от 2 граммов до 10 граммов» является включающим в себя конечные точки 2 грамма и 10 граммов и все промежуточные значения).

20 Как используется здесь, может быть применен язык аппроксимации для модификации любого количественного представления, которое может изменяться, не приводя к изменению основной функции, к которой оно относится. Соответственно, значение, модифицированное выражением или выражениями, такими как «около» и «по существу», может быть не ограничено определенным точным значением. Модификатор «около» также следует считать раскрывающим диапазон, ограниченный абсолютными значениями двух конечных точек. Например, выражение «от около 2 до около 4» также раскрывает диапазон «от 2 до 4».

25 Следует отметить, что многие выражения, используемые здесь, являются относительными выражениями. Например, выражения «верхний» и «нижний» относятся друг к другу по положению, т.е. верхний компонент расположен на большей высоте, чем нижний компонент в заданной ориентации, но эти выражения могут изменяться при переворачивании устройства. Выражения «вход» и «выход» относятся к текучей среде, протекающей через них в отношении заданной конструкции, например, текучая среда втекает через вход в конструкцию и вытекает через выход из конструкции.

30 Выражения «ближний» и «дальний» относятся к направлению, в котором текучая среда протекает через различные компоненты, т.е. текучая среда протекает через ближний компонент до протекания через дальний компонент. Следует отметить, что в петле первый компонент может быть описан и как расположенный ближе, и как расположенный дальше второго компонента.

35 Выражения «горизонтальный» и «вертикальный» используются для обозначения направления относительно абсолютного ориентира, т.е. уровня земли. Однако эти выражения не следует толковать как требующие, чтобы конструкции были абсолютно параллельными или абсолютно перпендикулярными друг другу. Например, первая вертикальная конструкция и вторая вертикальная конструкция не обязательно являются параллельными друг другу. Выражения «верх» и «низ» или «основание» используются для отнесения к поверхностям, где верх всегда выше, чем низ/основание относительно абсолютного ориентира, т.е. поверхности земли. Выражения «выше» и «ниже» или «вверх» и «вниз» также относятся к абсолютному ориентиру; восходящий поток всегда противодействует силе тяжести.

Настоящая заявка относится к «одинаковому порядку величины». Два числа имеют одинаковый порядок величины, если частное от деления большего числа на меньшее число представляет собой значение менее 10.

Необходимы эффективные технологии сепарации для многокомпонентных струй жидкости, которые исключают какие-либо отходы и уменьшают требуемую энергию и в связи с этим способствуют устойчивой окружающей среде. Технология акустофоретического фазового сепаратора со скоростью потока большого объема, использующая ультразвуковые стоячие волны, обеспечивает преимущество отсутствия расходных материалов, отсутствия формируемых отходов и наличия низкого расхода энергии. Технология является эффективной при удалении частиц значительно различающихся размеров, включая сепарацию частиц микрометрового и менее микрометрового размера. Примеры акустических фильтров/коллекторов, использующих акустофорез, могут быть обнаружены в принадлежащих заявителю заявках на патент США № 12/947,757; 13/085,299; 13/216,049; и 13/216,035, все содержимое каждой из которых настоящим полностью включено в данный документ путем ссылки.

Платформенная технология, описанная здесь, обеспечивает инновационное решение, которое включает в себя акустофоретический фазовый сепаратор со скоростью потока большего объема на основе ультразвуковых стоячих волн с преимуществом отсутствия расходных материалов, отсутствия формируемых отходов и наличия низкого расхода энергии. Акустофорез представляет собой маломощный, без перепадов давления, без засоров твердотельный подход к удалению частиц из дисперсий текучей среды: т.е. он используется для достижения сепараций, которые более обычно выполняются с помощью пористых фильтров, но он не имеет ни одного из недостатков фильтров. В частности, настоящее изобретение обеспечивает системы, которые работают в макромасштабе, для сепараций в текучих системах с высокими скоростями потока. Акустический резонатор выполнен с возможностью создания высокоинтенсивной трехмерной ультразвуковой стоячей волны, которая приводит к силе акустического излучения, которая больше, чем комбинированные воздействия сопротивления текучей среды и плавучести или силы тяжести, и в связи с этим способна захватывать (т.е. удерживать неподвижно) суспензионную фазу, чтобы обеспечивать больше времени для акустической волны для увеличения концентрации, агломерации и/или слипания частиц. Настоящие системы обладают способностью создания полей ультразвуковых стоячих волн, которые могут захватывать частицы в полях потока с линейной скоростью, составляющей от 0,1 мм/с, до скоростей, превышающих 1 см/с. Эта технология обеспечивает экологичную и устойчивую альтернативу для сепарации вторичных фраз со значительным уменьшением расхода энергии. Превосходные эффективности сепарации частиц были продемонстрированы для размеров частиц до одного мкм.

Акустофоретическая технология сепарации применяет ультразвуковые стоячие волны для захвата, т.е. удержания неподвижно, частиц вторичных фаз в струе основной текучей среды. Это является важным отличием от предыдущих подходов, где траектории частиц изменялись всего лишь с помощью воздействия силы акустического излучения. Рассеивание акустического поля от частиц приводит к трехмерной силе акустического излучения, которая действует в качестве трехмерного поля захвата. Сила акустического излучения пропорциональна объему частицы (например, кубу радиуса), когда частица является маленькой относительно длины волны. Она пропорциональна частоте и коэффициенту акустического контраста. Она также масштабируется с акустической энергией (например, квадратом амплитуды акустического давления). Для гармонического возбуждения синусоидальное пространственное изменение силы является тем, что приводит частицы к устойчивым положениям в пределах стоячих волн. Когда сила акустического излучения, приложенная к частицам, значительно больше, чем комбинированное воздействие силы сопротивления текучей среды и силы плавучести/

гравитационной силы, частица захватывается в пределах поля акустической стоячей волны. Воздействие акустических сил на захваченные частицы приводит к концентрации, агломерации и/или слипанию частиц и капель. Дополнительно, вторичные межчастичные силы, такие как силы Бьеркнесса, содействуют агломерации частиц. Частицы и/или 5 текучие среды, более тяжелые, чем основная текучая среда (т.е. более плотные, чем основная текучая среда), сепарируются посредством усиленного гравитационного осаждения, а частицы и/или текучие среды, более легкие, чем основная текучая среда, сепарируются посредством усиленной плавучести.

Также возможно приводить в действие множество ультразвуковых преобразователей 10 с помощью произвольного фазирования. Другими словами, множество преобразователей может работать с возможностью сепарации материалов в струе текучей среды, будучи не в фазе друг с другом. В качестве альтернативы, один ультразвуковой преобразователь, который был разделен на упорядоченный массив, также может работать так, что некоторые компоненты массива будут не в фазе с другими 15 компонентами массива.

Эффективные и экономичные процессы сепарации частиц могут быть пригодными во многих областях формирования энергии, например, производстве воды, гидроразрыва и биотоплива, например, сбора и обезвоживания. Акустофоретическая технология может быть использована для цели ускоренного улавливания бактериальных спор в 20 воде, извлечения нефти и обезвоживания бионефти, полученной из микроводорослей. Современная технология, используемая в области извлечения нефти, неэффективна при извлечении маленьких, т.е. менее 20 мкм, капель нефти. Однако акустофоретические системы, описанные здесь, могут усиливать улавливание и слипание маленьких капель нефти, тем самым сдвигая распределение размера частиц, приводящее к общему 25 увеличенному улавливанию нефти. Для использования в общем необходимо продемонстрировать большие скорости потока на уровне 15-20 галлонов в минуту (GPM) на квадратный фут (площадь сечения). Другой целью является увеличенное улавливание капель нефти с диаметром менее 20 мкм.

Акустофоретическая сепарация также может использоваться для содействия таким 30 применениям, как передовая технология биопереработки для преобразования дешевой легко доступной непищевой биомассы (например, муниципальных твердых отходов и осадка сточных вод) в широкий ряд химических веществ и вторичных спиртов, которые далее могут дополнительно перерабатываться в восполняемое горючее, реактивное топливо или дизельное топливо. Технология обработки воды используется для 35 обезвоживания ферментационного бульона и изоляции ценных органических солей для дальнейшей переработки в топливо. Процесс обезвоживания в настоящее время выполняется посредством дорогостоящего и неэффективного способа ультрафильтрации, который страдает от частого загрязнения мембран, относительно низкого коэффициента концентрации и высоких капитальных и эксплуатационных затрат. Акустофоретическая 40 сепарация может отфильтровывать частицы с распределением размера поступающих частиц, которое охватывает более трех порядков величины, а именно от 600 мкм до 0,3 мкм, обеспечивая улучшения концентрации сепарированного бульона с более низкими капитальными и эксплуатационными затратами. Некоторые другие применения находятся в областях обработки сточных вод, повторного использования серой воды 45 и производства воды.

Акустофоретическая сепарация также пригодна для сбора, извлечения нефти и обезвоживания микроводорослей для преобразования в бионефть. Современные технологии сбора, извлечения нефти и обезвоживания для микроводорослей страдают

от высоких эксплуатационных и капитальных затрат. Современные наилучшие оценки назначают цену за баррель бионефти, полученный из микроводорослей, минимум \$200,00 за баррель. В уровне техники биотоплива из микроводорослей существует потребность в технологиях, которые улучшают этапы сбора, извлечения нефти и обезвоживания этого процесса. Акустофоретическая технология сепарации удовлетворяет эту потребность.

Другие применения находятся в области биологических и медицинских применений, таких как сепарация липидов от красных кровяных клеток. Это может иметь особую важность во время операции в условиях искусственного кровообращения, которая включает в себя отсасывание пролитой медиастинальной крови. Липиды непреднамеренно заносятся в кровоток при обратном переливании крови в тело. Микроэмболы липидов могут перемещаться к мозгу и вызывать различные нейрокогнитивные расстройства. В связи с этим существует потребность очистки крови. Существующие способы в настоящее время являются неэффективными или губительными для красных кровяных клеток.

Одно конкретное применение для устройства акустофореза находится в переработке материалов биореактора. В биореакторе периодического действия в конце цикла производства важно отфильтровывать все клетки и клеточный дебрис от экспрессированных материалов, которые находятся в струе текучей среды. Экспрессированные материалы состоят из биомолекул, таких как рекомбинантные белки или моноклональные антитела, и являются требуемым продуктом, подлежащим извлечению. Посредством использования акустофореза сепарация клеток и клеточного дебриса является очень эффективной и приводит к очень маленьким потерям экспрессированных материалов. Это представляет собой улучшение современных процессов фильтрации (глубинной фильтрации, фильтрации в тангенциальном потоке, центрифугирования), которые показывают ограниченные эффективности при высоких плотностях клеток так, что потери экспрессированных материалов в самих телах фильтров могут составлять до 5% материалов, производимых биореактором. Доказано, что использование клеточной культуры млекопитающих, включающей в себя яичник китайского хомячка (СНО), клетки гибридомы NS0, клетки почки новорожденного хомячка (ВНК) и человеческие клетки, является очень эффективным путем производства/экспрессирования рекомбинантных белков и моноклональных антител, требуемых от современной фармацевтики. Фильтрация клеток млекопитающих и клеточного дебриса млекопитающих посредством акустофореза содействует значительному увеличению выхода биореактора периодического действия.

Другой тип биореактора, перфузионный реактор, использует непрерывное экспрессирование белка-мишени или моноклональных антител из клеток СНО. Это обеспечивает намного меньшую занимаемую площадь при более быстром цикле производства. Использование акустофореза для удержания клеток СНО в струе текучей среды, когда они производят/экспрессируют протеины, представляет собой очень эффективный путь производства с замкнутым контуром. Он также обеспечивает максимальную эффективность производства протеинов и моноклональных антител в том, что ни один из материалов не теряется в теле фильтра.

В процессе биореактора периодического действия устройство акустофореза использует одну или множество стоячих волн для захвата клеток и клеточного дебриса. Клетки и клеточный дебрис, имеющие положительный коэффициент контраста, перемещаются к узлам (а не пучностям) стоячей волны. По мере агломерации клеток и клеточного дебриса на узлах стоячей волны происходит также физическое разделение

струи текучей среды, в результате чего больше клеток захватываются, когда они приходят в контакт с клетками, которые уже удерживаются в пределах стоячей волны. Когда клетки в стоячей волне агломерируются настолько, что масса больше не способна удерживаться акустической волной, агрегированные клетки и клеточный дебрис, которые были захвачены, выпадают из струи текучей среды посредством силы тяжести, и могут собираться отдельно. Для содействия этому гравитационному осаждению клеток и клеточного дебриса стоячая волна может прерываться, чтобы позволять всем клеткам выпадать из струи текучей среды, которая отфильтровалась из биореактора периодического действия.

Особый вариант выполнения также сосредотачивается на улавливании и укрупнении капель нефти менее 20 мкм. По меньшей мере 80% объема капель менее 20 мкм улавливаются и далее укрупняются до капель, которые больше 20 мкм. Процесс включает в себя захват капель нефти в акустической стоячей волне, слипание многих маленьких захваченных капель и в итоге высвобождение более крупных капель, когда акустическая сила захвата становится меньше силы плавучести. Эта конструкция показана на Фиг. 3, где сепарация загрязнителей не требуется.

Передовые многоаспектные физические компьютерные модели и модели с множеством масштабов длины и высокочастотные (МГц), высокомошные и высокоэффективные ультразвуковые возбудители со встроенными средствами управления были объединены для достижения новых конструкций акустических резонаторов, приводимых в действие массивами пьезоэлектрических преобразователей, приводя к устройствам акустофоретической сепарации, которые значительно превосходят современные способности.

При необходимости такие преобразователи формируют трехмерную стоячую волну в текучей среде, которая прикладывает боковую силу к суспендированным частицам/вторичной текучей среде для дополнения аксиальной силы так, чтобы увеличивать возможности захвата частиц акустофоретической системы. Обычные результаты, опубликованные в литературе, указывают, что боковая сила на два порядка величины меньше аксиальной силы. В отличие от этого, технология, раскрытая в этой заявке, обеспечивает боковую силу такого же порядка величины, как и аксиальная сила.

Как определено здесь, примеси включают в себя частицы или текучие среды, отличающиеся от основной текучей среды. Акустический резонатор 10 выполнен с возможностью поддержания высокоинтенсивной трехмерной акустической стоячей волны. Система приводится в действие функциональным генератором и усилителем (не показаны). Производительность системы отслеживается и управляется компьютером.

Иногда может быть необходимо модулировать амплитуду частоты или напряжения стоячей волны из-за акустического течения. Это может быть выполнено с помощью амплитудной модуляции и/или с помощью частотной модуляции. Рабочий цикл распространения стоячей волны также может использоваться для достижения определенных результатов для захвата материалов. Другими словами, акустический пучок может запускаться и останавливаться на различных частотах для достижения требуемых результатов.

Схематическое представление варианта выполнения для удаления нефти или другого, более легкого, чем вода, материала показано на Фиг. 1А. Частоты возбуждения, обычно в диапазоне от сотен кГц до десятков МГц, подаются преобразователем 10. Одна или более стоячих волн создаются между преобразователем 10 и отражателем 11. Микрокапли 12 захватываются в стоячих волнах в пучностях 14 давления, где они агломерируются, агрегируются, скапливаются или слипаются и, в случае плавучего

материала, всплывают на поверхность и выпускаются с помощью выходящего выхода 16, расположенного выше пути потока. Очищенная вода выпускается на выходе 18. Акустофоретическая технология сепарации может выполнять сепарацию многокомпонентных частиц без какого-либо загрязнения при намного уменьшенном расходе.

Схематическое представление варианта выполнения для удаления загрязнителей или другого, более тяжелого, чем вода, материала, показано на Фиг. 1В. Частоты возбуждения, обычно в диапазоне от сотен кГц до десятков МГц, подаются преобразователем 10. Загрязнители в поступающей воде 13 захватываются в стоячих волнах в узлах 15 давления, где они агломерируются, агрегируются, скапливаются или слипаются и, в случае более тяжелого материала, опускаются к нижнему коллектору и выпускаются с помощью выходящего выхода 17, расположенного ниже пути потока. Очищенная вода выпускается в выходе 18.

Фиг. 2А показывает распределение размера частиц, которое измерялось при прохождении водонефтяной эмульсии через акустофоретическую систему без активированного акустического поля. Максимальный размер 20 частиц находится между 20-50 мкм в размере без активированного акустического поля. Эти капли обычно очень тяжело сепарировать традиционными средствами, такими как, например, гидроциклоны.

Фиг. 2В показывает подобное распределение размера частиц, которое измерялось после прохождения водонефтяной эмульсии через акустофоретическую систему с активированным акустическим полем. Максимальный размер 22 частиц больше 200 мкм в размере при активированном акустическом поле. Результаты ясно показывают значительную величину укрупнения капель нефти, т.е. многие капли менее 20 мкм слиплись, агломерировались или скопились в более крупные капли (больше 20 мкм) в результате воздействия акустических сил на капли.

Фиг. 3 показывает другой вариант выполнения акустофоретического сепаратора 30 частиц. Акустофоретический сепаратор 30 имеет вход 32 и выход 34. Вход 32 оснащен соплом или рассеивателем 90, имеющим соты 95 для облегчения развития потока вытеснения. Акустофоретический сепаратор 30 имеет массив 38 преобразователей 40, в этом случае шесть преобразователей, все из которых размещены на одной и той же стенке. Преобразователи размещены так, что они покрывают все поперечное сечение пути потока. Система акустофоретической сепарации на Фиг. 3 в некоторых вариантах выполнения имеет квадратное поперечное сечение 6 дюймов × 6 дюймов (152,4 мм × 152,4 мм), она работает со скоростями потока до 3 галлонов в минуту (GPM) или линейной скоростью 8 мм/с. Преобразователи 40 представляют собой шесть преобразователей PZT-8 (цирконат-титанат свинца) с диаметром 1 дюйм (25,4 мм) и номинальной резонансной частотой 2 МГц. Каждый преобразователь потребляет около 28 Вт мощности для захвата капель со скоростью потока 3 GPM. Это переводится в расход энергии 0,25 кВт·ч/м³. Это является показателем очень низкого расхода энергии этой технологии. При необходимости каждый преобразователь приводится в действие и управляется его собственным усилителем. Применение для этого варианта выполнения заключается в сдвиге распределения размера частиц посредством агломерации, агрегации, скопления или слипания капель нефти микрометрового размера в более крупные капли, как очевидно на Фиг. 2А и Фиг. 2В.

Фиг. 4А и Фиг. 4В показывают два различных рассеивателя, которые могут использоваться на входе акустофоретического сепаратора. Рассеиватель 90 имеет вход 92 (здесь с круглой формой) и выход 94 (здесь с квадратной формой). Рассеиватель по

Фиг. 4А проиллюстрирован на Фиг. 3. Фиг. 4А включает в себя сетку или соты 95, тогда как Фиг. 4В не включает в себя упомянутые элементы. Сетка помогает обеспечивать равномерный поток.

Фиг. 5 представляет собой изображение поперечного сечения традиционного ультразвукового преобразователя. Этот преобразователь имеет пластину 50 износа на нижнем конце, эпоксидный слой 52, керамический кристалл 54 (изготовленный, например, из PZT), эпоксидный слой 56 и слой 58 подложки. На обеих сторонах керамического кристалла имеется электрод: положительный электрод 61 и отрицательный электрод 63. Эпоксидный слой 56 прикрепляет слой 58 подложки к кристаллу 54. Весь узел содержится в корпусе 60, который может быть выполнен, например, из алюминия. Электрический адаптер 62 обеспечивает соединение для проводов для прохода через корпус и соединения с выводами (не показаны), которые прикрепляются к кристаллу 54. Обычно слои подложки выполнены с возможностью усиления демпфирования и создания широкополосного преобразователя с равномерным смещением по широкому диапазону частоты и выполнены с возможностью подавления возбуждения на особых собственных модах колебаний. Пластины износа обычно выполнены в виде трансформаторов полного сопротивления для более хорошего соответствия характеристическому полному сопротивлению среды, в которую преобразователь излучает.

Фиг. 6 представляет собой снимок пластины 50 износа с пузырьком 64, где пластина износа оттянута от поверхности керамического кристалла за счет колебательного давления и нагрева.

Фиг. 7А представляет собой вид в поперечном сечении ультразвукового преобразователя 81 настоящего изобретения, который может использоваться с акустофоретическим сепаратором на Фиг. 3. Преобразователь 81 имеет алюминиевый корпус 82. Кристалл 86 PZT ограничивает нижний конец преобразователя и подвергается воздействию внешней области корпуса. Кристалл поддерживается по его периметру маленьким упругим слоем 98, например, силиконовым или подобным материалом, расположенным между кристаллом и корпусом. Иными словами, слой износа отсутствует.

Винты (не показаны) прикрепляют алюминиевую верхнюю пластину 82а корпуса к телу 82b корпуса с помощью резьб 88. Верхняя пластина включает в себя соединитель 84 для передачи мощности к кристаллу 86 PZT. Каждая из нижней и верхней поверхностей кристалла 86 PZT соединена с электродом (положительным и отрицательным), таким как серебряный или никелевый. Охватывающий выступ 90 электрода соединяется с нижним электродом и изолирован от верхнего электрода. Электрическая мощность обеспечивается к кристаллу 86 PZT посредством электродов на кристалле, при этом охватывающий выступ 90 является точкой соединения с землей. Отметим, что кристалл 86 не имеет слоя подложки или эпоксидного слоя, который представлен на Фиг. 5. Иными словами, в преобразователе имеется воздушный зазор 87 между алюминиевой верхней пластиной 82а и кристаллом 86 (т.е. воздушный зазор полностью пустой). Минимальная подложка 58 и/или пластина 50 износа могут быть обеспечены в некоторых вариантах выполнения, как видно на Фиг. 7В.

