УДК 622.794.2

А.А. Лавриненко, Г.Ю. Гольберг, И.В. Кунилова

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ СУСПЕНЗИЙ ДРЕНИРОВАНИЕМ

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования закономерностей обезвоживания суспензий дренированием на ленточных фильтр-прессах. Предложено и экспериментально подтверждено кинетическое уравнение, описывающее зависимость гидростатического давления, являющегося движущей силой процесса, от времени и начальных условий. Выведены уравнения для расчета скорости движения лент фильтра в зависимости от нагрузки по твердой фазе и для решения обратной задачи — определения производительности фильтра по твердой фазе при различных значениях скорости движения лент. Данные расчетов, полученных на основании результатов лабораторных исследований свидетельствуют, что производительность фильтров по твердой фазе при максимальной скорости движения лент 0,35 м/с составляет 6,8—15,7 т/ч. Они не противоречат результатам опытно-промышленных испытаний, согласно которым для двух концентратов флотации различного гранулометрического состава и зольности эта величина составляет соответственно 15,3 и 9,0 т/ч.

Ключевые слова: ленточный фильтр-пресс, обезвоживание дренированием, угольные суспензии, гидростатическое давление, удельное сопротивление осадка, скорость движения лент, производительность по твердой фазе.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-28-33

Обеспечение высокой эффективности работы оборудования для обезвоживания тонкодисперсных продуктов обогащения в водно-шламовых схемах предприятий по переработке минерального сырья является актуальной проблемой, имеющее важное экономическое и экологическое значение. В последние годы для осуществления этой операции на углеобогатительных фабриках применяют в основном ленточные фильтр-прессы, характеризующиеся непрерывным режимом работы, сравнительно низкими капитальными и эксплуатационными затратами, достаточной степенью обезвоживания. Это, в свою очередь, обусловливает необходимость развития теории разделения суспензий на ленточных фильтр-прессах для осуществления возможности технологического расчета и прогнозирования режимов работы фильтров при обезвоживании продуктов с различными характеристиками.

Существующие подходы к технологическому расчету ленточных фильтр-прессов [1—3] не позволяют определить значения производительности фильтров исходя из свойств обезвоживаемых суспензий и прогнозировать результаты обезвоживания суспензий с различными свойствами. По нашему мнению, существенное значение для решения этой задачи имеет определение параметров обезвоживания суспензии в зоне дренирования, поскольку именно здесь формируется осадок с определенными свойствами, из которого в дальнейшем влага удаляется механическим отжимом. В то

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 11. С. 28–33.
© А.А. Лавриненко, Г.Ю. Гольберг, И.В. Кунилова. 2017.

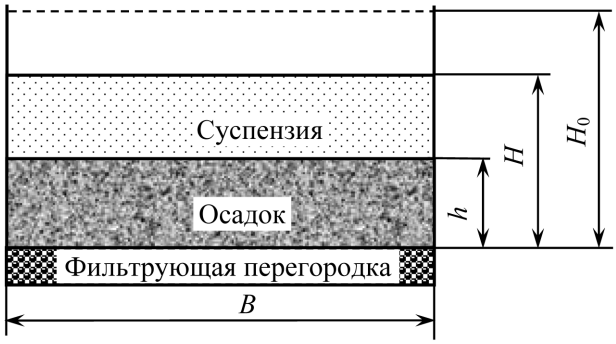

Рис. 1. Схема обезвоживания суспензии дренированием на ленточном фильтр-прессе: H_0 — высота слоя суспензии на ленте в начальный момент времени; *H* — текущая высота слоя суспензии на ленте; *h* — толщина осадка; *B* — рабочая ширина ленты

же время кинетика этого процесса до настоящего времени не изучена.

Цель настоящей работы — установление закономерностей обезвоживания суспензий дренированием для осуществления возможности расчета технологических показателей работы ленточных фильтр-прессов на основе аналитических зависимостей взаимосвязи скорости движения лент и производительности по твердой фазе.

Процесс, протекающий в зоне дренирования, заключается в следующем. Исходная суспензия, к которой добавлены флокулянты, поступает на фильтрующую ленту, движущуюся горизонтально со скоростью υ. Под действием силы тяжести вода проходит через отверстия ленты, а твердая фаза задерживается, образуя осадок (рис. 1). Таким образом, имеет место фильтрование, движущей силой которого является гидростатическое давление (*P*), причем с течением времени (*t*) за счет удаления свободной воды из суспензии величина *P* монотонно убывает. Его значение измеряется сотнями Па, что примерно на 2 порядка меньше по сравнению с фильтрованием под вакуумом и на 3 порядка меньше по сравнению с фильтрованием под избыточным давлением (рис. 2). Кроме того, в отличие от названных процессов, величина *P* зависит не только от времени, но и от начальной высоты столба суспензии на ленте H_0, которая определяется объемным расходом исходной суспензии V_0, поскольку:

$$P = \rho_c g H \qquad (1)$$

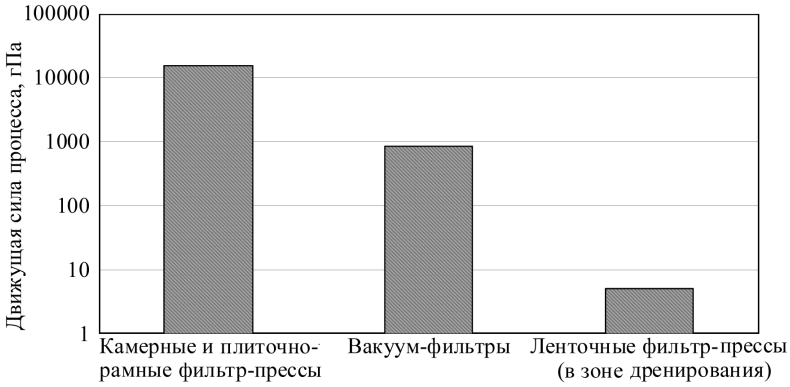

Рис. 2. Движущая сила процессов фильтрационного обезвоживания суспензий

$$H_0 = \frac{V_0}{B\upsilon} \qquad (2)$$

где g — ускорение свободного падения (9,8 м/с^2); ρ_c — плотность суспензии, кг/м^3.

Согласно [4], основное уравнение фильтрования при переменном давлении без учета сопротивления фильтрующей перегородки записывается следующим образом:

$$t_K = \frac{\mu\alpha_0 h^2}{2P_Э u}; h = \sqrt{\frac{2P_Э u t_K}{\mu\alpha_0}} \qquad (3)$$

где $t_к$ — время от начала процесса до момента исчезновения свободной влаги с поверхности осадка, с; μ — вязкость фильтрата, Па · с; α_0 — удельное объемное сопротивление осадка, м$^{-2}$; u — отношение объема осадка к объему фильтрата; $P_э$ — эквивалентное давление, Па; рассчитывается как средняя интегральная величина за время $t_к$ по уравнению:

$$P_Э = \frac{1}{t_K}\int_0^{t_K} P(t)dt \qquad (4)$$

где t — текущее время, с.

При этом максимальная эффективность обезвоживания суспензии в зоне дренирования достигается при следующем условии: скорость движения лент фильтра υ должна быть такой, чтобы время пребывания суспензии в зоне дренирования было равно значению $t_к$, отсюда:

$$t_K = \frac{L}{\upsilon} \qquad (5)$$

где L — длина зоны дренирования, м.

Исходное уравнение для определения производительности ленточного фильтр-пресса по твердой фазе Q (т/ч), на основании зависимостей, приведенных в [5—6]:

$$Q = 3{,}6\rho_0 \frac{100 - W}{100} B\upsilon h \qquad (6)$$

где ρ_0 — плотность осадка к концу зоны дренирования, кг/м^3; W — влажность осадка к концу зоны дренирования, %.

Обе указанные величины определяются экспериментально.

Сложность расчетов по уравнению (6) обусловлена тем, что величины υ и h взаимосвязаны кинетическими закономерностями процесса обезвоживания дренированием, которые до настоящего времени не установлены.

С другой стороны, величина Q выражается через объемный расход исходной суспензии V и содержание в ней твердой фазы $C_т$:

$$Q = \frac{VC_T}{1000} \qquad (7)$$

Таким образом, при известных значениях V, $C_т$, h, ρ_0 и W, становится возможным решение задачи по определению требуемого значения υ:

$$\upsilon = \frac{VC_T}{36\rho_0 Bh(100 - W)} \qquad (8)$$

Определение величины α_0, необходимой для расчета толщины осадка h, осуществляется экспериментально на основании данных, полученных в опытах по обезвоживанию суспензий дренированием в лабораторных условиях. В то же время для определения значений $P_э$ и $t_к$ необходимо знать характер зависимости P от t в аналитическом виде. Согласно [7]:

$$t = \bar{A}\, P\left(\ln\left(\frac{P}{P_0}\right)\right)^2 \qquad (9)$$

где P_0 — начальное значение гидростатического давления (при t = 0); $\bar{A}$ — экспериментальная постоянная.

Применение уравнения (9) для практических расчетов затруднено тем, что из него в явном виде невозможно выразить величину давления P как функцию времени t. В настоящей работе для аппроксимации указанной зависимости предложена следующая степенная функция:

$$P = P_0\left(1 - at^n\right); \ \ln\left(1 - \frac{P}{P_0}\right) = \ln a + n\ln t \qquad (10)$$

где a, n — постоянные величины.

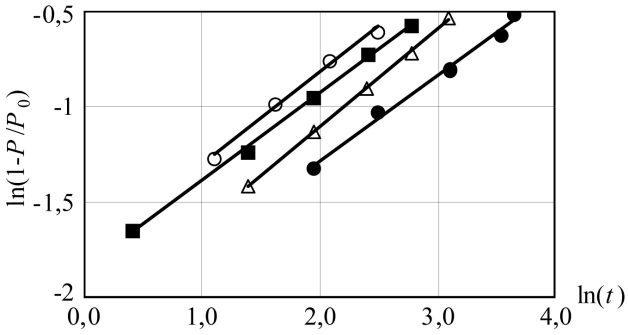

Рис. 3. Кинетика обезвоживания суспензий дренированием: ■ — проба 1: *a* = 0,16, *n* = 0,46, *r* = 0,99; ● — проба 2: *a* = 0,11, *n* = 0,45, *r* = 0,99; ○ — проба 3: *a* = 0,17, *n* = 0,48, *r* = 0,99; Δ — проба 4: *a* = 0,12, *n* = 0,51, *r* = 0,98

Для экспериментальной проверки предложенной зависимости были выполнены лабораторные исследования по обезвоживанию дренированием (с применением флокулянтов) четырех проб модельных суспензий, твердая фаза которых была получена из необогащенного шлама угля марки К-9. Опытным путем определяли реагентный режим, обеспечивающий минимальное возможное значение α_0. В кинетических опытах определяли гидростатическое давление *P* в зависимости от времени *t*, причем полученные данные наносили на график в координатах ln(1 — *P*/P_0) — ln(*t*) и рассчитывали коэффициент корреляции *r*. Свойства исследованных суспензий приведены в таблице, данные по кинетике обезвоживания — на рис. 3.

На рис. 3 видно, что зависимость, выраженная уравнением (10), описывает экспериментальные данные с весьма высоким коэффициентом корреляции — не менее 0,98. При этом экспериментально определенное значение *a* находилось в пределах от 0,12 до 0,17, а значение показателя степени *n* — от 0,45 до 0,51, т.е. в среднем близко к 0,5, следовательно, уравнение (10) можно записать в виде:

$$P = P_0\left(1 - a\sqrt{t}\right) \qquad (11)$$

Подставляя полученное выражение в уравнение (4), получаем:

$$P_э = \frac{P_0}{t_K}\int_0^{t_K}\left(1 - a\sqrt{t}\right)dt = P_0\left(1 - \frac{2a}{3}\sqrt{t_K}\right) \qquad (12)$$

Таким образом, подставляя выражение (12) для $P_э$ в уравнение (3), получаем следующее уравнение для расчета скорости движения лент в зависимости от заданной нагрузки на фильтр:

Состав и свойства исследованных угольных шламов

Наименование показателей	Наименование продукта			
	проба 1	проба 2	проба 3	проба 4
Содержание класса –0,063 мм, %	10,7	41,5	10,7	41,5
Зольность класса –0,063 мм, %	9,6	9,6	30,0	30,0
Плотность твердой фазы, кг/м^3	1300	1240	1350	1520
СТ, кг/м^3	200			
$\alpha_0 \cdot 10^{-10}$, м$^{-2}$	2,8	4,1	1,9	3,0
W, %	46,5	54,9	47,5	54,9
u	0,43	0,52	0,48	0,46

$$\upsilon = \frac{4a^2A^2L}{2{,}25\left(A - \frac{VC_T}{1000}\right)^2} \qquad (13)$$

где

$$A = 3{,}6\rho_0 \frac{100 - W}{100} B \frac{2L\rho_C g(u+1)}{\mu\alpha_0} \qquad (14)$$

Для решения обратной задачи, т.е. определения значений Q при различных υ, преобразуем уравнение (6) к следующему виду:

$$Q = A\left(1 - \frac{2a}{3}\sqrt{\frac{L}{\upsilon}}\right) \qquad (15)$$

По уравнению (15) было выполнено численное моделирование режимов работы ленточного фильтр-пресса для исследованных тонкодисперсных угольных шламов (см. таблицу). Значения конструктивных параметров фильтра: B = 2,5 м; L = 2,7 м. Значение υ в соответствии с характеристикой фильтра варьировалось в пределах от 0,05 до 0,35 м/с. Значения ρ_C и ρ_0 определяли экспериментально. Было установлено, что при максимальной скорости движения лент, составляющей 0,35 м/с, ожидаемое значение Q для этих продуктов составляет 6,8—15,7 т/ч.

Полученные расчетные данные были сопоставлены с результатами опытно-промышленной эксплуатации ленточных фильтр-прессов на операции обезвоживания следующих продуктов флотации углей марки К-9:

• концентрата I с выходом класса крупностью –0,063 мм, равным 14,0% и зольностью этого класса 11,8%;

• концентрата II со значениями указанных параметров соответственно 13,0% и 43,4%.

Усредненные значения производительности фильтров по твердой фазе, пересчитанные на величину C_T = 200 кг/м^3 при скорости движения лент 0,35 м/с для концентратов I и II составили 15,3 и 9,0 т/ч соответственно. Эти результаты укладываются в интервал 6,8—15,7 т/ч; следовательно, данные расчетов и опытно-промышленных испытаний не противоречат друг другу.

Таким образом, в настоящей работе предложено и экспериментально подтверждено уравнение, описывающее кинетику обезвоживания суспензий дренированием. Это, в свою очередь, позволило вывести уравнения для расчета скорости движения лент фильтр-пресса при известных значениях объемного расхода исходной суспензии и содержания в ней твердой фазы, а также обратной задачи — определения производительности ленточного фильтр-пресса по твердой фазе при различных значениях скорости движения лент. Расчетные данные не противоречат данным, полученным в опытно-промышленных испытаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Severin B. F.*, *Grethlein H. E.* Laboratory simulation of belt press dewatering: Application of the Darcy equation to gravity drainage // Water Environment Research. 1996. Vol. 68, no 3, pp. 359—369.

2. *Oliver J.*, *Vaxelaire J.* Municipal sludge dewatering by belt filter press: effect of operating parameters // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2005. vol. 80, no 8, pp. 948—953.

