

**Е.И. НАЗИМКО**, д-р техн. наук,

**В.Г. НАУМЕНКО**

(Украина, Донецк, Донецкий национальный технический университет)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОСАДКОВ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВЛАГИ В ПОРАХ**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Известно, что продукты шламовой крупности удерживают наибольшее количество влаги по сравнению с другими продуктами технологической цепочки обогащения. Это связано с высокоразвитой поверхностью мелких и тонких материалов и специфическими свойствами тонких водных пленок [1, 2]. Поэтому исследование сложных процессов, протекающих в сети капилляров в осадке продолжает оставаться актуальной научно-технической задачей. При этом возникает необходимость решения новых теоретических и практических вопросов.

*Анализ исследований и публикаций.* Такие параметры как градиент давления, сопротивление осадка, капиллярные явления, микроструктура порового пространства, форма и размер частиц, пористость, удельная поверхность и др. определяют скорость прохождения воды в пористом теле осадка. Исследование сложных процессов перемещения влаги в осадках сопряжено с определенными трудностями. Поэтому принимают некоторые упрощения и допущения. Наибольшее распространение получила модель, которая изображает поровую среду как развитую сеть каналов и расширений [3]. Такую сеть можно считать неполным ориентированным мультиграфом [4]. При этом вершины графа соответствуют отдельным порам. При исследовании процессов, происходящих в объеме осадка в ходе удаления влаги, сложно учесть свойства отдельных пор, из-за чего многие исследователи используют интегральный подход. Однако, рассмотрение движения жидкости в одной поре также представляет определенный интерес.

*Постановка задачи.* Цель данной работы – исследование влияния проницаемости осадков на перемещение влаги в отдельно взятой поре.

*Изложение материала и результаты.* Для анализа перемещения жидкой фазы принята единичная сквозная пора, расположенная в слое осадка. По длине поры выделено несколько участков №1-10. Схема расчетной модели приведена на рис. 1.

Участок №1 соответствует выходу из поры в атмосферу через слой фильтровальной ткани, следующие за ним участки постепенно удаляются в сторону подачи суспензии под напором и последний участок №11 соответствует входу в пору.

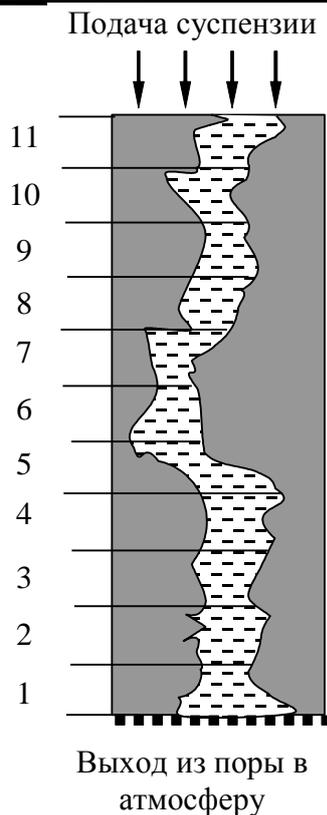


Рис. 1. Схема единичной поры в слое осадка

Для рассмотрения процесса переноса влаги в поре с переменной проницаемостью принято известное дифференциальное уравнение переноса вещества в пористой среде. В общем случае это уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial [P(x, y, t)]}{\partial t} = \frac{\partial [Dx(x, y, t) * \partial P(x, y, t) / \partial x]}{\partial x} + \frac{\partial [Dy(x, y, t) * \partial P(x, y, t) / \partial y]}{\partial y} + ps(x, y, t). \quad (1)$$

Здесь  $P(x, y, t)$  – давление жидкости, находящееся в зависимости от координат пространства и времени;  $Dx(x, y, t)$  и  $Dy(x, y, t)$  – коэффициенты диффузии, зависящие от координат пространства и времени;  $ps(x, y, t)$  – внешний источник давления.

