

П. А. Бакум

ГВУЗ «Национальный горный университет»

## Сепарационные характеристики вертикального сгустителя-дешламатора с погруженным кольцом

*Выполнено математическое моделирование процессов классификации твердой фазы в вертикальном сгустителе-дешламаторе с погруженным кольцом, имитирующим работу блока тонкослойного сгущения. Определены сепарационные характеристики вертикального сгустителя-дешламатора. Показано, что при погружении кольца коэффициент диффузии и вероятность извлечения твердой фазы в слив – возрастают. (Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.).*

**Ключевые слова:** математическая модель, сепарационная характеристика, сгуститель-дешламатор, тонкослойный блок, турбулентно-диффузионная модель, массоперенос

*Mathematical modelling of processes of classifying of hard phase in vertical thickener-deslimmer with scrobicule simulating the work of block of thin-bedded thickening is fulfilled. Separating characteristics of vertical thickener-deslimmer are defined. It is shown that during immersion of scrobicule, the diffusion coefficient and probability of extraction of hard phase into runoff increases.*

**Key words:** mathematical model, separating characteristic, thickener-deslimmer, thin-bedded block, turbulent-diffusion model, mass-transfer

Применение вертикальных сгустителей-дешламаторов позволяет достичь ряда преимуществ, среди которых получение – плотного осадка, возможность удаления осадка без применения специальных устройств, а также возможность их рационального размещения на производственной площади благодаря сравнительно небольшим диаметрам аппаратов. Так, на Вольногорском государственном горно-металлургическом комбинате при обогащении титаноциркониевых песков в технологической схеме используются вертикальные сгустители-дешламаторы – струйные зумпфы. Эти сооружения, кроме основного своего предназначения по обесшламливанию рудного песка, также применяются в качестве аккумулирующих емкостей. Несмотря на ряд преимуществ вертикальных сгустителей, их эффективность, как правило, не превышает 30–40 %, в то время как в горизонтальных и радиальных сгустителях эффективность достигает 50–60 % [6]. Сравнительно небольшая площадь сгущения и специфика турбулентных потоков в объеме аппарата способствуют возникновению локальных зон выноса полезных компонентов. В связи с этим особую значимость приобретают задачи интенсификации работы сгустительных сооружений и снижения потерь полезных компонентов в слив.

Наиболее широкое применение в практике обогащения полезных ископаемых при модернизации действующих сгустителей, дешламаторов, осветлителей получили тонкослойные

элементы (блоки, модули). Тонкослойный блок представляет собой пакет из ряда параллельных наклонных плоскостей, расположенных на расстоянии 30–50 мм между собой и соединенных боковыми стенками в один пакет. Чтобы происходило сползание осадка, угол наклона плоскостей обеспечивается в диапазоне 45–60°. Реконструкция действующих аппаратов путем установки тонкослойных блоков в объеме сгустителя позволяет реализовывать классификацию тонкодисперсного материала по требуемой крупности разделения, и таким образом – регулировать качество слива.

Один из вариантов установки и расчета тонкослойных блоков в объеме сгустителя предложен в работе [1]. В своей монографии автор ограничивается лишь описанием расчета тонкослойных элементов, не беря во внимание влияние тонкослойных элементов на сепарационные эффекты в объеме самого вертикального сгустителя. Также упрощенный расчет вертикального отстойника, оборудованного тонкослойными блоками, детально описан в строительных нормах и правилах [2].

К сожалению, такой подход к расчету сгустителя со встроенными тонкослойными блоками не позволяет прогнозировать качественно-количественные показатели разделения твердой фазы с учетом влияния производительности, ширины и глубины погружения тонкослойных блоков, реологических свойств суспензии и турбулентно-диффузионных процессов массопереноса.

В связи с этим целью данной работы является определение сепарационных характеристик вертикального сгустителя-дешламатора в зависимости от его удельной объемной производительности, ширины и глубины погружения тонкослойных блоков. В общем виде сепарационные характеристики показывают зависимость вероятности извлечения твердых частичек в слив от их крупности. То есть позволяют определить, какая доля от исходного материала перейдет в сливной продукт сгустителя.