Конструкция преобразователя может влиять на производительность системы. Обычный преобразователь представляет собой многослойную конструкцию с керамическим кристаллом, приклеенным к слою подложки и пластине износа. Так как преобразователь нагружается высоким полным механическим сопротивлением, представленным стоячей волной, традиционные принципы конструирования для пластин

износа, например, полуволновая толщина для применений стоячей волны или четвертьволновая толщина для применений в излучении, и способы изготовления могут быть не подходящими. Точнее, в одном варианте выполнения настоящего изобретения в преобразователях отсутствует пластина износа или подложки, позволяя кристаллу колебаться в одной из его собственных мод с высоким коэффициентом качества. Колеблющийся керамический кристалл/диск непосредственно подвергается воздействию текучей среды, протекающей через проточную камеру.

Удаление подложки (например, выполнение кристалла с воздушной подложкой) также позволяет керамическому кристаллу колебаться на модах более высокого порядка колебания с маленьким демпфированием (например, модальное смещение более высокого порядка). В преобразователе, имеющем кристалл с подложкой, кристалл колеблется с более равномерным смещением подобно поршню. Удаление подложки позволяет кристаллу колебаться в моде неравномерного смещения. Чем выше порядок формы моды кристалла, тем больше узловых линий имеет кристалл. Модальное смещение более высокого порядка кристалла создает больше линий захвата несмотря на то, что корреляция линии захвата с узлом необязательно является взаимно однозначной, и приведение в действие кристалла на более высокой частоте необязательно будет производить больше линий захвата. Смотри пояснение ниже в отношении Фиг. 20-21D.

В некоторых вариантах выполнения кристалл может иметь подложку, которая минимально влияет на коэффициент качества кристалла (например, менее 5%). Подложка может быть изготовлена из по существу акустически прозрачного материала, такого как бальзовое дерево, поролон или пробка, который позволяет кристаллу колебаться в форме моды более высокого порядка и поддерживает высокий коэффициент качества, при этом по-прежнему обеспечивая определенную механическую поддержку для кристаллу. Слой подложки может быть сплошным или может представлять собой решетку, имеющую отверстия в слое так, что решетка повторяет узлы колеблющегося кристалла в особой моде колебаний более высокого порядка, обеспечивая поддержку в положениях узлов, при этом позволяя остальной части кристалла свободно колебаться. Цель решетчатой конструкции или акустически прозрачного материала заключается в обеспечении поддержки без снижения коэффициента качества кристалла или воспрепятствования возбуждению особой формы моды.

Размещение кристалла в непосредственном контакте с текучей средой также способствует высокому коэффициенту качества путем исключения воздействий демпфирования и поглощения энергии оксидного слоя и пластины износа. Другие варианты выполнения могут иметь пластины износа или поверхность износа для предотвращения PZT, который содержит вывод, от контакта с основной текучей средой. Это может быть необходимо, например, в биологических применениях, таких как сепарация крови. Такие применения могут использовать слой износа, такой как хром, электролитический никель или химический никель. Химическое осаждение из паровой фазы также может использоваться для нанесения слоя поли (п-ксилилена) (например, парилена) или другого полимера. Органические и биосовместимые покрытия, такие как силикон или полиуретан, также используются в качестве поверхности износа. Толщина материала поверхности износа может составлять половину длины волны или менее.

В настоящих системах система работает с напряжением так, что частицы захватываются в ультразвуковой стоячей волне, т.е. остаются в неподвижном положении. Частицы собираются по четко определенным линиям захвата, сепарированные на

половину длины волны. В пределах каждой узловой плоскости частицы захватываются в минимумах потенциала акустического излучения. Аксиальный компонент силы акустического излучения приводит частицы с положительным коэффициентом контраста к узловым плоскостям давления, тогда как частицы с отрицательным коэффициентом контраста приводятся к плоскостям пучности давления. Радиальный или боковой компонент силы акустического излучения представляет собой силу, которая захватывает частицу. В системах, использующих обычные преобразователи, радиальный или боковой компонент силы акустического излучения обычно на несколько порядков величины меньше аксиального компонента силы акустического излучения. С другой стороны, боковая сила в сепараторах, показанных на Фиг. 1А, Фиг. 1В, Фиг. 3 и Фиг. 27, может быть значительной, такого же порядка величины, как и аксиальный компонент силы, и является достаточной для преодоления силы сопротивления текучей среды с линейными скоростями до 0,01 м/с. Как пояснено выше, боковая сила может увеличиваться путем приведения преобразователя в действие в формах моды более высокого порядка в отличие от формы колебания, где кристалл эффективно перемещается как поршень, имеющий равномерное смещение. Акустическое давление пропорционально приводящему в действие напряжению преобразователя. Электрическая мощность пропорциональна квадрату напряжения.

В вариантах выполнения сигнал импульсного напряжения, приводящий в действие преобразователь, может иметь синусоидальную, квадратную, пилообразную или треугольную форму волны; и имеет частоту от 500 кГц до 10 МГц. Сигнал импульсного напряжения может быть приведен в действие широтно-импульсной модуляцией, которая производит любую требуемую форму волны. Сигнал импульсного напряжения также может иметь возможность запуска и остановки амплитудной или частотной модуляции для исключения течения.

Фиг. 8 представляет собой компьютерную модель акустофоретического сепаратора 92, смоделированного для создания Фиг. 9А-9Д и Фиг. 11-17. Пьезокерамический кристалл 94 находится в непосредственном контакте с текучей средой в водяном канале 96. Слой силикона 98 находится между кристаллом 94 и алюминиевой верхней пластиной 100. Отражатель 102 отражает волны для создания стоячих волн. Отражатель изготовлен из материала с высоким акустическим полным сопротивлением, такого как сталь или вольфрам, обеспечивая хорошее отражение. В справочных целях ось Y 104 будет называться аксиальным направлением. Ось X 106 будет называться радиальным или боковым направлением. Вычислялись модели акустического давления и скорости, включающие в себя пьезоэлектрические модели преобразователя PZT, линейные упругие модели окружающей конструкции (например, пластины и стенок отражателя) и линейную акустическую модель волн в водяном столбе. Сила излучения, воздействующая на суспендированные частицы, вычислялась с использованием формулы Горькова. Свойства материала частиц и текучей среды, такие как плотность, скорость звука и размер частиц, вводятся в программу и используются для определения монопольного и дипольного вкладов рассеивания. Сила акустического излучения определяется путем выполнения градиентной операции над потенциалом U поля, который представляет собой функцию от объема частицы и усредненной по времени потенциальной и кинетической энергии акустического поля.

В обычном эксперименте система работает с напряжением так, что частицы захватываются в ультразвуковой стоячей волне, т.е. остаются в неподвижном положении. Аксиальный компонент силы акустического излучения приводит частицы с положительным коэффициентом контраста к узловым плоскостям давления, тогда как

частицы с отрицательным коэффициентом контраста приводятся к плоскостям пучности давления. Радиальный или боковой компонент силы акустического излучения представляет собой силу, которая захватывает частицы. В связи с этим она должна быть больше, чем комбинированное воздействие силы сопротивления текучей среды и гравитационной силы. Для маленьких частиц или эмульсий сила FD сопротивления может быть выражена в виде:

$$\vec{F}_D = 4\pi\mu_f R_p (\vec{U}_f - \vec{U}_p) \left[\frac{1 + \frac{3}{2}\hat{\mu}}{1 + \hat{\mu}} \right]$$

где U_f и U_p представляют собой скорость текучей среды и частиц, R_p представляет собой радиус частиц, μ_f и μ_p представляют собой динамическую вязкость текучей среды и частиц, а $\hat{\mu} = \mu_p / \mu_f$ представляет собой отношение динамических вязкостей. Сила F_B плавучести выражается в виде:

$$F_B = \frac{4}{3}\pi R_p^3 (\rho_f - \rho_p)$$

Для частицы, подлежащей захвату в ультразвуковой стоячей волне, равновесие силы на частице должно равняться нулю, и в связи с этим может быть обнаружено выражение для боковой силы FLRF акустического излучения, которое задается:

$$F_{LRF} = F_D + F_B$$

Для частицы известного размера и свойства материала и для заданной скорости потока это уравнение может использоваться для оценки величины боковой силы акустического излучения.

Теоретическая модель, которая используется для вычисления силы акустического излучения, представляет собой формулу, разработанную Горьковым. Первичная сила F_A акустического излучения определена в виде функции от потенциала U поля,

$$F_A = -\nabla(U),$$

где потенциал U поля определен как

$$U = V_0 \left[\frac{\langle p^2 \rangle}{2\rho_f c_f^2} f_1 - \frac{3\rho_f \langle u^2 \rangle}{4} f_2 \right]$$

а f_1 и f_2 представляют собой монопольный и дипольный вклады, определенные как

$$f_1 = 1 - \frac{1}{\Lambda\sigma^2}, \quad f_2 = \frac{2(\Lambda - 1)}{2\Lambda + 1},$$

где p представляет собой акустическое давление, u представляет собой скорость частицы текучей среды, Λ представляет собой отношение плотности ρ_p частицы к плотности ρ_f текучей среды, σ представляет собой отношение скорости c_p звука частицы к скорости c_f звука текучей среды, а V_0 представляет собой объем частицы. Для одномерной стоячей волны, где акустическое давление выражено в виде

$$p = A \cos(kx) \cos(\omega t),$$

где A представляет собой амплитуду акустического давления, k представляет собой волновое число, а ω представляет собой угловую частоту. В этом случае имеется только аксиальный компонент силы F_{ARF} акустического излучения, которая оказывается

равной

$$F_{ARF} = V_0 k X \frac{A^2}{4\rho_f c_f^2} \sin(2kx),$$

5 где X представляет собой коэффициент контраста, заданный

$$X = \left(\frac{5\Lambda - 2}{1 + 2\Lambda} - \frac{1}{\sigma^2 \Lambda} \right)$$

10 Частицы с положительным коэффициентом контраста будут приводиться к узловым плоскостям давления, а частицы с отрицательным коэффициентом контраста будут приводиться к плоскостям пучности давления.

Теория Горькова ограничена размерами частиц, которые являются маленькими в отношении длины волны звуковых полей в текучей среде и частице, и она также не принимает во внимание воздействие вязкости текучей среды и частицы на силу излучения. Были разработаны дополнительные числовые модели для вычисления силы

15 акустического излучения для частицы без какого-либо ограничения в отношении размера частицы относительно длины волны. Эти модели также включают в себя воздействие вязкости текучей среды и частицы, и в связи с этим представляют собой более точное вычисление силы акустического излучения. Модели, которые были осуществлены, основаны на теоретической работе Юрия Ильинского и Евгении Заболотской.

20 Фиг. 9А-9Д показывают имитации разницы в градиентах давления захвата между одной акустической волной и многомодовой акустической волной. Фиг. 9А показывает аксиальную силу, связанную с одной стоячей акустической волной. Фиг. 9В показывает боковую силу за счет одной стоячей акустической волны. Фиг. 9С и 9Д показывают аксиальную силу и боковую силу, соответственно, в многомодовом (модах колебаний более высокого порядка, имеющих множество узлов) возбуждении пьезоэлектрического кристалла, где образуется множество стоячих волн. Электрический вход является таким же, как одна мода на Фиг. 9А и 9В, но сила захвата (боковая сила) в 70 раз больше (отметим шкалу справа на Фиг. 9В по сравнению с 9Д). Чертежи были созданы с

25 помощью имитации компьютерного моделирования пьезоэлектрического преобразователя 1 МГц, приводимого в действие 10 В переменного тока, загерметизированного в алюминиевой верхней пластине в открытом водяном канале, оканчивающемся стальным отражателем (смотри Фиг. 8). Поле на Фиг. 9А и 9В составляет 960 кГц с максимальным давлением 400 кПа. Поле на Фиг. 9С и 9Д составляет 961 кГц с максимальным давлением 1400 кПа. В дополнение к более высоким силам

30 поле 961 кГц (Фиг. 9С и Д) имеет больше градиентов и фокальных пятен.

Фиг. 10 показывает трехмерную сформированную компьютером модель вычисления формы моды, показывающую смещение вне плоскости для круглого кристалла, приводимого в действие на частоте 1 МГц.

40 Фиг. 11-17 основаны на модели на Фиг. 8 с пьезоэлектрическим преобразователем PZT-8, работающим на 2 МГц. Преобразователь имеет ширину 1 дюйм (25,4 мм) и толщину 0,04 дюйма (1,016 мм), загерметизированный в алюминиевой верхней пластине (толщиной 0,125 дюйма (3,175 мм)) в водяном канале 4 дюйма × 2 дюйма (101,6 мм × 50,8 мм), оканчивающемся пластиной стального отражателя (толщиной 0,180 дюймов (4,572 мм)). Акустический пучок охватывает расстояние в 2 дюйма (50,8 мм). Размер

45 глубины, который составляет 1 дюйм (25,4 мм), не включен в двумерную модель. Преобразователь приводится в действие на 15 В, и выполняется вычисление развертки по частоте для идентификации различных акустических резонансов. Показаны результаты трех последовательных частот акустического резонанса, т.е. 1,9964 МГц

(Фиг. 11, 12 и 13), 2,0106 МГц (Фиг. 14 и 15) и 2,025 МГц (Фиг. 16 и 17). Сила акустического излучения вычисляется для капли нефти с радиусом 5 мкм, плотностью 880 кг/м³ и скоростью звука 1700 м/с. Вода представляет собой главную текучую среду с плотностью 1000 кг/м³, скоростью звука 1500 м/с и динамической вязкостью 0,001 кг/мс. Фиг. 11 показывает боковую (горизонтальную) силу акустического излучения. Фиг. 12 показывает аксиальный (вертикальный) компонент для резонансной частоты 1,9964 МГц. Фиг. 13 показывает амплитуду акустического давления.

Фиг. 11-15 показывают относительно низкие боковые силы захвата. Фиг. 16-17 показывают, что относительная величина бокового и аксиального компонента силы излучения является очень похожей, указывая на то, что возможно создавать большие силы захвата там, где боковой компонент силы имеет подобную величину или выше, чем аксиальный компонент. Это является новым результатом и противоречит обычным результатам, отмеченным в литературе.

Второй результат заключается в том, что величина акустической силы захвата превышает величину силы сопротивления текучей среды для обычных скоростей потока порядка мм/с, и в связи с этим возможно использовать это акустическое поле для захвата капли нефти. Разумеется, захват с более высокими скоростями потока может быть получен путем увеличения подаваемой мощности к преобразователю. То есть акустическое давление пропорционально приводящему в действие напряжению преобразователя. Электрическая мощность пропорциональна квадрату напряжения.

Третий результат заключается в том, что на показанной частоте высокие силы захвата, связанные с этой особой модой захвата, продолжают по всему проточному каналу, тем самым обеспечивая улавливание капель нефти по всей ширине канала. Наконец, сравнение минимумов поля акустической силы захвата, т.е. положений захваченных частиц, с наблюдаемыми положениями захвата капель в стоячей волне показывает удовлетворительное соответствие, указывая на то, что моделирование в действительности является точным инструментом для прогнозирования акустического захвата частиц. Это будет показано более подробно ниже.

Фиг. 14 показывает боковой компонент силы акустического излучения на резонансной частоте 2,0106 МГц, а Фиг. 15 показывает аксиальный компонент силы акустического излучения на резонансной частоте 2,0106 МГц. Фиг. 14 и 15 проявляют более высокие максимальные силы захвата, чем Фиг. 11 и 12. Боковые силы акустического излучения превышают аксиальную силу излучения. Однако более высокие силы захвата располагаются в верхней части проточного канала и не охватывают всю глубину проточного канала. В связи с этим они будут представлять моду, которая является эффективной при захвате частиц в верхнем участке канала, но необязательно по всему каналу. Снова, сравнение с измеренными схемами захвата указывает на существование таких мод и схем захвата.

Фиг. 16 показывает боковой компонент силы на резонансной частоте 2,025 МГц, а фиг. 17 показывает аксиальный компонент силы акустического излучения на резонансной частоте 2,025 МГц. Акустическое поле существенно изменяется на каждой частоте акустического резонанса, и в связи с этим точная настройка системы является особо важной. Как минимум двумерные модели являются необходимыми для точного прогнозирования акустических сил захвата.

Разработаны двумерные осесимметричные модели для вычисления сил захвата для круглых преобразователей. Модели использовались для прогнозирования акустических сил захвата на частицах, которые далее могут использоваться для прогнозирования траекторий частиц в совокупности с воздействием сил сопротивления текучей среды и

плавучести. Модели ясно показывают, что возможно формировать боковые акустические силы захвата, необходимые для захвата частиц и преодоления воздействий плавучести и сопротивления текучей среды. Модели также показывают, что круглые преобразователи не обеспечивают большие силы захвата по всему объему стоячей волны, создаваемой преобразователем, указывая на то, что круглые преобразователи выработывают высокие силы захвата только вблизи центра ультразвуковой стоячей волны, формируемой преобразователем, но обеспечивают намного меньшие силы захвата по направлению к краям стоячей волны. Это дополнительно указывает на то, что круглый преобразователь обеспечивает только ограниченный захват для маленького сечения потока текучей среды, который будет протекать через стоячую волну круглого преобразователя, и отсутствие захвата вблизи краев стоячей волны.

Фиг. 18 представляет собой линейно-логарифмический график (линейная ось y , логарифмическая ось x), который показывает масштабирование силы акустического излучения, силы сопротивления текучей среды и силы плавучести с радиусом частиц. Вычисления выполнялись для обычной капли нефти SAE-30, используемой в экспериментах. Сила плавучести представляет собой зависящую от объема частиц силу, и в связи с этим она ничтожна для размеров частиц порядка мкм, но растет и становится значительной для размеров частиц порядка сотен мкм. Сила сопротивления текучей среды линейно масштабируется со скоростью текучей среды, и в связи с этим обычно превышает силу плавучести для частиц микрометрового размера, но ничтожна для частиц более крупного размера порядка сотен мкм. Масштабирование силы акустического излучения является другим. Когда размер частицы является маленьким, уравнение Горького является точным, и акустическая сила захвата масштабируется с объемом частицы. В конечном счете, когда размер частиц укрупняется, сила акустического излучения больше не увеличивается с кубом радиуса частиц и будет быстро исчезать с определенным критическим размером частиц. Для дополнительных увеличений размера частиц сила излучения снова увеличивается по величине, но с противоположной фазой (не показана на графике). Эта схема повторяется для увеличивающихся размеров частиц.

Первоначально, когда суспензия протекает через систему с главным образом маленькими частицами микрометрового размера, силе акустического излучения необходимо уравновешивать комбинированное воздействие силы сопротивления текучей среды и силы плавучести для частицы, подлежащей захвату в стоячей волне. На Фиг. 18 это происходит для размера частиц около 3,5 мкм, обозначенного как R_{c1} . График далее указывает на то, что все более крупные частицы также будут захватываться. В связи с этим, когда маленькие частицы захватываются в стоячей волне, происходит слипание/скопление/агрегация/агломерация частиц, приводящие к непрерывному укрупнению эффективного размера частиц. По мере укрупнения размера частиц сила акустического излучения отражается от частиц так, что крупные частицы будут заставлять силу акустического излучения уменьшаться. Укрупнение размера частиц продолжается до тех пор, пока сила плавучести не становится преобладающей, что обозначается вторым критическим размером частиц R_{c2} , при таком размере частицы будут подниматься или опускаться в зависимости от их относительной плотности в отношении основной текучей среды. По мере того, как частицы поднимаются или опускаются, они больше не отражают силу акустического излучения так, что сила акустического излучения далее увеличивается. Не все частицы будут выпадать, и эти оставшиеся частицы будут продолжать также укрупняться в размере. Это явление объясняет быстрые падения и подъемы силы акустического излучения за пределами

размера R_{c2} . Таким образом, Фиг. 18 объясняет, как маленькие частицы могут непрерывно захватываться в стоячей волне, укрупняться в более крупные частицы или скапливаться, и далее в итоге будут подниматься или осаждаться за счет увеличенной силы плавучести.

5 Так как круглые преобразователи не обеспечивают большие силы захвата по всему объему, исследовалось воздействие формы преобразователя на эффективность сепарации нефти. Использовались круглый кристалл PZT-8 с диаметром 1 дюйм (25,4 мм) (Фиг. 19, 110) и квадратный кристалл 1 дюйм × 1 дюйм (25,4 мм × 25,4 мм) (Фиг. 19, 112). В других отношениях эксперимент проводился в идентичных условиях. Таблица 1
10 показывает результаты.

