УДК 621.1

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОГО СПОСОБА СЕПАРАЦИИ МИКРОЧАСТИЦ УГЛЯ ИЗ ВОДНОЙ СМЕСИ

Дроздов С.М.[1], Михальцевич В.В.[2], Паздеев В.Н.[2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им.проф.Н.Е.Жуковского(ЦАГИ), Жуковский, Россия
[2] ООО "КЭНЭС", Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе выполнена проверка физической реализуемости нового способа сепарации микрочастиц из жидкостей. На лабораторной модели одного слоя сепаратора исследованы основные положения предлагаемого способа сепарации и определены диапазоны эксплуатационных параметров разрабатываемого устройства. Экспериментально подтвержден супер-эффект сепарации твердых частиц из жидкости, позволяющий, при наличии наклона слоя φ=20° , не менее чем в три раза увеличить производительность сепаратора без потери качества.

На основании результатов исследований сделан прогноз характеристик натурного варианта сепаратора для выделения из воды мелких частиц угля плотностью ρ=1400 кг/м^3 и характерными размерами в диапазоне от 0.03 мм до 0.3 мм с наиболее вероятным размером 0.1мм. (по массовой доле частиц).

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследований настоящей работы является новый способ сепарации и основанные на нем устройства для механического выделения из жидкостей или газов микрочастиц примеси, разделения по удельному весу и размерам смесей твёрдых частиц, очистки жидкостей от взвеси твердых частиц.

В промышленности весьма актуальна проблема эффективного выделения из состава смесей нежелательных или полезных компонентов с целью очистки жидкостей и газов от взвеси, рационального использования горнорудного сырья, бережного природопользования, повторной переработки или обезвреживания техногенных отходов и др. Для решения этой проблемы создано значительное количество устройств и ряд технологий. Однако в большинстве существующих устройств для механического разделения нерастворимых компонент смеси (сепараторы, концентраторы, отстойники) происходят одновременно оба противоположных процесса – сепарация и смешивание. Нежелательный процесс - смешивание возникает из-за возбуждения в несущей жидкости (или газе) турбулентной формы движения. Поэтому в целом ряде технологических процессов не удается добиться требуемого уровня разделения (очистки) смеси, либо требуемый уровень достигается ценой неприемлемого усложнения конструкции сепаратора, больших размеров устройств и больших энергетических затрат.

С целью значительного повышения эффективности сепарации, Дроздовым С.М. предложен новый способ, основные положения которого защищены в патенте РФ [1]. Суть предложенного способа сепарации заключается в применении специальной формы движения сепарируемой среды – течения типа Хилли-Шоу [2], когда среда горизонтально протекает через решетку, составленную из большого количества тонких слоев, образованных параллельными (или почти параллельными) плоскостями с зазором d между ними. При небольшом числе Рейнольдса (Re<1000), которое определяется малым зазором d, в рабочей области устройства (слоях решетки) обеспечивается ламинарная форма течения несущей жидкости или газа в направлении наложенного градиента давления. Под действием гравитационной (или центробежной) силы, более плотные частицы примеси смещаются перпендикулярно потоку жидкости, оседают на нижней (внешней) стенке области и, через специальные отверстия, выводятся в приемный бункер и далее в выходной трубопровод. Очищенная жидкость (газ) выводится через коллектор на противоположном конце рабочей области. Конструктивно новый способ может быть реализован либо в виде гравитационного устройства (рис.1), либо в виде центробежного сепаратора.

© Дроздов С.М., Михальцевич В.В., Паздеев В.Н.

