

относительно паросодержания потока от основных режимно-конструктивных параметров аналогичен характеру зависимости параметра двухфазности от тех же величин.

### Выводы

В результате расчетно-аналитических исследований получены данные, характеризующие параметр двухфазности для пористых высокотеплопроводных материалов при движении сквозь них двухфазных парожидкостных потоков. На основании объединения теоретических исследований В.А. Майорова и экспериментальных Ю.А. Зейгарника и И.В. Калмыкова, а так же в результате выполненных на этой основе вычислений и построенных по их результатам графических зависимостей, можно сделать следующие выводы.

1. Параметр двухфазности для рассматриваемого случая движения двухфазного парожидкостного потока зависит от гораздо более широкого перечня параметров, чем это считалось ранее. При этом, режимно-конструктивными параметрами, от которых зависит параметр двухфазности, являются:

- число Рейнольдса исходного жидкостного потока  $Re_0$ ;
- массовое расходное паросодержание  $x$ ,
- гидравлические параметры пористой структуры (вязкостный  $\alpha$  и инерционный  $\beta$  коэффициенты сопротивления пористого материала);
- давление насыщения  $P_s$  потока (параметры  $\rho', \rho'', \mu', \mu''$ ).

2. Рост гидравлического сопротивления при движении парожидкостного потока в пористых материалах, по сравнению с однофазным движением теплоносителя, при одинаковых массовых расходах, может составлять тысячу и более раз.

3. Рост гидравлического сопротивления в пористых высокотеплопроводных каналах, при движении сквозь них двухфазных парожидкостных потоков, может быть сведён к минимуму в результате уменьшения числа Рейнольдса потока на входе в канал и увеличения пористости канала.

Полученные результаты, наряду с известным фактом значительного роста интенсивности теплообмена в пористых высокотеплопроводных каналах, по сравнению с гладкостенными каналами, в случае рассмотрения движения двухфазных испаряющихся потоков, позволят в дальнейшем провести расчётно – аналитическое исследование теплогидравлической эффективности пористых теплообменных каналов при движении сквозь них испаряющегося теплоносителя, с целью возможного применения пористых теплообменных элементов в энергетических комплексах горного оборудования.

### Список литературы

1. Майоров В.А. Структура и сопротивление двухфазного испаряющегося потока в пористых материалах / В.А. Майоров // Известия Академии наук СССР. Энергетика и транспорт. – 1980. - № 5. - С. 126 – 133.
2. Шейдеггер А. Физика течения жидкостей через пористую среду / А. Шейдеггер. М.: Гостоптехиздат, 1960. - 250 с.
3. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика / И.А. Чарный. - М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы (Гостоптехиздат), 1963. - 396 с.
4. Lockhart R.W. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes / R.W. Lockhart, R.C. Martinelli // Chemical Engineering Progress. - 1949. - v.45. - pp.39-48.
5. Зейгарник Ю.А. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористых структур при адiabатическом движении пароводяных смесей / Ю.А. Зейгарник, И.В. Калмыков // Теплофизика высоких температур. - 1985. - Т.23. - № 5. - С. 934 – 940.
6. Chisholm D. Prediction of pressure gradient in pipeline system during two-phase flow / D. Chisholm, Sutherland L.A. // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1969. – V. 184. - Pt. 3c. – P. 24-32.
7. Поляев, В.М. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов / В.М. Поляев, В.А. Майоров, Л.Л. Васильев. - М.: Машиностроение, 1988. - 168 с.
8. Косторнов, А.Г. Проницаемые волокновые пористые материалы / А.Г. Косторнов. – К.: Техніка, 1983. – 128 с.
9. Белов, С.В. Пористые металлы в машиностроении / С.В. Белов - М.: Машиностроение, 1981. – 247с.
10. Пористые проницаемые материалы: справ. изд. / Под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия, 1987. – 335 с.