Для изучения влияния тонкослойных блоков на сепарационную характеристику аппарата была предложена конструкция сгустителя-дешламатора (рис. 1) с центральной подачей питания через успокоительную решетку (3), оборудованного по периферии сливного желоба (2) кольцевым тонкослойным блоком (КТБ) (4). Данный блок выполнен в форме кольца, расположенного по периферии вертикального сгустителя. Внутри блока установлены наклонные пластины (или трубки различной формы сечения, в частности в форме сот) [5].

При проведении экспериментальных исследований на лабораторной установке было изучено влияние погруженного кольца, имитирующего работу КТБ, на сепарационную характеристику вертикального сгустителя-дешламатора.

Большинство процессов классификации и обогащения полезных ископаемых осуществляется в турбулентной среде. На величину турбулентности влияют как скорость потока, так и движущиеся в нем зерна. Если твердые частицы движутся относительно жидкости, то происходит изменение концентрации твердой фазы в движущемся элементе турбулентности за счет массообмена с окружающей его средой. Полученные на основании турбулентно-

диффузионной теории математические модели наиболее полно и объективно отражают физический процесс и закономерности массопереноса в рабочем объеме сгустителя-дешламатора, позволяют прогнозировать гранулометрический состав продуктов разделения [7].

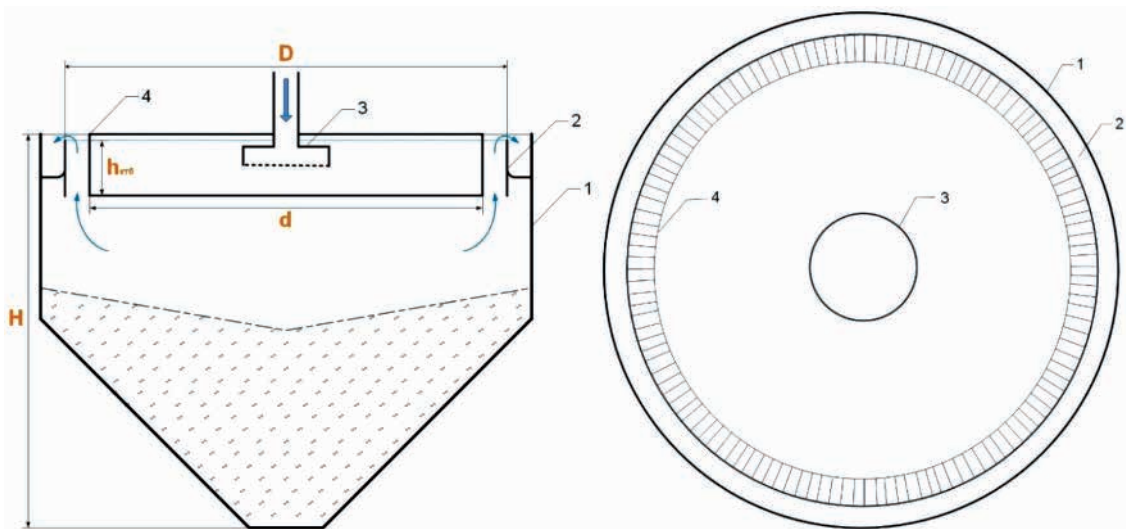
В связи с этим, рассмотрим турбулентно-диффузионную модель процесса классификации в восходящем потоке, представленную в виде [4]:

$$E = E_c \exp \left( \int \frac{U(y) - v(y)}{D(y)} dh \right), \quad (1)$$

где  $E_c$  – объемная доля суспензии, извлекаемая в слив, дол. ед.;  $U$  – средняя скорость восходящего потока, м/с;  $v$  – скорость частиц относительно среды, м/с;  $D$  – коэффициент турбулентного переноса твердой фазы (коэффициент диффузии), м<sup>2</sup>/с;  $h$  – глубина ввода суспензии, м.

