

Е.И. НАЗИМКО, Е.Е. ГАРКОВЕНКО, д-ра техн. наук,

В.Г. НАУМЕНКО

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет),

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ОСАДКОВ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Обогащение и обезвоживание шламовых продуктов продолжает оставаться одной из актуальных проблем современного углеобогащения, что связано с постоянным ростом содержания тонких и глинистых фракций в добываемом сырье. Совершенствование технологии механического обезвоживания методом фильтрования, как под действием градиента давлений, так и в центробежном поле, привлекает внимание многих исследователей [1-4]. В результате этих исследований разработаны основы гидродинамики и физики процесса. Однако, возникает необходимость решения новых теоретических и практических вопросов, таких как применение специальных приемов для интенсификации процесса, изменение соотношения между фазами процесса, применение химических средств, рациональное формирование осадка.

Анализ исследований и публикаций. Скорость удаления влаги определяется целым рядом факторов: градиентом давления, параметрами взаимодействия фаз, сопротивлением осадка, капиллярными явлениями, микроструктурой порового пространства, которая зависит формы и размера частиц, пористости и удельной поверхности и др.

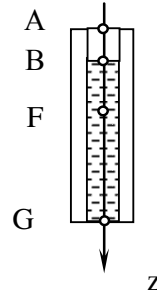
Для определения характеристик осадка, имеющих значение при фильтровании, изучались характеристики топологии пор на шлифах, проводились лабораторные эксперименты, осуществлялось моделирование поровой среды [5-7]. При рассмотрении процессов, происходящих в объеме осадка в ходе удаления влаги, сложно учесть свойства отдельных пор. Поэтому многие исследователи используют интегральный подход, при котором выполняется аналитическое моделирование перемещения фронта раздела фаз – жидкости и газа в поровой среде осадка, являющегося одной из определяющих составляющих механического обезвоживания при фильтровании.

Постановка задачи. Цель данной работы – аналитическое моделирование процесса удаления влаги из осадков с использованием классических подходов.

Изложение материала и результаты. Аналитическое исследование производится для условий, когда направление перемещения жидкости в порах совпадает с направлением градиента действующей силы, что имеет место во многих случаях фильтрации и, в частности, на ленточных вакуум-фильтрах. При этом приняты следующие допущения: 1) в суспензии отсутствует расслоение твердого по высоте; 2) удаление влаги рассматривается как движение воды в пористом теле под действием градиента давления; 3) температура не изменяет-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

ся; 4) пористая среда является несжимаемой и имеет постоянную проницаемость; 5) скорость движения ленты фильтра постоянна. Поэтому вытеснение воды из пор воздухом может рассматриваться подобно вытеснению при действии поршня, перемещающегося вдоль вертикальной оси z , и задача является одномерной (рисунок).



Вытеснение воды из пористого тела поршневым способом

Необходимо определить изменение положения границы раздела фаз вода – воздух с течением времени $h_i = h(\tau)$.

Начальный момент времени соответствует положению точки А, когда время $\tau = 0$, горизонтальная координата $x = 0$ при постоянстве скорости движения ленты и фильтровальной ткани. В этот момент $P_A = P_0 = 0,1$ МПа. Наличие градиента давлений между точками А и G, где $P_G < 0,1$ МПа, вызывает вытеснение жидкости воздухом. Процесс происходит в стационарных условиях. В точке В давление имеет значение $P_B = P_0$ и высота уровня жидкости в поре равна $h_0 = h(\tau)$. В точке F имеют место текущие значения параметров: $h_i = h(\tau)$, $P_F = P_i$, в конце процесса в точке G соответственно h_G и $P_G = P_1 < 0,1$ МПа.

В общем случае перенос вещества в пористой среде описывается уравнением вида:

$$\operatorname{div} [\delta C / \mu (\Delta P + \delta \Delta H)] = \partial m \delta / \partial \tau, \quad (1)$$

где δ – плотность вещества; C – проницаемость пористой среды; μ – вязкость; m – пористость; ΔP – градиент давления; ΔH – изменение энтальпии; τ – время.

Для области движения воздуха в соответствии с принятыми допущениями ($\Delta H = 0$, $C = \text{const}$, $m = \text{const}$) уравнение (1) для фильтрации газа будет иметь вид [8]:

$$\partial / \partial z (\delta (\partial P / \partial y)) = (m \mu / C) (\partial \delta / \partial \tau). \quad (2)$$

При постоянной температуре $\Delta H = 0$ и справедливо соотношение:

$$P / P_0 = (\delta / \delta_0)^\eta, \quad (3)$$

где η – отношение удельных теплоемкостей. При изотермическом процессе

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

считают, что $\eta = 1$.

