

УДК 628.51:622.794

М.И. ШИЛЯЕВ, А.И. ГОРБУНКОВ, А.Р. БОГОМОЛОВ, Е.М. ХРОМОВА

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ УГОЛЬНОГО КОНЦЕНТРАТА ПРИ ЕГО ОБЕЗВОЖИВАНИИ В ЦЕНТРИФУГАХ*

Проведен теоретический анализ процесса обезвоживания угольной суспензии в центрифуге. Из условия равенства центробежных сил и сил поверхностного натяжения, действующих на жидкость в объеме гранулированного слоя рабочего элемента ротора центрифуги, найдена аналитическая зависимость для расчета остаточной концентрации жидкости в центрифугируемом слое. Показано хорошее согласование результатов расчетов, выполненных на основе этой зависимости, с паспортными данными и данными режимных карт промышленных центрифуг типа ФВВ–1001У–01 и ФВВ–1121У–02.

Ключевые слова: обезвоживание, угольная суспензия, центрифугирование, коэффициент поверхностного натяжения, коэффициент динамической вязкости, порозность, диаметр угольных частиц, влажность.

1. Введение. Проблема обезвоживания угольного концентрата по-прежнему актуальна для углеобогатительных фабрик. Цель данной работы — разработка математической модели обезвоживания его в центрифугах. В качестве опытных данных для проверки модели использовались исследования на углеобогатительных фабриках Кузбасса, где характерным является концентрат коксующихся марок углей: Г, ГЖ, К, КО, ОС. Концентрат представляет собой обогащенный уголь с зольностью 8–10 % против 12–40 % у необогащенного. Все процессы обогащения и большинство вспомогательных процессов проходят в водной среде. В табл. 1 приведено среднее распределение классов крупности концентрата с указанием типов оборудования на углеобогатительных фабриках Кузбасса. Реальные классы крупности на фабриках могут быть малозначительно взаимозасорены.

В табл. 2 дана средняя характеристика различных классов крупности угольных частиц в общем концентрате на ОФ «Анжерская».

Таблица 1. Классы крупности угольного концентрата и тип обогатительного и обезвоживающего оборудования на ОФ Кузбасса

Концентрат Класс, мм	Средняя доля участия	Оборудование	
		для обогащения	для обезвоживания
0–0,2(0,5)	20	Флотомшины	Вакуум-фильтры, гипербар-фильтры, термическая сушка
0,2(0,5)–1(2)	10	Спиральные сепараторы	Неподвижные сита, виброгрохоты, центрифуги, в т.ч. осадительно-фильтрующие, термическая сушка
1(2)–13(18)	35	Отсадочные машины или тяжелосредние гидроциклоны	Виброгрохоты, центрифуги, термическая сушка
13(18)–100(150)	35	Тяжелосредние сепараторы	Виброгрохоты

* Статья выполнена в рамках соглашения № 14.583.21.0004 ФЦП.

Таблица 2. Средняя характеристика классов крупности частиц в угольном концентрате на ОФ «Анжерская»

Класс, мм	Массовая доля, %	Влажность, %	Зольность, %	Обезвоживающее оборудование
13–100	30	7,5	8,0	Виброгрохот
1–13	35	9,5*	9,0	Виброгрохот + центрифуга «ФВВ-1121У-02» (7 шт.)
0,5–1	17	15,0*	10,0	Виброгрохот + центрифуга «Н-1000» (1 шт.)
0–0,5	18	31,0*	8,0	Вакуум-фильтры «Украина ДУ-80-2,7» (3 шт.) и «Andritz» (2 шт.)
Итого фр. 0–100 мм:	100	13,7*	8,9	—
Итого фр. 0–13 мм (поступает на сушку):	70	16,4*	9,2	—

* Влажность до термической сушки.

В настоящей работе нас будут интересовать только центрифуги и с теоретической точки зрения их предельные возможности по обезвоживанию угольной суспензии, на которые можно рассчитывать в практических условиях.

2. Постановка задачи, решение. Представим рабочий элемент центрифуги в виде ротора, вращающегося с угловой скоростью ω , с внутренним диаметром $D_1 = 2R_1$ и внешним $D_2 = 2R_2$, в объеме между которыми помещается гранулированный материал (угольный концентрат). Поры между гранулами заполняет жидкость — вода или водный раствор с пониженными вязкостными характеристиками для повышения эффективности обезвоживания (рис. 1). Гранулы будем считать монодисперсными со средним диаметром распределения их по размерам d_a . При сформулированных выше условиях требуется найти предельную (остаточную) концентрацию воды в объеме угольного концентрата, удерживающуюся в порах между гранулами.