Таблица 1 Результаты исследования круглой и квадратной формы преобразователей				
Форма преобразователя	Полная мощность на входе (Вт)	Скорость потока (мл/мин)	Продолжительность (мин)	Эффективность улавливания (%)
Круглая	20	500	30	59%
Квадратная	20	500	30	91%

Результаты указывают на то, что квадратный преобразователь 112 обеспечивает более хорошие эффективности сепарации нефти, что объясняется тем, что квадратный преобразователь 112 обеспечивает более хорошее покрытие проточного канала
20 акустическими силами захвата, и тем, что круглый преобразователь обеспечивает значительные силы захвата только вдоль осевой линии стоячей волны, подтверждая результаты численных имитаций.

Размер, форма и толщина преобразователя определяют смещение преобразователя на различных частотах возбуждения, которое, в свою очередь, влияет на эффективность сепарации нефти. Обычно преобразователь работает на частотах вблизи резонансной частоты толщины (половина длины волны). Градиенты в смещении преобразователя
25 обычно приводят к большим местам для нефти, подлежащей захвату. Модальные смещения более высокого порядка формируют трехмерные акустические стоячие волны со значительными градиентами в акустическом поле во всех направлениях, тем самым создавая в равной степени значительные силы акустического излучения во всех
30 направлениях, приводящие к множеству линий захвата, где количество линий захвата коррелирует с особой формой моды преобразователя.

Фиг. 20 показывает измеренную амплитуду полного электрического сопротивления преобразователя как функцию от частоты приблизительно 2,2 МГц резонанса преобразователя. Минимумы в полном электрическом сопротивлении преобразователя
35 соответствуют акустическим резонансам водяного столба и представляют потенциальные частоты для работы. Численное моделирование показало, что профиль смещения преобразователя значительно изменяется на этих частотах акустического резонанса и тем самым непосредственно влияет на акустическую стоячую волну и получающуюся в результате силу захвата. Так как преобразователь работает вблизи
40 его резонанса толщины, смещения поверхностей электрода по существу находятся не в фазе. Обычное смещение электродов преобразователя является не равномерным и изменяется в зависимости от частоты возбуждения. Например, на одной частоте возбуждения с одной линией захваченных капель нефти смещение имеет один максимум
45 в средней части электрода и минимумы вблизи краев преобразователя. На другой частоте возбуждения профиль преобразователя имеет множество максимумов, приводящих к множеству линий захвата капель нефти. Схемы смещения преобразователя более высокого порядка приводят к более высоким силам захвата и множеству

устойчивых линий захвата для улавливаемых капель нефти.

Для исследования воздействия профиля смещения преобразователя на акустическую силу захвата и эффективности сепарации нефти эксперимент повторялся десять раз при всех идентичных условиях, за исключением частоты возбуждения. Десять последовательных частот акустического резонанса, обозначенные круглыми номерами 1-9 и буквой А на Фиг. 20, использовались в качестве частот возбуждения. Условиями являлись продолжительность эксперимента 30 мин, концентрация нефти 1000 миллионных долей капель нефти SAE-30 приблизительно 5 мкм, скорость потока 500 мл/мин и подаваемая мощность 20 Вт.

По мере прохождения эмульсии мимо преобразователя наблюдались и характеризовались линии захвата капель нефти. Характеристика включала в себя наблюдение и схему количества линий захвата через канал текучей среды, как показано на Фиг. 21А, для семи из десяти резонансных частот, идентифицированных на Фиг. 20.

Фиг. 21В показывает изометрический вид системы, в которой определялись положения линий захвата. Фиг. 21С представляет собой вид системы, какой она представляется при взгляде вниз входа по стрелке 114. Фиг. 21D представляет собой вид системы, какой она представляется при взгляде непосредственно на поверхность преобразователя по стрелке 116.

Воздействие частоты возбуждения ясно определяет количество линий захвата, которое изменяется от одной линии захвата на частоте возбуждения акустического резонанса 5 и 9 до девяти линий захвата для частоты 4 акустического резонанса. На других частотах возбуждения наблюдаются четыре или пять линий захвата. Эти экспериментально наблюдаемые результаты подтверждают результаты, ожидаемые от различий при сравнении Фиг. 9А и 9В с Фиг. 9С и 9D. Различные профили смещения преобразователя могут производить различные (больше) линии захвата в стоячих волнах, при этом больше градиентов в профиле смещения в общем создают более высокие силы захвата и больше линий захвата.

Таблица 2 обобщает результаты от эксперимента захвата нефти, использующего систему, подобную Фиг. 27А. Важный вывод заключается в том, что эффективность сепарации нефти акустического сепаратора непосредственно относится к форме моды преобразователя. Профили смещения более высокого порядка формируют более большие акустические силы захвата и больше линий захвата, приводящих к более хорошим эффективностям. Второй вывод, пригодный для исследований масштабирования, заключается в том, что испытания указывают на то, что улавливание капель нефти размером 5 мкм при 500 мл/мин требует 10 Вт мощности на квадратный дюйм площади преобразователя на 1 дюйм охвата акустического пучка. Главное рассеивание представляет собой рассеивание термовязкостной абсорбции в полном объеме акустической стоячей волны. Расход энергии, связанный с этой скоростью потока, составляет $0,667 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$.

Положение резонансного максимума	Полная мощность на входе (Вт)	№ линий захвата	Скорость потока (мл/мин)	Продолжительность (мин)	Эффективность улавливания (%)
4	20	9	500	30	91%
8	20	5	500	30	58%
А	20	4	500	30	58%
9	20	2	500	30	37%

Фиг. 22 и 23 показывают снимки захваченных капель нефти в схеме девяти линий

захвата. Штриховые линии нанесены на линии захвата. Фиг. 24 показывает поле давления, которое соответствует схеме 9 линий захвата. Числовая модель представляет собой двумерную модель; и в связи с этим наблюдаются только три линии захвата. Еще два набора трех линий захвата существуют в третьем измерении, перпендикулярном плоскости двумерной модели на Фиг. 22 и Фиг. 23. Это сравнение указывает на то, что числовая модель является точной в прогнозировании свойства ультразвуковой стоячей волны и получающихся в результате сил захвата, снова подтверждая результаты, ожидаемые от различий при сравнении Фиг. 9А и 9В с Фиг. 9С и 9D.

В более крупных системах возможны различные конструкции преобразователя. Фиг. 25 показывает массив 120 преобразователей, включающий в себя три квадратных кристалла 120a, 120b, 120c 1 дюйм × 1 дюйм (25,4 мм × 25,4 мм). Два квадрата параллельны друг другу, а третий квадрат смещен для образования треугольной схемы и получения 100% акустического покрытия. Фиг. 26 показывает массив 122 преобразователей, включающий в себя два прямоугольных кристалла 122a, 122b 1 дюйм × 2,5 дюйма (25,4 мм × 63,5 мм), размещенных с их длинными осями параллельно друг другу. Мощность рассеивания на преобразователь составляла 10 Вт на 1 дюйм × 1 дюйм (25,4 мм × 25,4 мм) площади поперечного сечения преобразователя и на 1 дюйм (25,4 мм) охвата акустической стоячей волны для того, чтобы получать достаточные акустические силы захвата. Для охвата 4 дюймов (101,6 мм) системы среднего масштаба каждый квадратный преобразователь 1 дюйм × 1 дюйм (25,4 мм × 25,4 мм) потребляет 40 Вт. Более крупный прямоугольный преобразователь 1 дюйм × 2,5 дюйма (25,4 мм × 63,5 мм) использует 100 Вт в системе среднего масштаба. Массив трех квадратных преобразователей 1 дюйм × 1 дюйм (25,4 мм × 25,4 мм) будет потреблять в общей сложности 120 Вт, а массив двух преобразователей 1 дюйм × 2,5 дюйма (25,4 мм × 63,5 мм) будет потреблять около 200 Вт. Массивы близко расположенных преобразователей представляют альтернативные потенциальные варианты выполнения технологии. Размер, форма, количество и положение преобразователя может изменяться при необходимости для формирования требуемых трехмерных акустических стоячих волн.

Устройство 124 среднего масштаба с площадью поперечного сечения потока 4 дюйма × 2,5 дюйма (101,6 мм × 63,5 мм) для сепарации основной текучей среды от плавучей текучей среды или частицы показано на Фиг. 27А. Длина акустической траектории составляет 4 дюйма (101,6 мм). Устройство здесь показано в ориентации, где направление потока является нисходящим, что используется для сепарации менее плотных частиц от основной текучей среды. Однако устройство может быть по существу перевернуто вверх дном таким образом, что смесь течёт вверх, для обеспечения сепарации второй текучей среды или частиц, которые тяжелее основной текучей среды, которая может опускаться вниз к сборному каналу. Вместо плавучей силы в восходящем направлении вес агломерированных частиц за счет силы тяжести тянет их вниз. Следует отметить, что этот вариант выполнения изображен имеющим ориентацию, в которой текучая среда протекает вертикально. Однако также предполагается, что поток текучей среды может располагаться в горизонтальном направлении или под углом.

Содержащая частицы текучая среда поступает в устройство через входы 126 в кольцеобразную камеру 131. Кольцеобразная камера имеет кольцеобразный внутренний диаметр и кольцеобразный внешний диаметр. На этой иллюстрации видны два входа, хотя предполагается, что при необходимости может быть предусмотрено любое количество входов. В особых вариантах выполнения используются четыре входа. Входы являются радиально противоположными и радиально ориентированными.

Стенка 129 профилированного сопла уменьшает внешний диаметр пути потока

таким образом, чтобы формировать более высокие скорости вблизи области стенки и уменьшать турбулентность, производя вблизи поток вытеснения по мере развития профиля скорости текучей среды, т.е. текучая среда ускоряется вниз в направлении осевой линии практически без компонента периферийного движения и с низкой турбулентностью потока. Это формирует профиль потока камеры, который оптимален для акустической сепарации и сбора частиц. Текучая среда проходит через соединительный канал 127 и в проточную/сепараторную камеру 128. Как видно в увеличенном профилированном сопле 129 на Фиг. 27В, стенка сопла также добавляет компонент радиального движения к суспендированным частицам, перемещая частицы ближе к осевой линии устройства и формируя больше столкновений с поднимающимися плавучими агломерированными частицами. Это радиальное движение будет обеспечивать оптимальное отделение частиц от текучей среды в соединительном канале 127 до достижения сепараторной камеры. Стенка 129 профилированного сопла направляет текучую среду таким образом, чтобы формировать крупномасштабные вихри на входе сборного канала 133, чтобы также усиливать сбор частиц. В общем площадь потока устройства 124 выполнена с возможностью непрерывного уменьшения от кольцеобразной камеры 131 до сепараторной камеры 128 для обеспечения низкой турбулентности и образования завихрения для более хорошей сепарации, агломерации и сбора частиц. Стенка сопла имеет широкий конец и узкий конец. Выражение «отделение» используется для описания процесса агломерации, агрегации, скопления или слипания частиц/капель, который возникает, когда более крупная частица/капля перемещается в направлении, противоположном потоку текучей среды, и сталкивается с меньшими частицами, по существу отделяя меньшие частицы от суспензии.

Возвращаясь к Фиг. 27А, проточная/сепараторная камера 128 включает в себя массив 130 преобразователей и отражатель 132 на противоположных сторонах камеры. При использовании стоячие волны 134 создаются между массивом 130 преобразователей и отражателем 132. Эти стоячие волны могут использоваться для агломерации частиц, и эта ориентация используется для агломерации частиц, которые являются плавучими (например, нефть). Текучая среда, содержащая оставшиеся частицы, далее выходит через выход 135 потока.

По мере агломерации плавучих частиц они в итоге преодолевают комбинированное воздействие сил сопротивления потока текучей среды и силы акустического излучения, и их плавучая сила 136 является достаточной, чтобы заставлять плавучие частицы подниматься вверх. В этом отношении сборный канал 133 окружен кольцеобразной камерой 131. Более крупные частицы будут проходить через этот канал и в сборную камеру 140. Эта сборная камера также может представлять собой часть выходного канала. Сборный канал и выход потока находятся на противоположных концах устройства.

Следует отметить, что плавучие частицы, образованные в сепараторной камере 128, последовательно проходят через соединительный канал 127 и стенку 129 сопла. Это заставляет поступающий поток из кольцеобразной камеры обтекать поднимающиеся агломерированные частицы за счет направленного внутрь радиального движения, сообщенного стенкой сопла. Это позволяет поднимающимся частицам также захватывать меньшие частицы в поступающем потоке, увеличивая результативность отделения. Длина соединительного канала 127 и стенки 129 профилированного сопла, таким образом, увеличивают результативность отделения. В особенности высокая результативность обнаружена для частиц с размером от 0,1 мкм до 20 мкм, где эффективность является очень низкой для традиционных способов.

Конструкция здесь обеспечивает оптимизированный профиль скорости с низкой турбулентностью потока на входе в проточную камеру 128, длину отделения до проточной камеры для усиления агломерации и/или слипания частиц до акустической сепарации и использование вихрей для сбора для содействия удалению частиц в сборном канале 133.

В экспериментах, выполненных с устройством на Фиг. 27А, массив 120 преобразователей устанавливался в системе 124, удалялся и далее устанавливался массив 122 преобразователей. Массивы работали параллельно так, что каждый преобразователь приводился в действие одним и тем же сигналом напряжения от усилителя. Электронная схема приведения в действие состояла из функционального генератора и радиочастотного усилителя ENI A300 300 Вт. Результаты испытания показаны в Таблице 3. Первое испытание использовало только два из квадратных преобразователей 1 дюйм × 1 дюйм (25,4 мм × 25,4 мм) или массива 120, ориентированных параллельно друг другу, и проводилось со скоростью потока 1300 мл/мин. Оно привело к эффективности сепарации нефти в 88%. Следующее испытание включало в себя все три квадратных преобразователя и скорость потока 2000 мл/мин и привело к эффективности 93%. Эти результаты являются превосходными и демонстрируют, что технология является масштабируемой до более крупных каналов потока, приводимых в действие массивами преобразователей. Следующий набор испытаний включает в себя массив 122 прямоугольных преобразователей 1 дюйм × 2,5 дюйма (25,4 мм × 63,5 мм). Для первого испытания запускался только один преобразователь и привел к эффективности 87%. Второе испытание с обоими преобразователями привело к рабочей эффективности 97%. Для преобразователей 1 дюйм × 2,5 дюйма (25,4 мм × 63,5 мм) уровень мощности, который использовался, основывался на работе преобразователя на безопасных уровнях. Для этих испытаний расход энергии для средней системы составлял 1 кВт·ч/м³.

Конфигурация преобразователя	Количество активных преобразователей	Полная мощность на входе (Вт)	Скорость потока (мл/мин)	Продолжительность (мин)	Эффективность улавливания (%)
Преобразователи 1 дюйм × 1 дюйм	2	80	1300	15	88%
Преобразователи 1 дюйм × 1 дюйм	3	120	2000	15	93%
Преобразователи 1 дюйм × 2,5 дюйма	1	100	2000	8	87%
Преобразователи 1 дюйм × 2,5 дюйма	2	100	1000	15	97%

Численное моделирование также выполнялось для системы среднего размера с охватом 4 дюйма (101,6 мм) для акустической стоячей волны. Моделировалось множество преобразователей для исследования воздействия связи между преобразователями. Выполнялись развертки по частоте и идентифицировались резонансные частоты, для которых формы акустической моды крепко связываются с формами моды более высокого порядка преобразователя. Сравнения между численными и экспериментальными результатами являются превосходными и демонстрируют точность моделей. Фиг. 28 показывает поле акустического давления модели с двумя преобразователями на правой стороне. Фотография захваченных капель нефти в стоячей волне показана на Фиг. 29. И эксперимент, и модель показывают идентичные признаки. На некоторых частотах возбуждения капли нефти хорошо захватывались в стоячей

волне за пределами объема текучей среды, ограниченного площадью преобразователя, указывая на расширенное акустическое поле со значительными силами захвата. Фиг. 30 показывает фотографию таких захваченных капель нефти. Фиг. 31 показывает модель поля акустического давления, которая прогнозирует идентичные признаки.

5 Преобразователь обычно представляет собой тонкую пьезоэлектрическую пластину, которая работает в моде (3, 3), с электрическим полем в оси z и первичным смещением в оси z, как показано на Фиг. 38. Преобразователь обычно связан на одной стороне с воздухом (т.е. воздушным зазором в пределах преобразователя), а на другой стороне с водой (т.е. основной текучей средой). Типы волн, формируемых в пластине, известны
10 как составные волны. Поднабор составных волн в пьезоэлектрической пластине подобен симметричным (также называемым волнами сжатия или расширения) волнам утечки Лэмба. Пьезоэлектрическое свойство пластины обычно приводит к возбуждению симметричных волн Лэмба. Волны имеют утечку, так как они излучаются в слой воды, что приводит к формированию акустических стоячих волн в слое воды. Симметричные
15 волны Лэмба имеют профили смещения, которые симметричны в отношении нейтральной оси пластины, как показано на левой стороне на Фиг. 32. Симметричные волны Лэмба представляются более желательными, чем антисимметричные волны Лэмба, как показано на правой стороне на Фиг. 32. Волны Лэмба существуют в тонких пластинах бесконечной протяженности со свободными от напряжения условиями на
20 их поверхностях. Так как преобразователи этого варианта выполнения ограничены по свойству, фактические модальные смещения являются более сложными. Фиг. 33 показывает обычное изменение смещения в плоскости (смещения x) и смещения вне плоскости (смещения y) по толщине пластины, причем смещение в плоскости представляет собой четную функцию по толщине пластины, а смещение вне плоскости
25 представляет собой нечетную функцию. Из-за ограниченного размера пластины компоненты смещения изменяются по ширине и длине пластины. На Фиг. 38 показан пример, который иллюстрирует моду смещения (3, 3). Компонент вне плоскости отличается тремя периодическими волнистостями, компонент в плоскости отличается тремя колебаниями. Этот профиль смещения преобразователя называется модой (3, 3).
30 Дополнительные колебания более высокой частоты видны в профиле смещения, например, колебание с 25 максимумами, которое представляет собой 25 гармонику основной продольной моды в направлении ширины длины, так как отношение ширины и длины к толщине составляет 25 для заданного преобразователя. В общем, мода (m, n) представляет собой моду смещения преобразователя, при которой имеются m
35 волнистостей в смещении преобразователя в направлении ширины и n волнистостей в направлении длины, и при изменении толщины, которое описано на Фиг. 33. Максимальное количество m и n представляет собой функцию от размера кристалла и частоты возбуждения.

Как ранее пояснялось, преобразователи приводятся в действие так, что
40 пьезоэлектрический кристалл колеблется в модах более высокого порядка общей формулы (m, n), где m и n являются независимыми 1 или больше. Фиг. 34-38 показывают по порядку иллюстрации мод (1,1), (2,1), (1,2), (2,2) и (3,3) колебаний прямоугольной пластины. На каждом чертеже пластина 156 имеет длину 150, которая равна или длиннее ее ширины 152. Вид в перспективе, вид по длине (y=0) и вид по ширине (x=0) обеспечены
45 для каждой моды колебаний.

Фиг. 34 показывает моду (1, 1) колебаний. В этой моде пластина имеет ее максимальное смещение в пучности 154 в центре прямоугольной пластины 156. Фиг. 34В показывает вид по длине 150 (т.е. по стрелке 151), а Фиг. 34С показывает вид по

ширине 152 (по стрелке 153). Фиг. 34D показывает смещение в плоскости, связанное с модой (1, 1) колебаний.

Фиг. 35 показывает моду (2, 1). Здесь имеются две пучности 160 (достигающие максимума выше плоскости мембраны 156). Эти две пучности находятся на противоположных сторонах узловой линии минимального смещения 162, которое проходит параллельно ширине 152 и в центре длины 150. Отметим, что в случае квадратного преобразователя (такого, в котором длина 150 равна ширине 152, как и в преобразователе 112 на Фиг. 19 и на Фиг. 25), моды (1, 2) и (2, 1) являются всего лишь чередованиями друг друга. Фиг. 35B показывает вид по длине (т.е. по стрелке 161), а Фиг. 35C показывает вид по ширине (т.е. по стрелке 163).

Фиг. 36 показывает моду (1, 2). Эта мода также имеет две пучности 166 и одну узловую линию 164. По сравнению с Фиг. 35, отличие здесь заключается в том, что узловая линия 164 проходит по длине (параллельно длине 150) и в центре ширины 152. Фиг. 36B показывает вид по стрелке 165, а Фиг. 36C показывает вид по стрелке 167.

Фиг. 37, показывающая моду (2, 2), имеет четыре пучности 174 и две узловые линии 170, 172. Одна узловая линия 172 находится в центре ширины 152, параллельной длине 150. Другая узловая линия 170 находится в центре длины 150, параллельной ширине 152. Фиг. 37B показывает вид по стрелке 171, а Фиг. 37C показывает вид по стрелке 173.

Фиг. 38 показывает моду (3, 3) колебаний. Имеются две узловые линии 186 по длине и две узловые линии 180 по ширине. Три набора пучностей 182 создаются узловыми линиями 180, а три набора пучностей 184 создаются узловыми линиями 186. Это приводит в общей сложности к девяти пучностям, возникающим в результате их пересечения в каждом направлении. Фиг. 38B показывает вид по стрелке 181, а Фиг. 38C показывает вид по стрелке 183. Фиг. 38D показывает смещение в плоскости, связанное с модой (3, 3) колебаний.