3. *Christensen M. L.*, *Petersen R. R.*, *Jorgensen L. B.* Simulation of sludge dewatering on belt filters // Water Science & Technology. 2010. Vol. 61, no 12. Pp. 3162—3168.

4. *Жужиков В. А.* Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1980. — 400 с.

5. Solid-Liquid Separation. Ed. by L. Svarovsky. 4th edition. London: Butterworth, 2000. 554 p.

6. Michael R., Lindeburg P. E. Chemical Engineering Reference Manual for the PE Exam. 7th edition. — Belmont, California: Professional Publications, Inc., 2013.

7. *Гутин Ю. В.*, *Засядько А. В.*, *Панфилов Ф. А.*, *Гольберг Г. Ю.*, *Самойлова Е. К.* Исследование процессов кондиционирования и обезвоживания водо-угольных суспензий на ленточных фильтр-прессах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2000. — № 9. — С. 11—13. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Лавриненко Анатолий Афанасьевич[1] — доктор технических наук,
зав. лабораторией, e-mail: lavrin_a@mail.ru,
Гольберг Григорий Юрьевич[1] — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: gr_yu_g@mail.ru,
Кунилова Ирина Валерьевна[1] — кандидат технических наук,
старший научный сотрудник, e-mail: ira_kunilowa@mail.ru,
[1] ИПКОН РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 11, pp. 28–33.

UDC 622.794.2

A.A. Lavrinenko, G.Yu. Golberg, I.V. Kunilova

MECHANISMS OF DEHYDRATION OF SUSPENSIONS BY DRAINAGE

This article presents the results of theoretical and experimental investigations of suspensions dewatering by drainage in the gravity zone of belt press filters regarding this process as a filtration under alternative hydrostatic pressure. It was proposed and experimentally proved the kinetic equation for this pressure. On this base it was derived equations for calculation of filter solids throughput depending on the belts speed, and the reciprocal task — calculation of the belts speed for known feed flow rate and solids content. The results of calculations for model coal suspensions was consistent with those full-scale tests: at the maximum belts speed 0.35 m/s calculated values of solids throughput are from 6.8 to 15.7 tph and for two flotation concentrates of different granulometric composition and ash content on industrial belt press filter are 15.3 and 9.0 tph respectively.

Key words: belt press filter, dewatering by drainage, coal suspensions, hydrostatic pressure, cake specific resistance, belts speed, solids throughput.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-0-28-33

AUTHORS

Lavrinenko A.A.[1], Doctor of Technical Sciences,
Chief of Laboratory, e-mail: lavrin_a@mail.ru,
Golberg G.Yu.[1], Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: gr_yu_g@mail.ru,
Kunilova I.V.[1], Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher, e-mail: ira_kunilowa@mail.ru,
[1] Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Severin B. F., Grethlein H. E. Laboratory simulation of belt press dewatering: Application of the Darcy equation to gravity drainage. *Water Environment Research*. 1996. Vol. 68, no 3, pp. 359—369.

2. Oliver J., Vaxelaire J. Municipal sludge dewatering by belt filter press: effect of operating parameters. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2005. Vol. 80, no 8, pp. 948—953.

3. Christensen M. L., Petersen R. R., Jorgensen L. B. Simulation of sludge dewatering on belt filters. *Water Science & Technology*. 2010. Vol. 61, no 12, pp. 3162—3168.

4. Zhuzhikov V. A. *Fil'trovanie. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy*. 4-e izd. (Theory and practice of suspensions separation, 4th edition), Moscow, Khimiya, 1980, 400 p.

5. *Solid-Liquid Separation*. Ed. by L. Svarovsky. 4th edition. London: Butterworth, 2000. 554 p.

6. Michael R., Lindeburg P. E. *Chemical Engineering Reference Manual for the PE Exam*. 7th edition. Belmont, California: Professional Publications, Inc., 2013.

7. Gutin Yu. V., Zasyad'ko A. V., Panfilov F. A., Gol'berg G. Yu., Samoylova E. K. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2000, no 9, pp. 11—13.