

В.П. НАДУТЫЙ, д-р техн. наук,

В.И. ЕЛИСЕЕВ, канд. физ.-мат. наук,

В.И. ЛУЦЕНКО, канд. техн. наук, **И.П. ХМЕЛЕНКО**

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики НАН Украины)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ОПУСКАНИЯ ЖИДКОСТИ В ПОРОВЫХ КАНАЛАХ ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ ГОРНОЙ МАССЫ

Во многих технологических операциях обогащения полезных ископаемых процесс обезвоживания определяет эффективность дальнейшей переработки или качества готового продукта. При этом отделение внешней свободной влаги в слое перерабатываемой горной массы обычно не вызывает особых трудностей, однако оно является начальным этапом обезвоживания, после которого влажность массы составляет 18-20 %. Более глубокое обезвоживание связано с вязкими и капиллярными силами, действующими в поровых каналах и удерживающих в них жидкость. В результате этого дальнейшее обезвоживание слоя горной массы требует значительной энергии. Поровые каналы мокрого слоя горной массы по своей топологии значительно отличаются от классической капиллярной трубки, вследствие чего и поведение жидкости в них имеет свои особенности. Кроме того, в капиллярной жидкости могут находиться твердые мелкие частицы, которые вносят изменения в равновесное состояние мениска жидкости в поровом канале. Важным обстоятельством также является и тот факт, что почти все обезвоживающие устройства обогатительного оборудования имеют сетки с мелкой ячейкой, замыкающей поровый канал слоя при выходе жидкости. Это, в свою очередь, вносит дополнительные трудности извлечения жидкости и фракционирования частиц, так как на мелких ячейках могут образовываться тонкие и устойчивые пленки, мешающие движению частиц. В этом случае равновесное состояние жидкости в данной конструкции капилляра требует дополнительного изучения для поиска путей повышения эффективности обезвоживания. Подобные задачи стоят в областях совершенствования процессов вакуумного фильтрования, тонкого вибрационного грохочения с обезвоживанием пульпы, центрифугирования. В связи с этим приобретает актуальность рассмотрение капиллярной системы, включающей в себя поровые каналы и ячейки сеток.

Целью выполненного комплекса исследований являлось изучение равновесного состояния жидкости в ячейке тонкого сита, в капиллярах поровых каналов слоя влажной горной массы, определения зависимости этого состояния от ряда факторов и их влияния на процесс опускания жидкости при обезвоживании под влиянием внешних воздействий.

Научная задача о равновесных состояниях жидкости в слое требует поэтапного рассмотрения отдельных возможных вариантов этого состояния: равновесного положения жидкости в капилляре, структуры слоев в ячейке смачи-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

ваемого и несмачиваемого сита, равновесных слоев с твердой частицей в мениске. Решение такой задачи позволит разработать рекомендации по совершенствованию процессов и оборудования для более глубокого обезвоживания горной массы, дальнейшая сушка которой потребует меньше энергетических затрат.

В данной работе приведены обобщенные результаты выполненных авторами исследований равновесных состояний и процессов истечения жидкости из капиллярных каналов через ячейки сита с учетом прохождения через них твердых частиц.

На основе уравнения гидростатики, рассмотрена задача о равновесном состоянии капиллярной жидкости в ячейке сита в двух реальных для практики случаях – когда жидкость смачивает и не смачивает сетку [1]. Для этих двух случаев найдены аналитические выражения, описывающие формы менисков (табл. 1, п. 1 и п. 2). В приведенных в таблице 1 выражениях приняты следующие обозначения: H – верхний уровень слоя жидкости в ячейке сита; h – нижний уровень слоя жидкости; R_h – радиус окружности, по которой жидкость контактирует с поверхностью волокна; J_0 , J_1 – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно; $\theta = \text{tg } \gamma$ (γ – угол между касательной к поверхности в точке зацепления и прямой параллельной оси абсцисс); $\kappa^2 = Bo$; Bo – число Бонда; $n = r/R_h$; r – расчетный радиус; R_S – радиус волокна сетки. Следует отметить, что для удобства представления на данных рисунках величиной α для смачивающей жидкости обозначен угол смачивания, а для несмачивающей угол сопряженный углу смачивания.