Частным случаем данного уравнения является:

$$\frac{D d^2 P}{dx^2} = \frac{dP}{dt}, \quad (2)$$

где  $D$  – диффузионный фактор.

Диффузионный фактор  $D$  связан с проницаемостью поровой среды осадка и определяется из соотношения:

$$D = \frac{C P}{m \mu}, \quad (3)$$

где  $C$  – проницаемость пористой среды осадка;  $P$  – давление;  $m$  – пористость осадка;  $\mu$  – вязкость жидкости.

Далее использованы подходы, более подробно изложенные в работах [5, 6]. Для исследования процесса удаления влаги из осадка в неустановившемся режиме методом конечных разностей найдено решение нестационарного дифференциального уравнения (2) потока жидкости сквозь поровую среду осадка, имеющего переменную проницаемость по толщине.

В связи с тем, что жидкость имеет конечную вязкость, давление на выходе из поры падает в течение некоторого времени по экспоненте до атмосферного, которое условно принято за ноль. В аппаратах, применяемых для механического обезвоживания, скорость подачи пульпы обычно соответствует скорости удаления жидкости. Поэтому давление на входе в пору растёт так же по экспоненте, но этот процесс происходит медленнее, чем на выходе из поры.

Изменение давления на выходе из поры определялось по зависимости:

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{20}\right). \quad (4)$$

Изменение давления на входе в пору вычислено как:

$$P(t) = 0,5 + \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{-t}{30}\right)}. \quad (5)$$

Толщина осадка принята равной 30мм, что соответствует условиям фильтрации в фильтр-прессах. Диффузионный фактор имел постоянное значение и определялся по зависимости:

$$D(i) = \frac{0,1}{i^2}, \quad (6)$$

где  $i$  – номер участка в поре.

Результаты расчетов представлены в графической форме на рис. 2-5.

На рис. 3, 4 приведены графики изменения избыточного давления на участках, удаленных от входа в пору.

## Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

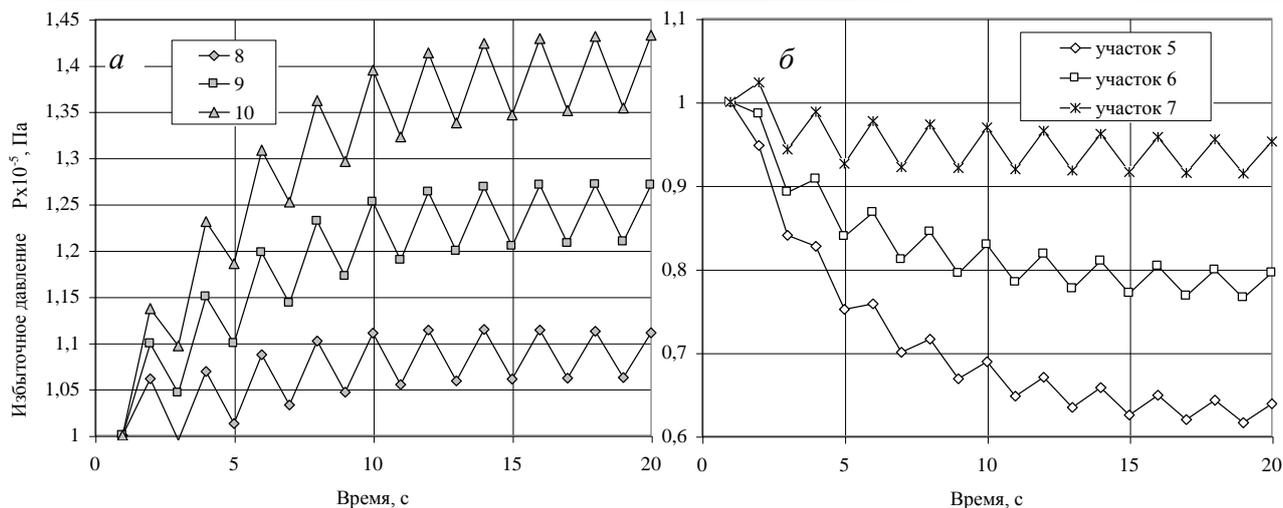


Рис. 2. Избыточное давление на участках поры:  
а – № 8-10; б – № 5-7

Данные позволяют заключить, что при высоком значении диффузионного фактора и проницаемости осадка, которые приняты для исследования, на участках №9 и №10 еще отмечается рост давления. То же относится и к участку №8. Все эти участки расположены ближе ко входу в пору. При этом имеют место колебания значений избыточного давления, хотя в целом давление на участках с течением времени продолжает увеличиваться. Отсюда следует вывод о возникновении в поре автоколебательных процессов [7].

Из данных рис. 2, б видно, что на участках №5, №6 и №7, расположенных в средней части поры на равном удалении от входа (нагнетания суспензии) и выхода из поры (связь с атмосферой) продолжают развиваться автоколебательные процессы и избыточное давление в поре имеет переменные значения в течение небольших отрезков времени. При этом на участке №7 избыточное давление еще увеличивается в начальный момент, затем происходит снижение его значения на общем фоне колебаний.

На рис. 3 представлено падение избыточного давления на участках поры, расположенных ближе к выходу из нее.

Из данных рис. 3 следует, что на участке выхода №1 колебания давления отсутствуют, идет плавное его снижение до атмосферного, условно принятого за ноль. На соседнем с ним участке №2 колебания избыточного давления начинают развиваться постепенно с течением времени и являются незначительными. На участке №3 колебания выше и появляются довольно быстро – на четвертой секунде. На участке №4 амплитуда колебаний продолжает расти и колебания проявляются уже с самой первой секунды.

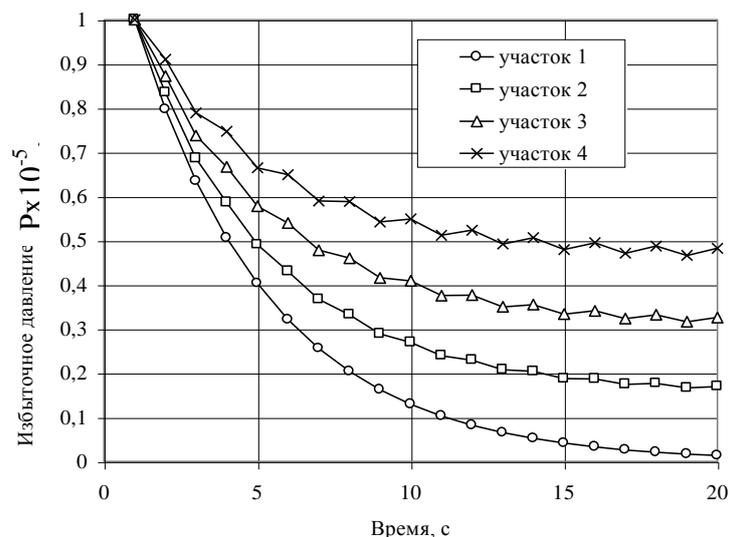


Рис. 3. Избыточное давление на участках, расположенных ближе к выходу из поры

Анализ показывает, что чем ближе расположен участок к средней части поры, тем больше разница между соседними во времени значениями избыточного давления. Сравнение разницы в соседних по времени значениях избыточного давления для разных участков показана на рис. 4.

Результаты, приведенные на рис. 4 позволяют заключить, что максимальная амплитуда колебаний давления характерна для участка №10, расположенного близко ко входу в пору. На соседнем с ним участке №9 амплитуда снижается и минимальная амплитуда колебаний давления имеет место на участке №2, расположенном близко к выходу из поры. В целом колебания давления на различных участках поры стремятся к затуханию с течением времени.

