

УДК 66.066.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОЦИКЛОНИРОВАНИЯ ЧАСТИЦ “ЛЕГКИХ” ФРАКЦИЙ НА ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ СЛИВНОГО ПАТРУБКА

© 2022 г. А. Б. Голованчиков^а, М. И. Ламскова^{а, *}, А. Е. Новиков^{а, б}, М. И. Филимонов^{а, б}

^аВолгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

^бФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия, Волгоград, Россия

*e-mail: lamskov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.03.2021 г.

После доработки 25.10.2021 г.

Принята к публикации 27.10.2021 г.

Рассмотрен процесс разделения неоднородных систем, в случае, когда плотность частиц дисперсной фазы меньше плотности дисперсионной среды. Предлагается процесс осуществлять в гидроциклоне с фильтрующей поверхностью сливного патрубка при вибрации, обеспечивающей виброожижение образующегося осадка и непрерывную регенерацию пор фильтровальной перегородки. Представлен алгоритм и приведен пример численного расчета процесса гидроциклонирования “легких” фракций дисперсной фазы с дополнительной очисткой на фильтрующей поверхности сливного патрубка в сравнении с типовым аппаратом.

Ключевые слова: гидроциклонирование, вибрация, амплитуда и частота, фильтровальная поверхность сливного патрубка, “легкая” фракция частиц, виброожижение, локальная и общая степени очистки

DOI: 10.31857/S0040357122020075

ВВЕДЕНИЕ

Гидромеханические процессы разделения неоднородных систем составляют основу многих производств химической, нефтехимической, угольной, горнорудной и других отраслей промышленности.

Экономичность и эффективность процессов разделения неоднородных систем часто определяется величиной уноса дисперсной фазы. Помимо снижения производительности технологического оборудования унос твердых частиц приводит к потерям целевого продукта. Если целевым продуктом является жидкая фаза, то унос твердых частиц негативно сказывается на ее качественных показателях. В связи с этим совершенствование технологического процесса разделения неоднородных жидкостных систем в гидроциклонах с позиции уменьшения уноса дисперсной фазы является перспективным направлением исследования.

Универсальным оборудованием для осуществления процессов разделения систем жидкость–твердое тело являются гидроциклонные аппараты. Они просты в изготовлении, компактны, обладают высокой производительностью. Кроме того, как показывает практика, эксплуатация гидроциклонов не требует больших затрат и дополнительного

персонала для обслуживания. Стандартные конструкции гидроциклонных аппаратов предназначены для разделения суспензий и эмульсий с плотностью частиц дисперсной фазы большей, чем плотность сплошной жидкой фазы [1–3]. Однако, конструкции гидроциклонов постоянно совершенствуются, становятся все более наукоемкими и сложными [4–7]. Так, например, одним из направлений исследования является разделение неоднородных жидкостных систем под совместным действием центробежного поля и радиальных магнитных полей – гидроциклоны Фрикера [8].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Обоснование предлагаемой конструкции аппарата. Скорость центробежного разделения в гидроциклонах значительно превышает скорость гравитационного разделения в отстойниках. Это увеличение характеризуется фактором разделения, который рассчитывается по формуле [9]:

$$F = \frac{v_c^2}{gR_i} \quad (1)$$

При этом “тяжелые” частицы дисперсной фазы, плотность которых больше плотности сплош-