Гравитационный сепаратор работает следующим образом. Жидкость, содержащая частицы примеси, через окно ввода смеси поступает в рабочие слои (4) , где, после сравнительно короткого начального участка, приобретает ламинарное стационарное и преимущественно одномерное течение в горизонтальном направлении под действием градиента давления, созданного, например, за счет перепада уровней жидкости на входе и выходе сепаратора (рис.1). Под действием гравитационной силы более плотные частицы примеси смещаются вниз, концентрируются в кюветах (5) на нижней стенке области и, через специальные отверстия (6), выводятся из рабочей области в накопительную камеру (7) и далее в выходной трубопровод. Очищенная жидкость выходит через окно слива на верхней крышке корпуса. Плотное заполнение рабочего объема устройств решеткой из пластин с малым зазором, позволяет решить две основные задачи: максимально упорядочить течение сепарируемой среды в направлении перпендикулярном линии действия разделяющего фактора (гравитационной или центробежной силы); подавить все вторичные моды течения, а, следовательно, и конвективное перемешивание, за счет поддержания сравнительно небольшого числа Рейнольдса Re<Re* в основном течении.

Одним из направлений промышленного применения результатов настоящего исследования предполагается разработка гравитационного сепаратора для выделения из воды мелких частиц угля плотностью ρ=1400 кг/м^3 и характерными размерами в диапазоне от 0.03 мм до 0.3 мм с наиболее вероятным размером примерно 0.1мм. (по массовой доле частиц).

На предварительном этапе исследований была построена упрощенная математическая модель течения жидкости с частицами примеси в рабочей области проектируемого сепаратора и получены результаты расчетов, позволяющие оценить реализуемость предложенного способа сепарации и определить наиболее эффективные режимы работы устройств данного типа. Расчеты показали, что для целей сепарации предпочтительно использовать слои повышенного удлинения. Расчетно-теоретические исследования позволили также определить, какими должны быть величины параметров работы сепаратора расход - q , число Re и др., чтобы при заданной геометрии устройства, размерах и плотности частиц обеспечить качество сепарации близкое к 100%. В частности обнаружено, что применение небольшого угла наклона слоев φ позволяет в несколько раз увеличить производительность сепаратора без потери качества (при фиксированных энергозатратах). Физическая причина такого супер-эффекта заключается в том, что при наличии угла наклона слоя φ, появляется компонента силы

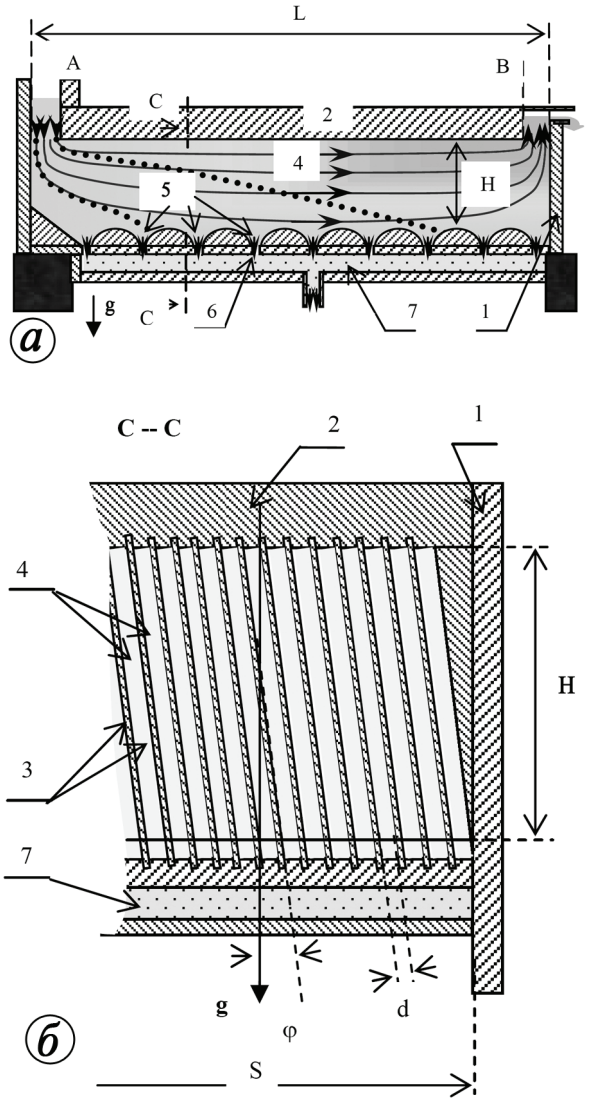

Рис.1 Схема гравитационного сепаратора.