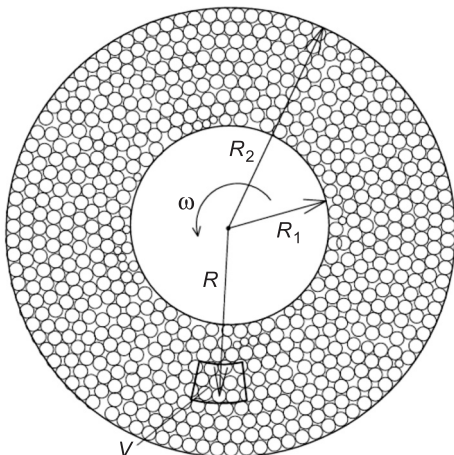


Рис. 1. Схема ротора центрифуги для обезвоживания угольной суспензии

При этом будем полагать, что основная масса воды без труда выбрасывается из центрифугируемого объема центробежными силами и остается только вода на поверхностях гранул в виде пленки, удерживаемой силами

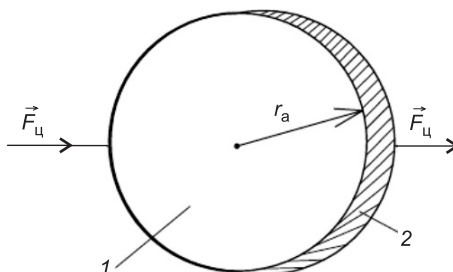


Рис. 2. Схема отрыва пленки жидкости от поверхности гранулы
1 — гранула, 2 — пленка жидкости

поверхностного натяжения. В слое гранулята выделим элементарный объем V , расстояние до которого от оси вращения R . Условием предельного обезвоживания в центрифуге поставим равенство центробежных сил, действующих на жидкость на тыльных поверхностях гранул площадью $S/2$ (рис. 2) в элементарном объеме V , силам поверхностного натяжения, удерживающим жидкость в виде пленки на этих поверхностях:

$$F_{ц} = F_{\sigma}, \quad (1)$$

где

$$F_{ц} = \varepsilon_{ж} V \rho_{ж} \omega^2 R; \quad (2)$$

$$F_{\sigma} = \frac{\sigma}{r_a} S, \quad (3)$$

$\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³;

ω — угловая частота вращения ротора, 1/с;

R — расстояние от оси вращения по радиусу до элементарного объема V , м;

$\varepsilon_{ж}$ — объемная концентрация жидкости в гранулированном слое, м³/м³;

σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м;

$r_a = d_a / 2$ — радиус гранул, принимаемых сферическими, м;

S — площадь поверхностей гранул в элементарном объеме V , м²:

$$S = 4\pi r_a^2 n V, \quad (4)$$

где n — счетная концентрация гранул, 1/м³;

$4\pi r_a^2$ — площадь поверхности гранулы радиусом r_a , м².

Приравнявая (2) и (3) с учетом (4), получим соотношение

$$\varepsilon_{ж} \rho_{ж} \omega^2 R = 4\pi r_a n \sigma. \quad (5)$$

Счетную концентрацию n свяжем с порозностью гранулированного слоя $\varepsilon_{ш}$. Очевидно,

$$1 - \varepsilon_{ш} = \frac{4}{3} \pi r_a^3 n, \quad (6)$$

где $\frac{4}{3} \pi r_a^3$ — объем сферической гранулы, м³. Тогда

$$n = \frac{3}{4} \frac{1 - \varepsilon_{ш}}{\pi r_a^3}. \quad (7)$$

Перепишем соотношение (5) в виде

$$\varepsilon_{ж} = 12 \frac{\sigma(1 - \varepsilon_{ш})}{\rho_{ж} \omega^2 R d_a^2}. \quad (8)$$

В качестве опытных данных для сравнения теории с экспериментом будем использовать данные из паспортов центрифуг ФВВ-1121У-02 и ФВВ-1001У-01 (табл. 3) и режимной карты к ФВВ-1001У-01 (табл. 4). Сделаем сначала оценку по данным табл. 3 и 4 для ФВВ-1001У-01. Зададим диаметр ротора центрифуги $2R = 1$ м, крупность обезвоживаемого угля 0,5–13 мм, плотность воды $\rho_{ж} = 10^3$ кг/м³, коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 0,072$ Н/м, $N = 420$ об/мин. Примем для плотной упаковки шаров $\varepsilon_{ш} = 0,4$ [1], размер гранул среднеквадратичным

Таблица 3. Данные из паспортов к центрифугам ФВВ (фильтрующие вибрационные вертикальные), установленным на ЦОФ «Сибирь» и ОФ «Анжерская»

Наименование	ФВВ-1121У-02	ФВВ-1001У-01
Производительность по исходному продукту, т/ч	Не более 100	Не более 100
Влажность обезвоженного осадка, %	8±0,5	7,1
Частота вращения ротора, об/мин	420	420
Частота колебаний ротора, кол/мин	1600	1600
Размах колебаний, мм	4–6	4–6
Площадь фильтрующей поверхности ротора, м ²	1,5	1,45
Наибольший диаметр конической части ротора, мм	1120	—
Внутренний диаметр корпуса ротора, мм	—	1000
Мощность электродвигателей, кВт	25,3	25,3
Масса центрифуги с комплектом ЗИП, кг	4080	3475
Габариты:		
длина, мм	2895	2895
ширина, мм	2165	2060
высота, мм	1650	1650