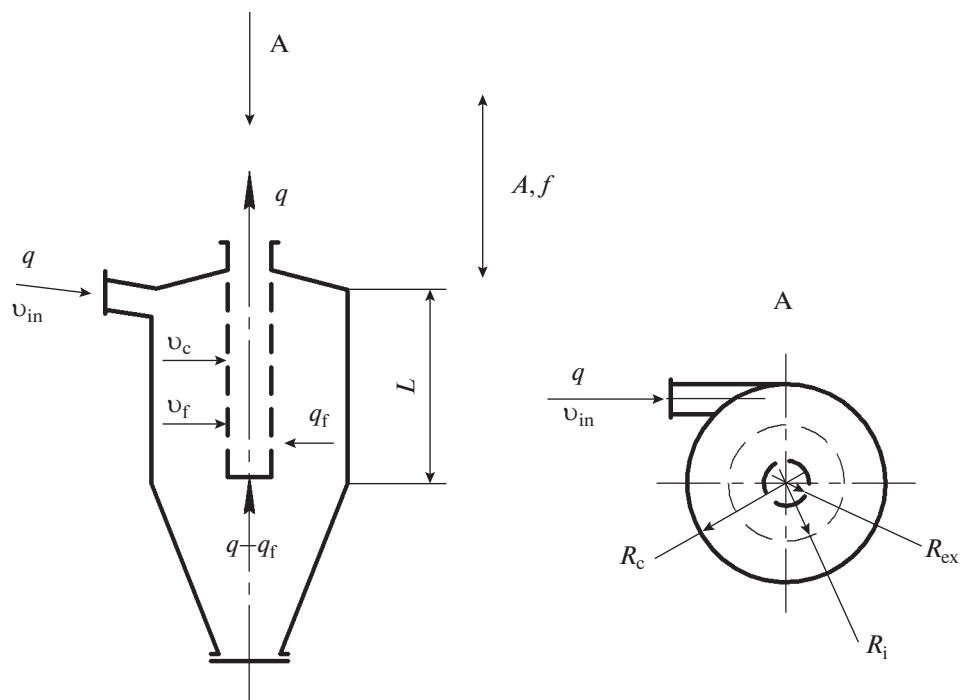


Рис. 1. Схема гидроциклона с боковой фильтрующей поверхностью сливного патрубка и виброожижением осадка.

ной фазы, оседают в виде слоя на внутренней поверхности корпуса, что в ряде случаев требует их периодического удаления при остановке работы гидроциклона. Последняя операция значительно упрощается при вибрации гидроциклона с амплитудой и частотой, переводящей осадок в виброожиженное состояние, при котором он непрерывно стекает со стенки в нижнюю часть аппарата.

В последнее время появились работы по гидроциклонированию суспензий и эмульсий, в которых плотность частиц и капель дисперсной фазы меньше плотности сплошной жидкой фазы. Так называемые “легкие” фракции под действием центробежной силы движутся в радиальном направлении от поверхности корпуса к наружной поверхности сливного патрубка и образуют на ней слой осадка. Алгоритм расчета такого гидроциклонирования “легких” фракций дисперсной фазы предложен нами в работах [10, 11]. В случае с гидроциклоном, дополненным фильтром тонкой очистки [12], также целесообразно для непрерывного сброса осадка с фильтрующей поверхности сливного патрубка использовать вибрацию при амплитуде и частоте, переводящих осадок в виброожиженное состояние. При этом частицы будут всплывать в верхнюю часть корпуса аппарата и далее отводиться через штуцер.

Исполнение боковой стенки сливного патрубка в виде фильтровальной поверхности позволит увеличить скорость центробежного движения “легких” частиц дисперсной фазы за счет скорости

фильтрации. Поскольку при малой разнице плотностей сплошной и дисперсной фаз

$$\Delta\rho = \rho - \rho_i, \tag{2}$$

в центробежном поле гидроциклона скорость радиального осаждения на наружную боковую стенку сливного патрубка “легких” частиц и капель дисперсной фазы остается незначительной, локальная и общая степени очистки характеризуются невысокими значениями.

Математическое моделирование совмещенного процесса гидроциклонирования и виброфильтрации. Целью работы является моделирование совмещенного процесса гидроциклонирования с виброфильтрацией на боковой поверхности сливного патрубка, обеспечивающим псевдоожижение и всплывание осадка из частиц “легких” фракций в верхнюю часть корпуса аппарата.

На рис. 1 представлена схема гидроциклона с фильтровальной боковой поверхностью сливного патрубка.