*Рекомендовано до друку проф. Давидовим С.А.*

УДК [622.648.22:622.693.4].001.57

*Е.В. Семененко, Е.С. Лапшин, д-ра техн. наук, С.Н. Киричко*

*(Україна, г. Дніпропетровськ, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України)*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗНАПОРНОГО ТЕЧЕНИЯ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ПУЛЬПЫ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ПАСТЫ

Безнапорные течения пульп с концентрацией пасты (ПКП) в технологиях обогащения минерального сырья (ТОМС) возможны по наклонной плоскости, лоткам и произвольной поверхности сложной геометрии, обладающей геодезической разностью отметок. Безнапорное течение по наклонной плоскости реали-

зуються при випуску пульпы з трубопроводу в хвостохранилище. В залежності від геометричних характеристик трубопроводів і відстаней між ними, реалізується плоске течення або ж радіальне (истечение з точечного джерела). Для умов ТОМС найбільше розповсюдження отримали лотки прямокутної форми, в ряді випадків впливом бокових стінок на параметри течення можна пренебрати. При такому допущенні течення в лотці аналогічно теченню по нахилній площині. Поверхності складної геометрії застосовуються звичайно в обогатительних апаратах. Однак потоки пульпы розглядаваної концентрації в обогатительних апаратах не використовуються, оскільки це виключає сепарацію.

В роботі [1] досконально виконаний огляд методів, направлених на виявлення закономірностей безнапорного течення неньютоновських серед. Важливо відзначити, що рішення отримані в вигляді складних нелінійних функцій, встановлюючих зв'язок між витратом і параметрами потоку. Тому, щоб визначити, яка глибина потоку забезпечує потрібний витрат пульпы, доводиться додатково використовувати чисельні методи, що ускладнює аналіз і синтез ТОМС.

В цій зв'язі метою роботи – розробка математичної моделі, описуючої в явній формі вплив на глибину потоку витрату пульпы і її реологічних характеристик пульпы.

Розглянемо встановившеся безнапорне течення пульпы по нахилній площині 1, нахилній під кутом  $\varphi$  до горизонту (рис. 1). Площина має неограничену ширину (розмір по нормалі до рисунку). В відмінність від потоків пульпы малих концентрацій, для яких можливі режими течення з високонцентраційним придонним шаром, течення ПКП характеризуються наявністю в потоці двох областей з порушеною 2 і ненарушеною 3 структурою серед. В області з ненарушеною структурою серед веде себе як тверде тіло, тут відсутні деформації сдвига. Фактично це шар, який ковзає по певній «смазці», якою є область порушеної структури. В цій області ПКП проявляє властивості рідини з ефективною в'язкістю, в якій мають місце сдвигові деформації і існують касательні напруження, описувані законом Бінгама-Шведова [1 – 7].

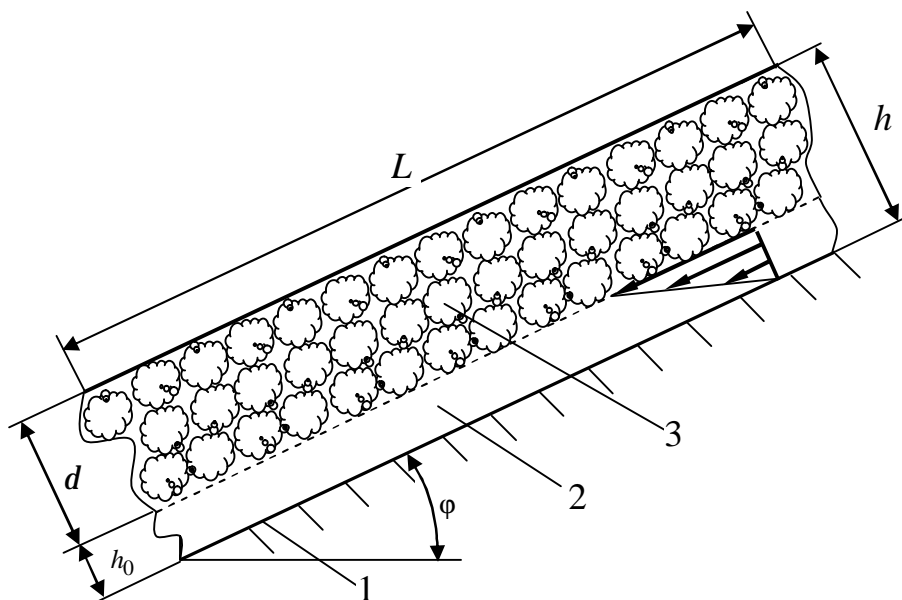


Рис. 1. Расчетная схема безнапорного течения пульпы с концентрацией пасты

При безнапорном теченні по нахилній площині об'ємний витрат (на одиницю ширини площини) ПКП визначається по формулі [6]

$$Q = \frac{\tau_0}{h} \left( h^2 - \frac{3}{2} h h_0 + \frac{1}{2} h_0^2 \right); \quad h_0 = \frac{1,054 \tau_0}{\rho g \sin j}; \quad \sin j = \frac{\Delta Z}{L}, \quad (1)$$