$d_a = \sqrt{0,5 \cdot 13} = 2,55 \text{ мм} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В соответствии с формулой (8), учитывая $\omega = \pi N / 30 = 3,14 \cdot 420 / 30 = 44 \text{ 1/с}$, получим

$$\varepsilon_{\text{ж}} = 12 \frac{0,072(1-0,4)}{10^3(44)^2 0,5(2,55 \cdot 10^{-3})^2} = 0,0824 \text{ м}^3/\text{м}^3 = 8,24 \% \text{ от общего объема.}$$

Поскольку в табл. 3–4 концентрации воды приведены на единицу массы угольной суспензии, кг/кг, требуется пересчет этой концентрации по формуле [2]

$$\varepsilon'_{\text{ж}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - \varepsilon_{\text{ш}} \rho_m}{\varepsilon_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon'_{\text{ж}}$ — концентрация воды в угольном гранулированном слое, кг/кг;
 ρ_m — плотность угля.

Таблица 4. Выписка из режимной карты к ФВВ-1001У-01 (установлена на ЦОФ «Сибирь»)

Наименование	Значение
Производительность по исходному продукту, т/ч	До 80
Крупность обезвоживаемого материала, мм	0,5–13
Содержание класса менее 0,5 мм в питании, %	Не более 20
Содержание класса более 0,5 мм в фугате, %	5–10
Влажность исходного угля, %	20–30
Влажность обезвоженного угля, %	8–12
Содержание твердого в фугате, кг/м ³	50–60
Количество центрифуг, шт.	8

Принимая $\rho_m = 1500 \text{ кг/м}^3$, при плотной упаковке шаров получим

$$\varepsilon'_{\text{ж}} = \frac{1}{1 + \frac{1-0,4}{0,0824} \cdot 1,5} 100 \% = 8,4 \% \quad (10)$$

В табл. 4 приведено $\varepsilon'_{\text{ж}} = 8-12 \%$, в табл. 3 $\varepsilon'_{\text{ж}} = 7,1 \%$, что в среднем хорошо согласуется с теоретическим результатом (10).

Для параметров центрифуги ФВВ-1121У-02 (см. табл. 3) $\varepsilon'_{\text{ж}} = 7,6 \%$ при паспортном значении $8 \pm 0,5 \%$, что также имеет место хорошее согласие теории и опыта.

Выводы. В работе получена формула (8) для расчета предельной концентрации воды в угольном грануляте при его обезвоживании в центрифугах, дающая хорошее согласование с паспортными и опытными данными для промышленных центрифуг ФВВ-1121У-02 и ФВВ-1001У-01. В теоретическую формулу для расчета предельной концентрации жидкости в гранулированном материале входят параметры, позволяющие повысить глубину обезвоживания гранулята за счет снижения коэффициента поверхностного натяжения воды с помощью специальных добавок, а также увеличения числа оборотов и диаметра центрифуг.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем [Текст] / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. — Л. : Химия, 1979. — 176 с.
2. Шильяев, М.И. Интенсификация тепломассообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении [Текст] / М.И. Шильяев, Е.М. Хромова, А.Р. Богомолов. — Томск : Изд-во ТГАСУ, 2010. — 272 с.

ШИЛЛЯЕВ Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ГОРБУНКОВ Алексей Игоревич, инженер-технолог

ООО «НПО Завод химреагентов», г. Кемерово

БОГОМОЛОВ Александр Романович, д-р техн. наук, проф.

Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово

ХРОМОВА Елена Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доц.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 15.08.14

Shilyaev Mikhail Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Gorbunkov Alexey Igorevich, process-engineer, «NPO plant chemicals», Kemerovo, Russia

Bogomolov Alexandr Romanovich, doctor of technical sciences, professor, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

Khromova Elena Mikhailovna, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

CALCULATION OF MOISTURE LIMIT OF COAL CONCENTRATES WHEN DEWATERING IN CENTRIFUGES

The paper presents a theoretical analysis of the coal slurry dewatering in centrifuge. By equating the centrifugal forces and surface tension forces acting on the fluid in the volume of the granular layer of the working element of the centrifuge rotor, found analytical dependence

for calculating the residual concentration of the liquid layer in the centrifuged is found. The good agreement of the results of calculations carried out on the basis of this dependence is shown, with passport data and the regime of industrial centrifuges card type FVV-1001U-01 and the FVV-1121U-02.

Key words: dehydration, coal slurry, centrifugation, the surface tension coefficient, the coefficient of dynamic viscosity, porosity, diameter of coal particle, moisture.

REFERENCES

1. A e r o v, M.E. Devices with a stationary granular bed [Text] / M.E. Aerov, O.M. Todes, D.A. Narinskiy. — L. : Chemistry, 1979. — 176 p.
2. S h i l y a e v, M.I. Intensification heat- and mass transfer in disperse environments at condensation and evaporation [Text] / M.I. Shilyaev, E.M. Khromova, A.R. Bogomolov. — Tomsk : TSUACE, 2010. — 272 p.