Особенность представленной конструкции связана с тем, что боковая поверхность сливного патрубка не сплошная, а представляет собой фильтрующую боковую поверхность цилиндра. В процессе центробежного разделения частиц, плотность которых меньше плотности сплошной жидкой фазы, на движущуюся частицу действует радиальная скорость центробежного всплывания “легких” фракций. Для предлагаемой конструкции к скорости центробежного всплывания прибавляется ско-

рость фильтрации, что уменьшает время всплывания частиц на отрезке от R_c до R_{ex} (рис. 1), а значит, уменьшает номинальный диаметр улавливаемых частиц, и как следствие, увеличивает локальную степень улавливания дисперсной фазы в аппарате. Другая особенность предлагаемой конструкции аппарата связана с продольной вертикальной вибрацией фильтрующей боковой поверхности сливного патрубка, при этом амплитуда и частота вибрации обеспечивают виброоживление осадка и всплывание его вверх вдоль боковой поверхности сливного патрубка.

Ускорение вибрации, определяемое по формуле:

$$Y = A(2\pi f)^2 \quad (3)$$

приводит к регенерации пор фильтровальной поверхности от частиц дисперсной фазы при определенном критическом значении, зависящем от характеристик разделяемой гетерогенной системы и фильтровальной поверхности.

Процесс перевода выделенного осадка в виброоживленное состояние и его всплывание вдоль фильтровальной перегородки обеспечивается интенсивностью вибрации [13]:

$$J = A^2 (2\pi f)^3. \quad (4)$$

Увеличивать интенсивность вибрации до критических значений, повышающих амплитуду и частоту, нецелесообразно, так как чрезмерно высокие параметры вибрации разрушают узлы и детали, кроме того увеличиваются энергозатраты на вибрацию.

Для определения требуемой амплитуда и частоты вибрации, необходимой для реализации процесса виброоживления слоя осадка, проведены экспериментальные исследования по разделению неоднородной системы, а именно водной суспензии влажных сосновых опилок, в аппарате предлагаемой конструкции. Характеристики разделяемой неоднородной системы и фильтровальной поверхности представлены в табл. 1. Для рассматриваемой суспензии и конструкции гидроциклона с вибрирующим фильтрующим патрубком критическое значение ускорения вибрации Y составляет 20 м/с^2 , критическая интенсивность вибрации $J = 1.5 \text{ м}^2/\text{с}^3$ или 1.5 Вт/кг , что соответствует частоте вибрации $f = 50 \text{ Гц}$ и амплитуде колебания $A = 0.23\text{--}0.25 \text{ мм}$. В этом случае поры фильтровального материала на сливном патрубке будут регенерироваться, а осадок находится в виброоживленном состоянии и всплывать вверх.

Рассмотрим алгоритм расчета процесса гидроциклонирования частиц “легких” фракций с фильтрующей боковой поверхностью сливного патрубка и его вибрацией с частотой не ниже f и амплитудой не менее A .

1. Алгоритм расчета номинального диаметра уловленных частиц (диаметра частиц дисперсной фазы, которые улавливаются в данном аппарате при рассматриваемых условиях на 100%) [9–11].

1.1. Скорость суспензии во входном патрубке:

$$v_{in} = \left(\frac{q}{3600}\right) / \pi R_{in}^2. \quad (5)$$

1.2. Окружная (тангенциальная) скорость суспензии внутри корпуса:

$$v_c = 3.1 v_{in} \left(\frac{R_{in}}{R_c}\right) / \left(\frac{L}{2R_c}\right)^{-0.32}. \quad (6)$$

1.3. Фактор разделения рассчитывается по формуле (1).

1.4. Из условия равенства времени центробежного всплывания частиц номинального диаметра, когда путь наибольший

$$\tau_s = \frac{R_c - R_{ex}}{v_{cf}} \quad (7)$$

и времени пребывания суспензии в сепарационной зоне

$$\tau = \left[\pi(R_c^2 - R_{ex}^2)L\right] / \left(\frac{q}{3600}\right), \quad (8)$$