Полученные зависимости позволяют определять путем последовательных приближений высоты столбов жидкости H , удерживаемые капиллярными силами, что дает возможность отдавать предпочтение тому или иному материалу сетки. В результате расчетов было определено, что несмачиваемые сетки могут удерживать более толстые слои жидкости. Кроме того, следует заметить, что варианты равновесных состояний на смачиваемой сетке ограничены переходом жидкости в пленки под сеткой при слиянии двух соседних менисков.

Аналогичными методами можно определить и остаточную массу тонкого слоя смачивающей жидкости в ячейке сетки (табл. 1 п. 3). На рисунке переменные с индексом N относятся к нижней поверхности, а с индексом W – верхней.

Более актуальную задачу представляет собой случай, когда в тонком слое жидкости в ячейке сита находится твердая частица, поскольку операция обезвоживания часто совмещается с извлечением или классификацией сырья при тонком грохочении. Поэтому решение задачи определения равновесного состояния жидкости в ячейке сита с твердой частицей, например, обезвоживающего грохота имеет практический интерес. В работах [2, 3] рассмотрены различные варианты равновесных слоев жидкости в ячейке сетки с частицами. Количество вариантов здесь значительно расширяется, ввиду смачивания и несмачивания сетки, а также смачивания и несмачивания частицы. В результате аналитических исследований установлены условия равновесия частиц в слоях, удерживающихся на сетке. Для толстого и среднего слоев смачивающей жидкости они имеют вид, приведенный в таблице 1 в пунктах 4,5.

сти; H_0 – расстояние от поверхности жидкости до частицы.

Найдено положение несмачиваемой частицы для случая смачиваемой сетки и получено условие равновесного состояния этой системы [4] (табл. 1, п. 7). Здесь $\Delta\rho_c = -\rho g R_w (h_0 + X_{Sc})$.

В практике тонкого грохочения рудных и угольных пульп после отбора свободной жидкости и в начале выхода капиллярной, под сеткой наблюдаются висющие капли (перетяжки) жидкости с твердыми частицами. Вследствие этого возникает необходимость рассмотрения устойчивости и отрыва перетяжки в виде жидкостной связи между пленкой жидкости на сетке и частицей. При условии, что объем жидкости в перетяжке остается постоянным, эта задача была подробно рассмотрена в [5], где предложено выражение для полной работы A , действующей на частицу силы, при растяжении перетяжки в процессе вибро-возмущений (табл. 1, п. 8). Здесь $\sum A$ – сумма работ действующих сил на вытягивание перетяжки с частицей; l_a – максимальное расстояние, на которое вытягивается частица на перетяжке за четверть периода $t = t_0 = 1/4 f$ ее колебательного движения по закону $x = X \sin(2\pi ft)$; f – частота колебаний; ρ_{ch} – плотность материала частицы; F – вынуждающая сила; N – мощность соответствующая работе A .

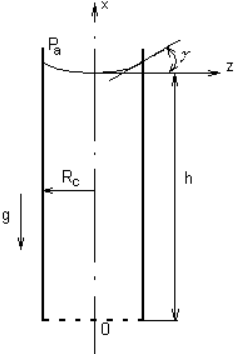
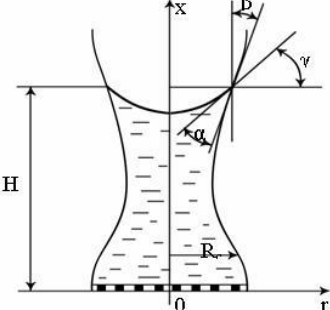
В случае тонкой классификации влажной горной массы, лежащей на сетке, возникает необходимость модельного представления движения жидкости по поровым каналам и через сетку, это особенно актуально при наложении вибраций, когда процесс обезвоживания приобретает динамический характер. В этом случае особенности процесса требуют изучения поведения мениска жидкости в поровом канале при наложении дополнительных ускорений, определения влияния диаметра канала на процесс истечения жидкости в устье канала и на поведение струи при ее истечении через сетку, влияния высоты порового канала и т.п. Подробно эти вопросы рассмотрены в работе [6], где поровые каналы моделируются стеклянными трубками различного диаметра. Такое допущение вынуждено, поскольку поровые каналы в сыпучем материале не поддаются моделированию, однако это допущение позволяет установить основные физические факторы и характеры зависимостей. При моделировании процесса движения мениска в колеблющихся каналах с сеткой были приняты ранее выведенные уравнения для описания движения жидкости в неподвижных открытых капиллярах [7]. В результате преобразований и дополнений в [6] получено уравнение, описывающее движение некоторого слоя жидкости в капиллярном канале, имитирующем поровой канал сыпучего материала на сетке, совершающей гармонические колебания (табл. 2, п. 1), где p_a , p_b – давление атмосферное и в нижнем сечении трубки, соответственно, Н/м²; t – время, с; R_c – радиус трубки, м; h – высота слоя жидкости в трубке, м; U_c – скорость движения трубки, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – коэффициент динамической вязкости, кг/м·с; $\theta = tg\gamma = 1/tg\alpha$; γ – угол между текущим радиусом трубки и касательной к поверхности мениска; α – угол сма-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