Осадки с низкой проницаемостью имеют минимальное значение диффузионного фактора, который определялся по линейной зависимости:

$$D = i \cdot 10^{-7} . \quad (7)$$

На рис. 5 показаны результаты расчетов при минимальном значении диффузионного фактора для осадков с низкой проницаемостью, которые позволяют прийти к заключению, что от входа в пору, где происходит нагнетание суспензии, до середины поры давление продолжает повышаться, но менее интенсивно. На участке №6 еще наблюдается некоторое небольшое повышение давления, исчезающее с течением времени. Для участков, расположенных в средней части поры, характерно падение напора, которое продолжается до выхода из поры в атмосферу.

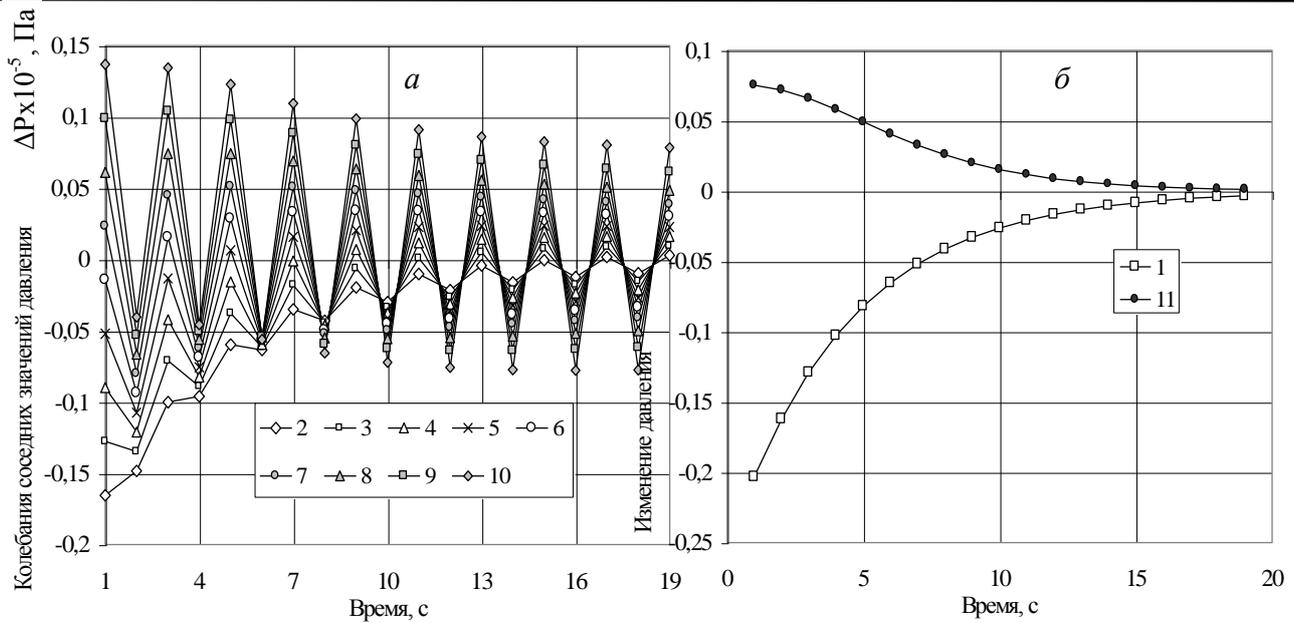


Рис. 4. Разница в соседних значениях давления по длине поры:  
 а – на различных участках; б – на входе (№11) и выходе (№1)