получаем уравнение для скорости центробежного всплывания частиц номинального диаметра:

$$v_{cf} = \left(\frac{q}{3600}\right) / \pi(R_c + R_{ex})L. \quad (9)$$

1.5. Число Лященко для частиц номинального диаметра:

$$La_0 = v_{cf}^3 \rho_i^2 / [gF\mu(\rho - \rho_i)]. \quad (10)$$

1.6. Число Архимеда для частиц номинального диаметра определяется из трансцендентного уравнения Тодеса методом половинного деления:

$$La_0 = Ar_0^2 / (18 + 0.61\sqrt{Ar_0})^3. \quad (11)$$

1.7. Номинальный диаметр уловленных частиц:

$$d_0 = \sqrt[3]{Ar_0 \mu^2 / gF\rho(\rho - \rho_i)}. \quad (12)$$

2. Алгоритм расчета локальной степени улавливания частиц меньше номинального размера и общей степени очистки [10, 11].

2.1. Число Архимеда для частиц фракций d_i меньше номинального размера d_0 :

$$Ar_i = Ar_0 [d_i/d_0]^3. \quad (13)$$

2.2. Число Рейнольдса для частиц фракции d_i меньше номинального размера d_0 :

$$Re_i = Ar_i / [18 + 0.61\sqrt{Ar_i}]. \quad (14)$$

Таблица 1. Исходные и справочные данные, расчётные параметры гидроциклона ГНС-125 [14], работающего в режиме гидроциклонирования и совмещенном режиме гидроциклонирования и виброфильтрации (I – параметры типового гидроциклона; II – параметры гидроциклона с боковой виброфильтрующей поверхностью сливного патрубка)

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Тип гидроциклона	
			I	II
Исходные и справочные данные				
Производительность по суспензии	м ³ /ч	q	20	20
Плотность жидкости	кг/м ³	ρ	1000	1000
Плотность частиц суспензии	кг/м ³	ρ_i	750	750
Динамическая вязкость жидкости	Па · с	μ	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
Внутренний радиус цилиндрического корпуса гидроциклона	м	R_c	0.0625	0.0625
Радиус сливного патрубка	м	R_{ex}	0.025	0.025
Радиус питающего патрубка	м	R_{in}	0.02	0.02
Высота сепарационной зоны гидроциклона	м	L	1.1	1.1
Сопrotивление фильтровальной поверхности	1/м	r_f	–	2.3×10^9
Удельное сопротивление осадка, находящегося в виброоживленном состоянии	1/м ²	r_s	–	1.3×10^{10}
Толщина слоя осадка, находящегося в виброоживленном состоянии	м	δ	0	5×10^{-3}
Избыточное давление в корпусе	Па	ΔP	–	9806.65
Ускорение вибрации	м/с ²	Y	0	20
Интенсивность вибрации	м ² /с ³	J	0	1.5
Расчетные параметры				
Общая степень очистки				
теоретическая	%	η	31.6	59.7
экспериментальная			28.1	56.4
Фактор разделения	–	F	8.06	8.06
Номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100%	мкм	d_0	148.1	134.9
Скорость потока в питающем патрубке	м/с	v_{in}	4.42	4.42
Окружная скорость суспензии в корпусе	м/с	v_c	2.22	2.22
Скорость центробежного всплывания частиц номинального диаметра	м/с	v_{cf}	1.83×10^{-2}	1.43×10^{-2}
Время пребывания суспензии в сепарационной зоне	с	τ	2.04	2.04
Поверхность фильтрования	м ²	S	–	0.173
Скорость фильтрования	м/с	v_f	–	4.07×10^{-3}
Производительность по фильтрату	м ³ /ч	q_f	–	0.98
Доля расхода фильтрата в общем расходе очищаемой жидкости	%	δ_f	–	12.25
Отношение скорости фильтрования к скорости осаждения частиц номинального диаметра в типовом гидроциклоне	–	v_{rat}	–	0.0858
Частота колебаний для создания псевдооживленного слоя и регенерации пор фильтровальной поверхности	Гц	f	–	50
Амплитуда вибрации для процесса виброфильтрации	м	A	–	0.25×10^{-3}