чівання; k – коефіцієнт опору.

Таблиця 2

Динамика слоя жидкости в поровых каналах, опирающихся на ячейки сита

Условия равновесия в ячейке сита	Расчетная схема	Уравнение
1. Опускание жидкости в поровом канале		$h \left(\frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{dU_c}{dt} \right) + gh + 8 \frac{\mu}{\rho R_c^2} h \frac{dh}{dt} - 2 \frac{\sigma}{\rho R_c} \frac{\theta}{(1 + \theta^2)^{1/2}} = -k \frac{dh}{dt} - \frac{p_a - p_b}{\rho}$
2. Опускание жидкости в поровом канале переменного сечения		$\left[r_{ch}^2 \frac{d^2 h}{dr^2} + 2 r_{ch} \frac{dr_{ch}}{dh} \left(\frac{dh}{dr} \right)^2 \right] - \int_0^h \frac{dS}{r_c^2} + \frac{gh}{a} T^2 + 8 \frac{\nu T}{a^2} r_{ch}^2 \frac{dh}{d\tau} \cdot \int_0^h \frac{d\xi}{r_{ch}^4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{co}^4 - r_{ch}^4}{r_{co}^4} \left(\frac{dh}{dr} \right)^2 - 2 \frac{\sigma T^2}{\rho a^3 r_{ch}} \cdot \frac{\theta}{(1 + \theta^2)^{1/2}} = -k \frac{T}{a} \cdot \frac{dh}{dr} - \frac{T^2}{a^2} \cdot \frac{p_a - p_b}{\rho}$

При постоянном давлении p_b стационарное решение полученного уравнения имеет вид

$$h = 2 \frac{\sigma}{\rho g R_c} \cdot \frac{\theta}{(1 + \theta^2)^{1/2}} - \frac{p_a - p_b}{\rho g}.$$

Это выражение показывает уровень остающейся воды в канале для разных коэффициентов поверхностного натяжения, углов смачивания и перепада давления и позволяет проанализировать влияние колебаний сетки на динамику опускания жидкости в канале и влияние перепада давления на остаточное количество жидкости.

В работе [8] теоретически и экспериментально было показано влияние сетки на скорость опускания жидкости в капилляре. Сетка принималась как дополнительное сопротивление движению жидкости. Анализ результатов показал, что закон опускания жидкости без сетки в теории с достаточно высокой точностью совпадает с экспериментальным (рис. 1). При наличии сетки результаты несколько хуже, но вполне удовлетворительны. Исследования показали, что сетка при сравнительно больших сопротивлениях оказывает влияние на движение мениска в трубке, а это в свою очередь влияет на остаточную массу жидко-

СТИ.