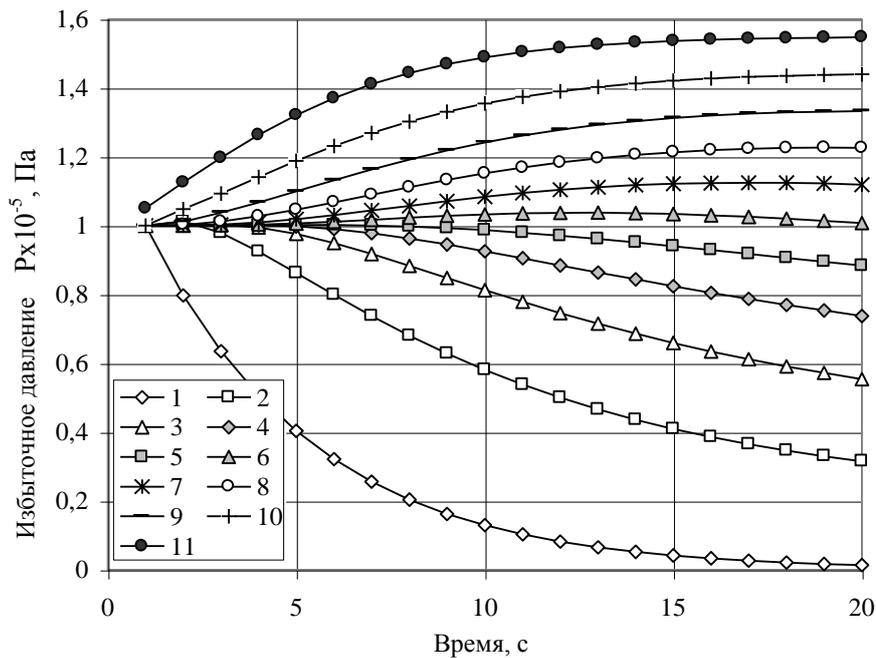


Рис. 5. Избыточное давление в порах для осадков с низкой проницаемостью

Таким образом, потери напора проявляются неоднозначно по длине поры и с течением времени, а также в зависимости от проницаемости осадка. Изменение избыточного давления в поре при низкой проницаемости осадков имеет монотонный характер.

*Выводы.* Для осадков с высокой проницаемостью характерно наличие колебаний избыточного давления по длине поры, которые развиваются постепенно с течением времени. При этом, чем ближе расположен участок к средней

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

части пори, тем більше різниця між сусідніми значеннями надлишкового тиску. Максимальна амплітуда коливань тиску характерна для ділянок, розташованих близько до входу в пору. На ділянках, знаходячись близько до виходу з пори, амплітуда коливань надлишкового тиску найбільш низька.

Колісання тиску на різних ділянках пори прагнуть до затухання з течією часу.

Втрати напора проявляються неоднозначно по довжині пори і з течією часу.

Зміна надлишкового тиску в порі при низькій проникності осадинок має монотонний характер.

Виявлене збільшення надлишкового тиску по довжині пори при високій проникності осадинок ще раз підкріплюють складність протікаючих в порі процесів навіть при прийнятих спрощеннях.

### **Список літератури**

1. Полулях А.Д. Особливості сучасних технологій углеобогачення // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2003. – Вип. 17(58). – С. 3-6.
2. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. Вода в дисперсних системах. – М.: Хімія, 1989. – 288 с.
3. Jerauld G.R., Salter S.J. The effect of pore-structure on hysteresis in relative permeability and capillary pressure: pore level modeling // Transport in Porous Media. – 1990. – 5. – Р. 103-151.
4. Особливості флотації і обезводження тонкодисперсних углекислотних матеріалів. / Е.Е. Гарковенко, Е.І. Назимко, А.І. Самойлов і др. – Донецьк: Норд-Прес, 2002. – 266 с.
5. Гарковенко Е.Е. Методи моделювання процесу фільтрування рідини через пористу середовище осадинок // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України. – 2005. – №56. – С. 27-34.
6. Гарковенко Є.Є., Назимко О.І. Інтенсифікація процесу фільтрування в полі деформацій зсуву // Тр. Міжнар. конф. "Міжнародний та вітчизняний досвід переробки відходів". – 2002. – С. 17-19.
7. Назимко О.І., Гарковенко Є.Є., Морозова В.Г. Аналітичне дослідження впливу проникності осадинок на переміщення речовини в порах // Обогащение полезных ископаемых: Науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 20(61). – С. 83-88.

© Назимко Е.И., Науменко В.Г., 2012

*Надійшла до редколегії 27.07.2012 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*