2.3. Скорость всплывания в центробежном поле частиц фракций d_i меньше номинального размера d_0 :

$$v_i = Re_i \mu / \rho d_i. \quad (15)$$

2.4. Из условия равенства времени всплывания частиц с траектории $R_{ex} \leq R_i \leq R_c$:

$$\tau_i = (R_i - R_{ex}) / v_i \quad (16)$$

и времени пребывания, приравнивая правые части уравнения (7) и (16) получаем пропорцию:

$$\frac{R_i - R_{ex}}{R_c - R_{ex}} = \frac{v_i}{v_{cf}}. \quad (17)$$

2.5. Исходя из условия равномерного распределения частиц каждой фракции по объему очищаемой суспензии следует, что левая часть последней пропорции (17) численно равна локальной степени улавливания частиц i -ой фракции с диаметром частиц $d_i < d_0$.

Тогда локальные степени улавливания частиц по фракциям будут определяться по уравнениям:

$$\begin{aligned} \chi_i &= v_i / v_{cf} \quad d_i \leq d_0, \\ \chi_i &= 1 \quad d_i \geq d_0, \end{aligned} \quad (18)$$

а относительная концентрация уловленных частиц каждой фракции

$$\eta_i = \chi_i C_i. \quad (19)$$

2.6. Общая степень очистки определяется по формуле:

$$\eta = \sum_{i=1}^m \eta_i, \quad (20)$$

где m – число фракций дисперсной фазы.

3. Алгоритм расчёта совмещенного процесса гидроциклонирования “легких” фракций и виброфильтрования на боковой фильтровальной поверхности сливного патрубка.

3.1. Скорость фильтрования с образованием осадка на фильтрующей поверхности определяется из уравнения [13]:

$$v_f = \frac{\Delta P}{\mu(r_f + r_s \delta)}. \quad (21)$$

3.2. Поверхность фильтрования определяем по формуле:

$$S = 2\pi R_{ex} L. \quad (22)$$

3.3. Скорость радиального движения частиц “легких” фракций к боковой поверхности сливного патрубка для частиц номинального диаметра будет равняться сумме скоростей фильтрования и центробежного всплывания:

$$v_s = v_{cf}' + v_f. \quad (23)$$

Время осаждения частиц на сливном патрубке при суммарном действии на нее двух сил – центробежной и фильтрования, вычисляется по формуле:

$$\tau_s = \frac{R_c - R_{ex}}{v_s}. \quad (24)$$

3.4. Из условия равенства времени осаждения частицы с общей скоростью v_s (23) и времени пребывания ее в сепарационной зоне аппарата (8) получаем уравнение для общей скорости всплывания в центробежном поле и фильтрования:

$$v_s = \left(\frac{q}{3600} \right) / [\pi(R_c + R_{ex})L]. \quad (25)$$

3.5. Выполняем расчет по формулам (10)–(12) и (13)–(20), используя модифицированное число Лященко с учетом равенства (23):

$$La' = (v_{cf}')^3 \rho_i^2 / [gF\mu(\rho - \rho_i)] < La, \quad (26)$$

где $v_{cf}' = v_s - v_f$.

3.6. Число Архимеда и номинальный диаметр частиц, рассчитанные по формулам (11) и (12), будут с учетом фильтрования меньше, чем для стандартного процесса гидроциклонирования, а уравнение (17) приобретает вид:

$$\frac{R_i - R_{ex}}{R_c - R_{ex}} = \frac{v_i + v_f}{v_{cf}' + v_f}, \quad (27)$$

так как

$$\frac{R_i - R_{ex}}{v_{cf}' + v_f} = \frac{R_i - R_{ex}}{v_i + v_f}.$$

Соответственно, при условии равенства времени центробежного движения к боковой фильтрующей поверхности сливного патрубка “легких” частиц номинального диаметра и частиц фракции $d_{(i)}$ с траектории $R_{(i)}$, среднему времени пребывания суспензии в гидроциклоне, уравнение (18) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \chi_i &= \frac{v_i + v_f}{v_{cf}' + v_f} \quad d_i \leq d_0, \\ \chi_i &= 1 \quad d_i \geq d_0. \end{aligned} \quad (28)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 и на рис. 2 приведены исходные, справочные данные и расчётные параметры процесса разделения неоднородной системы (водной суспензии влажных сосновых опилок) в гидроциклоне ГНС-125 [14] в типовом исполнении и при его дополнении фильтрующим сливным патрубком с механизмом вибрации.