Эти моды являются иллюстративными, и в общем преобразователи будут колебаться в модах более высокого порядка, чем (2, 2). Моды более высокого порядка будут производить больше узлов и пучностей, приводить к трехмерным стоячим волнам в слое воды, отличаясь значительными градиентами в акустическом поле во всех направлениях, не только в направлении стоячих волн, но и в боковых направлениях. Вследствие этого, акустические градиенты приводят к более значительным силам захвата в боковом направлении.

Фиг. 39A-39C показывают поле давления, формируемое преобразователем, работающим на различных модах смещения. На каждом чертеже колеблющийся кристалл проиллюстрирован в $y=1$ дюйм (25,4 мм), а получаемая стоячая волна, которая передается в текучую среду, проиллюстрирована ниже. Фиг. 39A показывает величину акустического давления, когда слой воды приводится в движение преобразователем, работающим преимущественно на моде (1, 1). Получающееся в результате поле давления представляет собой поле, которое может быть описано в виде главным образом одномерной стоячей волны с медленно изменяющейся амплитудой акустического давления в боковом направлении. Фиг. 39B показывает поле давления, возбуждаемое преобразователем, работающим преимущественно на моде (2, 2), и подобным образом Фиг. 39C показывает поле давления, когда преобразователь работает преимущественно на моде (3, 3). Заметим, что возбуждение (2, 2) приводит к формированию четырех (2x2) параллельных акустических стоячих волн, а (3, 3) приводит к девяти (3x3) стоячим волнам. Отношение бокового компонента силы акустического излучения к аксиальному компоненту вычислялось для этих трех полей давления. Возбуждение на моде (2, 2)

приводит к удваиванию этого отношения по сравнению с модой (1, 1). Возбуждение на моде (3, 3) приводит к утраиванию отношения моды (1, 1), таким образом, демонстрируя преимущество возбуждающих мод более высокого порядка.

В общем случае, но конкретно в отношении массива преобразователей на Фиг. 27А, конфигурация преобразователя настоящего изобретения создает трехмерное поле давления, которое включает в себя стоячие волны, перпендикулярные или нормальные к потоку текучей среды. Градиенты давления являются достаточно большими для формирования акустофоретических сил ортогонально направлению стоячей волны (т.е. акустофоретические силы параллельны направлению потока текучей среды), которые имеют такой же порядок величины, как и акустофоретические силы в направлении волны. Это обеспечивает усиленный захват и сбор частиц в проточной камере и по четко определенным линиям захвата, в отличие от простого захвата частиц в собирающих плоскостях, как в традиционных устройствах. Частицы имеют значительное время для перемещения к узлам или пучностям стоячих волн, формируя области, где частицы могут концентрироваться, агломерироваться и/или слипаться.

В некоторых вариантах выполнения поток текучей среды имеет число Рейнольдса до 1500, т.е. возникает ламинарный поток. Для практического применения в промышленности число Рейнольдса обычно составляет от 10 до 1500 для потока через систему. Перемещение частиц относительно движения текучей среды формирует число Рейнольдса намного меньше 1,0. Число Рейнольдса представляет отношение воздействий инертного потока к воздействиям вязкости в заданном поле потока. Для чисел Рейнольдса ниже 1,0 силы вязкости являются преобладающими в поле потока. Это приводит к значительному демпфированию, где силы сдвига являются преимущественными во всем потоке. Этот поток, где силы вязкости являются преобладающими, называется потоком Стокса. Поток меласс является примером. Профилирование и обтекаемость стенки почти не имеют значения.

Это связано с потоком очень вязких текучих сред или потоком в очень маленьких каналах, подобных микроэлектромеханическим устройствам. Профилирование входа почти не имеет значения. Поток частиц относительно текучей среды в сепараторе частиц FSA будет представлять собой поток Стокса, так как и диаметры частиц, и относительные скорости между частицами и текучей средой являются очень маленькими. С другой стороны, число Рейнольдса для потока через систему будет значительно больше 1,0, так как скорость текучей среды и диаметр входа значительно больше. Для чисел Рейнольдса значительно больше 1,0 силы вязкости являются преобладающими только там, где поток находится в контакте с поверхностью. Эта область вязкости вблизи поверхности называется пограничным слоем и была впервые распознана Людвигом Прандтлем (источник 2). В потоке в канале поток будет ламинарным, если число Рейнольдса значительно выше 1,0 и ниже 2300 для полностью развитого потока в канале. Напряжение сдвига на стенке будет рассеиваться в струю с расстоянием. На входе канала скорость потока начинается равномерной. По мере того, как поток перемещается вниз канала, воздействие силы вязкости стенки будет рассеиваться внутрь по направлению к осевой линии для формирования параболического профиля скорости. Этот параболический профиль будет иметь максимальное значение, которое равно удвоенной средней скорости. Длина, требуемая для развития параболического профиля, представляет собой функцию от числа Рейнольдса. Для числа Рейнольдса, равного 20, которое является обычным для операции СНО, длина развития будет составлять 1,2 диаметров канала. Таким образом, полностью развитый поток возникает очень быстро. Эта максимальная скорость в центре может быть

разрушительной для акустической сепарации частиц. Также при числах Рейнольдса в ламинарном потоке может возникать турбулентность, и профилирование поверхности потока является очень важным при управлении потоком. По этим причинам сепаратор выполнялся с кольцеобразной входной камерой и трубой коллектора.

5 Большая кольцеобразная камера сопровождается соплом входной стенки, которое ускоряет и направляет текучую среду внутрь к осевой линии, как показано на Фиг. 27В. Профиль стенки будет иметь большое воздействие на профиль. Сходимость по площади увеличивает среднюю скорость потока, но профиль скорости определяет профиль стенки. Профиль стенки сопла будет представлять собой линию обтекания потока, и
10 он выполнен с маленьким радиусом изгиба в сепараторе.

Преобразователь/преобразователи используются для создания поля давления, которое формирует силы одинакового порядка величины и ортогонально к направлению стоячей волны, и в направлении стоячей волны. Когда силы приблизительно
15 одинакового порядка величины, частицы размера 0,1 мкм-300 мкм будут перемещаться более эффективно по направлению к областям агломерации («линиям захвата»), как видно на Фиг. 21С. За счет одинаково больших градиентов в ортогональном компоненте акустофоретической силы имеются «горячие точки» или области сбора частиц, которые
20 расположены не в обычных положениях в направлении стоячей волны между преобразователем 130 и отражателем 132. Горячие точки расположены в максимумах или минимумах потенциала акустического излучения. Такие горячие точки представляют положения сбора частиц, которые обеспечивают более хорошую передачу волны между преобразователем и отражателем во время сбора и более значительные межчастичные
силы, приводя к более быстрой и более хорошей агломерации частиц.

Одно применение акустофоретического сепаратора в сепарации клеток от среды,
25 такое как сепарация красных кровяных клеток, описано в заявке США № 13/866,584 Dutra и Lipkens, озаглавленной «ACOUSTOPHORETIC SEPARATION OF LIPID PARTICLES FROM RED BLOOD CELLS», которая настоящим полностью включена в данный документ путем ссылки.

Другое применение представляет собой сепарацию биологического лечебного белка
30 от биологических клеток, которые производят белок. В этом отношении современные способы сепарации требуют фильтрации или центрифугирования, каждое из которых может разрушать клетки, высвобождая белковый дебрис и энзимы в процесс очистки и увеличивая нагрузку на дальние участки системы очистки. Необходимо быть
способным обрабатывать объемы, имеющие более высокие плотности клеток, так как
35 это обеспечивает сбор большего количества лечебного белка и более хорошие эффективности затрат.

Фиг. 40А и Фиг. 40В представляют собой разобранные виды, показывающие различные части акустофоретических сепараторов. Фиг. 40А имеет только одну сепараторную камеру, тогда как Фиг. 40В имеет две сепараторные камеры.

40 Обращаясь к Фиг. 40А, текучая среда поступает в сепаратор 190 через вход 191 с четырьмя отверстиями. Переходная часть 192 обеспечена с возможностью создания потока вытеснения через сепараторную камеру 193. Преобразователь 40 и отражатель 194 расположены на противоположных стенках сепараторной камеры. Текучая среда далее выходит из сепараторной камеры 193 и сепаратора через выход 195.

45 Фиг. 40В имеет две сепараторные камеры 193. Связующий элемент 196 системы размещен между двумя камерами 193 для соединения их вместе.

Акустофоретическая сепарация была испытана на различных линиях клеток яичника китайского хомячка (СНО). В одном эксперименте раствор с начальной плотностью

клеток $8,09 \times 10^6$ клеток/мл, мутностью ячеек 1,232 ЕМФ и жизнеспособностью клеток приблизительно 75% сепарировался с использованием системы, которая изображена на Фиг. 40А. Преобразователи представляли собой кристаллы с 2 МГц, запускались приблизительно с 2,23 МГц, передавая 24-28 Вт. Использовалась скорость потока 25 мл/мин. Результат этого эксперимента показан на Фиг. 41А.

В другом эксперименте сепарировался раствор с начальной плотностью клеток $8,09 \times 10^6$ клеток/мл, мутностью 1,232 ЕМФ и жизнеспособностью клеток приблизительно 75%. Клеточная линия СНО имела бимодальное распределение размера частиц (при размере 12 мкм и 20 мкм). Результат показан на Фиг. 41В.

Фиг. 41А и Фиг. 41В созданы анализатором жизнеспособности клеток Beckman Coulter. Другие испытания показали, что частоты 1 МГц и 3 МГц были не настолько эффективны, как 2 МГц, при сепарации клеток от текучей среды.

В других испытаниях со скоростью потока 10 л/ч 99% клеток улавливались с подтвержденной жизнеспособностью клеток более 99%. Другие испытания со скоростью потока 50 мл/мин получали конечную плотность клеток 3×10^6 клеток/мл с жизнеспособностью около 100% и практически без роста температуры. В еще других испытаниях 95% уменьшение мутности получалось при скорости потока 6 л/ч. Смесь основной текучей среды и второй текучей среды или частицы может протекать через проточную камеру со скоростью по меньшей мере 0,25 литров/час.

Испытание на масштабированном блоке, показанном на Фиг. 27, выполнялось с использованием дрожжей в качестве имитатора СНО для биологических применений. Для этих испытаний при скорости потока 15 л/ч испытывались различные частоты, а также уровни мощности. Таблица 4 показывает результаты испытания.

Таблица 4 Результаты системы 2,5 дюйма × 4 дюйма при скорости потока 15 л/ч			
Частота (МГц)	30 Вт	37 Вт	45 Вт
2,2211	93,9	81,4	84,0
2,2283	85,5	78,7	85,4
2,2356	89,1	85,8	81,0
2,243	86,7	-	79,6

В биологических применениях многие части, например, трубопровод, ведущий в корпус и из него, входы, выходная камера и входная камера, все могут являться одноразовыми, при этом только преобразователь и отражатель подлежат очистке для повторного использования. Исключение центрифуг и фильтров обеспечивает более хорошую сепарацию клеток СНО без снижения жизнеспособности клеток. Форм-фактор акустофоретического сепаратора также меньше, чем у фильтрующей системы, что позволяет миниатюризировать сепарацию СНО. Преобразователи также могут приводиться в действие с возможностью создания быстрых изменений давления для предотвращения или очистки засоров из-за агломерации клеток СНО. Частота преобразователей также может изменяться с возможностью получения оптимальной результативности для заданной мощности.

Настоящее изобретение было описано в отношении примерных вариантов выполнения. Очевидно, что специалистом в данной области техники могут быть предусмотрены изменения и замены при прочтении и понимании вышеприведенного подробного описания. Предполагается, что настоящее изобретение подразумевается включающим в себя все такие изменения и замены в тех случаях, когда они входят в объем правовой охраны приложенной формулы изобретения или ее эквивалентов.

(57) Формула изобретения

1. Устройство для сепарации с помощью акустофореа, содержащее:
5 проточную камеру, имеющую по меньшей мере один вход и по меньшей мере один
5 Выход;
по меньшей мере один ультразвуковой преобразователь, расположенный на стенке
проточной камеры, причем преобразователь включает в себя пьезоэлектрический
материал, приводимый в действие сигналом напряжения с возможностью создания
10 многомерной стоячей волны в проточной камере, причём многомерная стоячая волна
10 включает в себя аксиальный компонент и боковой компонент, которые имеют
одинаковый порядок величины; и
отражатель, расположенный на стенке на противоположной стороне проточной
камеры от по меньшей мере одного ультразвукового преобразователя.
2. Устройство по п. 1, в котором многомерная стоячая волна может захватывать
15 частицы в поле потока, имеющем линейную скорость от 0,1 мм/с до более 1 см/с.
3. Устройство по п. 1, в котором пьезоэлектрический материал может колебаться в
форме моды более высокого порядка, чем мода поршня.
4. Устройство по п. 1, в котором пьезоэлектрический материал может колебаться
для создания профиля смещения, имеющего множество максимумов и минимумов.
- 20 5. Устройство по п. 1, в котором пьезоэлектрический материал имеет прямоугольную
форму.
6. Устройство по п. 1, в котором многомерная стоячая волна представляет собой
трехмерную стоячую волну.
7. Устройство по п. 1, в котором отражатель имеет неплоскую поверхность.
- 25 8. Устройство по п. 1, дополнительно содержащее:
вход устройства, который ведет к кольцеобразной камере;
стенку профилированного сопла, расположенную дальше входа устройства;
сборный канал, окруженный кольцеобразной камерой; и
соединительный канал, соединяющий стенку профилированного сопла с входом
30 проточной камеры.
9. Ультразвуковой преобразователь, содержащий:
корпус, имеющий верхний конец, нижний конец и внутренний объем;
кристалл на нижнем конце корпуса, имеющий подвергающуюся воздействию
внешнюю поверхность и внутреннюю поверхность, причем кристалл способен
35 колебаться при приведении в действие с помощью сигнала напряжения;
слой подложки, контактирующий с внутренней поверхностью кристалла, причем
слой подложки выполнен из по существу акустически прозрачного материала.
10. Преобразователь по п. 9, в котором по существу акустически прозрачный
материал представляет собой бальзовое дерево, пробку или поролон.
- 40 11. Преобразователь по п. 9, в котором по существу акустически прозрачный
материал имеет толщину до 1 дюйма (25,4 мм).
12. Преобразователь по п. 9, в котором по существу акустически прозрачный
материал имеет форму решетки.
13. Устройство для сепарации с помощью акустофореа, содержащее:
45 проточную камеру, имеющую вход и выход;
по меньшей мере один ультразвуковой преобразователь, расположенный на стенке
проточной камеры, причем преобразователь включает в себя кристалл, который может
возбуждаться для формирования многомерной стоячей волны, которая включает в

себя аксиальный компонент и боковой компонент, которые имеют одинаковый порядок величины; и

отражатель, расположенный на стенке на противоположной стороне проточной камеры от по меньшей мере одного ультразвукового преобразователя;

5 в котором колебание кристалла производит градиенты давления, которые формируют горячие точки, расположенные в минимуме или максимуме потенциала акустического излучения.

14. Способ сепарации второй текучей среды или частицы от основной текучей среды, содержащий этапы, на которых:

10 пропускают смесь основной текучей среды и второй текучей среды или частицы через устройство, причем устройство содержит:

проточную камеру, имеющую по меньшей мере один вход и по меньшей мере один выход;

15 по меньшей мере один ультразвуковой преобразователь, расположенный на стенке проточной камеры, причем преобразователь включает в себя пьезоэлектрический материал, приводимый в действие сигналом напряжения с возможностью создания многомерной стоячей волны в проточной камере, причём многомерная стоячая волна включает в себя аксиальный компонент и боковой компонент, которые имеют одинаковый порядок величины; и

20 отражатель, расположенный на стенке на противоположной стороне проточной камеры от по меньшей мере одного ультразвукового преобразователя; и

отправляют сигнал импульсного напряжения для приведения в действие по меньшей мере одного ультразвукового преобразователя для сепарации основной текучей среды от второй текучей среды или частицы.

25 15. Способ по п. 14, в котором многомерная стоячая волна приводит к силе акустического излучения, имеющей аксиальный компонент силы и боковой компонент силы, которые имеют одинаковый порядок величины.

16. Способ по п. 14, в котором многомерная стоячая волна может захватывать частицы в медленном поле, имеющем линейную скорость от 0,1 мм/с до более 1 см/с.

30 17. Способ по п. 14, в котором пьезоэлектрический материал может колебаться в форме моды более высокого порядка, чем мода поршня.

18. Способ по п. 14, в котором пьезоэлектрический материал может колебаться с возможностью создания профиля смещения, имеющего множество максимумов и минимумов.

35 19. Способ по п. 14, в котором ультразвуковой преобразователь содержит:

корпус, имеющий верхний конец, нижний конец и внутренний объем;

кристалл на нижнем конце корпуса, имеющий подвергающуюся воздействию внешнюю поверхность и внутреннюю поверхность, причем кристалл способен колебаться при приведении в действие с помощью сигнала напряжения;

40 слой подложки, контактирующий с внутренней поверхностью кристалла, причем слой подложки изготовлен из по существу акустически прозрачного материала.

20. Способ по п. 19, в котором по существу акустически прозрачный материал представляет собой бальзовое дерево, пробку или поролон.

45 21. Способ по п. 19, в котором по существу акустически прозрачный материал имеет толщину до 1 дюйма (25,4 мм).

22. Способ по п. 19, в котором внешняя поверхность кристалла покрыта материалом поверхности износа с толщиной в половину длины волны или менее, причем материал поверхности износа представляет собой уретановое, эпоксидное или силиконовое

покрытие.

23. Способ по п. 14, в котором смесь протекает вертикально вниз, а вторая текучая среда или частица всплывает вверх к сборному каналу.

24. Способ по п. 14, в котором смесь течет вертикально вверх, а вторая текучая среда или частица опускается вниз к сборному каналу.

25. Способ по п. 14, в котором частица представляет собой клетки яичника китайского хомячка (СНО), клетки гибридомы NS0, клетки почки новорожденного хомячка (ВНК) или человеческие клетки.

26. Способ по п. 14, в котором более 90% частицы сепарируют от основной текучей среды на основании объема.

27. Способ по п. 14, в котором стоячие волны являются нормальными к вертикальному направлению потока.

28. Способ по п. 14, в котором формируют горячие точки, которые расположены в минимуме или максимуме потенциала акустического излучения.

29. Способ по п. 14, в котором сигнал импульсного напряжения имеет синусоидальную, квадратную, пилообразную или треугольную форму волны.

30. Способ по п. 14, в котором сигнал импульсного напряжения имеет частоту от 500 кГц до 10 МГц.

31. Способ по п. 14, в котором сигнал импульсного напряжения приводят в действие с возможностью запуска и остановки амплитудной или частотной модуляции для исключения акустического течения.

32. Способ по п. 14, в котором смесь основной текучей среды и второй текучей среды или частицы имеет число Рейнольдса 1500 или менее до поступления в проточную камеру.

33. Способ по п. 14, в котором частица имеет размер от около 0,1 мкм до около 300 мкм.

34. Способ по п. 14, в котором смесь основной текучей среды и второй текучей среды или частицы протекает через проточную камеру со скоростью по меньшей мере 0,25 литров/час.

35. Способ по п. 14, в котором смесь протекает из входа устройства через кольцеобразную камеру и за стенкой профилированного сопла до поступления во вход проточной камеры.

36. Способ по п. 35, в котором сепарированная вторая текучая среда или частица агломерируется и поднимается и в котором втекающую смесь направляют к поднимающейся второй текучей среде или частице посредством стенки профилированного сопла.

37. Способ по п. 14, в котором смесь протекает из входа устройства через кольцеобразную камеру и за стенкой профилированного сопла для формирования крупномасштабных вихрей на входе в сборный канал до поступления во вход проточной камеры, таким образом усиливая сепарацию второй текучей среды или частицы от основной текучей среды.

38. Устройство для сепарации с помощью акустофореза, содержащее:

проточную камеру, имеющую по меньшей мере один вход и по меньшей мере один выход;

по меньшей мере один ультразвуковой преобразователь, расположенный на стенке проточной камеры, причем преобразователь включает в себя кристалл, приводимый в действие сигналом напряжения с возможностью создания многомерной стоячей волны в проточной камере, причём многомерная стоячая волна включает в себя аксиальный

компонент и боковой компонент, которые имеют одинаковый порядок величины; и отражатель, расположенный на стенке на противоположной стороне проточной камеры от по меньшей мере одного ультразвукового преобразователя;

5 причём по меньшей мере один ультразвуковой преобразователь формирует стоячую волну, которая производит агрегацию, скопление или слипание капель нефти микрометрового размера и смещает распределение размера частиц по направлению к более крупным каплям.

39. Устройство для сепарации с помощью акустофореза, содержащее:

10 проточную камеру, имеющую по меньшей мере один вход и по меньшей мере один выход;

по меньшей мере один ультразвуковой преобразователь, расположенный на стенке проточной камеры, причём преобразователь включает в себя кристалл, приводимый в действие сигналом напряжения с возможностью создания многомерной стоячей волны в проточной камере, причём многомерная стоячая волна включает в себя аксиальный

15 компонент и боковой компонент, которые имеют одинаковый порядок величины; и отражатель, расположенный на стенке на противоположной стороне проточной камеры от по меньшей мере одного ультразвукового преобразователя;

причем плавучесть частиц, которые захватываются в многомерной стоячей волне, может быть спрогнозирована на основании силы акустического излучения.