Применение формулы (1) на практике возможно лишь в том случае, когда известны функциональные зависимости распределения скорости потоков  $U$ , скорость частиц относительно среды  $v$ , и коэффициента турбулентного массопереноса  $D$  в объеме аппарата. Как было показано в работе [5], распределение скорости потоков имеет сложный характер и зависит от радиальной и вертикальной координаты относительно оси симметрии сгустителя-классификатора. Не менее сложным является и определение коэффициента турбулентной диффузии, который зависит от скорости  $U$ .

С этой целью математическую модель процесса классификации (1) следует упростить, усреднив основные показатели турбулентно-диффузионного массопереноса. Примем, что скорость восходящего потока  $U$  равномерна в плоскости сечения и по высоте аппарата; ско-



**Рис. 1. Принципиальная схема вертикального сгустителя-дешламатора, модернизированного втроенным кольцевым тонкослойным блоком**

рость частиц относительно среды  $v$  принимается установившейся по высоте аппарата и равной гидравлической крупности; коэффициент диффузии  $D$  принимаем как среднее значение во всем рабочем объеме сгустителя-дешламатора. Тогда формула (1) преобразуется в:

$$E = E_c \exp\left(\frac{(U-v)h}{D}\right), \quad (2)$$

Используя понятие граничной крупности разделения, по сути, можно описать любую экспериментальную сепарационную характеристику. Для этого осуществим некоторые преобразования полученных ранее зависимостей.

Прологарифмировав уравнение (2), получим:

$$\ln \frac{E}{E_c} = \frac{U-v}{D}h \quad (3)$$

или

$$\ln \frac{E_c}{E} = \frac{v-U}{D}h. \quad (4)$$

Скорость осаждения частиц по формуле Стокса пропорциональна квадрату крупности осаждаемой частицы:  $v = kd^2$ . Тогда формула (4) примет вид:

$$\ln \frac{E_c}{E} = \frac{kd^2 - U}{D}h. \quad (5)$$

Граничной крупностью принято называть такую, частицы которой распределяются по продуктам сепарации равномерно. Поскольку при гидравлической классификации доля любых частиц, извлекаемых в слив, не превышает  $E_c$ , то граничная крупность разделения будет определяться из условия  $E(d_c) = \frac{E_c}{2}$ .

В таком случае коэффициент пропорциональности  $k$  из (5) будет определен как:

$$k = \frac{U + \frac{D}{h} \ln(2)}{d_c^2}. \quad (6)$$

Подстановка этого значения в формулу (1) и преобразования дают:

$$E = E_c \exp\left[\frac{U}{D}h - \left(\frac{U}{D}h + \ln(2)\right) \cdot \left(\frac{d}{d_c}\right)^2\right]. \quad (7)$$

Из (7) следует, что для определения сепарационной характеристики сгустителя-классификатора достаточно иметь значения граничной крупности разделения  $d_c$ , а также комплексного коэффициента  $\frac{U}{D}h$ . Благодаря данному комплексному коэффициенту  $\frac{U}{D}h$  представляется возможным учесть влияние погруженного КТБ на гидродинамические процессы в рабочем объеме классификатора, коэффициент диффузии и скорость потоков.

Проверим адекватность данной модели путем сравнения с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке со следующими геометрическими размерами: общая высота сгустителя – 0,12 м; высота цилиндрической части – 0,06 м; диаметр цилиндрической части – 0,18 м; угол наклона конусной части – 45°; диаметр питающей насадки – 0,055 м ( $\approx 10\%$  от площади сгустителя).

Исследования проводились на идентичных пробах кварцевого песка Мальшевского месторождения Вольногорского ГГМК. При этом влияние отдельно взятого фактора на сепарационную характеристику аппарата определялось при фиксированных значениях остальных параметров.