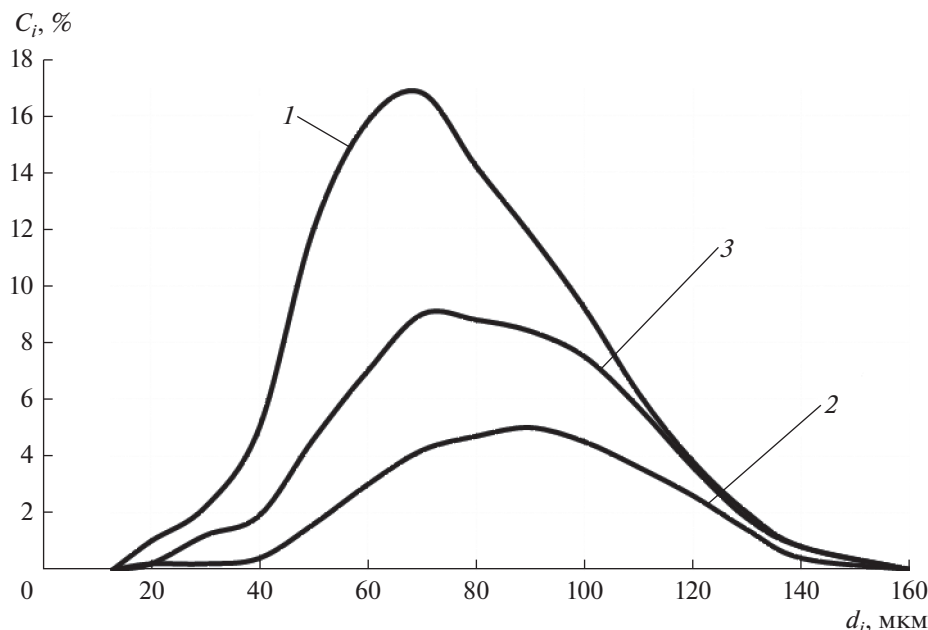


Рис. 2. Графики зависимости локальной степени улавливания “легких” частиц по фракциям: 1 – Плотность распределения частиц по фракциям в исходной суспензии; 2 – Распределение уловленных частиц по фракциям в типовом гидроциклоне ГНС-125; 3 – Распределение уловленных частиц по фракциям в гидроциклоне ГНС-125 с фильтрующей боковой поверхностью сливного патрубка и виброожижением осадка.

По результатам имитационного моделирования получено, что для гидроциклона виброфильтрование через боковую поверхность сливного патрубка позволяет увеличить локальные степени улавливания “легких” частиц размером меньше номинального, что приводит к увеличению пофракционных степеней очистки (рис. 2), и как следствие, показатель общей степени очистки возрастает с 31.6% до почти 60%.

Доказано уменьшение номинального диаметра уловленных частиц с 148.1 мк до 134.9 мк, т.е. представленная конструкция гидроциклонного аппарата обеспечивает выделение частиц дисперсной фазы более тонкой фракции, что обусловлено значительным превышением скорости фильтрования над скоростью центробежного разделения для тонкодисперсных частиц.

В табл. 1 представлены данные экспериментальных исследований по определению общей степени очистки для гидроциклона ГНС-125 типовой конструкции (I) и дополненного сливным патрубком с боковой виброфильтрующей поверхностью (II).

Экспериментально установлено, что использование в гидроциклоне процесса виброфильтрования на боковой поверхности сливного патрубка позволяет повысить общую степень очистки с 28.1 до 56.4%, т.е. в 2 раза, а расхождение теоретических данных с экспериментальными незначительно и составляет менее 5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен процесс разделения неоднородных систем, в случае, когда плотность частиц дисперсной фазы меньше плотности дисперсионной среды. Предлагается процесс осуществлять в гидроциклоне с фильтрующей поверхностью сливного патрубка при вибрации, обеспечивающей виброожижение образующегося осадка и непрерывную регенерацию пор фильтровальной перегородки. Представлены результаты математического моделирования процесса гидроциклонирования “легких” фракций дисперсной фазы с дополнительной очисткой на фильтрующей поверхности сливного патрубка в сравнении с типовым аппаратом. Из результатов имитационного моделирования следует, что общая степень очистки от частиц дисперсной фазы “лёгких” фракций в гидроциклоне ГНС-125 с боковой виброфильтрующей поверхностью сливного патрубка выше в 1.9 раза в сравнении с гидроциклоном типовой конструкции. Проведенные экспериментальные исследования также показали увеличение общей степени очистки в 2 раза при использовании гидроциклона предлагаемой конструкции. Незначительное расхождение теоретических данных с экспериментальными подтверждает адекватность представленного алгоритма расчета процесса гидроциклонирования “легких” фракций дисперсной фазы с дополнительной очисткой на виброфильтрующей поверхности сливного патрубка.

Таким образом, комбинирование в гидроциклонах нескольких технологических процессов позволяет обеспечить комплексный подход к процессу разделения гетерогенных систем, позволяя повысить экономические показатели процесса как за счет более эффективного улавливания дисперсных частиц тонких фракций, так и в результате непрерывной очистки фильтрующей поверхности сливного патрубка при использовании вибрации, что позволяет избежать простоя оборудования на время регенерации фильтрующего элемента.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-2289.2020.8.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	амплитуда вибрации, м
C_i	доля i -ой фракции, %
d_i	диаметр частиц i -ой фракции, мкм
d_0	номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100%, мкм
F	фактор разделения
f	частота колебаний для создания псевдооживленного слоя и регенерации пор фильтровальной поверхности, Гц
J	интенсивность вибрации, $\text{м}^2/\text{с}^3$
L	высота сепарационной зоны гидроциклона, м
m	число фракций дисперсной фазы
ΔP	избыточное давление в корпусе гидроциклона, Па
q	производительность по суспензии, $\text{м}^3/\text{ч}$
q_f	производительность по фильтрату, $\text{м}^3/\text{ч}$
R_c	внутренний радиус цилиндрического корпуса гидроциклона, м
R_{ex}	радиус сливного патрубка, м
R_i	радиус траектории движения частиц i -ой фракции, м
R_{in}	радиус питающего патрубка, м
S	поверхность фильтрования, м^2
r_f	сопротивление фильтровальной поверхности, $1/\text{м}$
r_s	удельное сопротивление осадка, находящегося в виброоживленном состоянии, $1/\text{м}^2$
Y	ускорение вибрации, $\text{м}/\text{с}^2$
δ	толщина слоя осадка, находящегося в виброоживленном состоянии, м
δ_f	доля расхода фильтрата в общем расходе очищаемой жидкости, %
η_i	относительная концентрация уловленных частиц каждой фракции

η	общая степень очистки, %
μ	динамическая вязкость жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$
$\Delta \rho$	разница плотностей сплошной и дисперсной фаз, $\text{кг}/\text{м}^3$
ρ	плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$
ρ_i	плотность частиц суспензии, $\text{кг}/\text{м}^3$
τ	время пребывания суспензии в сепарационной зоне, с
τ_s	время осаждения частиц, с
v_c	окружная скорость суспензии в корпусе, $\text{м}/\text{с}$
v_{cf}	скорость центробежного всплывания частиц номинального диаметра, $\text{м}/\text{с}$
v'_{cf}	приведенная скорость центробежного всплывания частиц, $\text{м}/\text{с}$
v_f	скорость фильтрования, $\text{м}/\text{с}$
v_i	скорость движения частиц i -ой фракции, $\text{м}/\text{с}$
v_{in}	скорость суспензии во входном патрубке гидроциклона, $\text{м}/\text{с}$
v_{rat}	отношение скорости фильтрования к скорости осаждения частиц номинального диаметра
v_s	скорость радиального движения частиц к боковой поверхности сливного патрубка, $\text{м}/\text{с}$
χ_i	локальная степень улавливания частиц i -ой фракции
Ar_0	число Архимеда для частиц номинального диаметра
Ar_i	число Архимеда для частиц i -ой фракции
La_0	число Лященко для частиц номинального диаметра
La'	приведенное число Лященко номинального диаметра
Re_0	число Рейнольдса для частиц номинального диаметра
Re_i	число Рейнольдса для частиц i -ой фракции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hydrocyclones: Analysis and Applications // Eds. Svarovsky L., Dordrecht M.T. Thew: Kluwer Academic Publishers, 1992.
2. Bradley D. The hydrocyclone. London: Pergamon press, 1965.
3. Дик И., Миньков Л.Л. Особенности течения высококонцентрированной суспензии в гидроциклоне // Теорет. основы хим. технологии. 2019. Т. 53. № 4. С. 431.
4. Lagutkin M.G., Baranov D.A. Evaluation of the effect of the coriolis force in swirling-flow apparatuses // Theor. Found. of Chem. Eng. 2004. V. 38. № 1. P. 6. [Лагуткин М.Г., Баранов Д.А. Оценка действия силы Кориолиса в аппаратах с закрученным потоком //

- Теорет. основы хим. технологии. 2004. Т. 38. № 1. С. 9.]
5. *Baranov D.A., Pronin A.I., Dikov V.A., Ivanov A.A., Kolesova N.A., Balahnlm I.A., Lagutkin M.G.* Battery hydrocyclones for chemical industry and for units to re-water and sewage purify // *Chem. and Petrol. Eng.* 2007. V. 43. № 7. P. 385. [*Баранов Д.А., Пронин А.И., Диков В.А., Иванов А.А., Колесова Н.А., Балахнин И.А., Лагуткин М.Г.* Гидроциклоны для химических производств и установок очистки оборотных и сточных вод // *Хим. и нефтегаз. машиностр.* 2007. Т. 43. № 7. С. 20].
 6. *Neesse T., Schneider M., Donhauser F., Schricke B.* Computer controlled hydrocyclone battery // *Science & Technology of Filtration and Separations for the 21st Century.* Florida: 2001. № 32. P. 85.
 7. *Dueck J.G., Matvienko O.V., Neesse T.* Modeling of hydrodynamics and separation in a hydrocyclones // *Theor. Found. of Chem. Eng.* 2000. V. 30. № 5. P. 428. [*Дик И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т.* Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне // *Теорет. основы хим. технологии.* 2000. Т. 34. № 5. С. 478.]
 8. *Freeman R.J., Rowson N.A. Veasey T.J., Harris R.* The progress of the magnetic hydrocyclones // *Magnetic and Electrical Separation.* 1993. V. 4. № 3. P. 139.
 9. *Терновский И.Г., Кутенов А.М.* Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994.
 10. *Голованчиков А.Б., Ламскова М.И., Филимонов М.И., Новиков А.Е.* Моделирование процессов очистки нефтяных шламов в гидроциклоне одновременно от “тяжелых” и “легких” частиц дисперсной фазы // *Известия ВолгГТУ.* Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. № 11. Волгоград, 2016. С. 8.
 11. *Golovanchikov A.B., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M. I.* Modeling the process of separation of non-homogeneous liquid disperse systems in hydrocyclone accounting for similarity criteria // *Chem. and Petrol. Eng.* 2018. V. 54. № 1. P. 118. [*Голованчиков А.Б., Новиков А.Е., Ламскова М.И., Филимонов М.И.* Моделирование процессов разделения неоднородных жидкостных систем в гидроциклоне с учетом критериев подобия // *Хим. и нефтегаз. машиностр.* 2018. № 2. С. 34.]
 12. *Ламскова М.И., Новиков А.Е., Филимонов М.И.* Гидроциклон Пат. 158008 РФ. 2015.
 13. *Голованчиков А.Б., Дулькин А.Б., Тябин Н.В.* Исследование работы виброфильтра с гидродинамическим приводом // *Изв. ВолгГТУ.* Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. № 1. Волгоград, 1996. С. 65.
 14. *Тимонин А.С.* Инженерно-экологический справочник. Т. 2. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003.