де  $Q$  – об'ємний витрат ПКП;  $\tau_0$  – напруження при початковому сдвигу (ННС);  $\eta$  – ефективна в'язкість;  $h$  – глибина потоку;  $h_0$  – висота шару з порушеною структурою;  $L$  – довжина площини;  $\rho$  – густина пульпы;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\Delta Z$  – різниця геодезических висот початку і кінця розглядаваної площини.

Виразення (1) перетворюється в квадратне рівняння відносно глибини потоку рішення, якого має вигляд (рис. 2)

$$x = \frac{3}{4} + \sqrt{\frac{1}{16} + \omega}; \quad (2)$$

$$x = \frac{h}{h_0}; \quad w = \left( \frac{rgh_M \sin j}{1,054t_0} \right)^2; \quad h_M = \sqrt{\frac{\eta Q}{\tau_0}},$$

где  $x$  – относительная глубина потока;  $\omega$  – безразмерный расход пульпы;  $h_M$  – минимально возможная глубина потока.

Если требуется определить необходимый уклон плоскости, который при рассматриваемых  $\tau_0$  и  $\eta$  обеспечит заданный расход пульпы и глубину потока, то выражение (1) переписывают как уравнение относительно величины  $h_0$  решение которого имеет вид (рис. 3)

$$h_0 = \frac{h}{2} \left( 3 - \sqrt{1 + 8 \left( \frac{h_M}{h} \right)^2} \right). \quad (3)$$

Полученные формулы для определения параметров безнапорного течения ПКП ввиду нелинейности не позволяют явно выделить факторы и исследовать закономерности их влияния. Перейдя в формуле (2) к размерным величинам и учитывая ее структуру, зависимость глубины потока от расхода пульпы может быть записана так:

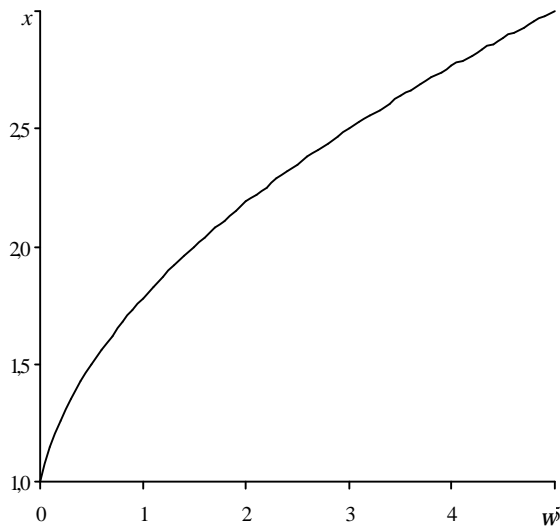


Рис. 2. Зависимость относительной глубины потока от безразмерного расхода пульпы

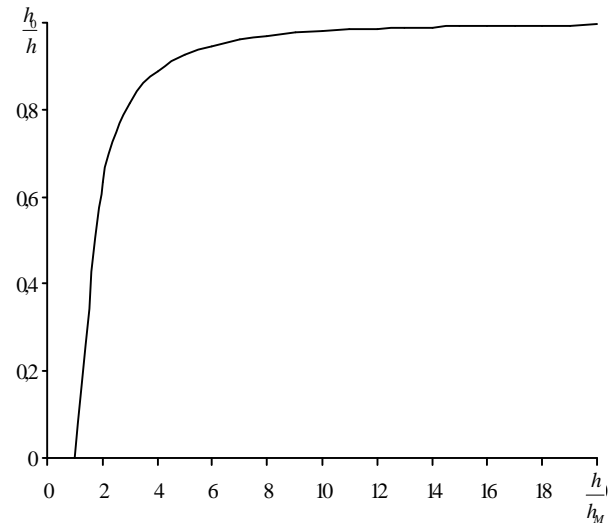


Рис. 3. Зависимость относительной высоты слоя пульпы с нарушенной структурой  $h_0/h$  от безразмерной глубины потока  $h/h_M$

$$h = m\sqrt{\omega}h_0; \quad m = \frac{3}{\sqrt{16\omega}} + \sqrt{1 + \frac{1}{16\omega}}, \quad (4)$$

где  $m$  – коэффициент расхода (рис. 4).