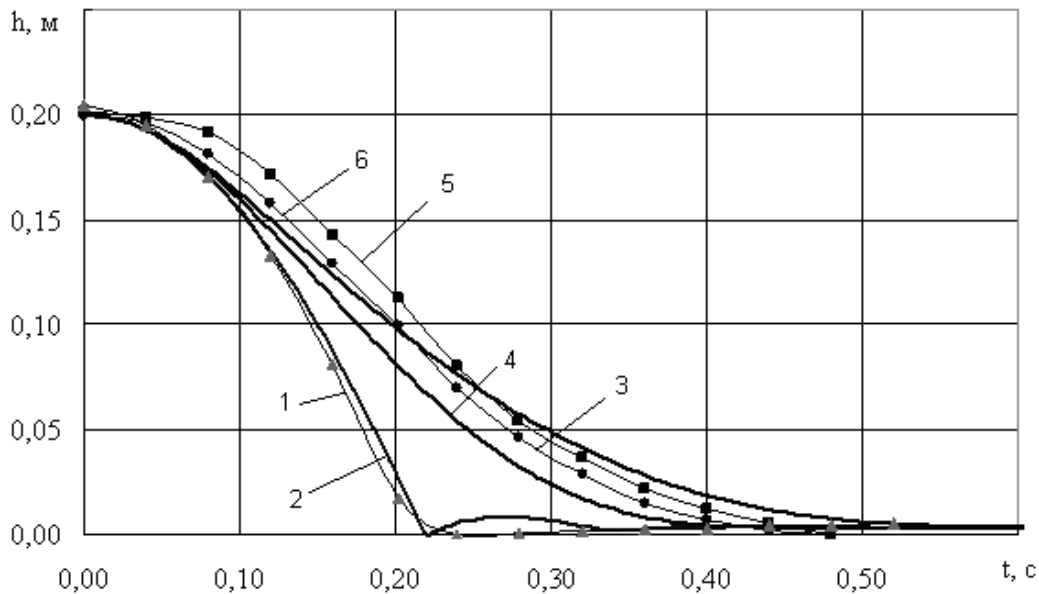


Рис. 1. Зависимость времени обезвоживания порового канала от размера ячеек сетки:

- 1, 2 – без сетки; 3, 4 – сетка 100 мкм; 5, 6 – сетка 50 мкм;
- 1, 3, 5 – данные эксперимента; 2, 4, 6 – расчетные данные

Таким образом, установлена существенная роль менисков в поровых каналах на процесс обезвоживания. При этом увеличение амплитуды колебаний приводит к более тонким пленкам на сетках, что увеличивает вероятность их разрыва и улучшение обезвоживания. С уменьшением коэффициента сопротивления менее 0,1 снижается отрицательное влияние мениска, а также и с увеличением диаметра порового канала более 2,0 мм. Установлено существенное влияние вибрации в этом случае при амплитуде $a = 5,0$ мм и частоте $f > 10,0$ Гц.

Данные выводы получены при анализе системы с поровыми каналами цилиндрической формы. Однако в работах [7, 9] было показано, что поведение жидкости в капиллярном канале переменного сечения имеет свои особенности и отличается наличием гистерезисов, которые приводят к тому, что остаточная масса жидкости в канале может иметь различную величину. Анализ модели такой системы (табл. 2, п. 2) представлен в работе [10], где решалась задача определения зависимости опускания жидкости в канале от закона изменения его проходного сечения. Основываясь на результатах работ [6, 7], в [10] получено уравнение для движения жидкости в канале переменного сечения с мелкопористой сеткой на выходе в безразмерном виде, где $r = t/T$; $\xi = x/a$; $r_c = R_c/a$; $h = H/a$; t – время; T – масштаб времени; x – координата; a – линейный масштаб (средний радиус капилляра); $R_c = a[1 + \varepsilon \sin(2\pi f \xi)]$ – текущий радиус капилляра в точке контакта стенки с мениском; ε – безразмерная амплитуда; r_{co} – безразмерный радиус на нижнем срезе канала; g – ускорение свободного паде-

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

ния, м/с^2 ; ν – кинематический коэффициент вязкости; $\theta = \text{tg} \gamma$; γ – угол сопряжения кривой смачивания с горизонтом. Из приведенного уравнения можно получить уравнение движения жидкости для канала с постоянным сечением, если положить $r_c = r_{ch} = r_{co} = 1$.

Расчеты были проделаны в предположении, что угол смачивания не меняется, таким образом можно проследить влияние геометрических факторов на движение жидкости и ее установившееся положение. Разработанная математическая модель движения мениска жидкости в поровом канале переменного сечения с сеткой на выходе, указывает на зависимость процесса от волнистости канала. Расчеты показали, что при волнистости канала с амплитудами $\varepsilon = 0,1; 0,2; 0,3$ и коэффициенте сопротивления $k = 1$ мениск жидкости опускается до самой сетки. При больших амплитудах волнистости поверхности канала мениск останавливается в трубке над сеткой. Например, в случае $\varepsilon = 0,4$ высота $h = 0,307$, а при $\varepsilon = 0,5$ $h = 0,872$. Это указывает на то, что при $\varepsilon = 0,5$ радиус канала становится небольшим, и силам поверхностного натяжения с таким углом смачивания удастся удержать этот столб жидкости в поровом пространстве слоя влажной горной массы [10].