С учетом значения δ_0 , выделенного из соотношения (3), уравнение (2) будет иметь вид:

$$\partial P / \partial \tau = K_1 \partial / \partial z (\delta (\partial P / \partial z)). \quad (4)$$

Здесь K_1 – коэффициент, содержащий постоянные величины. $K_1 = C / \mu m$.

Нелинейное уравнение (4) решается путем его линеаризации, для чего текущее значение давления P заменяется средним значением P_{cp} , являющимся постоянным. Тогда уравнение (4) может быть приведено к линейному виду:

$$K_2 \partial^2 P / \partial z^2 = \partial P / \partial \tau, \quad (5)$$

где K_2 – коэффициент, содержащий постоянные величины. $K_2 = C P_{cp} / \mu m$.

В уравнении (5) необходимо учесть начальные и граничные условия. Тогда можно записать:

$$K_2 \partial^2 P / \partial z^2 = \partial P / \partial \tau, \quad 0 \leq z \leq h_0, \quad \tau > 0, \quad (6)$$

$$\text{при } \tau = 0: \quad P = P_0, \quad \partial P / \partial \tau = 0, \quad (7)$$

$$\text{при } z = 0: \quad P = P_0; \quad \text{при } z = h: \quad P = P_1. \quad (8)$$

На границе раздела фаз воздух – вода получим:

$$z = h_B, \quad P_B^+ = P_B^- \quad (9)$$

$$(C / \mu_{\text{в-х}}) (\partial P^+ / \partial z) |_{z=h_B} = -m (dh_B / d\tau); \quad (10)$$

$$(C / \mu_{\text{вода}}) (\partial P / \partial z) |_{z=h_B} = -m (dh_B / d\tau). \quad (11)$$

После интегрального осреднения правой части уравнения (6) по координате z получим:

$$K_2 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{h_B} \int_0^{h_B} \frac{\partial P}{\partial \tau} dz = K_2 f(\tau), \quad 0 \leq z \leq h_B, \quad \tau > 0, \quad (12)$$

Отсюда:

$$d^2 P / dz^2 = f(\tau), \quad (13)$$

$$\frac{1}{h_B} \int_0^{h_B} \frac{\partial P}{\partial \tau} dz = f(\tau), \quad (14)$$

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Выражение (14) после двойного интегрирования в пределах от z до h_B с использованием принятых граничных условий приходит к виду:

$$P(z, \tau) = P_B + K \frac{dh_B}{d\tau} (h_B - z) + \frac{1}{2} f(\tau) (h_B - z)^2. \quad (15)$$

Здесь $K = m\mu_{в-х} / C$.

Функция $f(\tau)$, вид которой неизвестен, может быть определена из начальных условий, когда $z = 0, P = P_A$:

$$f(\tau) = \frac{2}{h_B^2} (P_A - P_B - K \frac{dh_B}{d\tau} h_B). \quad (16)$$

Подстановка выражения (16) в уравнение (15) позволяет получить зависимость для изменения давления:

$$P(z, \tau) = P_B + K \frac{dh_B}{d\tau} (1 - \frac{z}{h_B})z + (P_A - P_B)(1 - \frac{z}{h_B})^2. \quad (17)$$

Равенство (14) может быть преобразовано с учетом полученных выражений (16) и (17), что дает возможность получить дифференциальное уравнение второго порядка вида для границы раздела воздух-вода:

$$\begin{aligned} \frac{K h_B^2}{6} \frac{d^2 h_B}{d\tau^2} + [(P_A - P_B) \frac{1}{3} + 2K_2 K] \frac{dh_B}{d\tau} + \frac{K h_B}{3} (\frac{dh_B}{d\tau})^2 + \\ + \frac{2}{3} h_B \frac{dP_B}{d\tau} = \frac{2K_2}{h_B} (P_A - P_B). \end{aligned} \quad (18)$$

Уравнение фильтрации жидкости (вторая фаза – вода) и граничные условия для движения несжимаемой жидкости будут иметь следующий вид:

$$\partial P / \partial z = 0,$$

$$\text{при } z = h \quad P = P_G; \quad \text{при } z = h_B \quad P_B^+ = P_B^-, \quad \frac{\partial P^-}{\partial z} \Big|_{z=h_B} = -K_3 \frac{dh_B}{d\tau}, \quad (19)$$

где $K_3 = m\mu_{вода} / C$.