Здесь: 1 – стенки корпуса, 2 - верхняя крышка корпуса, 3 – пластины, 4 - рабочие слои и линии тока несущей жидкости, 5 - кюветы, 6 - отверстия для вывода концентрата частиц примеси, 7 – камера накопления концентрата частиц примеси, точки – траектории частиц примеси, g – вектор силы тяжести, φ - угол наклона слоев.

тяжести нормальная к пластинам и тяжелые частицы выходят из ядра потока к стенке, где скорость горизонтального сноса значительно меньше. На основании расчетов были сформулированы следующие два основных критерия, определяющие эффективную работу сепараторов данного типа:

$$Re = \frac{\rho q}{\mu H} < Re^*,$$

$$q \le q_{max} = \Phi(\varphi)(L - A)\frac{9{,}8 \cdot n \cdot |\rho_T - \rho|}{27\mu}(a)^2 d \qquad (1)$$

где: H – высота пластин, L≥4H - длина пластин, d - характерный зазор между пластинами решетки 1≤d≤20 мм, A<H – продольный размер окна ввода в слой сепарируемой среды, ρ, μ - плотность и вязкость несущей среды (жидкости или газа), q - объемный расход жидкости или газа через слой, Re* - критическое число Рейнольдса разрушения ламинарного стационарного и преимущественно одномерного течения в слое, $\rho_т$ – плотность частиц примеси, a - диаметр частиц примеси, которые удаляются с вероятностью 98%, n –величина перегрузки в слое (для гравитационного сепаратора n=1), φ - угол наклона пластин к линии действия гравитационной (центробежной) силы [град], Φ(φ) – безразмерная функция влияния угла φ, определяемая экспериментальным или расчетным путем для конкретной геометрии устройства . При отсутствии более точных данных рекомендуется принять (для диапазона $\varphi<20^0$):

$$\Phi(\varphi) = (1 + 0.00306\frac{H}{d}\varphi)\cdot\cos(\varphi\pi/180) \qquad (2)$$

Основной причиной сдерживающей активную разработку и применение идеи нового сепаратора в промышленности является отсутствие экспериментальных данных, подтверждающих реализуемость и эффективность предложенного способа сепарации. Например, входящие в критерий (1) безразмерная функция влияния угла наклона слоя Φ(φ) и величина критического числа Рейнольдса Re*, ниже которой в слоях реализуется ламинарное стационарное и преимущественно одномерное течение, могут быть достоверно определены только в эксперименте. В получении таких данных и состояла главная задача настоящих исследований. Кроме того, в число главных задач входят: изучение физики явлений, определяющих процесс сепарации, численное моделирование течения жидкой среды и процесса сепарации, проработка основных элементов конструкции сепараторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментальных исследований спроектирована и изготовлена модель одного слоя гравитационного сепаратора (варианты ГС-1 и модернизированный ГС-2) с приемными корзинами на нижней стенке для накопления концентрата частиц примеси. Фотография модели ГС-2 приведена на рис.2. На данной модели исследованы режимы течения несущей жидкости, проверена физическая реализуемость основных положений нового способа сепарации и отработаны способы извлечения частиц примеси.

Рис.2. Фото установки ГС-2. Фронтальный вид.

Основным элементом установки ГС-2 является слой, образованный двумя прозрачными листами (лицевым и задним), вырезанными из оргстекла 3 мм толщины. Размеры рабочего объема слоя: длина L= 1000 мм, высота H=100 мм, зазор – d=2 мм. Лицевой лист цельный и полностью покрывает весь слой, у заднего листа отсутствуют надстройки ввода и вывода жидкости. Слой крепится вертикально на подставке и имеет возможность поворота вокруг горизонтальной оси X на угол φ =[0 ÷ 90] градусов (рис.1б, 2). По периметру слой ограничен пластинами 2 мм толщины, которые определяют зазор и герметизируют внутренний объем слоя. Вверху слева и справа имеются одинаковые надстройки ввода/вывода жидкости, снабженные вводным и выводным штуцерами (рис.2). Вводной штуцер соединен шлангом с питающим резервуаром объемом ≈ 12 литров. Выводной штуцер имеет шланг с насадками на конце для регулировки расхода. Ниже уровня y = 0 на заднем листе закреплена пластина торможения толщиной 1 мм, которая уменьшает зазор в 2 раза и значительно снижает скорость продольного течения. Ниже уровня y = -20 мм на пластину торможения наложены 10 корзин для накопления частиц примеси (рис. 1б, 2, 3). Они выполнены на общей пластине толщиной 1 мм, которая вместе с пластиной торможения определяет зазор слоя 2 мм. Корзины представляют собой круглые емкости диаметром 20 мм и толщиной 2 мм, ширина устья входа в каждую корзину 8 мм. Внизу каждого объема корзин, на заднем листе установлен штуцер под шприц 2 – 20 $см^3$ для извлечения частиц.

На заднем листе, в точках с координатами (x=200 мм, y=50 мм) и (x=800 мм, y=50 мм) установлены штуцеры внутренним диаметром 2 мм под медицинские трубки для измерения перепада давления. Для предотвращения расперания слоя давлением жидкости, по средней линии внутри слоя установлено четыре 5 мм шайбы толщиной 2 мм, стянутые болтиками. Расчетные режимы соответствуют не менее чем 95% сепарации частиц критического диаметра a*=[0.03 ÷ 0.3]мм. (плотность частиц $\rho_ч$ = 2651 $кг/м^3$).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВИДЕОМАТЕРИАЛОВ

Экспериментальные исследования имели целью получить количественную и качественную информацию о закономерностях течения несущей жидкости, эволюции распределения частиц примеси по рабочему объему установок, определить эффективность процесса сепарации, подтвердить (или опровергнуть) реализуемость и эффективность предложенного способа сепарации.

Для исследования гидродинамики несущей жидкости на каждом из объектов (ГС-1, ГС-2) проведена серия испытаний, в которых реализованы режимы течения, начиная с одномерного ламинарного и стационарного режима и кончая режимом возникновения развитых вихревых структур и нестационарности. Главная задача для каждой модели - определить предельное число Рейнольдса Re* (1) (предельный расход q*), при котором на большей части рабочего объема слоя еще сохраняется одномерный ламинарный и стационарный режим течения. Исследования проведены с помощью следующих методов: визуальный анализ картины течения с записью на видеокамеру; измерение расхода жидкости q и перепада давления ΔP в слое; измерение распределения стационарной скорости течения мелких частиц в жидкости.

Исследование эффективности процесса сепарации частиц проводилось следующими методами: визуализация с записью на видеокамеру эволюции отдельных частиц, введенных в рабочий объем установки; визуализация с записью на видеокамеру движения потока частиц твердой примеси, количественная оценка их распределения по объему установки; измерение величины концентрации частиц примеси путем взятия проб смеси в приемных корзинах, на входе и на выходе из рабочего объема установки; исследование эффективности различных способов извлечения частиц твердой примеси из рабочего объема установки.

Для визуализации течения в слое использовались как естественные частицы, присутствующие в жидкости (пыль и т.п.), так и специально подобранные частицы силохром С-120 и силикогель КСК. Оба вида частиц, искуственно вводимых в жидкость, представляют одно вещество SiO_2 (плотность $\rho_ч$ = 2651 кг/м^3), но частицы силохром С-120 имеют меньший разброс размеров a=[50-80] мкм, чем силикогель КСК a=[30-120] мкм. Поскольку с точки зрения механики сепарации главное значение имеет скорость осаждения V_{oc}, были проведены специальные опыты по определению характерной скорости V_{oc} для имеющихся частиц силохром С-120 и силикогель КСК. В прозрачной кювете размером 240×90×12 мм, в стоячей воде, по видеозаписи, замерялись скорости установившегося осаждения частиц, введенных в верхнюю часть кюветы. Для частиц силохром С-120 получена V_{oc}≈2.5 мм/с с вероятным разбросом [1 ÷ 4] мм/с, а для частиц силикогель КСК V_{oc}≈3 мм/с с вероятным разбросом [0.7 ÷ 6] мм/с. Отметим, что такие величины V_{oc} хорошо соответствуют расчетным.

Поскольку установка ГС-1 имела конструктивные недостатки, результаты ее испытаний анализируются здесь, главным образом, с качественной точки зрения. При интересующих практику величинах расхода жидкости и числах Рейнольдса (50<Re<200), в окне ввода потока установки реализуется ярко выраженное турбулентное течение с двумя крупными вихрями – левый сильнее, правый слабее. В области ввода и поворота потока течение трехмерное, нестационарное с вихрями приходящими от окна ввода потока. В средней части слоя и далее по потоку вихри затухают и течение становится ламинарным, стационарным и преимущественно одномерным. Имеется градиент скорости по высоте слоя – внизу скорость естественных частиц больше чем вверху. Траектории частиц примеси имеют небольшой угол подъема, который возрастает по мере приближения к окну вывода.

При впрыске частиц моделирующих угольную взвесь, возбуждаются вихревые образования, которые сносятся вниз по потоку и постепенно затухают в правой половине установки. Доля частиц дошедших до середины слоя уменьшается при увеличении угла наклона слоя φ>0. Однако остаточные вихри существенно разрушают супер-эффект сепарации от наклона слоя. В полуимперической формуле (1) супер-эффект описывается фактором Φ(φ) (2). Физическая причина супер-эффекта состоит в том, что при наличии угла наклона слоя φ, появляется компонента силы тяжести нормальная к пластинам и частицы выходят из ядра потока к стенке, где скорость горизонтального сноса значительно меньше. Расчеты показывают - как только частица ложится на стенку, ее траектория круто уходит вниз. В результате даже для мелких частиц, при небольшом наклоне φ=10°, достигается 98% сепарация, вместо 33% в слое без наклона (φ=0), где большинство частиц выносятся потоком через окно вывода. (рис. 1, 2).

Испытания на модернизированной установке ГС-2 имели главной целью проверить физическую реализуемость супер-эффекта сепарации. Поэтому в экспериментальных режимах был установлен приблизительно одинаковый расход смеси Q=0.75 литров в минуту (Re=125). При таком расходе в слое без наклона будут сепарироваться только самые крупные частицы a>0.1 мм, массовая доля Y которых в смеси невелика Y<0.2 . Чтобы достигнуть 80-90% сепарации в слое без наклона

необходимо снизить расход в 4 раза до q=0.171 литров в минуту. При установке угла φ=20° , согласно расчетам, высокое качество сепарации (70-80%) должно обеспечиваться даже при расходе q=0.75 литров в минуту. Этот факт и нужно было подтвердить в испытаниях.

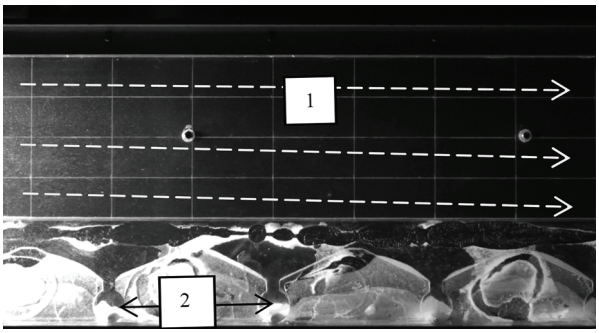

Рис.3 Визуализация потока воды с частицами в слое ГС-2 при φ=0, q=0.75 литр/мин. Re=125. 1-траектории частиц примеси, 2 - корзины с осадком из частиц.

Наиболее полно и качественно результаты визуализации течения жидкости и сепарации частиц можно оценить при просмотре видеофайлов, испытаний. Однако основные экспериментальные факты неплохо отражены и на фотографиях, вырезанных из этих файлов (рис.3, 4).

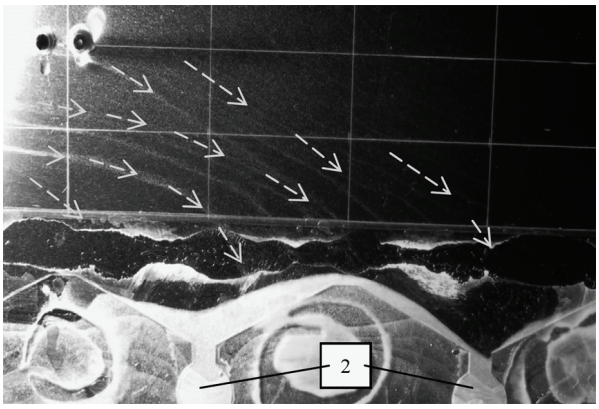

Рис.4. Визуализация потока воды с частицами в слое ГС-2 при φ=10°, q=0.75 литр/мин., Re=125. Супер-эффект сепарации.

Анализ файлов визуализации однозначно показал, что во всем диапазоне исследованных чисел Re<320 реализуется ламинарное, преимущественно одномерное течение в основной части слоя. При этом в окне ввода жидкости течение, как правило, нестационарное с интенсивными вихрями, которые полностью затухают до середины установки. Ввод частиц примеси является дополнительным вихреобразующим фактором, но по мере движения в слое, вихри затухают и частицы демонстрируют прямолинейные траектории (рис. 3).

Для вертикального слоя (φ=0) наклон траекторий частиц небольшой и лишь незначительная часть частиц захватывается в корзины (рис.3).

Как только рабочий слой устанавливается под углом φ>5° (в испытаниях - φ=10° или φ=20°), на стенку слоя осаждается много частиц, которые круто сползают вниз и оседают в приемных корзинах (рис.4). Плотность распределения оседающих частиц неравномерная - наибольшее их количество оседает в 3 корзине (рис.5).

Для количественной оценки эффективности сепарации проведены специальные испытания. В резервуаре питающем установку была приготовлена смесь воды с известной массой частиц силикогель КСК (массовая доля Y≈0.004). Установка запускалась при фиксированном расходе смеси Q=0.75 литр/мин и, за известное время (≈8 минут), производилось периодическое извлечение смеси концентрата частиц из всех корзин. Кроме того периодически брались известные порции смеси на входе и выходе установки (рис.1, 2). После испытаний все пробы смеси выпаривались и сухой остаток взвешивался на аналитических весах (погрешность не более ±0.5 миллиграмм). Результаты этих испытаний приведены на рис.5.

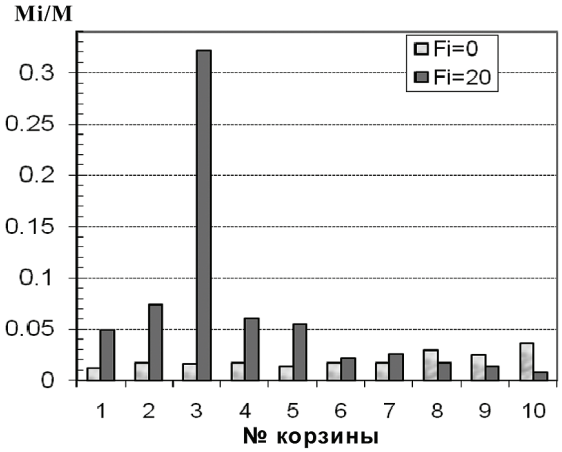

Рис.5. Результаты измерений сепарации частиц силикогель в слое ГС-2 при расходе q=0.75 литр/мин. (Re=125) для угла наклона φ=0 и φ=20°. По горизонтальной оси отложен номер i корзины, а по вертикальной массовая доля частиц осевших в ней.

Из рис.5 видно, что в испытании без наклона слоя (φ=0), суммарная масса частиц, извлеченных из всех корзин составила менее 20% от полной массы частиц прошедших через установку ГС-2. А в испытании с наклоном (φ=20°) суммарная масса

извлеченных частиц оказалась 65-68% от полной массы частиц прошедших через слой.

Фактор наклона слоя Ф(φ), количественно описывающий супер-эффект сепарации частиц, в расчетах аппроксимируется формулой (2). Согласно расчетам, установив наклон φ=20°, можно добиться увеличения расхода в Ф=3.8 раза без потери качества сепарации. По результатам испытаний можно уверенно дать оценку фактору наклона слоя Ф(φ=20) ≥ 3. Приведенные выше данные позволяют сделать вывод, что супер-эффект сепарации подтвержден экспериментально на установке ГС-2.

Теперь напомним исходную постановку задач исследований: *Разработать гравитационный сепаратор для выделения из воды мелких частиц угля плотностью $\rho_ч$=1400 кг/м^3 и характерными размерами в диапазоне от 0.03 мм до 0.3 мм с наиболее вероятным размером примерно 0. 1мм (по массовой доле частиц).*

Используя результаты проведенных исследований, опираясь на подобие геометрии рабочего слоя, законы динамического подобия по числам Рейнольдса Re и $Re_{осажд}$ можно с высокой степенью достоверности рассчитать основные характеристики натурного сепаратора. В частности для сепаратора с параметрами - длина слоя L=4 м, высота слоя H=0.4 м, нирина рабочего объема S=4 м, зазор между пластинами d=4 мм, толщина пластин h=2 мм, количество слоев N=667, получены следующие характеристики: производительность Q=163 м^3/час, качество сепарации - отношение интегральной массовой доли частиц на выходе из сепаратора к их массовой доле на входе $Y_{вых}/Y_{вход}$ =0.077, критический диаметр частиц (вероятность сепарации которых не менее 98%) a* = 0.1 мм, число Рейнольдса Re=170.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнена проверка физической реализуемости нового способа сепарации микрочастиц из жидкостей, ключевым моментом которого является обеспечение ламинарного движения сепарируемой среды в направлении перпендикулярном действию разделяющего фактора (гравитации).

В результате выполнения настоящих исследований создана физически адекватная математическая модель течения несущей жидкости с частицами примеси в рабочей области разрабатываемых устройств и проведены расчеты режимов работы устройств данного типа в широком диапазоне параметров, включая моделирование экспериментальных режимов. Спроектирована, изготовлена и налажена лабораторная модель одного слоя сепаратора, подготовлено оборудование и методика проведения исследований. Экспериментально проверены основные положения предлагаемого способа сепарации и уточнены параметры сепарирующего слоя. Экспериментально подтвержден супер-эффект сепарации твердых частиц из жидкости, позволяющий, при наличии наклона слоя φ=20°, не менее чем в три раза увеличить производительность сепаратора без потери качества.

На основании результатов исследований сделан прогноз характеристик натурного варианта сепаратора для выделения из воды мелких частиц угля плотностью $\rho_ч$=1400 кг/м^3 и характерными размерами в диапазоне от 0.03 мм до 0.3 мм с наиболее вероятным размером примерно 0.1мм. (по массовой доле частиц).

Таким образом результаты лабораторных исследований подтвердили физическую реализуемость нового способа сепарации микрочастиц из жидкостей и есть все основания продолжить работу в направлении создания опытного образца сепаратора для выделения из воды мелких частиц угля.

Авторы благодарят Э.Б. Василевского за полезные советы при постановке задач настоящих исследований и критический анализ их результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов С.М. Патент РФ № 2275229 от 27.05.2004 “Способ выделения частиц примеси из жидкостей и газов и устройство для его осуществления (варианты)”
2. Hele-Shaw H.S. Trans. Inst. Nav. Arch. XI, 1898, v. 25.