Объемная концентрация твердой фазы в питании лабораторной установки обеспечивалась порядка 0,025%. После проведения каждого отдельного эксперимента весь полученный слив объемом 40–120 л (в зависимости от производительности по питанию) подвергался отстаиванию и дальнейшей декантации чистой воды. Далее определялся гранулометрический состав песка с помощью мокрого ситового анализа.

Условия проведения экспериментов представлены в табл. 1.

Чтобы провести сравнение эмпирических и теоретических кривых, необходимо определить комплексный коэффициент  $\frac{U}{D}h$ . Для этого определим граничные крупности разделения  $d_c$  на экспериментальных кривых сепарационных характеристик [5]. Далее, путем подбора комплексного коэффициента  $\frac{U}{D}h$ , с помощью математической модели (7) получим инвариант-

Таблица 1

Геометрические и технологические параметры работы лабораторной установки

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Предельные значения	
			min	max
Удельная объемная производительность	q	м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> с)	0,001	0,003
Относительная ширина погруженного кольца	(R - r)/R	дол. ед.	0,11	0,22
Относительная глубина погружения кольца	h <sub>кТБ</sub> /R	дол. ед.	0,11	0,34
Гранулометрический состав кварцевого песка	d	Мкм	0	316

ные к экспериментальным кривые (рис. 2). При этом относительная суммарная погрешность не должна быть более 10 %.

Как видно из рис. 2, закономерность изменения комплексного коэффициента  $\frac{Uh}{D}$  носит линейный характер и при увеличении скорости восходящего потока и глубины погружения КТБ снижается. Это свидетельствует о том, что коэффициент турбулентной диффузии  $D$  увеличивается при возрастании скорости потока и глубины погружения КТБ, поскольку уменьшается рабочий объем сгустителя-классификатора.

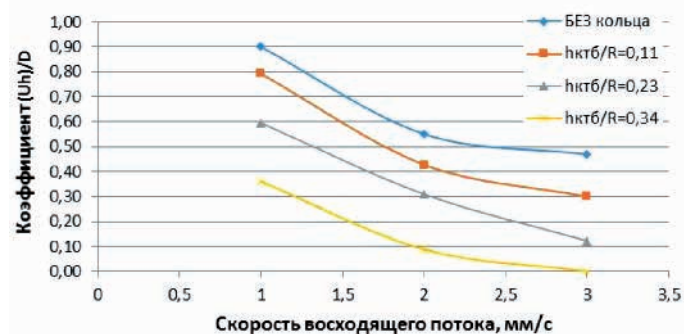
Сравнение экспериментальных и расчетных кривых представлено на рис. 3-4.

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных кривых сепарационных характе-

ристик (рис. 3-4) показывает высокую точность разработанной математической модели процесса классификации (7). Коэффициент корреляции Пирсона, который характеризует существование линейной зависимости между экспериментальными и расчётными данными, составляет  $r = 0,99$ . При этом наиболее близкие к экспериментальным результаты можно получить при удельной производительности (скорости восходящего потока)  $q \leq 0,001 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$  и относительной глубине погружения КТБ  $h_{\text{ктб}}/R \leq 0,11$ .

Применение полученной математической модели позволяет прогнозировать качественно-количественные показатели продуктов разделения в вертикальных сгустителях-дешламаторах, а также своевременно производить настройку оборудования при изменении качества исходного сырья.

Зависимость коэффициента  $(Uh)/D$  от скорости восходящего потока и относительной глубины погружения КТБ при относительной ширине  $(R-r)/R=0,11$



Зависимость коэффициента  $(Uh)/D$  от скорости восходящего потока и глубины погружения КТБ при относительной ширине  $(R-r)/R=0,23$