Результаты численного анализа зависимости  $m(\omega)$  (см. рис. 4) показывают, что формулу (4) с инженерной точностью (коэффициент детерминации 0,9513) можно аппроксимировать следующей степенной функцией:

$$m = \frac{1,841}{\omega^{0,188}},$$

а поэтому зависимость (4) может быть записана так:

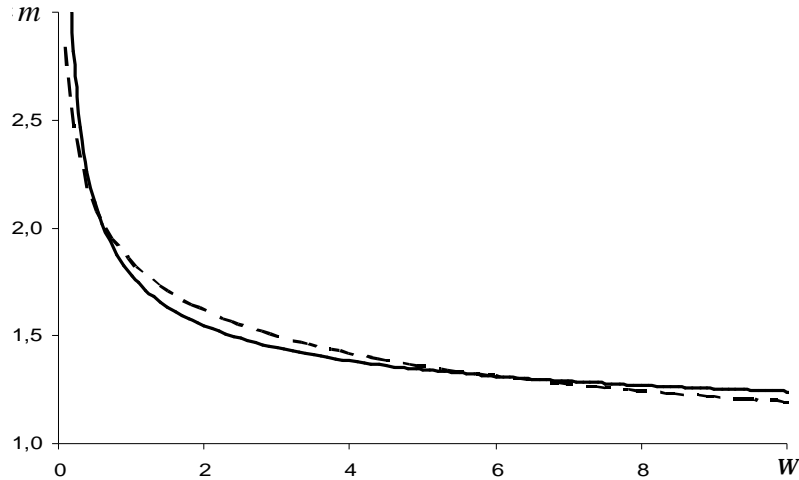


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $m$  от величины безразмерного расхода пульпы: сплошная кривая, полученная теоретически, пунктирная – в результате аппроксимации

$$h = \left( \frac{5,345t_0}{rg \sin j} \right)^{0,376} \left( \frac{hQ}{t_0} \right)^{0,312}. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет явно выделить факторы, влияющие на глубину безнапорного потока ПКП по наклонной плоскости, и исследовать закономерности этого влияния: зависимость глубины от напряжения при начальном сдвиге, объемного расхода и эффективной вязкости описывается степенной функцией с положительным дробным показателем, а зависимость от синуса угла наклона плоскости, по которой осуществляется течение, описывается степенной функцией с отрицательным дробным показателем.

Еще одним параметром, характеризующим рассматриваемое течение, является толщина недеформируемого слоя (поток с ненарушенной структурой), которая вычисляется как разница глубины потока и высоты подвижного слоя (поток с нарушенной структурой):

$$d = h - h_0 = \left( 1,841 \left( \frac{hQ}{t_0} \right)^{0,312} \left( \frac{rg \sin j}{1,054t_0} \right)^{0,624} - 1 \right) \frac{1,054t_0}{rg \sin j}, \quad (6)$$

где  $\delta$  – толщина недеформируемого слоя.

Результаты численного анализа зависимости величина  $\delta$  от расхода, реологических характеристик и плотности пульпы, а также угла наклона плоскости течения показывают, что формулу (6) с инженерной точностью (коэффициент детерминации 0,9967) можно аппроксимировать степенной функцией вида

$$d = 0,757 \left( \frac{hQ}{t_0} \right)^{0,6} \left( \frac{rg \sin j}{1,054t_0} \right)^{0,2}. \quad (7)$$