20

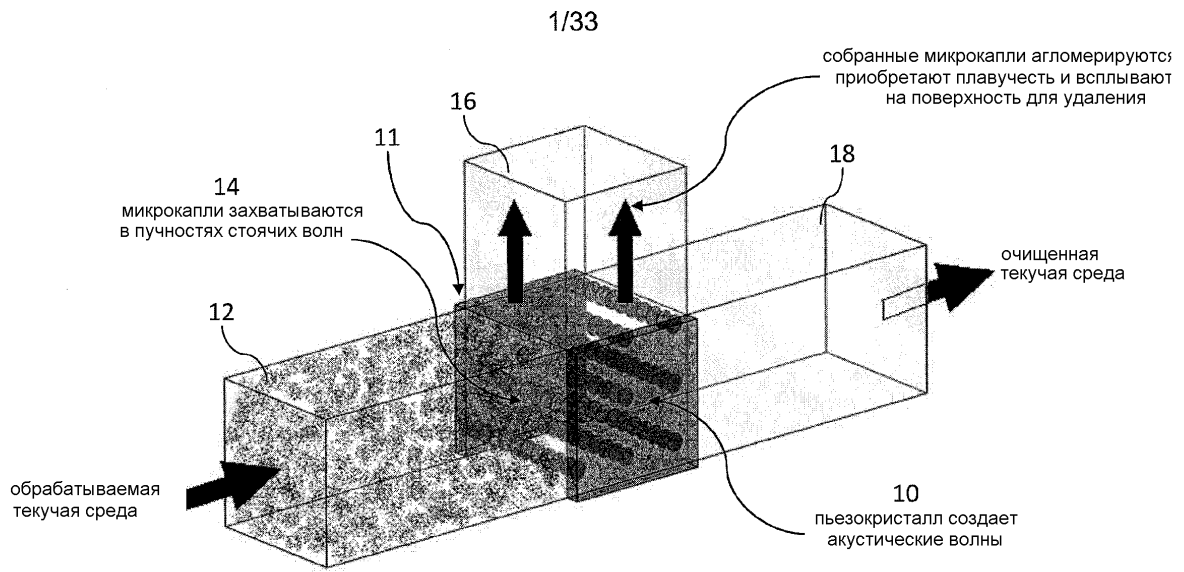
25

30

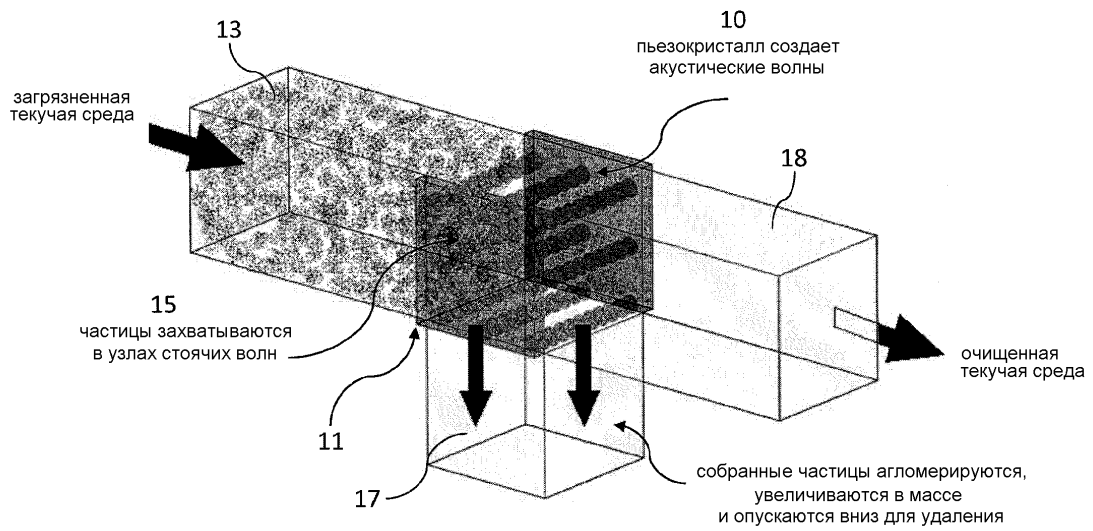
35

40

45

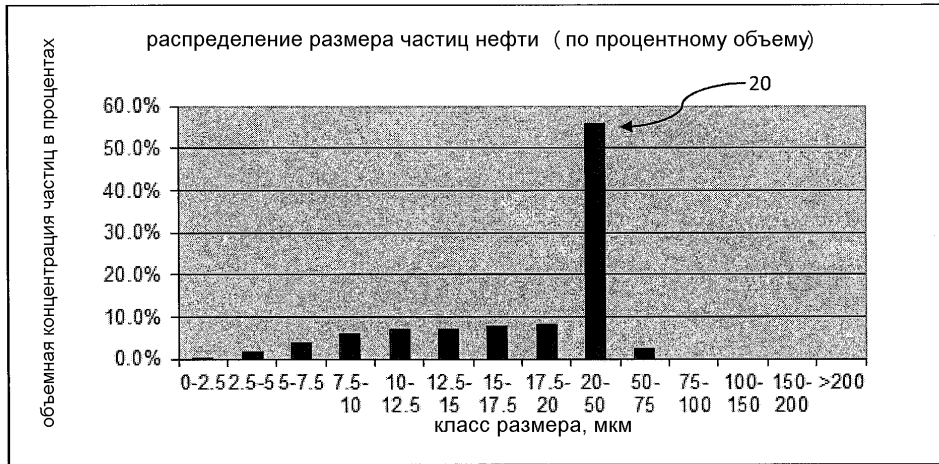


Фиг.1А

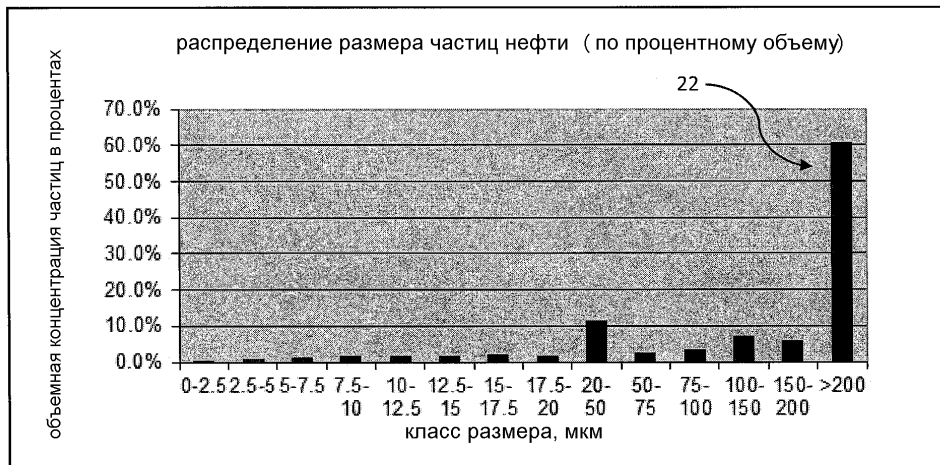


Фиг.1В

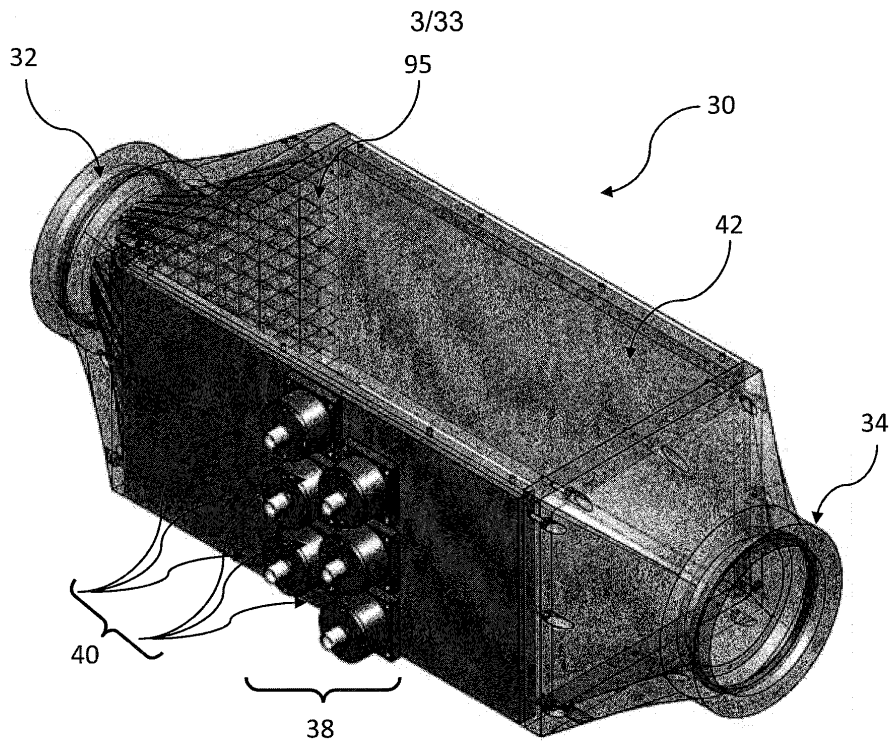
2/33



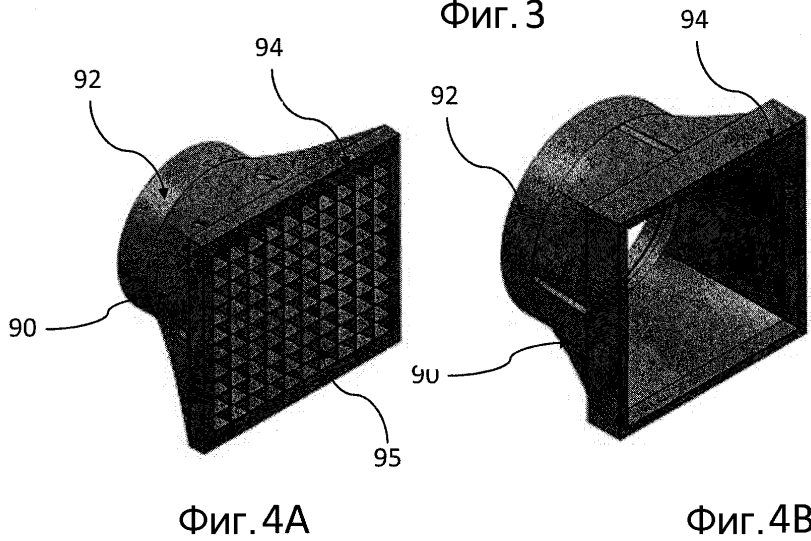
Фиг. 2А



Фиг.2В



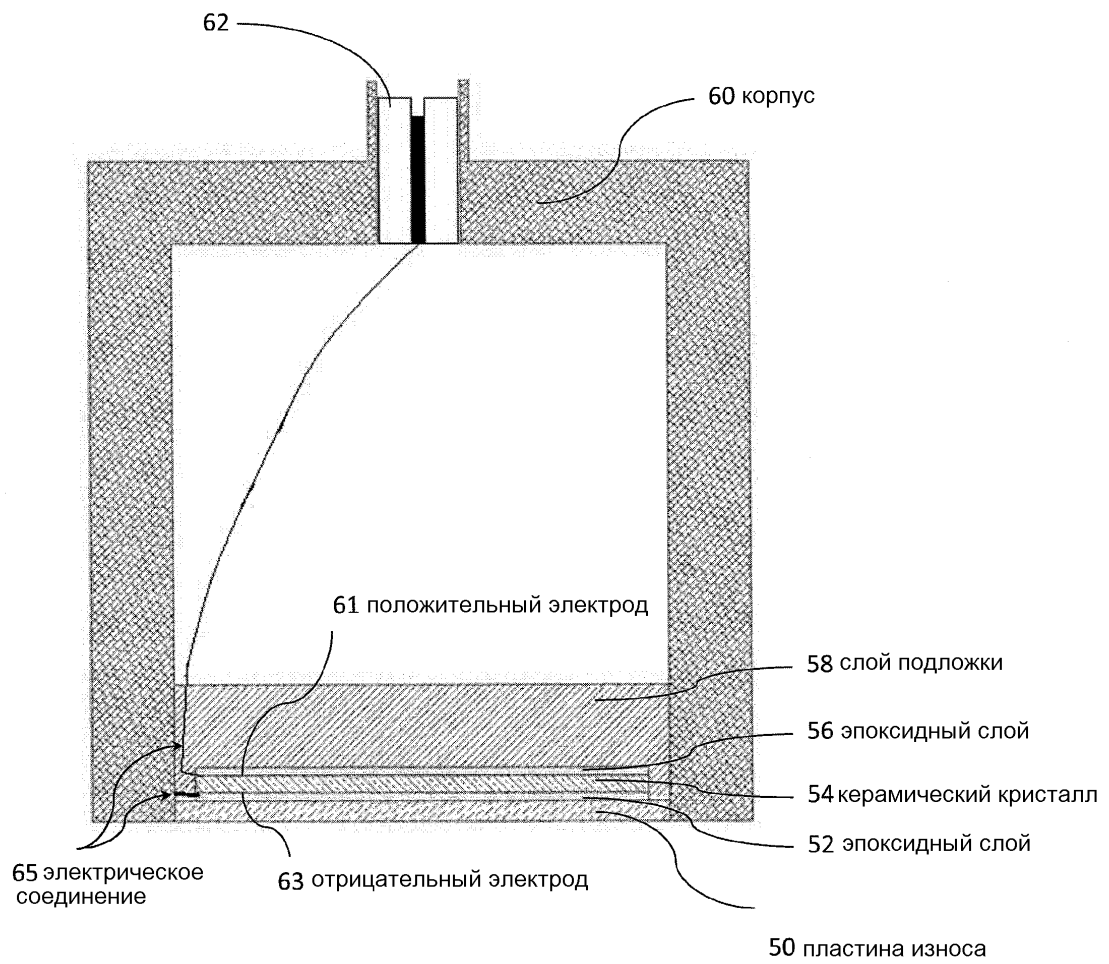
Фиг. 3



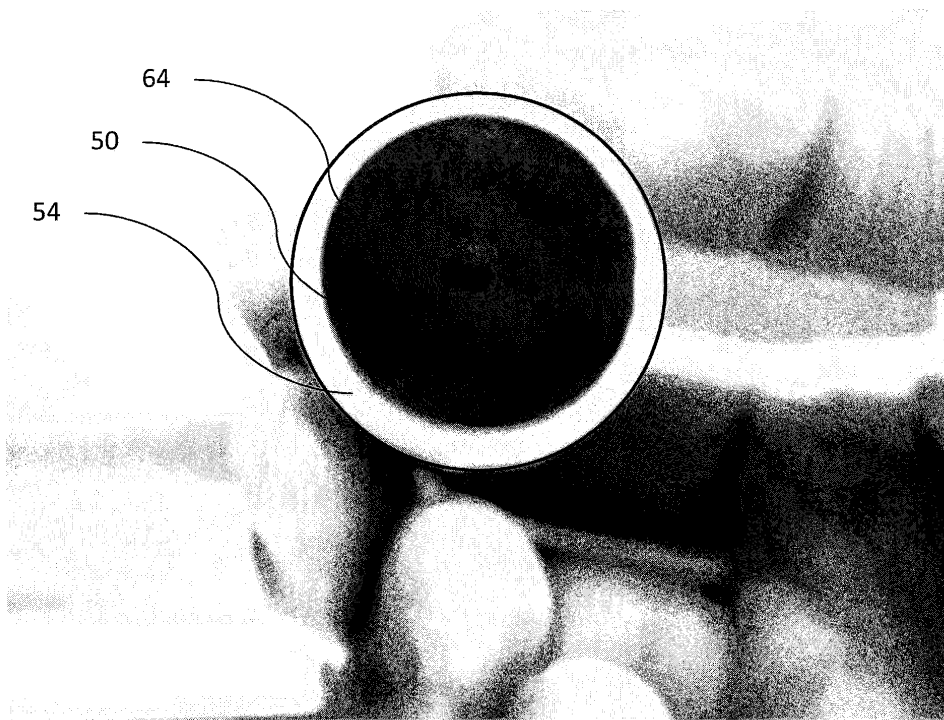
Фиг. 4А

Фиг. 4В

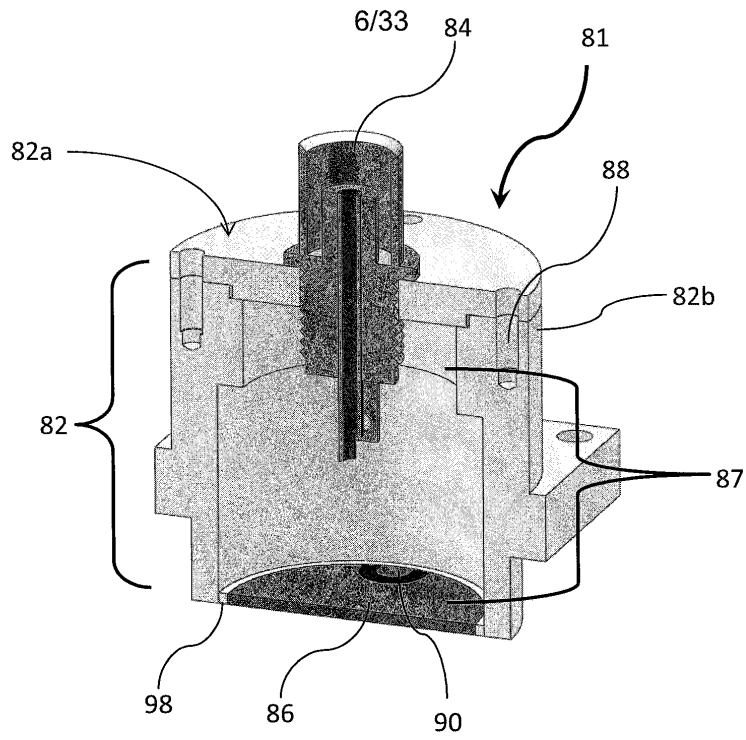
4/33



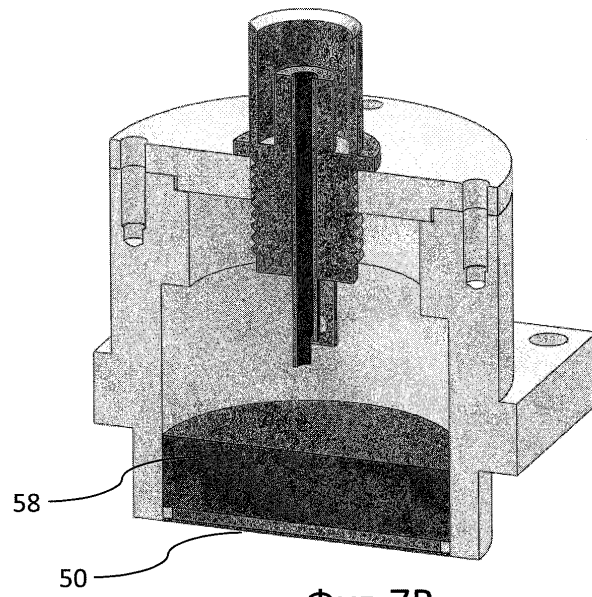
Фиг.5



Фиг. 6

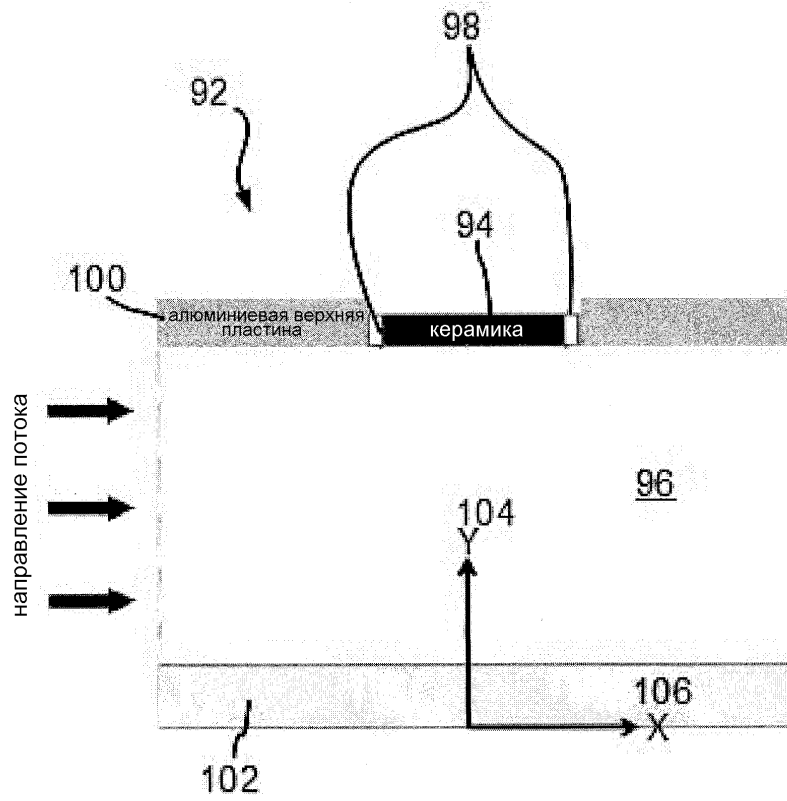


Фиг. 7А



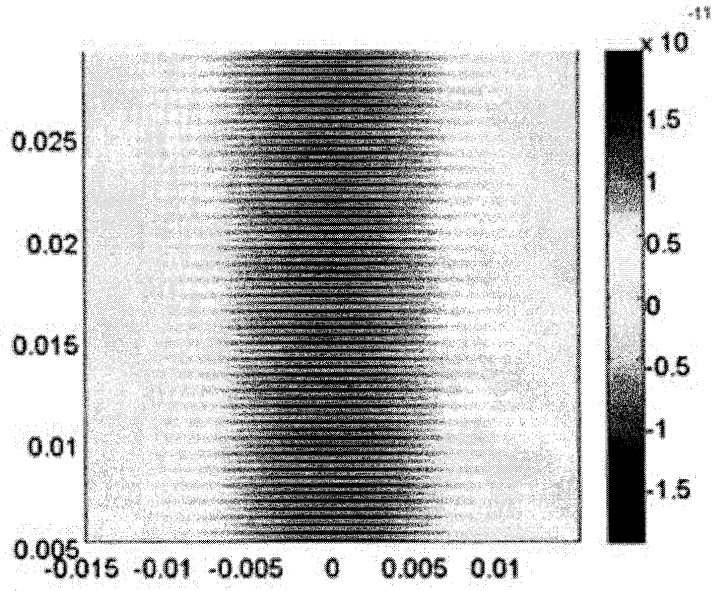
Фиг. 7В

7/33

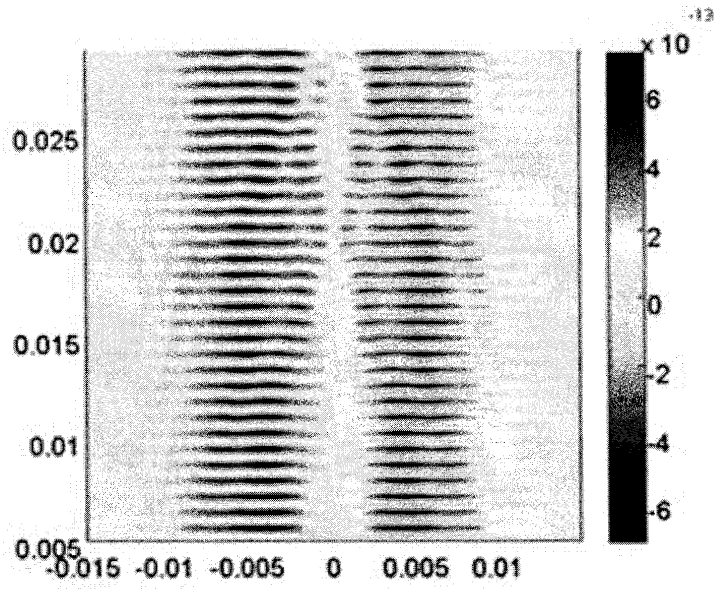


Фиг. 8

8/33

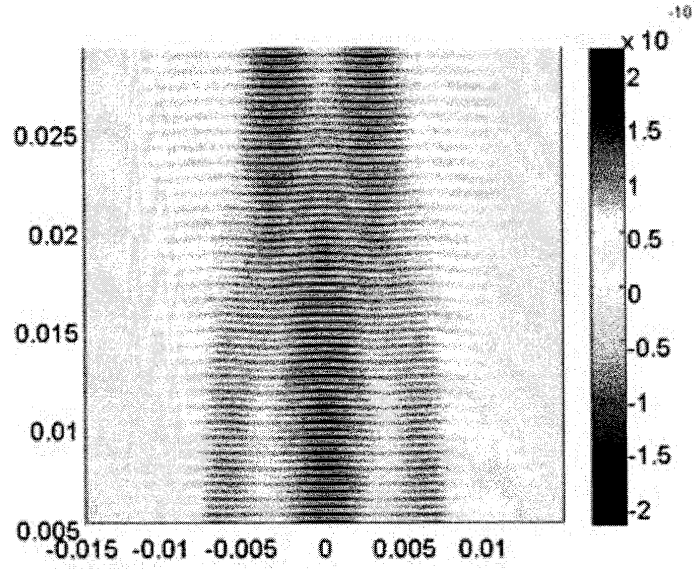


Фиг. 9А

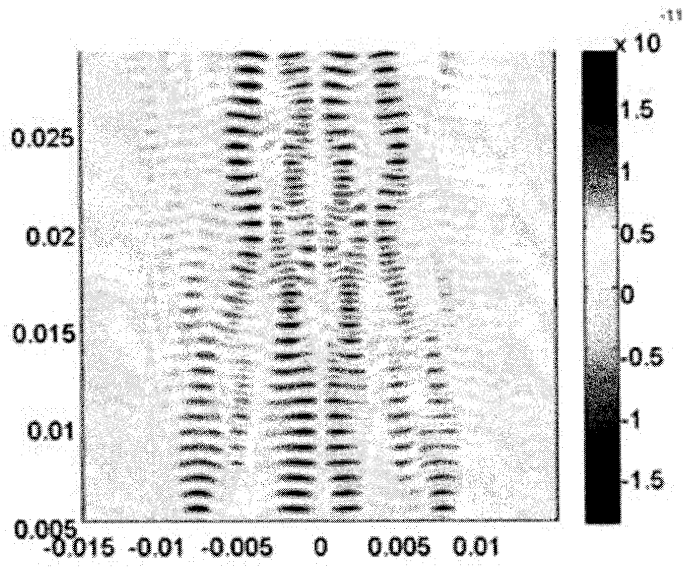


Фиг. 9В

9/33

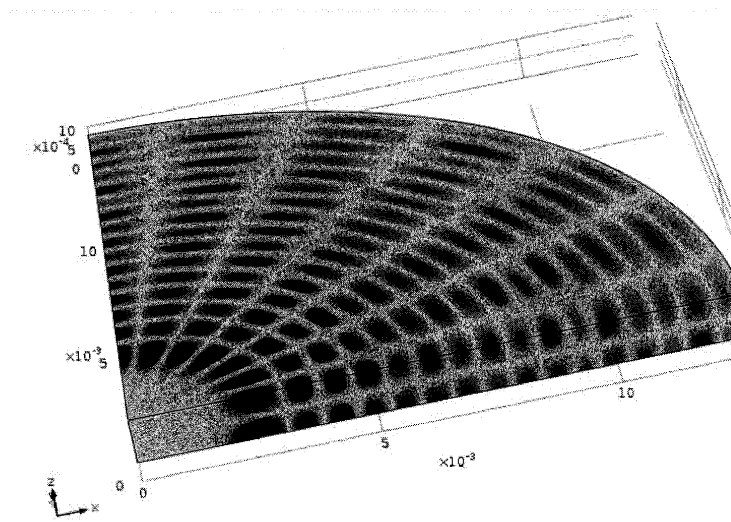


Фиг. 9С