Такая задача будет иметь решение в виде функции

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

$$P = P_G + K_3 \frac{dh_B}{d\tau} (h - z). \quad (20)$$

При $z = h_B$ получим зависимость следующего вида:

$$P_B = P_G + K_3 \frac{dh_B}{d\tau} (h - h_B). \quad (21)$$

Положение границы раздела фаз воздух – вода и давления на ней может быть определено путем совместного решения уравнений (18) и (21). Предварительно уравнение (18) для границы раздела воздух – вода упрощается при условии пренебрежения первым и третьим его членами вследствие их малости. При этом точность остается в допустимых пределах. Первый член уравнения (18) описывает инерционные силы, которые в данном случае незначительны. Третий член этого уравнения представляет собой скорость движения границы раздела воздух-вода во второй степени, которая также является величиной, имеющей небольшой порядок. С учетом этого уравнение (18) имеет другой вид и с учетом выражения (21) может быть получено дифференциальное уравнение второго порядка относительно h_B :

$$0,66K_3 h_B^2 (h - h_B) \frac{d^2 h_B}{d\tau^2} + \{ [0,33(P_A - P_G) + 2K_2 K] h_B + 2K_2 K_3 (h - h_B) \} \frac{dh_B}{d\tau} - [0,33K_3 h_B (h - h_B) + 0,66K_3 h_B^2] \left(\frac{dh_B}{d\tau} \right)^2 = 2K_2 (P_A - P_G). \quad (22)$$

В данном уравнении пренебрежимо малыми являются первый и третий члены, их так же можно не учитывать без потери точности. В ходе упрощения получено уравнение первого порядка:

$$\frac{dh_B}{d\tau} = \frac{6K_2 \Delta P}{[\Delta P + 6K_2 (K - K_3)] h_B + 6K_2 K_3 h}. \quad (23)$$

С целью упрощения полученного уравнения комплексы выражений, содержащих постоянные величины, могут быть обозначены как:

$$a = \Delta P + 6K_2 (K - K_3), \quad b = 6K_2 K_3 h, \quad \Delta P = P_A - P_G. \quad (24)$$

После интегрирования получено уравнение второй степени вида:

$$0,5 a h_B^2 + b h_B = 6 K_2 \Delta P \tau + c_0. \quad (25)$$

Здесь c_0 – постоянная интегрирования, которая определяется из начальных условий: при $\tau = 0$, $h = 0$, $c_0 = 0$.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

С учетом того, что значение коэффициента K_3 значительно превышает значение коэффициента K , так как $\mu_{вода} \gg \mu_{в-х}$, для расчета положения границы раздела фаз воздух – вода получаем следующую зависимость:

$$h_B = -6K_2K_3h/[\Delta P + 6K_2(K-K_3)] + \{ [6K_2K h/(\Delta P + 6K_2(K-K_3))]^2 + 12 K_2 \Delta P \tau / (\Delta P + 6K_2(K-K_3)) \}^{0.5} \quad (26)$$

Максимальное время обезвоживания слоя осадка τ_{max} можно определить путем вычисления параметра h_B . Этот момент имеет место тогда, когда h_B достигает значения h_G . Для выполнения расчетов необходимо иметь значения проницаемости и пористости исследуемого осадка. Эти параметры в основном определяются характеристиками его поровой среды, способом укладки частиц в осадке и гранулометрическим составом материала, слагающего осадок.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные аналитические исследования позволили установить сложный характер зависимости перемещения положения границы раздела фаз воздух – вода в поровой среде осадка даже при принятых упрощениях.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на анализ полученной зависимости в применении к фильтрованию тонкодисперсных осадков.

Список литературы

1. Kuchma Yu., Vertola L., Abramuk S. Combination of Centrifuges for Dewatering the Finely Dispersed Slurry and the Flotation Concentrate // Proceedings of XVI ICPC. – USA: SME, 2010. – P. 496-503.
2. Анциферов О.В., Богданов О.О. Методика оцінки технологічних параметрів процесу механічного зневоднення шламів // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77)-37(78). – С. 150-154.
3. Пейчев И.Д. Теоретические основы фильтрования угольных суспензий // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 25(66)-26(67). – С. 144-148.
4. Березняк А.А. Исследование кинетики фильтрования через антрацит крупностью 40-50 мкм // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 31(72). – С. 86-88.
5. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1980. – 398с.
6. Назимко Е.И. Исследование микроструктуры кека методами фрактальной геометрии // Наукові праці Донату: Серія гірничо-електромеханічна. – 2001. – Вип. 27. – С. 283-288.
7. Kinetics of Phases Interaction during Mineral Processing Simulation / L.I. Nazimko, E.E. Garkovenko, A.N. Corchevsky & al // Proceedings of XV International Congress of Coal Preparation. – China, 2006. – P. 785-798.
8. Особенности флотации и обезвоживания тонкодисперсных углесодержащих материалов. / Е.Е. Гарковенко, Е.И. Назимко, А.И. Самойлов и др. – Донецк: Норд-Пресс, 2002. – 266 с.

© Назимко Е.И., Гарковенко Е.Е., Науменко В.Г., 2012

Надійшла до редколегії 27.02.2012 р.

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом