

Разделение асбестовых концентратов в гидроциклоне

Николай Петрович КОСАРЕВ*
 Валентин Яковлевич ПОТАПОВ**
 Алексей Владимирович ДОЛГАНОВ***
 Владимир Валентинович ПОТАПОВ

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Рассмотрены вопросы, связанные с эксплуатацией гидроциклонов в асбестовой промышленности для разделения тонко расщепленных асбестовых волокон от породных примесей и нераспушенных иголок асбеста, используемых при мокром обогащении ломкого хризотил-асбеста, а также некоторых видов амфиболовых асбестов и при очистке товарных сортов хризотил-асбеста нормальной прочности от магнетита.

Цель исследования. Цель и задачи исследования – изучение режимов работы гидроциклона для разделения и обесшламливания асбестовых продуктов. Особое внимание уделяется вопросам поведения частиц внутри гидроциклона.

Методология исследования. Проанализированы представленные в литературе формулы для расчета объемной производительности гидроциклонов. В результате этого определено, что объемная производительность гидроциклона не зависит от размера песковой насадки и что влияние последней сказывается в основном на удельном распределении воды между сливным и песковым продуктами.

Результаты исследования. В ходе обработки полученных экспериментальных данных результаты расчета показали, что при различных насадках и напорах питания движение зерен граничного размера во внутреннем потоке гидроциклонов испытанной конструкции происходит в пределах $1 < Re < 20$. Следовательно, принятые зависимости Ψ от Re при выводе расчетных формул являются справедливыми.

Выводы. Объемная производительность гидроциклонов $D = 75$ мм и $D = 200$ мм испытанной конструкции по питанию и по сливу зависит от напора питания и диаметра песковой насадки. Установленные закономерности поведения частиц асбестовых концентратов в гидроциклонах имеют практическое значение и могут быть использованы при выборе технологических параметров их работы для достижения заданных условий по крупности разделения частиц.

Ключевые слова: гидроциклон, объемная производительность, число Рейнольдса, коэффициент сопротивления, асбест, скорость движения частиц, граничная крупность разделения.

Введение

В асбестовой промышленности гидроциклоны применяются для разделения тонко расщепленных асбестовых волокон от породных примесей и нераспушенных иголок асбеста. Они используются при мокром разделении ломкого хризотил-асбеста некоторых видов амфиболовых асбестов и при очистке товарных сортов хризотил-асбеста нормальной прочности от магнетита.

Гидроциклоны характеризуются высокой четкостью разделения, с их помощью из асбестовых концентратов удаляются породные частицы любой крупности вплоть до 0,05 мм. От более тонких пылеобразных породных примесей концентраты сравнительно легко очищаются путем обесшламливания на грохотах. При правильном регулировании процесса разделения асбестовых суспензий в гидроциклонах и подборе соответствующих размеров ячеек сит на грохотах можно достичь полного удаления породных примесей из концентратов при высоком извлечении волокна.

Крупность разделения частиц в гидроциклоне зависит от его конструкции и технологических параметров ра-

боты. В настоящей статье излагаются результаты исследований по определению зависимости крупности разделения частиц асбестовых концентратов от технологических параметров работы гидроциклонов. Исследования проводились с учетом имеющихся в литературе теоретических данных по разделению минеральных суспензий в гидроциклонах и своеобразия формы асбестовых волокон.

Разделение асбестовых концентратов производится в гидроциклонах, которые имеют следующую техническую характеристику:

Диаметр цилиндрической части, мм	75	200
Длина цилиндрической части, мм	40	140
Длина конической части, мм	260	470
Угол конусности, рад	$\pi/15$	$\pi/9$
Размер входного отверстия, мм	$17,5 \times 17,5$	$36,0 \times 36,0$
Диаметр сливного патрубка, мм	24	42
Диаметры песковых насадок, мм	10, 12, 14, 16, 18	16, 20, 28

*iuggu-journal@yandex.ru

**2c1@inbox.ru

***gmf.gm@m.ursmu.ru

В литературе имеется ряд формул для расчета объемной производительности гидроциклонов. Проведенными исследованиями установлено, что наименьшие расхождения между расчетными и фактическими показателями дает формула А. И. Поварова [1, 2]

$$Q = 5K_{\alpha}K_Dd_n d_c \sqrt{gH}, \quad (1)$$

где Q – объемная производительность гидроциклона по питанию, л/мин; d_n – диаметр питающего отверстия, см; d_c – диаметр сливного патрубка, см; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – напор питания, кг/см²; K_{α} – коэффициент, зависящий от угла конусности; K_D – коэффициент, зависящий от диаметра гидроциклона;

$$K_{\alpha} = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \tan \alpha/2}; \quad (2)$$

$$K_D = 0,8 + \frac{1,2}{1+0,1D}, \quad (3)$$

где α – угол конусности, град; D – диаметр гидроциклона, см.

Для расчета гидроциклона испытанной конструкции формула А. И. Поварова примет вид:

$$Q = 6d_n d_c \sqrt{gH}. \quad (4)$$

Из литературных источников известно, что объемная производительность гидроциклона не зависит от размера песковой насадки и что влияние последней сказывается в основном на удельном распределении воды между сливным и песковым продуктами.

Экспериментальные исследования показали, что эти закономерности справедливы и для любой конструкции гидроциклонов. На рис. 1 приведены усредненные кривые зависимостей объемных производительностей гидроциклонов $D = 75$ и $D = 200$ мм по питанию и сливу от отношения размеров песковой насадки к диаметру сливного патрубка.

Производительность гидроциклона по сливу с некоторым приближением может быть выражена уравнением:

$$Q_c = Q \left(1,1 - 0,45 \frac{d_{\text{пес}}}{d_c} \right). \quad (5)$$

В литературе [3–9] имеется ряд формул, устанавливающих зависимость диаметра граничного зерна и максимальной крупности частиц, уходящих в слив, от геометрических размеров и технологических параметров работы гидроциклона.

Под диаметром граничного зерна большинство исследователей подразумевают диаметр такого бесконечно узкого класса, частицы которого поровну (по 50 %) извлекаются в слив и пески. Максимальная крупность частиц в сливе определяется верхним пределом крупности таких частиц, содержание которых составляет 95,0 %. Отношение между максимальным размером частицы в сливе и диаметром граничного зерна не является постоянной величиной, оно зависит от конструктивных особенностей и технологических параметров работы гидроциклона. Практически это отношение колеблется от 1,5 до 3,0, но может быть и более высокое значение.

Основной задачей при обогащении асбестовых руд в гидроциклоне является очистка волокна от песковой фракции, т. е. получение в сливе продукта, не содержащего крупных породных частиц [3, 10, 11].

Формулы, предназначенные для определения диаметра граничного зерна, не дают точного представления о максимальной крупности частиц в сливе, и поэтому они не могут быть рекомендованы для асбестовых руд.

Более приемлемыми для этой цели являются формулы для определения наибольшего зерна в глине (Поварова, Травинского, Тарьяна и др.), из которых наиболее теоретически обоснована формула Е. М. Гольдина и А. И. Поварова [1]:

$$d = \frac{1,48d_n \sqrt{\mu}}{\varphi_x \sqrt{v_n h(\sigma - \Delta)}}, \quad (6)$$

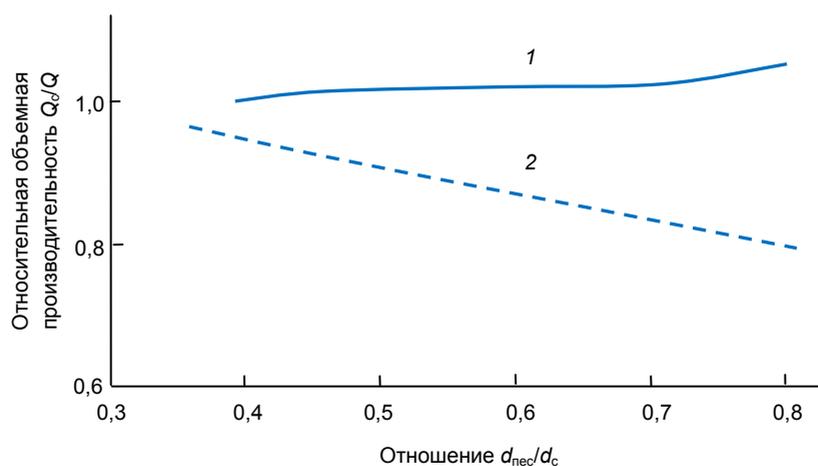


Рисунок 1. Влияние диаметра песковой насадки на объемную производительность гидроциклонов: $D = 75$ мм, $D = 200$ мм; 1 – по питанию, 2 – по сливу

Figure 1. Influence of the diameter of the sand nozzle on the volumetric delivery of hydrocyclones $D = 75$ mm, $D = 200$ mm; 1 – for feeding 2 – for draining

где d – диаметр наибольшего зерна в сливе, см; φ_x – коэффициент изменения окружной скорости, равный отношению скорости жидкости на радиусе сливного отверстия к скорости жидкости в точке питания; v_n – тангенциальная скорость жидкости в точке питания, см/с; h – высота внутреннего потока жидкости, равная 2/3 высоты конуса гидроциклона, см; σ, Δ – плотности частицы и среды, г/см³; μ – вязкость среды, г/(см × с).

Экспериментально установлено [1], что

$$\varphi_x = \frac{v_c}{v_n} = 17,5 \frac{d_n^3}{d_c D} \alpha^{0,3}, \quad (7)$$

где v_c – тангенциальная скорость на радиусе сливного отверстия, см/с; α – угол конусности гидроциклона, рад.

Скорость жидкости в точке питания:

$$v_n = \frac{4Q}{\pi d_n^2}. \quad (8)$$

При выводе формулы (6) авторы исходили из того, что движение зерен в восходящем потоке происходит в радиальном направлении. За время, которое основной поток, уходящий в слив, пройдет путь h , зерна верхнего предела крупности, находящиеся в наиболее невыгодных условиях у границы воздушного столба, передвинутся до внешней границы внутреннего потока. Сопротивление среды при этом принято авторами линейным, а форма частиц – шарообразной.

Фактически в гидроциклоне разделяются частицы, не обладающие шарообразной формой, и процесс разделения происходит в условиях как вязкостного, так и динамического сопротивлений среды. По анализу источников установлено, что в гидроциклоне диаметром 75 мм граничная крупность разделения зерен каолина происходит в пределах чисел Рейнольдса 0,5–45.

Приняв основные положения Е. М. Гольдина и А. И. Поварова [1] о закономерностях движения твердых частиц во внутреннем потоке, можно вывести формулу для расчета максимальных размеров породных зерен и асбестовых волокон в сливе с учетом их формы и общего сопротивления среды.

Общее сопротивление среды выражается уравнениями:

– для шарообразной частицы

$$P = \Psi d^2 U^2 \Delta; \quad (9)$$

– для цилиндрической частицы

$$P = \Psi d_1 l U^2 \Delta. \quad (10)$$

Центробежные силы, приложенные к частицам:

– шарообразной

$$C = \frac{\pi d^3 (\delta - \Delta) v_t^2}{6r}; \quad (11)$$

– цилиндрической

$$\frac{\pi d (\delta - \Delta) v_t^2}{6r} = \Psi U^2 \Delta; \quad (12)$$

При равновесии центробежных сил с силами сопротивления среды частицы граничного размера будут двигаться по радиусу от центра к периферии. Уравнения равновесия примут вид:

– для шарообразной частицы

$$\frac{\pi d (\delta - \Delta) v_t^2}{6r} = \Psi U^2 \Delta; \quad (13)$$

– для цилиндрической частицы

$$\frac{\pi d_1 (\delta - \Delta) v_t^2}{4r} = \Psi U^2 \Delta, \quad (14)$$

где d – диаметр эквивалентного шара, см; d_1 – диаметр цилиндра, см; l – длина цилиндра, см; Ψ – коэффициент сопротивления среды; U – радиальная скорость частицы, см/с; v_t – тангенциальная скорость частицы, см/с; r – радиус вращения частицы, см.

Радиальная скорость движения частицы является переменной величиной, зависящей от r :

$$U = \frac{dr}{dt}. \quad (15)$$

Тангенциальная скорость v_t также является переменной величиной, она изменяется по радиусу от r_0 (радиус воздушного столба) до r_c (радиус сливного отверстия). Для упрощения расчетов ее обычно принимают за постоянную величину [1], равную тангенциальной скорости либо на радиусе сливного отверстия v_c , либо на радиусе воздушного столба v_0 , либо среднему значению скоростей на отрезке $r_0 - r_c$.

Коэффициент сопротивления среды Ψ зависит от формы частицы и критерия Рейнольдса. Критерий Рейнольдса в центробежном поле разделения имеет вид [12]:

– для шарообразной частицы

$$Re = \frac{Ud\Delta}{\mu}; \quad (16)$$

– для цилиндрической частицы

$$Re = \frac{2Ud_1\Delta}{\mu}. \quad (17)$$

Связь между Ψ и Re для шаров была установлена Рэлеем в графическом виде. Точной аналитической формулы, описывающей кривую Рэля, не найдено. Исследователями предложен ряд формул, из которых простые двучленные дают большие погрешности при вычислениях, а сложные многочленные неудобны, так как по ним невозможно получить аналитическое выражение скорости через диаметр частицы.

Некоторые исследователи (Корольков, Олевский и др.) предложили разбить кривую Рэля на ряд участков и заменить на каждом участке кривую на прямую линию. Такой подход к решению данного вопроса для нашего случая является наиболее приемлемым, так как позволяет установить достаточно точную аналитическую связь между Ψ и Re как для породных, так и для цилиндрических

частиц. Для этого не обязательно пользоваться кривой Рэлея, можно это сделать по кривым зависимостей Ψ/Re от Re , установленных нами для породных и цилиндрических частиц [12], тем более что при решении задач с породными частицами в этом случае не потребуются вводить поправочного коэффициента на форму, так как зависимость Ψ/Re от Re установлена не для шаров, а для зерен кварца.

Предварительный анализ экспериментальных данных работы гидроциклонов $D = 75$ и $D = 700$ мм испытанной конструкции на асбестовых рудах показал, что граничная крупность разделения частиц происходит в пределах чисел Рейнольдса от 0 до 20. С достаточным запасом для практических расчетов применимо аналитическое уравнение зависимости Ψ/Re от Re в пределах чисел Рейнольдса от 0,5 до 30.

Кривые зависимости Ψ/Re от Re для породных и цилиндрических частиц в работе [12] представлены в логарифмическом масштабе, уравнения отдельных прямолинейных участков этих кривых имеют вид

$$\Psi = BRe^{-n}. \tag{18}$$

В пределах чисел Рейнольдса от 0,5 до 30 аналитические зависимости Ψ от Re выражаются уравнениями:

– для шарообразной частицы

$$\Psi = 13,9 Re^{-0,7}; \tag{19}$$

– для цилиндрической частицы

$$\Psi = 9,2 Re^{-0,6}. \tag{20}$$

Подставляя в уравнения (13), (14) значения Ψ (19), (20), Re (16), (17), U (15), $v_i = \varphi_x v_n$ и решая их относительно dt , получим:

– для шарообразной частицы

$$dt = \frac{12,46\Delta^{0,23}\mu^{0,54}r^{0,77}}{d^{1,31}(\delta-\Delta)^{0,77}\varphi_x^{1,54}v_n^{1,54}} dr; \tag{21}$$

– для цилиндрической частицы

$$dt = \frac{4,35\Delta^{0,28}\mu^{0,43}r^{0,71}}{d_1^{1,14}(\delta-\Delta)^{0,71}\varphi_x^{1,43}v_n^{1,43}} dr. \tag{22}$$

Проинтегрировав уравнения (21), (22), приняв $r_0 = 0,6 r_c$ (7), получим время движения частиц граничной крупности от воздушного столба до внешней границы внутреннего потока:

– для шарообразной частицы

$$t = 1,2 \frac{\mu^{0,54}\Delta^{0,23}d_c^{1,77}}{d^{1,31}(\delta-\Delta)^{0,77}\varphi_x^{1,54}v_n^{1,54}}; \tag{23}$$

– для цилиндрической частицы

$$t = 0,45 \frac{\mu^{0,43}\Delta^{0,28}d^{0,71}}{d_1^{1,14}(\delta-\Delta)^{0,71}\varphi_x^{1,43}v_n^{1,43}} dr. \tag{24}$$

Время движения частиц граничной крупности от $r_0 - r_c$ равно времени пребывания жидкости во внутреннем потоке. Вертикальная скорость внутреннего потока определяется по объемной производительности [10, 13] гидроциклона по сливу и площади поперечного сечения внутреннего потока

$$v_z = 2 \frac{Q_c}{d_c^2}. \tag{25}$$

Время движения жидкости во внутреннем потоке

$$t = \frac{h}{v_x} = 0,5 \frac{hd_c^2}{Q_c}. \tag{26}$$

Решая совместно уравнения (23), (24) и (26), получим расчетные формулы для определения диаметров наибольших частиц в сливе:

$$d = 1,94 \frac{\mu^{0,41}\Delta^{0,17}Q_c^{0,77}}{(\delta-\Delta)^{0,59}\varphi_x^{1,18}v_n^{1,18}h^{0,76}d_c^{0,18}}; \tag{27}$$

$$d_1 = 0,91 \frac{\mu^{0,38}\Delta^{0,25}Q_c^{0,88}}{(\delta-\Delta)^{0,62}\varphi_x^{1,25}v_n^{1,25}h^{0,88}d_c^{0,25}}. \tag{28}$$

Значения Q_c и v_n подставляются из уравнений (4), (5), (8). Теоретически обоснованной формулы для определения коэффициента изменения окружной скорости φ_x не создано. Ранее указывалось, что А. И. Поваров предложил для определения φ_x эмпирическое уравнение (7), а другие авторы, исследуя закономерности процесса разделения каолинов в гидроциклоне, составили уравнение для определения φ_x на радиусе сливного отверстия для гидроциклона диаметром 75 мм:

$$\varphi_x = 0,912 \frac{D}{d_c} \left(2,3 \lg \frac{D}{d_c} + 1 \right)^{-1}. \tag{29}$$

Большой объем исследовательских работ по изучению динамики движения жидкости в гидроциклоне выполнен в ИГД им. Скочинского и в Институте горючих ископаемых. Исследования проводились на прозрачной модели гидроциклона диаметром 80 мм. Изучался характер изменения тангенциальной скорости воды в зависимости от изменения разгрузочных отверстий, давления на входе, размера входного отверстия и угла конусности гидроциклона.

По результатам проведенных исследований сделаны выводы, что характер изменения тангенциальной скорости вдоль радиуса определяется в основном размерами разгрузочных отверстий, главным образом, размером сливного отверстия. Давление на входе, размер питающего отверстия и угол конусности гидроциклона существенного влияния на характер изменения тангенциальной скорости не оказывают. Установлена зависимость тангенциальной скорости воды у границы с воздушным столбом от скорости ее на входе и диаметра сливного отверстия (рис. 2).

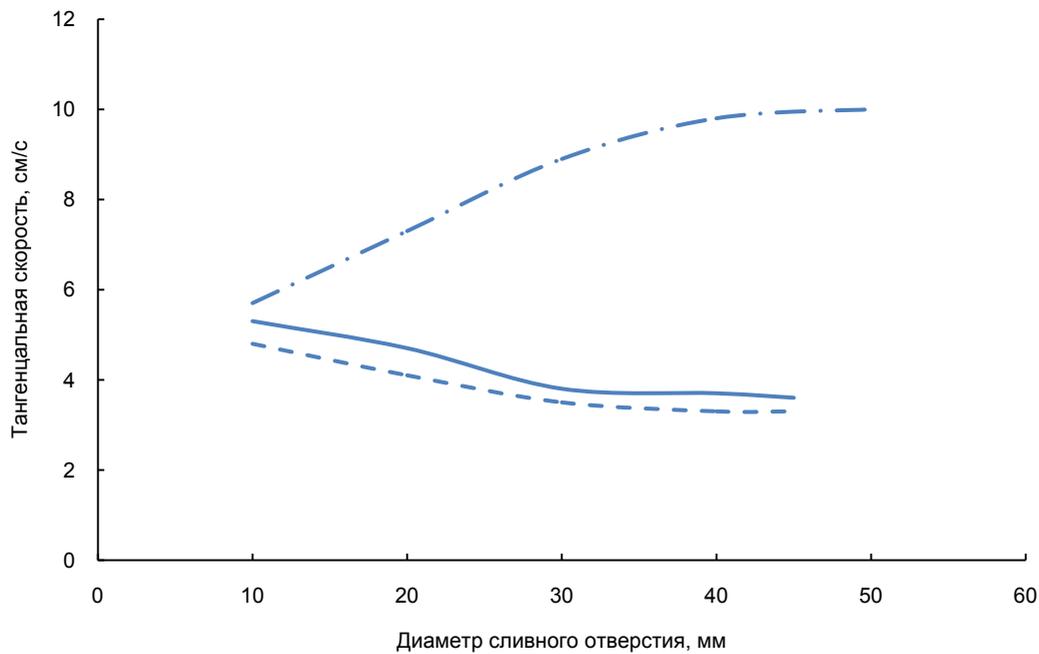


Рисунок 2. Изменение тангенциальной скорости воды в гидроциклоне в зависимости от диаметра сливного отверстия: сплошная линия – в цилиндрической части; пунктирная – в конической части
Figure 2. Change in the tangential velocity of water in the hydrocyclone depending on the diameter of the drain hole: solid line – in the cylindrical part; dotted – in the conical part

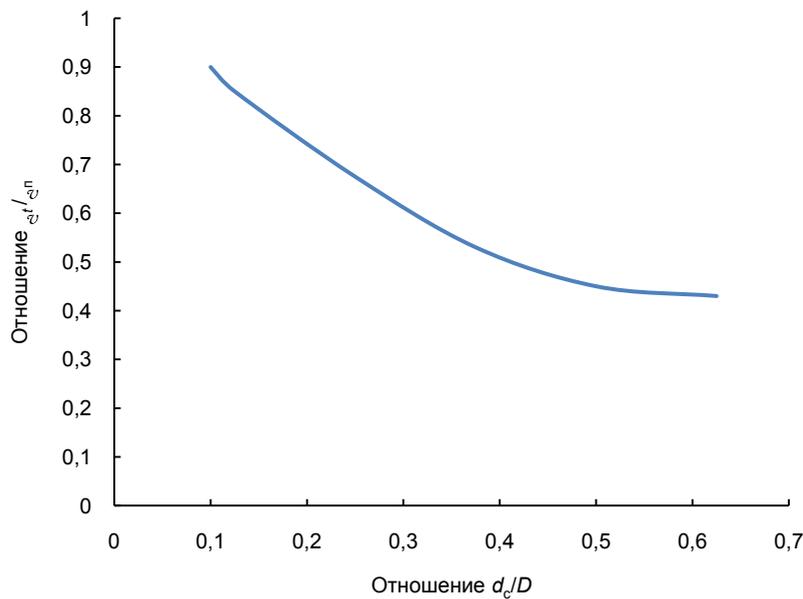


Рисунок 3. Изменение j_x в гидроциклоне на отрезке r_0-r_c в зависимости от отношения d_c/D
Figure 3. Change in j_x in the hydrocyclone on the segment r_0-r_c depending on the ratio d_c/D

Зависимость v_t у границы с воздушным столбом от v_n и d_c преобразована нами в зависимости φ_x от d_c/D . По экспериментальным данным, приведенным в работе [2], найдена аналогичная зависимость на радиусе сливного отверстия и средняя на отрезке r_0-r_c (рис. 3).

Указанные преобразования выполнены для конической части гидроциклона, так как в гидроциклонах испытанной конструкции сливной патрубок доходит до границы цилиндрической части с конической. Кривая зависимости φ_x от d_c/D хорошо описывается уравнением:

$$\varphi_x = 0,31 (d_c/D)^{-1/2} = 0,31 (d_c/D)^{1/2}. \quad (30)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета φ_x для гидроциклонов различной конструкции по уравнениям (7), (29), (30).

Значения φ_x , полученные по различным формулам, имеют большой диапазон колебаний. Очевидно, формулы для расчета φ_x не учитывают некоторых факторов, влияющих на изменение окружной скорости. У гидроциклонов

Таблица 1. Расчетные значения j_x для гидроциклонов
Table 1. Calculated values of j_x for hydrocyclones

Параметры гидроциклона	Значение φ_x		
	$17,5 = \frac{d_n^2}{d_c D} \alpha^{0,3}$	$0,912 = \frac{D}{d_c} \left(2,3 \lg \frac{D}{d_c} + 1 \right)^{-1}$	$0,31 \left(\frac{D}{d_c} \right)^{1/2}$
$D = 200$ мм $d_c = 42$ мм $d_n = 40$ мм $\alpha = 20^\circ$	2,42	1,70	0,69
$D = 75$ мм $d_c = 24$ мм $d_n = 20$ мм $\alpha = 12^\circ$	2,43	1,33	0,55

испытанной конструкции показатели D , d_n , d_c , α , входящие в формулы (7), (29), (30), являются постоянными величинами, следовательно, отношение $\varphi_x = v_1/v_n$ должно также иметь постоянное значение. Его можно получить расчетным путем, подставляя в уравнение (27) значения всех входящих в него показателей – постоянных и переменных, зависящих и не зависящих от технологических параметров работы гидроциклона.

Для определения значения φ_x нами была проведена серия опытов на руде крупностью –0,5 мм. Руда перемешивалась с водой в смесительном баке в весовом отношении 1 : 25. Из бака пульпа песковым насосом подавалась в гидроциклон, слив и пески которого возвращались в бак.

Для стабилизации режима работы гидроциклона каждый раз перед опробованием установка работала несколько минут по замкнутой схеме. В период опробования схема размыкалась и одновременно отбирались пробы из сливного и пескового продуктов. Давление пульпы на входе поддерживалось 1,2 кг/см², песковые насадки имели размеры: для гидроциклона $D = 75$ мм – 12, 16 мм, для гидроциклона $D = 200$ мм – 20, 28 мм. Средние характеристики крупности продуктов слива приведены на рис. 4.

Подставляя значения H , $d_{\text{нec}}$, d_n и d_c в уравнения (4), (5), определим Q и Q_c . По найденному значению Q и по формуле (8) найдем v_n . Параметры Δ , μ и δ в условиях проведенных опытов имеют постоянные значения, соответственно равные 1 г/см³, 2,6 г/см³ и 0,01 г/(см · с). Диаметр максимального зерна в сливе определяется по характеристикам крупности слива. Подставляя значения Δ , δ , μ , Q_c , v_n , h и d в уравнение (27), найдем значения φ_x для гидроциклонов: $D = 75$ мм – 0,83, $D = 200$ мм – 1,06.

Уравнения (27), (28) можно значительно упростить, ограничив их применение для конкретных гидроциклонов, имеющих определенные конструктивные параметры. Для гидроциклонов испытанной конструкции постоянными параметрами являются d_n , d_c , h .

По условиям работы гидроциклонов на сильно разжиженной пульпе постоянное значение имеют показатели Δ и μ . Плотности частиц также можно принять за постоянные величины, имеющие средние значения: у породных зерен 2,6 г/см³, у асбестовых волокон 2,9 г/см³.

Подставляя в уравнения (27), (28) значения Q_c , v_n , φ_x , Δ , δ , d_c , h , μ , получим упрощенные формулы для расчета максимальной крупности частиц в сливе:

– для гидроциклона $D = 75$ мм

$$d = 0,0048 \frac{\left(1,1 - 0,45 \frac{d_{\text{нec}}}{d_c} \right)^{0,76}}{H^{0,21}}; \quad (31)$$

$$d_1 = 0,00245 \frac{\left(1,1 - 0,45 \frac{d_{\text{нec}}}{d_c} \right)^{0,88}}{H^{0,19}}; \quad (32)$$

– для гидроциклона $D = 200$ мм

$$d = 0,0065 \frac{\left(1,1 - 0,45 \frac{d_{\text{нec}}}{d_c} \right)^{0,76}}{H^{0,21}}; \quad (33)$$

$$d_1 = 0,0033 \frac{\left(1,1 - 0,45 \frac{d_{\text{нec}}}{d_c} \right)^{0,88}}{H^{0,19}}. \quad (34)$$

Формулы (32), (34) предназначены для расчета крупности разделения идеальных цилиндрических тел. При переходе на асбестовые волокна в связи с несовершенством формы последних расчетный диаметр следует увеличить на 20 % согласно зависимости, установленной в работе [12].