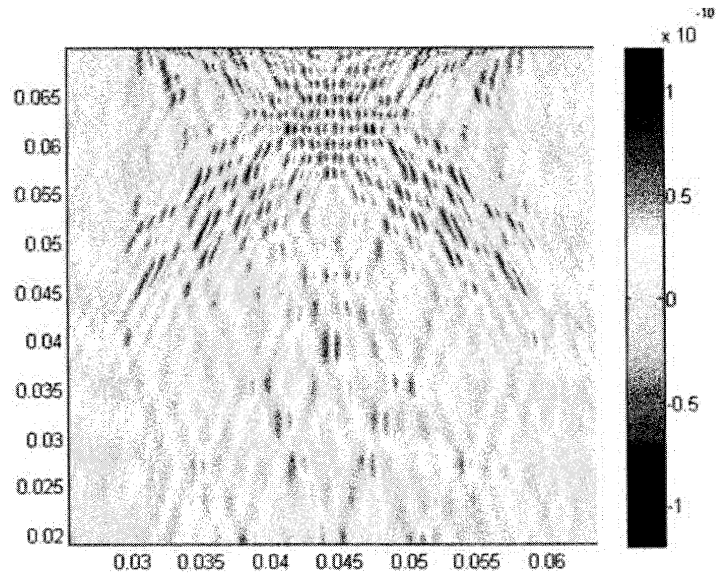
Фиг. 9D

10/33

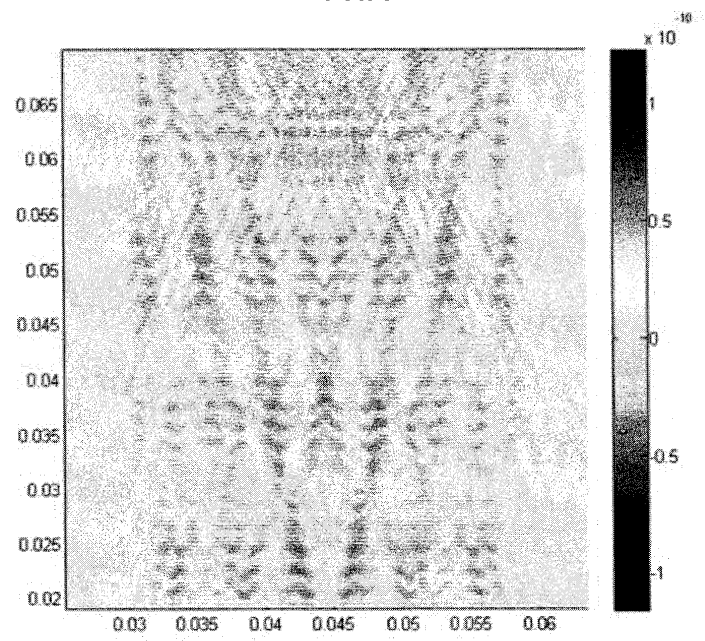


Фиг. 10

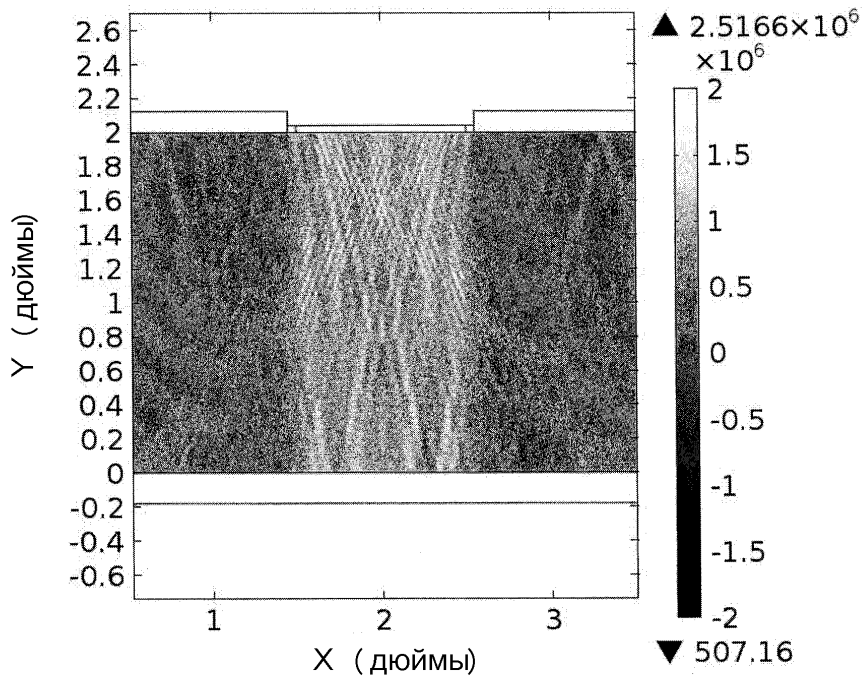
11/33



Фиг. 11

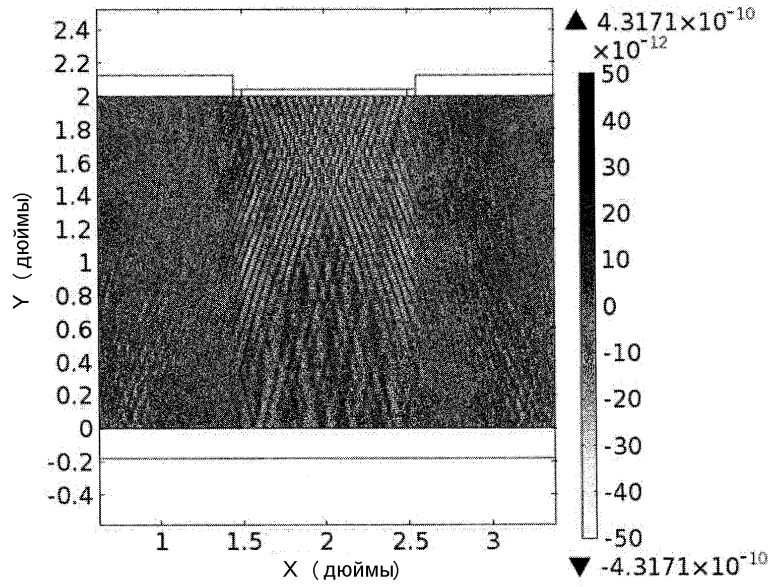


Фиг. 12

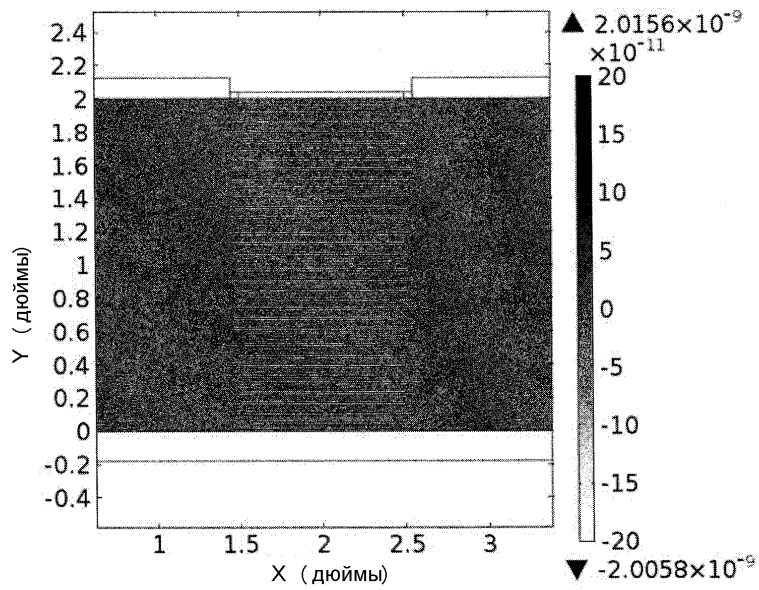


Фиг.13

13/33

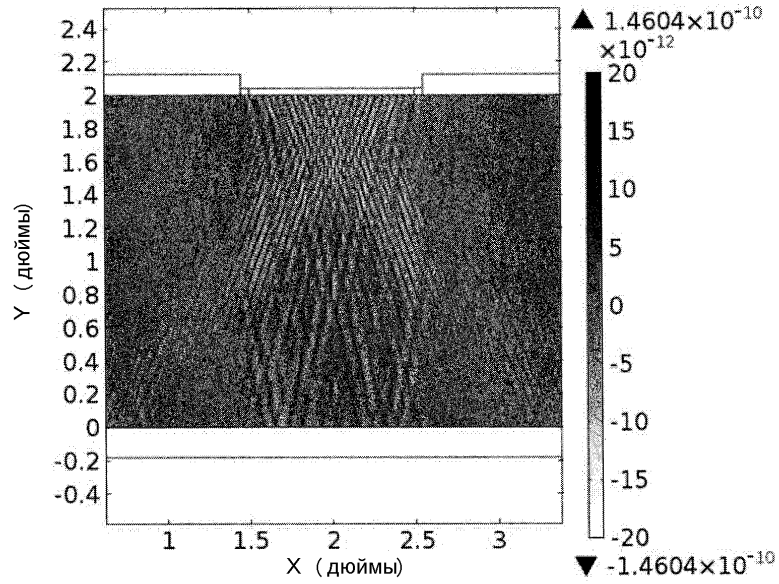


Фиг. 14

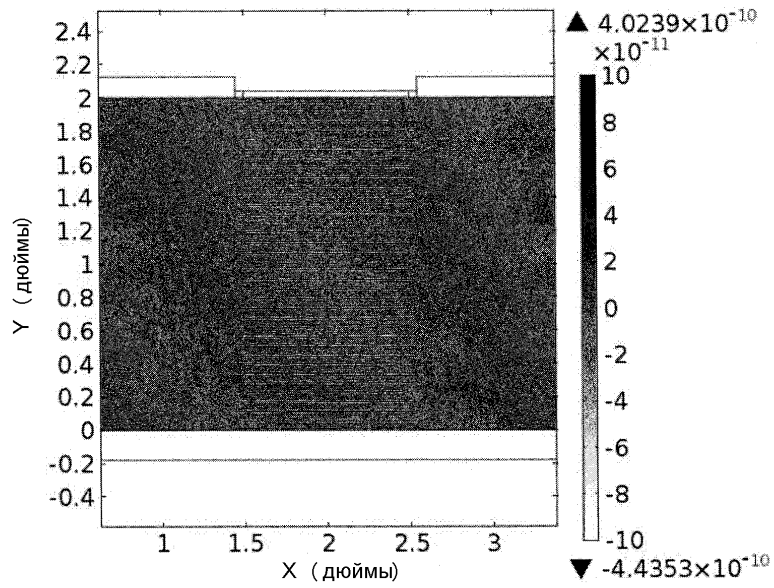


Фиг. 15

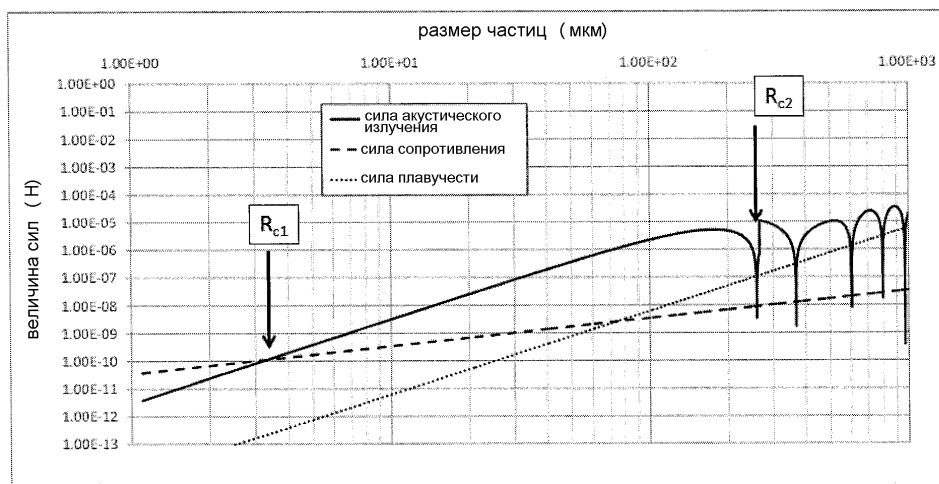
14/33



Фиг. 16

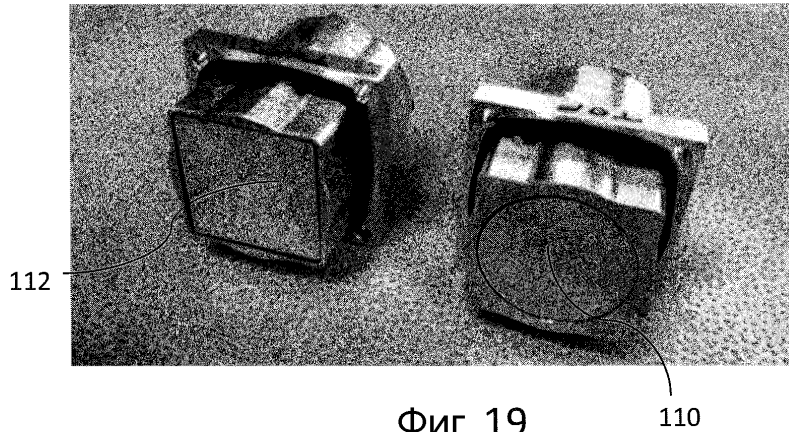


Фиг. 17



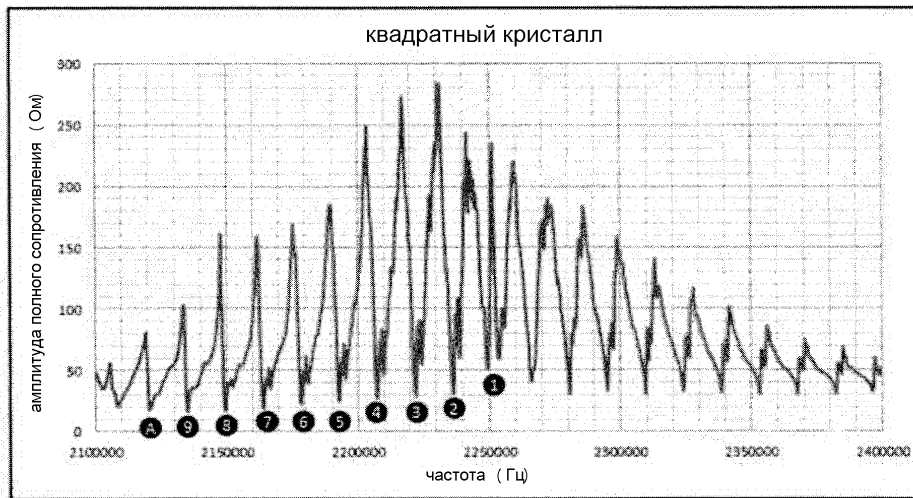
Фиг. 18

16/33



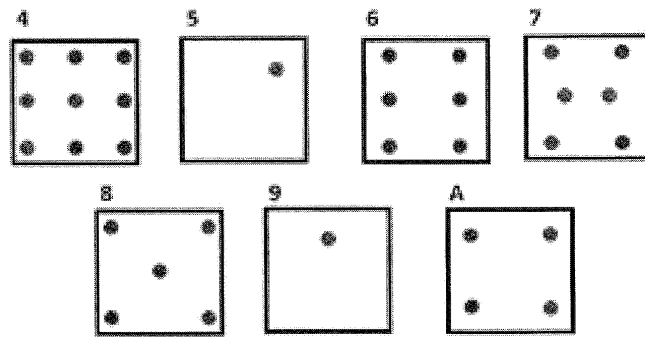
Фиг. 19

110

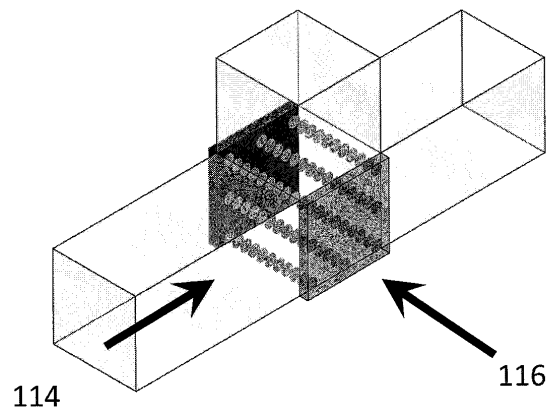


Фиг. 20

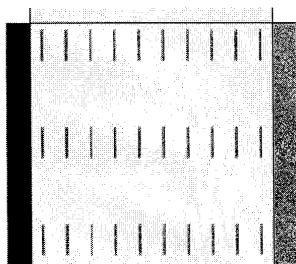
17/33



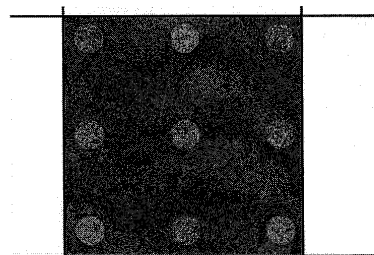
Фиг. 21А



Фиг. 21В

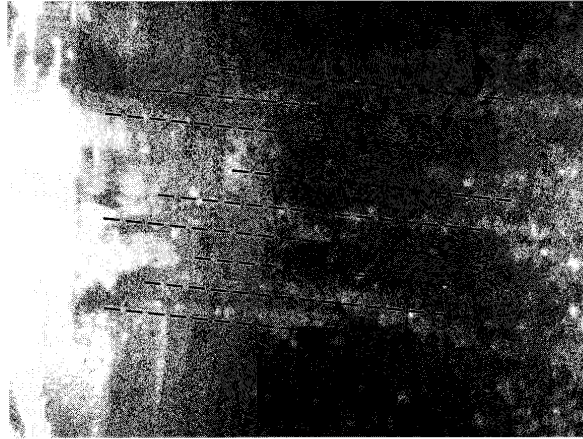


Фиг. 21С

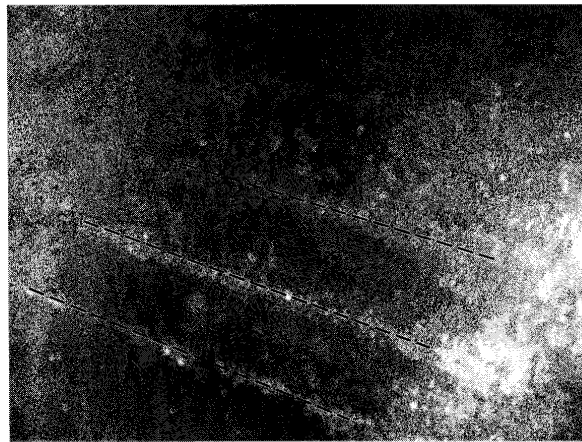


Фиг. 21D