Таким образом, из математической модели (1) – (7) следует, что основными факторами, влияющими на параметры безнапорного течения пульп с концентрацией пасты по плоскости, являются реологические характеристики пульпы, такие как эффективная вязкость и напряжение при начальном сдвиге. Показано, что высота подвижного слоя пульпы, в котором происходит нарушение структуры вязко-пластичной среды, прямо пропорциональна начальному касательному напряжению, обратно пропорциональна плотности пульпы и синусу угла наклона плоскости. Впервые установлено, что зависимость глубины течения пульпы от начального напряжения сдвига, объемного расхода и эффективной вязкости описывается степенной функцией с положительным дробным показателем, а от синуса угла наклона плоскости – степенной функцией с отрицательным дробным показателем. При этом зависимость толщины недеформируемого слоя пульпы от синуса угла наклона плоскости, объемного расхода и эффективной вязкости описывается степенной функцией с положительным дробным показателем, а от начального напряжения сдвига – степенной функцией с отрицательным дробным показателем.

## Список литературы

1. Haldenwang, R. The flow of Non-Newtonian fluids in open channels / R. Haldenwang. – Cape Town: Cape Technikon, 2003. – 384 p.
2. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон – М.: Мир, 1964. – 155 с.
4. Яхно, О.М. Основы реологии полимеров / О.М. Яхно, В.Ф. Дубовицкий. – К.: Вища шк., 1976. – 188 с.
5. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
6. Киричко, С.Н. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей в условиях предприятий Кривбасса / С.Н. Киричко // Геотехн. механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2012. – Вып. 103. – С. 101 – 106.
7. Александров, В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В.И. Александров. – С.Пб.: СПГТИ (ТУ), 2000. – 117 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Четвериком М.С.*

УДК 622.648[621.643.29:678.742.2].001.24

*А.И. Нестеренко, д-р физ.-мат. наук, Л.Г. Татарко  
(Украина, г. Днепропетровск, ДГХТУ МОНС Украины)*

*Е.В. Семененко, д-р техн. наук*

*(Украина, г. Днепропетровск, ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)*

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводы из полиэтилена высокой плотности ПЭ 100 за последние десять лет хорошо зарекомендовали себя в водопроводных и газовых сетях, где они составили серьезную конкуренцию стальным трубопроводам. Это послужило предпосылкой для применения этих труб в системах горного производства, на открытых горных работах и в пределах промплощадки горно-обогатительных комбинатов, как для транспортировки воды, так и для транспортировки гидросмесей [1 – 5]. Известные методики расчета гидравлического уклона при течении воды в полиэтиленовых трубопроводах (ISO TR 10501, СНиП 2.04.02-84, СП 40-102-2000) позволяют обоснованно рассчитать диаметр и другие параметры магистрали [6 – 8]. Однако для систем, транспортирующих гидросмеси, подобные методики не утверждены, кроме того, до недавнего времени известны примеры использования труб из полиэтилена для замены части магистрали гидротранспортных комплексов, что не требует обоснования величины диаметра трубопровода [3 – 5, 9]. Применение такого вида труб вместо стальных для всей магистрали систем водоснабжения или гидротранспорта сдерживается отсутствием научно обоснованных методов расчета, учитывающих меньший по сравнению с стальными трубами запас по прочности.

Целью статьи является разработка методики проектировочного расчета параметров трубопроводных систем горного предприятия, подающих воду и гидросмеси по магистралям из полиэтиленовых труб.

Проектировочный расчет проводится с целью определения величины диаметра трубопровода и показателей назначения насосов (суммарного напора и мощности насосов), необходимых для обеспечения регламентированных параметров и режимов работы. При проектировочном расчете системы водоснабжения накладываются ограничения на скорость и давление потока, которые не должны превышать допустимых значений [7, 8, 10]:

$$V \leq [V], \quad P \leq [P], \quad (1)$$

где  $V$  – скорость течения жидкости по трубопроводу;  $[V]$  – максимально допустимая скорость потока;  $P$  – давление потока в трубопроводе;  $[P]$  – максимально допустимое давление потока.

При расчете гидротранспортного комплекса к ограничениям (1) добавляется условие реализации сверхкритического режима течения, которое для фактического диаметра трубопровода является критическим значением [2, 11 – 13], т.е.

$$D \leq D_{кр}, \quad (2)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубопровода;  $D_{кр}$  – критический диаметр трубопровода, обусловленный требованием сверхкритического режима течения [11 – 13].