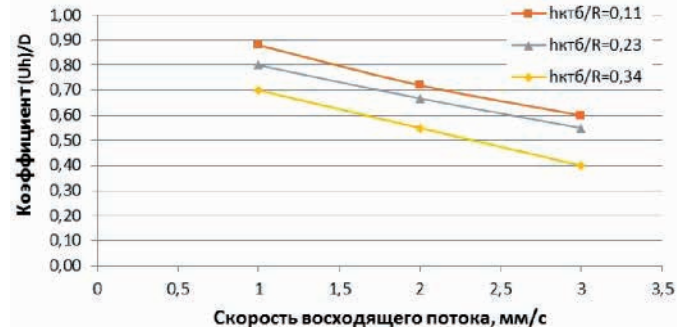
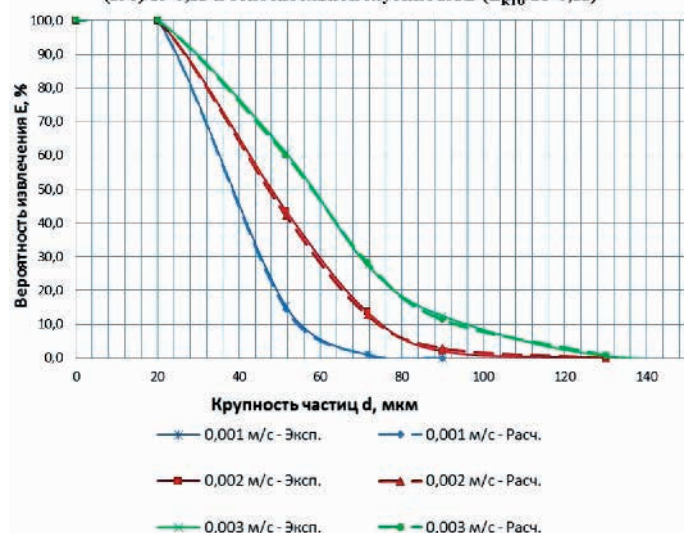


Рис. 2. Зависимость комплексного коэффициента  $\frac{Uh}{D}$  от скорости восходящего потока, относительной ширины и глубины погружения КТБ

Сепарационная характеристика сгустителя при относительной ширине  $(R-r)/R=0,11$  и относительной глубине КТБ  $(h_{\text{ктб}}/R=0,11)$



Сепарационная характеристика сгустителя при относительной ширине  $(R-r)/R=0,11$  и относительной глубине КТБ  $(h_{\text{ктб}}/R=0,22)$

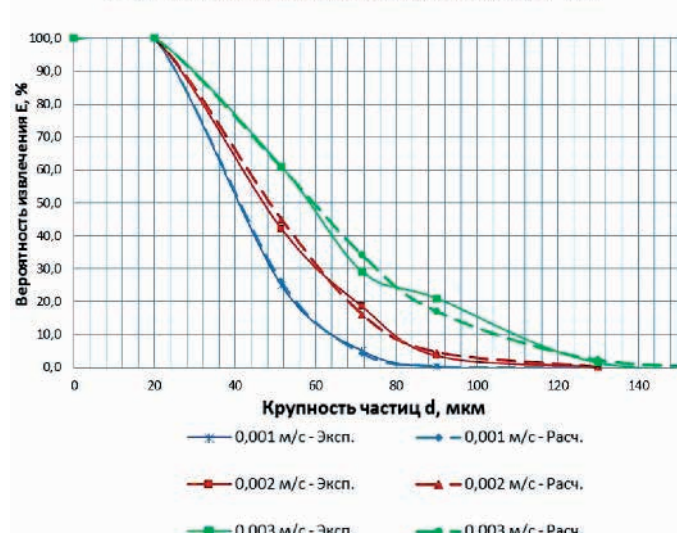


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных сепарационных характеристик сгустителя-дешламатора при относительной ширине кольца  $(R - r)/R = 0,11$  и удельной производительности  $q = 0,001 \div 0,003 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