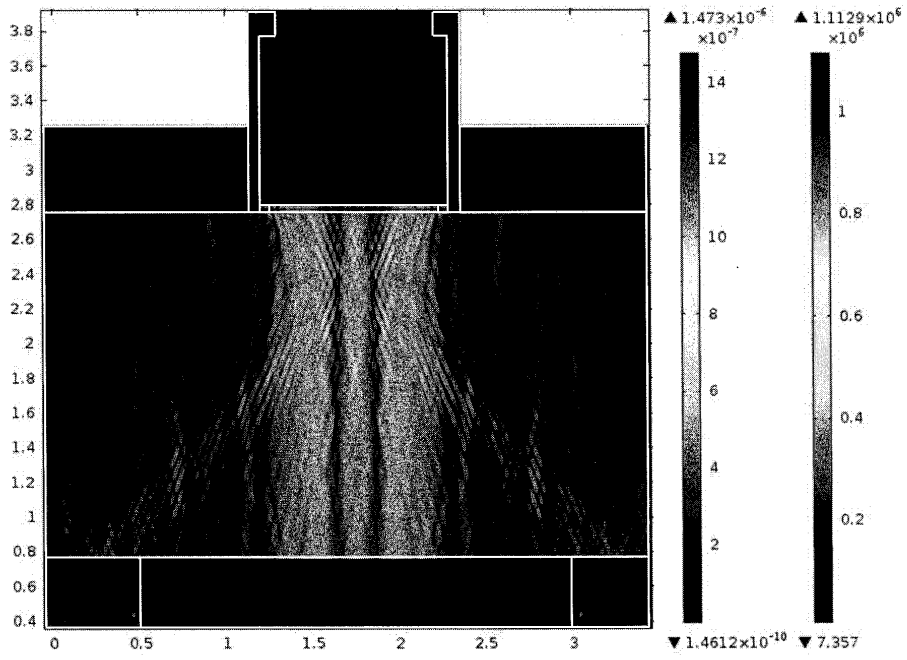
18/33



Фиг. 22

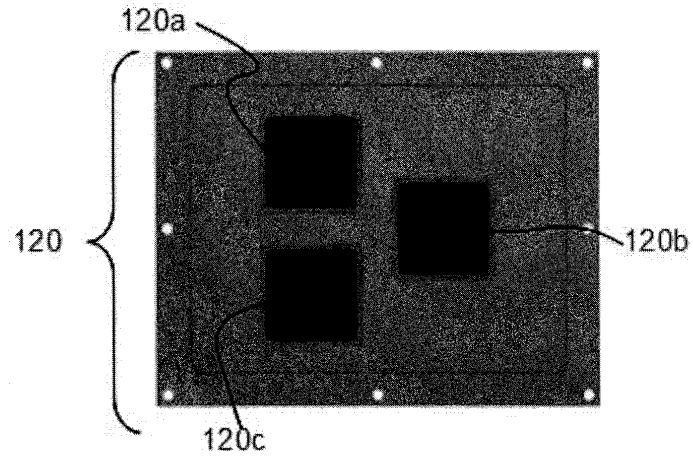


Фиг. 23

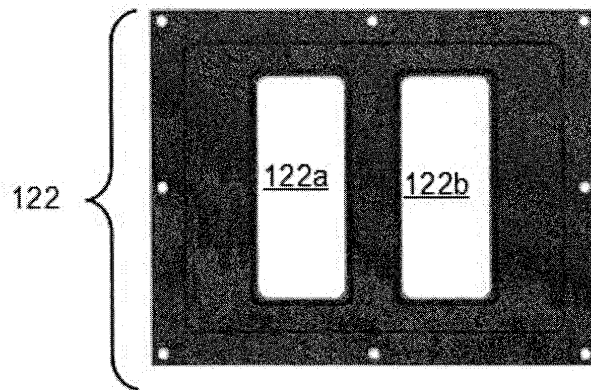


Фиг. 24

20/33

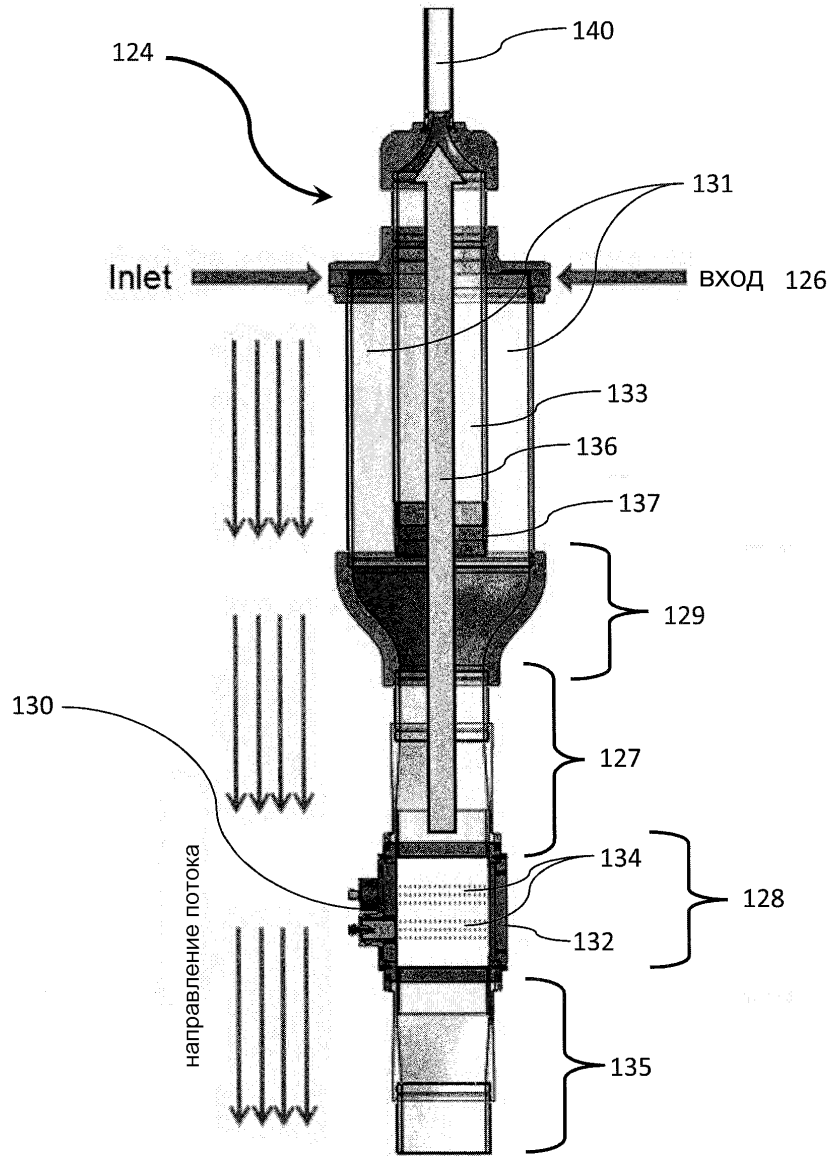


Фиг. 25



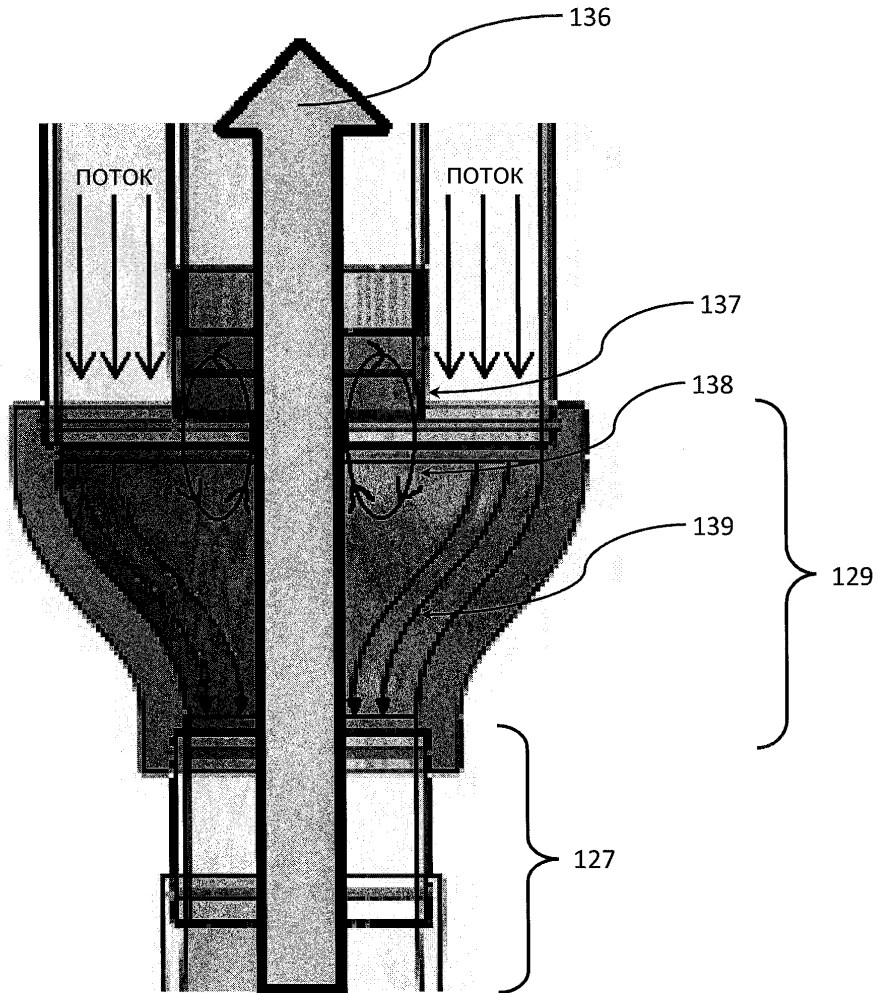
Фиг. 26

21/33



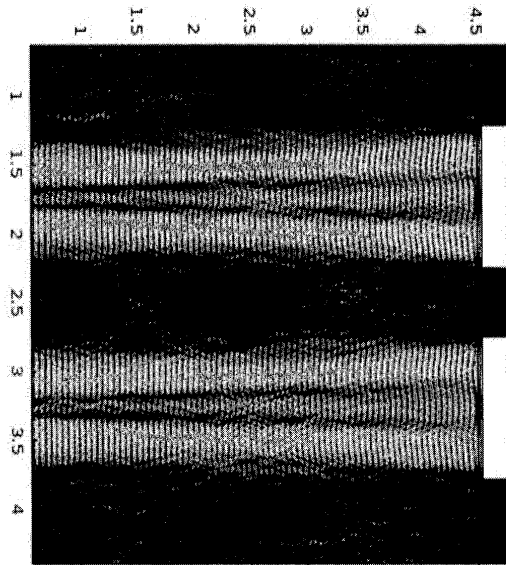
Фиг. 27А

22/33

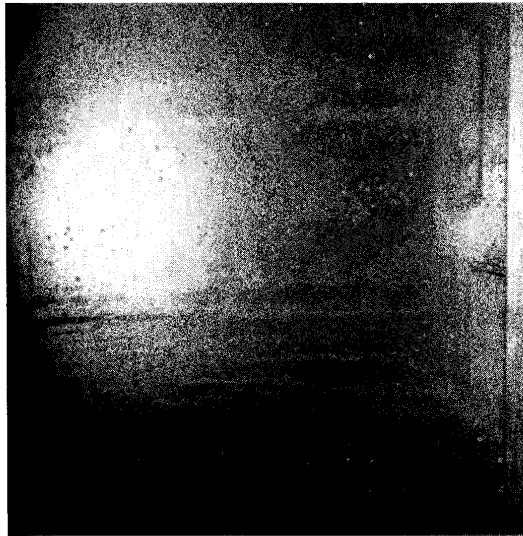


Фиг. 27В

23/33



Фиг. 28

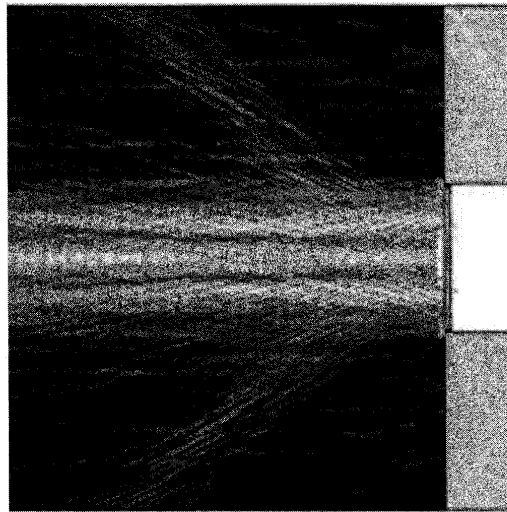


Фиг. 29

24/33

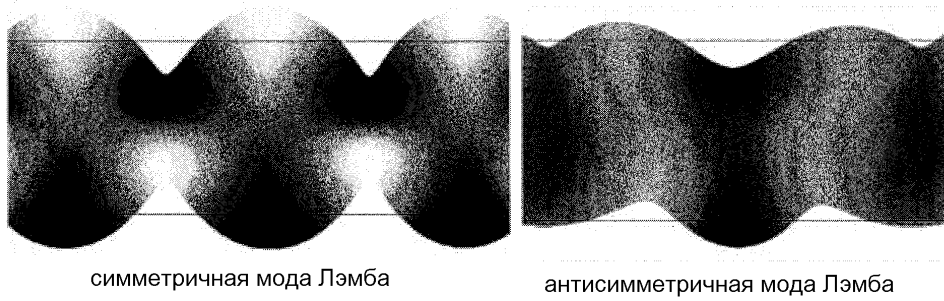


Фиг. 30

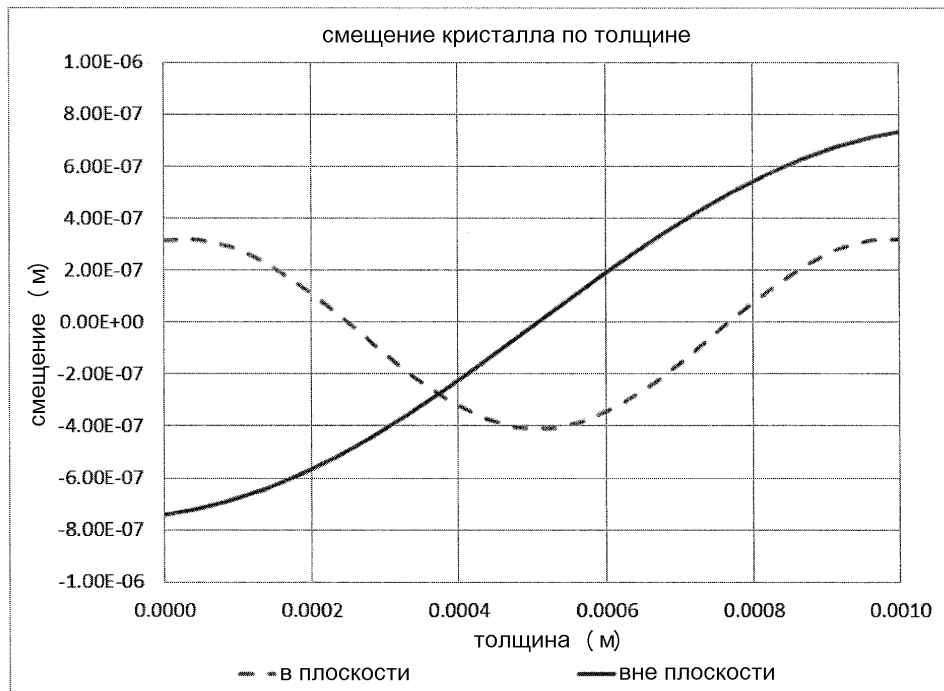


Фиг. 31

25/33

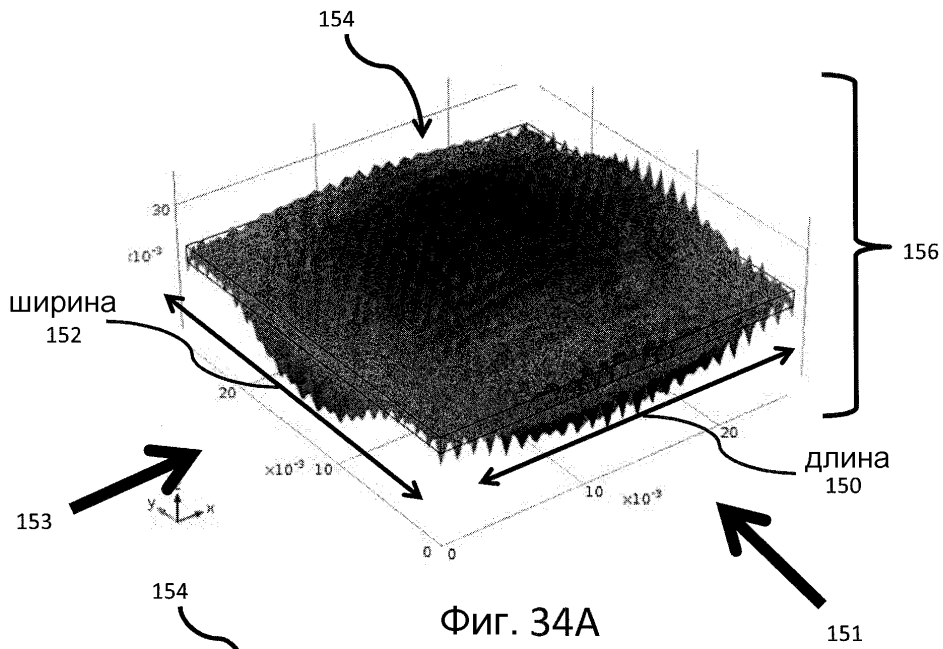


Фиг. 32

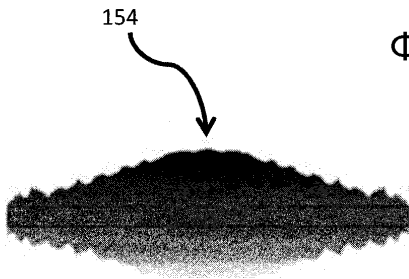


Фиг. 33

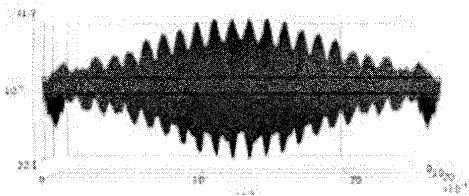
26/33



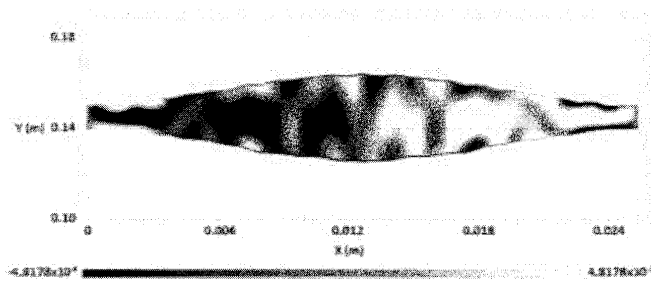
Фиг. 34А



Фиг. 34В

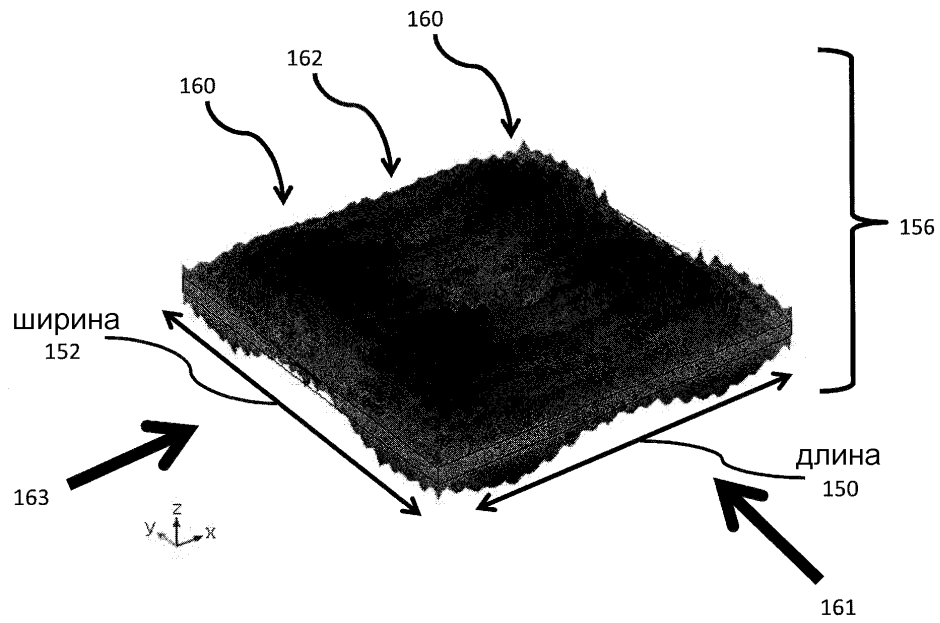


Фиг. 34С

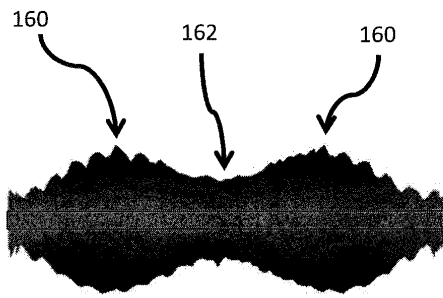