Выводы

1. Рассмотрены различные варианты и условия равновесного состояния жидкости и частиц в ячейках обезвоживающего сита. В расчетах показано, что на мелких сетках капиллярные силы могут удерживать довольно толстые слои жидкости, при этом несмачиваемые сетки оказывают большее капиллярное сопротивление началу обезвоживания.

2. Тонкие пленки жидкости, которые могут образовываться в ячейках сита, также могут держать значительные усилия и не пропускать частицы через себя.

3. Расчеты висящих на перетяжках частиц показали, что работа по перемещению частиц в колебательном процессе пропорциональна квадрату частоты колебаний, при этом мощность соответствует величине пропорциональной частоте в третьей степени.

4. Проведенный цикл работ по исследованию опускания слоя жидкости в капилляре показал удовлетворительное совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными, что говорит об адекватности математической модели. Результаты исследований свидетельствуют, что капиллярные силы влияют на остаточную массу воды в капилляре. Высота слоя при этом, как и в классической теории, зависит от коэффициента поверхностного натяжения и угла смачивания. С увеличением σ и уменьшением угла смачивания высота остаточного слоя растет.

5. Сопротивление сетки может оказывать заметное влияние на движение мениска, что, в свою очередь, в реальных условиях может влиять на высоту остаточной массы жидкости.

6. Величина столба остаточной жидкости линейно зависит от диаметра порового канала. Ввиду наличия порядкового гистерезиса скорость движения

жидкости во многом определяет остаточную массу, т.к. в зависимости от предыстории движения возможна остановка слоя на разных уровнях.

Список литературы

1. Равновесные слои жидкости в капиллярной ситовой ячейке / **В.И. Елисеев, В.И. Луценко, В.П. Надутый, И.П. Хмеленко** / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2008. – Вып. 74. – С. 44-54.
2. Определение равновесного состояния тонкого слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита грохота / **В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко и др.** // Науковий вісник НГУ. – 2008. – Вип. 9. – С. 81-85.
3. Определение условия равновесия слоя жидкости с твердой частицей в ячейке сита / **В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко** / Вісник НТУ "ХП". – Харків. – 2008. – Вип. 38. – С. 22-28.
4. Результаты исследований равновесного состояния жидкости в ячейке сита обезвоживающего грохота / **В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко** / Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця. – 2009. – Вип. 3(55). – С. 77-80.
5. Определение условий равновесного состояния частицы, висящей на перетяжке жидкости / **В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко** / Науковий вісник: Наук.-техн. журнал НГУ. – Дніпропетровськ. – 2008. – Вип. 10. – С. 46-49.
6. Определение закономерностей опускания жидкости в поровых каналах влажной горной массы, лежащей на сетке / **В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко** / Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2009. – Вип. 22. – С. 71-74.
7. Proceedings of the VII Minsk International Seminar "Heap Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources" / **V.I. Eliseyev, V.I. Lutsenko, V.F. Prisiakov** / Minsk, Belarus, 8-11 September 2008. – P. 388-394.
8. Экспериментальные исследования и моделирование процесса обезвоживания горной массы на грохоте с подстилающей сеткой / **В.П. Надутый, В.И. Луценко, В.И. Елисеев, И.П. Хмеленко** / Вісник НТУ "ХП". – Харків. 2009. – Вип. 25. – С.151-156.
9. **Елисеев В.И.** Статические гистерезисные явления в капиллярах / **В.И. Елисеев, В.И. Луценко** // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2006. – Вип. 66. – С. 157-163.
10. Разработка модели опускания жидкости в поровом канале переменного сечения при обезвоживании слоя горной массы / **В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко, И.П. Хмеленко** / Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 85. – С. 64-69.

© Надутый В.П., Елисеев В.И., Луценко В.И., Хмеленко И.П., 2010

*Надійшла до редколегії 12.02.2010 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Є.С. Лапишиним*