Критерий Рейнольдса показывает, в каком режиме (турбулентном, ламинарном или переходном) перемещаются в гидроциклоне частицы граничной крупности и какой вид сопротивления оказывает среда. При выводе уравнений (31)–(34) было учтено, что при изменении режимов работы гидроциклонов меняются как размеры граничных зерен, так и характер сопротивления среды. Последний учтен в формулах через коэффициент сопротивления среды, который, в свою очередь, учтен через число Рейнольдса. Аналитическая связь между Ψ и Re определена уравнениями (19), (20) в пределах чисел Рейнольдса от 0,5 до 30.

Для проверки справедливости принятых значений критерия Рейнольдса для частиц граничной крупности в гидроциклонах испытанной конструкции расчетным путем по формулам (31)–(34) определяем d и d_1 при различных значениях H и $d_{\text{нec}}$ (табл. 2)

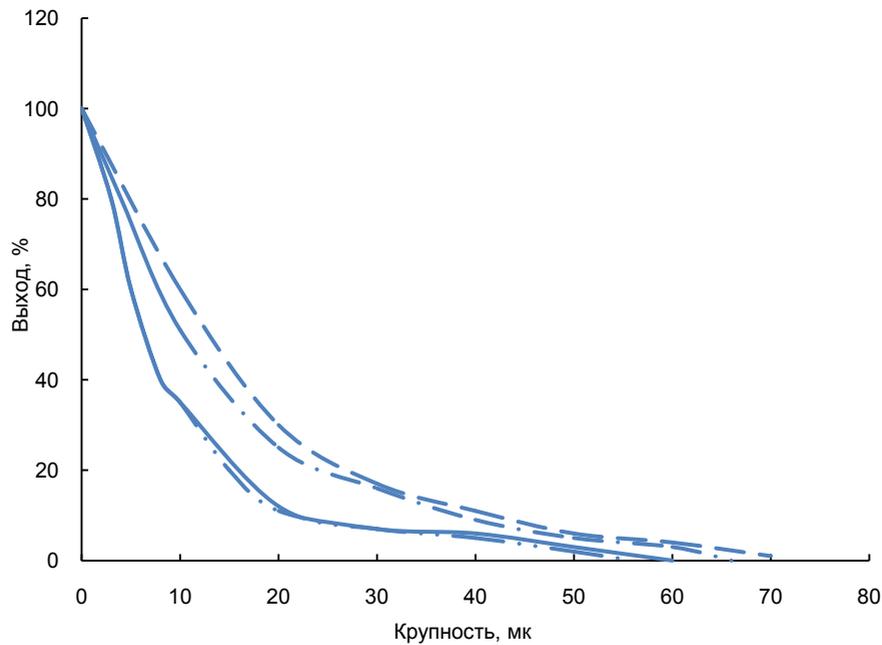


Рисунок 4. Характеристики крупности продуктов слива: пунктирная линия – $D = 200$ мм, $d_{\text{нec}} = 20$ мм; пунктирная линия с точкой – $D = 200$ мм, $d_{\text{нec}} = 28$ мм; сплошная линия – $D = 75$ мм, $d_{\text{нec}} = 12$ мм; пунктирная линия с двумя точками – $D = 75$ мм, $d_{\text{нec}} = 16$ мм
Figure 4. Characteristics of the size of the discharge products: dotted line – $D = 200$ mm, $d_{\text{нec}} = 20$ mm; dotted line with a dot – $D = 200$ mm, $d_{\text{нec}} = 28$ mm; solid line – $D = 75$ mm, $d_{\text{нec}} = 12$ mm; dotted line with two dots – $D = 75$ mm, $d_{\text{нec}} = 16$ mm

Таблица 2. Расчетные значения параметров Рейнольдса, диаметров и средних радиальных скоростей движения частиц граничной крупности во внутреннем потоке гидроциклонов
Table 2. Calculated values of the Reynolds parameters, diameters and average radial velocities of movement of particles of separation mesh in the internal flow of hydrocyclones

Давление на выходе, кг/см ²	d , мк, U , см/с, Re	$D = 75$ мм				$D = 200$ мм			
		$d_{\text{нec}} = 1,0$ см		$d_{\text{нec}} = 1,8$ см		$d_{\text{нec}} = 1,6$ см		$d_{\text{нec}} = 2,8$ см	
		Волокно	Породные частицы						
0,5	d	26	52	22	45	36	71	32	63
	U	10,0	10,0	7,3	7,3	13,0	13,0	11,9	11,9
	Re	5,2	5,2	3,2	3,2	9,2	9,2	7,5	7,5
1,0	d	23	45	19	39	31	62	28	55
	U	14,0	14,0	19,8	19,8	19,3	19,3	16,4	16,4
	Re	6,2	6,2	4,2	4,2	12,0	12,0	9,0	9,0
2,0	d	20	39	17	34	53	53	24	48
	U	20	20	15	15	24,5	24,5	23	23
	Re	8,0	7,5	5,1	5,1	13,0	13,0	11,0	11,0
4,0	d	18	34	15	29	46	46	21	41
	U	26,5	26,5	23,8	23,8	34,8	34,8	29,3	29,3
	Re	9,2	9,0	6,8	6,9	16,0	16,0	12,0	12,0

По формулам [1]:

$$Re^2\Psi = \frac{\pi d^3(\delta - \Delta)g\Delta}{6\mu^2}; \tag{35}$$

$$Re^2\Psi = \frac{\pi d_1^3(\delta - \Delta)g\Delta}{\mu^2}, \tag{36}$$

подставляя вместо ускорения свободного падения g центробежное ускорение v_t^2 / r , определяем для них параметры $Re^2\Psi$. Тангенциальную скорость v_t находим из выра-

жения $v_t = v_{\text{пф}}$, а радиус принимаем равным $0,8 r_c$ (средним между r_0 и r_c). По кривым зависимостей $Re^2\Psi$ от Re (6) определяем Re и по найденным значениям Re рассчитываем средние радиальные скорости движения частиц граничной крупности во внутреннем потоке.

Результаты расчета показали, что при различных насадках и напорах питания [14, 15–18] движение зерен граничного размера во внутреннем потоке гидроциклонов испытанной конструкции происходит в пределах $1 < Re < 20$. Следовательно, принятые зависимости Ψ

от Re при выводе расчетных формул являются справедливыми.

Выводы (заключение)

Объемная производительность гидроциклонов $D = 75$ мм и $D = 200$ мм испытанной конструкции по питанию и по сливу зависит от напора питания и диаметра лесковой насадки. Расчет производительности рекомендуется производить по формулам (4), (5).

Перемещение породных частиц и асбестовых волокон граничной крупности в радиальном направлении от границы с воздушным столбом до внешней границы центрального восходящего потока происходит при одновременном действии сил вязкостного и динамического сопротивлений среды в области критериев Рейнольдса от 3,2 до 16.

Приближенная аналитическая связь между коэффициентом сопротивления и числом Рейнольдса при ради-

альном перемещении частиц граничного размера в центральном восходящем потоке выражается уравнениями (19), (20), которые получены путем «выпрямления» участков кривых $\psi / Re = f(Re)$ в пределах чисел Рейнольдса от 0,5 до 30.

Для расчета граничной крупности разделения асбестовых волокон и породных частиц в гидроциклонах испытанной конструкции можно пользоваться формулами (31)–(34), выведенными с учетом одновременного действия сил вязкостного и динамического сопротивлений среды.

Установленные закономерности поведения частиц асбестовых концентратов в гидроциклонах имеют практическое значение и могут быть использованы при выборе технологических параметров их работы для достижения заданных условий по крупности разделения частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М: Недра, 1978. 232 с.
2. Бауман А. В. Гидроциклоны. Теория и практика. Новосибирск: Гормашэкспорт, 2020. 56 с.
3. Старостин А. Г., Федотова О. А., Кобелева А. Р. Очистка сточных вод от мелкодисперсных частиц на гидроциклоне // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2020. № 1. С. 99–112. <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2020.1.08>
4. Голованчиков А. Б., Ильин А. В., Ильина Л. А., Первакова Г. И. Оценка вероятности улавливания частиц в гидроциклоне, батареи и каскаде гидроциклонов с учетом экспериментальных исследований // Известия ВолгГТУ. 2014. № 1 (128). С. 27–31.
5. Шагарова О. Н. Энергетическая характеристика гидроциклона // ГИАБ. 2010. № 10. С. 127–134.
6. Голубцов В. М. К расчету производительности напорных гидроциклонов // Промышленная энергетика. 2011. № 5. С. 41–43.
7. Anjos R. P., Medronho R. A., Klein T. S. Assessment of turbulence models for single phase CFD computations of a liquid-liquid hydrocyclone using OpenFoam // Journal of Turbulence. 2021. Vol. 22. No. 2. P. 79–113. <https://doi.org/10.1080/14685248.2020.1846050>
8. Jung K. J., Hwang I.-J., Kim Y.-J. Effect of inner wall configurations on the separation efficiency of hydrocyclone // Journal of Mechanical Science and Technology. 2019. Vol. 33. No. 11. P. 5277–5283. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1019-1>
9. Ji L., Kuang S., Yu A. Numerical investigation of hydrocyclone feed inlet configurations for mitigating particle misplacement // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2019. Vol. 58. No. 36. P. 16823–16833. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01203>
10. Валеев С. И. Очистка сточных вод в гидроциклонах систем оборотного водоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2000. 18 с.
11. Матвиенко О. В., Евтюшкин Е. В. Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84. № 2. С. 230–238.
12. Маркелов В. М. Коэффициент равнопадаемости породных частиц и асбестовых волокон в водной среде // Труды ВНИИпроектасбеста. 1972. Вып. 12. С. 25–28.
13. А. с. SU 1456239 A1. Способ определения расхода пульпы в питании гидроциклона / Л. Р. Тисменецкий, Т. Ю. Трач, В. П. Хорольский, Н. И. Сокур. № 4151942; заявл. 26.11.86; опубл. 07.02.89.
14. Пат. RU 2179482 C2. Способ регулирования работы гидроциклона и гидроциклон / Дегтярев Г. В., Дегтярева О. Г.; патентообладатели Кубанский гос. аграрн. ун-т, ЗАО «КВАЗАР». № 2000107776/12; заявл. 28.03.00; опубл. 20.02.02.
15. А. с. SU 929234 A1, М. Кл³. В 04 С 11. Промывное устройство камеры сгущения гидроциклона / А. А. Таттибаев, Р. П. Помашев, А. А. Абдураманов, Н. Ю. Креккер. № 2655710/23–26; заявл. 12.06.78; опубл. 23.05.82, Бюл. № 19.
16. Пат. RU 2165308 C1, МПК В 04 С5/00. Гидроциклон очиститель-смеситель / Карев Е. А., Шабалин В. С., Фадеев Р. Л., Хузахметов Ф. В.; патентообладатель Ульяновский гос. техн. ун-т. № 2000108107/12; заявл. 31.03.00; опубл. 20.04.01.
17. А. с. SU 886997 A1. Трехпродуктовый гидроциклон / И. Г. Терновский, А. М. Кутепов, Д. А. Баранов, М. Г. Лагуткин. № 2884500; заявл. 15.02.80; опубл. 07.12.81.
18. А. с. SU 1005932 A1. Гидроциклон / В. А. Вайдуков, Н. И. Глаголев. № 3393515; заявл. 12.02.82; опубл. 23.03.83.

Статья поступила в редакцию 04 февраля 2023 года

Separation of asbestos concentrates in a hydrocyclone

Nikolay Petrovich KOSAREV*
Valentin Yakovlevich POTAPOV**
Aleksey Vladimirovich DOLGANOV***
Vladimir Valentinovich POTAPOV

Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Relevance. Issues related to the operation of hydrocyclones in the asbestos industry for the separation of finely split asbestos fibers from rock impurities and non-fluffed asbestos needles used in the wet enrichment of brittle chrysotile asbestos, as well as some types of amphibole asbestos and in the purification of commercial grades of chrysotile asbestos of normal strength from magnetite are considered.