Фиг. 34D

27/33



Фиг. 35А

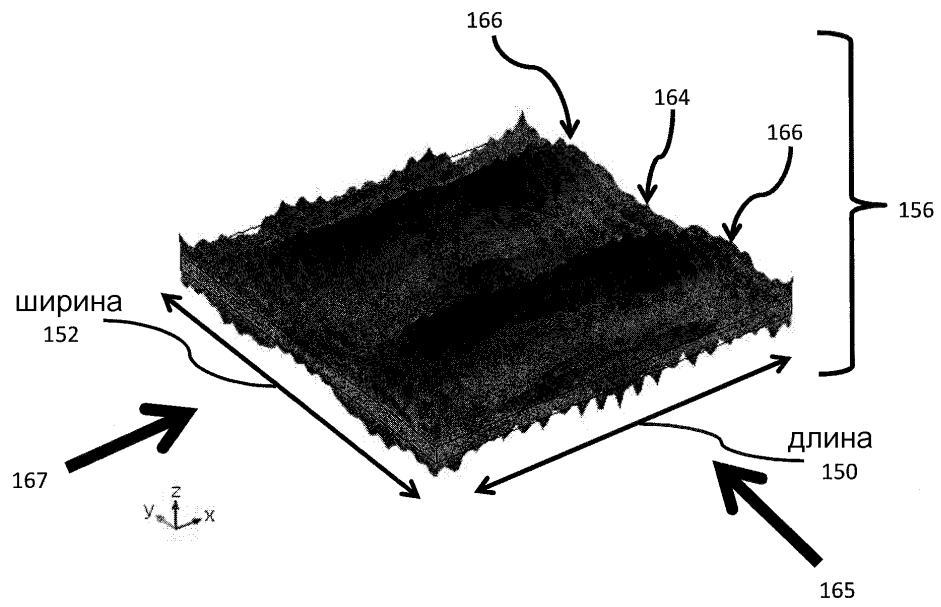


Фиг. 35В

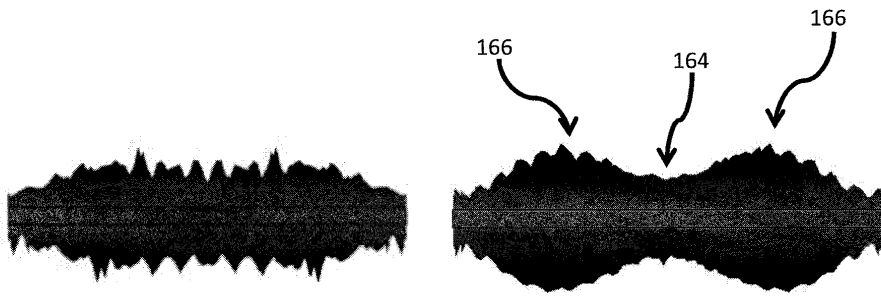


Фиг. 35С

28/33



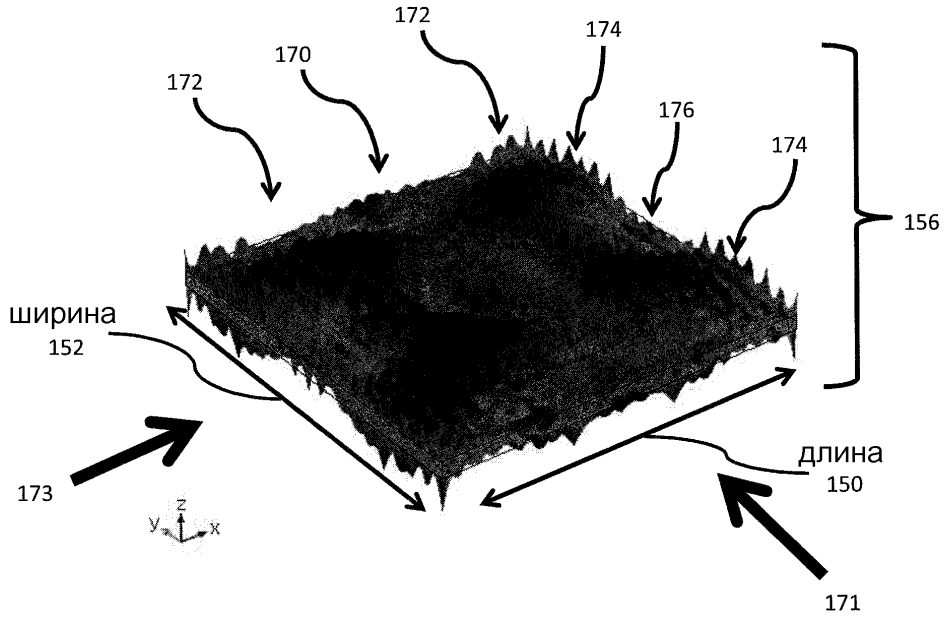
Фиг. 36А



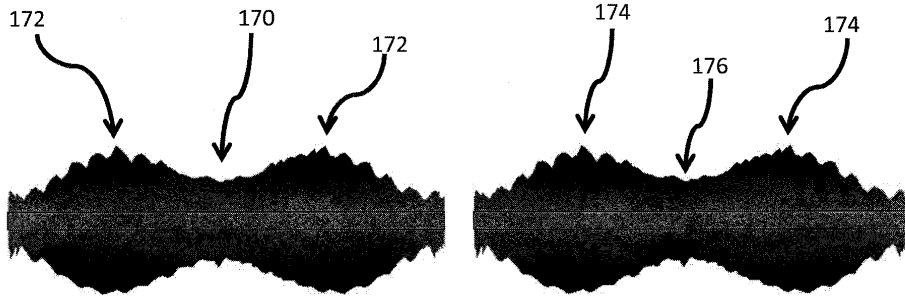
Фиг. 36В

Фиг. 36С

29/33



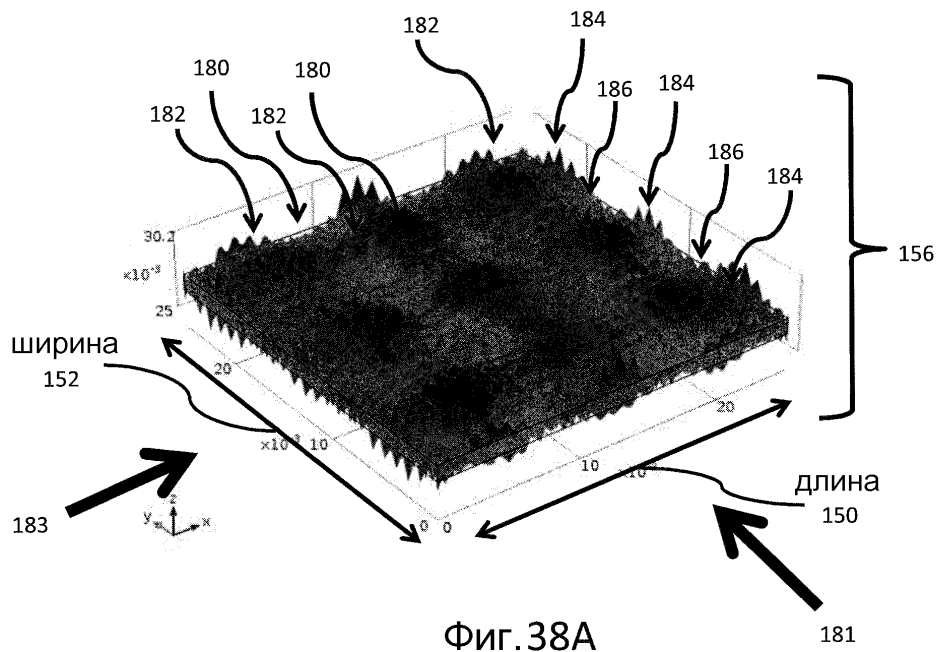
Фиг. 37А



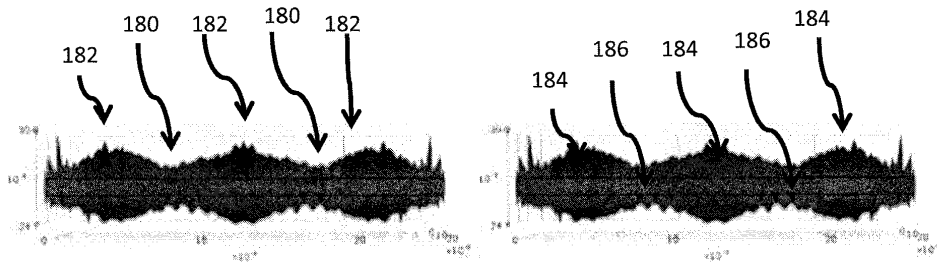
Фиг. 37В

Фиг. 37С

30/33

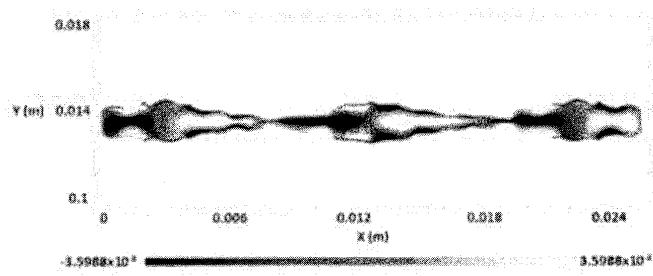


Фиг. 38А



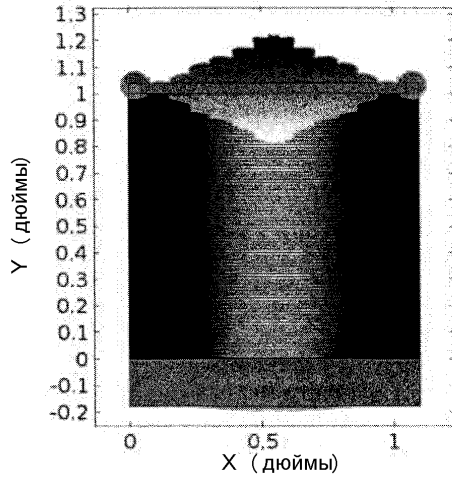
Фиг. 38В

Фиг. 38С

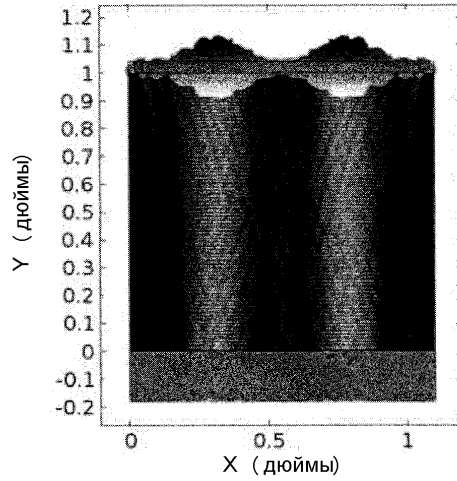


Фиг. 38D

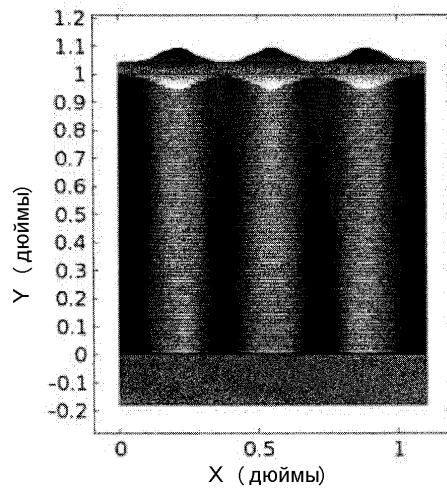
31/33



Фиг. 39А

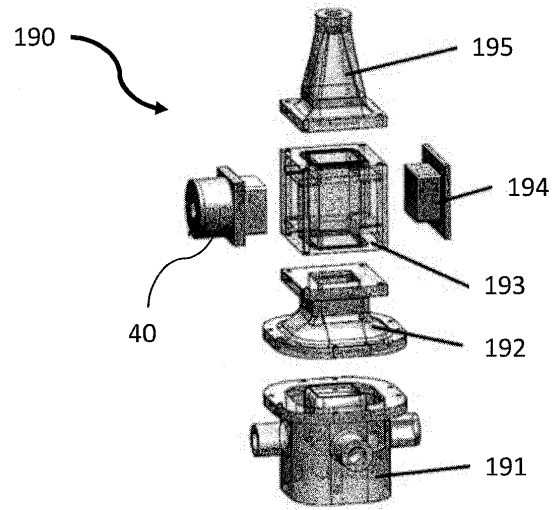


Фиг. 39В

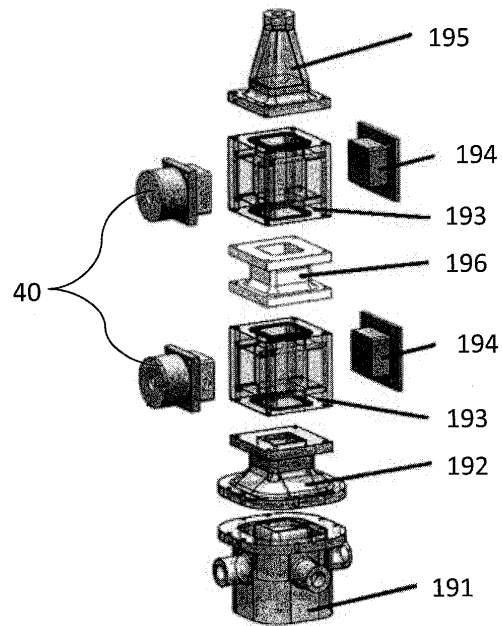


Фиг. 39С

32/33

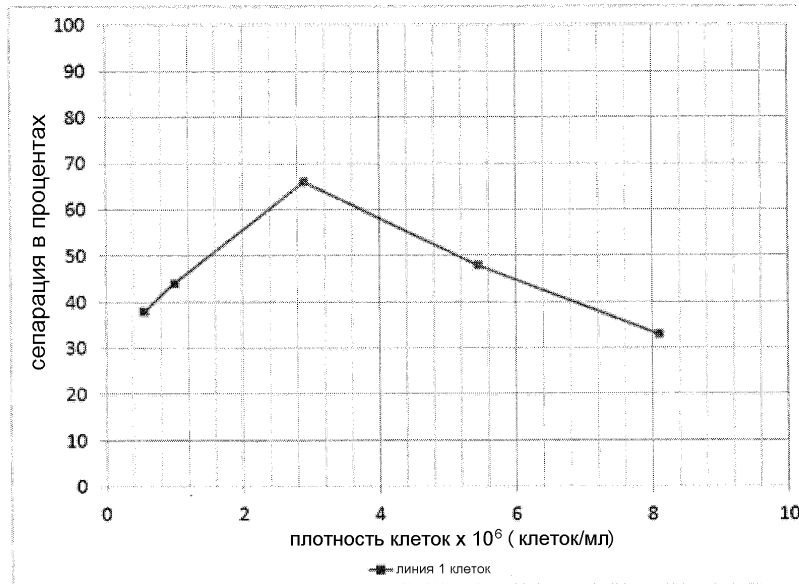


Фиг. 40А

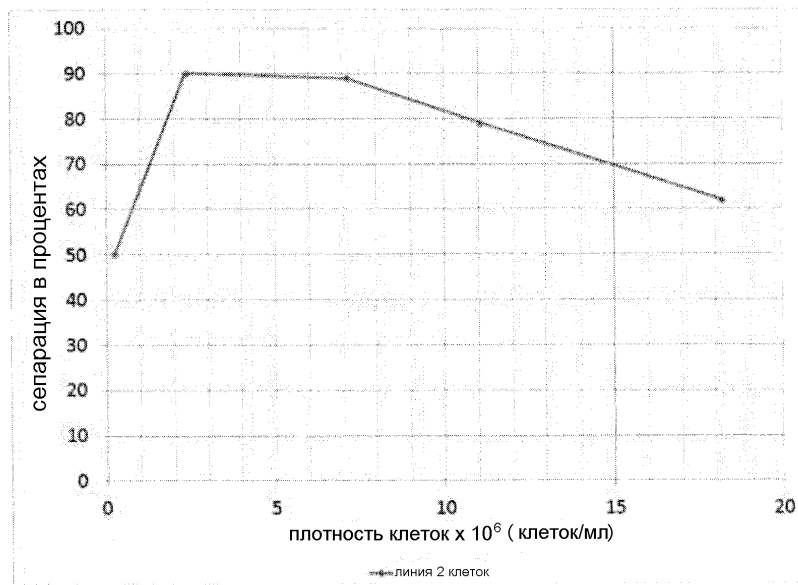


Фиг. 40В

33/33



Фиг. 41А



Фиг. 41В