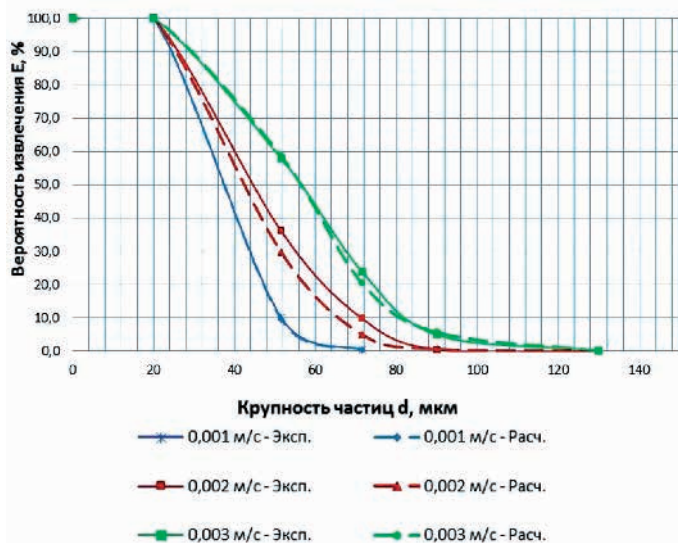
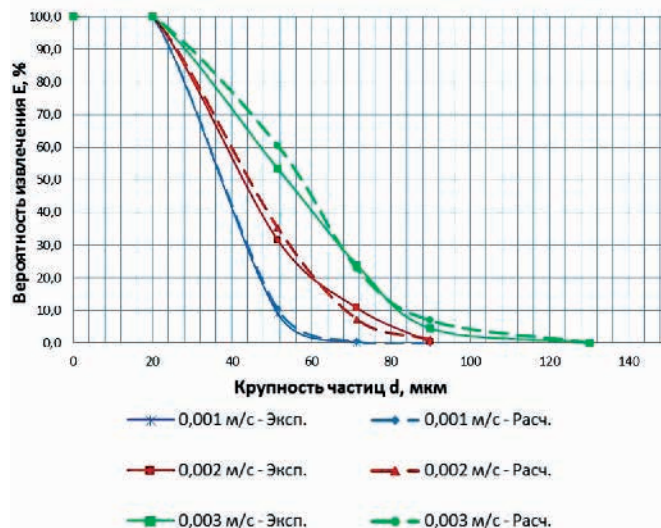
Сепарационная характеристика сгустителя при относительной ширине  $(R-r)/R=0,22$  и относительной глубине КТБ  $(h_{ктб}/R=0,11)$ Сепарационная характеристика сгустителя при относительной ширине  $(R-r)/R=0,22$  и относительной глубине КТБ  $(h_{ктб}/R=0,22)$ 

Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных сепарационных характеристик сгустителя-дешламатора при относительной ширине кольца  $(R - r)/R = 0,23$  и удельной производительности  $q = 0,001 \div 0,003 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

#### Библиографический список

1. Демура М. В. Проектирование тонкослойных отстойников / М. В. Демура – К.: Будівельник, 1981. – 52 с.
2. Проектирование сооружений для очистки сточных вод. Справочное пособие к СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения (ВНИИ ВОДГЕО) Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1990. – 134 с.
3. Inclined Plate Settler. Model LTE-C. Рекламный проспект компании Metso Minerals [Electronic recourse]. – Available at: [http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/258F1AC8E312FE2CC1256BD60041841D/\\$File/TS\\_IPS\\_LTE-C-en.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/258F1AC8E312FE2CC1256BD60041841D/$File/TS_IPS_LTE-C-en.pdf)
4. Пилов П. И. Гравитационная сепарация полезных ископаемых: учебн. пособие / П. И. Пилов. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 123 с.

5. Бакум П. А. Исследование работы модернизированного вертикального сгустителя-дешламатора / П. А. Бакум // Матеріали Міжнародної студентської конференції з проблем збагачення корисних копалин – стан, досягнення, перспективи розвитку збагачення корисних копалин. – Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2015. – 143 с.

6. Отстойники для очистки сточных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gardenweb.ru/otstoiniki-dlya-otchistki-stochnykh-vod>

7. Neesse Th. Der aufbereitungstechnische Klassiervorgang im turbulenten, wässrigen Medium. Freiburger Forschungshefte. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1969. – A 465. – S. 5-50.

Поступила 09.09.2015