Purpose. The purpose and objectives of the research is to study the operating modes of a hydrocyclone for the separation and desliming of asbestos products. Particular attention is paid to the behavior of particles inside the hydrocyclone.

Methodology. The formulas presented in the literature for calculating the volumetric delivery of hydro-cyclones are analyzed. As a result, it was determined that the volumetric delivery of the hydrocyclone does not depend on the size of the sand nozzle and that the influence of the latter affects mainly the specific distribution of water between the discharge and sand products.

Results. In the course of processing the obtained experimental data, the calculation results showed that, at different nozzles and feed heads, the movement of grains of separation mesh in the internal flow of hydrocyclones of the tested design occurs within $1 < Re < 20$. Therefore, the accepted dependences of Ψ on Re when deriving the calculated formulas are correct.

Conclusions. The volumetric delivery of hydrocyclones $D = 75$ mm and $D = 200$ mm of the tested design for feeding and draining depends on the feed head and the diameter of the framework nozzle. The established regularities in the behavior of particles of asbestos concentrates in hydrocyclones are of practical importance and can be used when choosing the technological parameters of their operation to achieve the specified conditions for the size of particle separation mesh.

Keywords: hydrocyclone, volumetric delivery, Reynolds number, drag coefficient, asbestos, particle velocity, limiting separation mesh.

REFERENCES

1. Povarov A. I. 1978, Hydrocyclones in processing plants. Moscow, 232 p. (In Russ.)
2. Bauman A. V. 2020, Hydrocyclones. Theory and practice. Novosibirsk, 56 p. (In Russ.)
3. Starostin A. G., Fedotova O. A., Kobeleva A. R. 2020, Wastewater treatment from fine particles on a hydrocyclone. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical Engineering and Biotechnology], no. 1, pp. 99–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9400/2020.1.08>
4. Golovanchikov A. B., Ilyin A. V., Ilyina L. A., Pervakova G. I. 2014, Estimation of the probability of trapping particles in a hydrocyclone, a battery and a cascade of hydrocyclones, taking into account experimental studies. *Izvestiya VolgGTU* [News of the Volgograd State Technical University], no. 1 (128), pp. 27–31. (In Russ.)
5. Shagarova O. N. 2010, Energy characteristic of the hydrocyclone. *GIAB* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 10, pp. 127–134. (In Russ.)
6. Golubtsov V. M. 2011, On the calculation of the performance of pressure hydrocyclones. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], no. 5, pp. 41–43. (In Russ.)
7. Anjos R. P., Medronho R. A., Klein T. S 2021, Assessment of turbulence models for single phase CFD computations of a liquid-liquid hydrocyclone using OpenFoam. *Journal of Turbulence*, vol. 22, no. 2, pp. 79–113. <https://doi.org/10.1080/14685248.2020.1846050>
8. Jung K. J., Hwang I. J., Kim Y. J. 2019, Effect of inner wall configurations on the separation efficiency of hydrocyclone. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 11, pp. 5277–5283. <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1019-1>
9. Ji L., Kuang S., Yu A. 2019, Numerical investigation of hydrocyclone feed inlet configurations for mitigating particle misplacement. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 58, no. 36, pp. 16823–16833. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01203>
10. Valeev S. I. 2000, Wastewater treatment in hydrocyclones of water recycling systems, PhD thesis. Kazan, 18 p. (In Russ.)
11. Matvienko O. V., Evtuyshkin E. V. 2011, Mathematical study of the separation of the dispersed phase in a hydrocyclone during the purification of viscoplastic drilling fluids. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], vol. 84, no. 2, pp. 230–238. (In Russ.)
12. Markelov V. M. 1972, Equal settling factor of rock particles and asbestos fibers in the aquatic environment. *Trudy VNIIproyektasbesta* [Proceedings of VNIIproyektasbest], issue 12, pp. 25–28. (In Russ.)

✉ iuggu-journal@yandex.ru

**2c1@inbox.ru

***gmf.gm@m.ursmu.ru

13. Tismenetsky L. R., Trach T. Yu., Khorolsky V. P., Sokur N. I. A. c. SU 1456239 A1. Method for determining pulp consumption in hydrocyclone feed, no. 4151942; applied 26.11.86; published 07.02.89. (*In Russ.*)
14. Degtyarev G. V., Degtyareva O. G., Patent RU 2179482 C2. Method for regulating the operation of a hydrocyclone and a hydrocyclone itself. Patent holders Kuban state agricultural university, CJSC "KVAZAR", no. 2000107776/12; applied 28.03.00; published 20.02.02. (*In Russ.*)
15. Tattibaev A. A., Pomashev R. P., Abduramanov A. A., Krecker N. Yu. A. c. SU 929234 A1, M. Cl³. B 04 C 11. Washing device of the hydrocyclone thickening chamber, no. 2655710/23–26; applied 12.06.78; published 23.05.82. Bul. no. 19. (*In Russ.*)
16. Karev E. A., Shabalin V. S., Fadeev R. L., Khuzakhmetov F. V. Patent RU 2165308 C1, IPC B 04 C5/00. Hydrocyclone cleaner-mixer. Patent holder Ulyanovsk state technical university, no. 2000108107/12; applied 31.03.00; published 20.04.01. (*In Russ.*)
17. Ternovsky I. G., Kutepov A. M., Baranov D. A., Lagutkin M. G. A. c. SU 886997 A1. Three-product hydrocyclone, no. 2884500; applied 15.02.80; published 07.12.81. (*In Russ.*)
18. Vaidukov V. A., Glagolev N. I. A. c. SU 1005932 A1. Hydrocyclone, no. 3393515; applied 12.02.82; published 23.03.83. (*In Russ.*)

The article was received on February 04, 2023