

Список литературы

1. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. – М.: Химия, 1975. – 264 с.
2. Зонтаг Г., Штрэнге К. Коагуляция и устойчивость дисперсных систем. – Л.: Химия, 1973. – 150 с.
3. Е.И. Назимко, И.Н. Друц. Исследование кинетики взаимодействия фаз в динамической среде при обогащении минералов // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. – 2004. – №1. – С. 336–339.
4. Е.И. Назимко, И.Н. Друц. Исследование кинетики взаимодействия мелких частиц с пузырьками воздуха в процессе флотации // Обогащение полезных ископаемых. Днепропетровск. – 2003. – Вып. 18(59). – С. 95–102.
5. К.В. Зотова, А.А. Трапезников. Исследования двухсторонних пленок, образованных из аэрозоля МА с добавками желатины // Коллоидный журнал. Т. 27. – 1965. – №2. – С. 197–202.
6. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. – М-Л.: Химия, 1974. – 352 с.
7. О.Г. Тараканов, А.И. Демина, Е.Г. Дубяга. О структурообразовании в пленках неводных пен как факторе их стабилизации // Докл. АН СССР. – 1965. – Т.163, №3. – С. 684–685.
8. Н.В. Сухин, Е.И. Зозуля. Экспериментальное исследование вязкости двухфазных пен // Обогащение полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1978. – Вып. 23. – С. 67–71.

© Назимко Е.И., Друц И.Н., Серафимова Л.И.,
Звягинцева Н.А., Шевченко Ю.В., 2005

*Надійшла до редколегії 10.10.2005 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Піловим П.І.*

УДК 622.77

В.И. КРИВОЩЕКОВ, канд. техн. наук,

О.А. ЕРМАК

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

К СТРУКТУРЕ ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ

Развитие флотационной технологии углей, рудного и нерудного минерального сырья в основном зависит от совершенствования процессов флотации и удаления пенного продукта из камеры флотомашин.

Для удаления минерализованной пены известно много конструкций гребков [1].

По мнению авторов [2] повысить качество угольного флотоконцентрата

наиболее рационально за счет снижения зольности и увеличения плотности пенного продукта путем его обезвоживания. При этом пеноносное приспособление оснащается дуговыми лопастями, выполненными из шпальтовых колосников. Необходимое расстояние 3–5 мм между колосниками для снижения зольности флотоконцентрата на 3–4% и повышение плотности до 500–550 кг/м³ установлено в период опытно-промышленных испытаний в условиях одной из фабрик Кузбасса и лаборатории КузНИИУглеобогащение.

Обезвоживание пенного продукта с целью повышения плотности и качества флотоконцентрата возможно и на колосниковых ситах, размещенных в боковых пенных желобах с патрубками для отвода обезвоженного флотоконцентрата и подрешетного продукта.

По сравнению с результатами флотации угольного шлама ЦОФ "Добропольская" без обезвоживания и с обезвоживанием на сите с отверстиями 3 и

5 мм при угле наклона менее 45° к горизонтальной плоскости во втором случае флотоконцентрат получен более плотный (с содержанием твердого 480–520 кг/м³) с пониженной на 2,9–3,5% зольностью.

При обезвоживании пенного продукта флотации рудного и нерудного минерального сырья ширина щелевого канала (размер отверстий) сит также должна превышать максимальный размер зерен флотоконцентрата.

В работе [3] исследовались некоторые особенности пенного потока, что связано с обоснованием гидродинамической модели обезвоживания в устройствах с щелевыми каналами для повышения эффективности технологии флотации полезных ископаемых.

Щелевые каналы применяют не только для реализации обезвоживания, они необходимы и для осуществления процессов гидрогрохочения, классификации и гидросепарации [4].

Цель данной работы – исследование потока вязкой жидкости в щелевом канале.

При расчете гидродинамических и массообменных характеристик между потоком жидкости и твердой стенкой канала существенное влияние на структуру потока оказывает режим течения и геометрия стенок канала. При решении таких задач из-за трудностей математического характера преобладают экспериментальные методы.

Сен-Вананом экспериментально исследован ламинарный режим течения жидкости в трубах прямоугольного сечения и получены следующие основные результаты [5]:

– число Рейнольдса

$$Re = \frac{Uab}{(a+b)\nu};$$

– коэффициент сопротивления

$$\lambda = \frac{16}{\text{Re}} \frac{8 \frac{a}{b}}{\left(1 + \frac{a}{b}\right)^2 k};$$

– средняя скорость жидкости

$$U = \frac{P_1 - P_2}{64L\mu} k;$$

– расход жидкости

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{16L\mu} abk,$$

где ν , μ – коэффициенты кинематический и динамический вязкости;

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{L} \quad \text{– падение давления на единицу длины.}$$

Величина k зависит от отношения сторон прямоугольного сечения канала a/b следующим образом

a/b	1	1,25	2	4	10	∞
k	2,249	2,198	1,830	1,123	0,5	0

В работе [6] исследовано установившееся двухмерное течение жидкости в расширяющейся щели колосникового сита тонкого грохочения. Ширина щели 0,1...0,2 мм, угол α между боковыми гранями соседних колосников, образующих щель, равен 10° . В щели возникает градиент давления, поскольку на входе в нее давление определяется глубиной потока, а на выходе оно равно атмосферному. Расход жидкости через щель сита пропорционален перепаду давлений, который для не очень высокой скорости транспортирования суспензии по ситу может рассматриваться как гидростатическое давление слоя.

Получены зависимости для распределения скорости, градиента давления и расхода жидкости через щель сита. При этом принято, что скорость вдоль линий тока изменяется медленно, а из полученного выражения

$$\frac{U}{U_0} = \frac{\cos 2\varphi - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}; \quad \varphi = \pm \alpha / 2$$

видно, что распределение скорости по ширине расходящегося потока для безинерционного течения жидкости не зависит от коэффициента вязкости.

Авторами экспериментально установлено в щелевом канале с зазором 3 мм и более наличие гармонических колебаний жидкости и выполнена их качественная оценка.

Рассмотрим более общий случай: течение вязкой жидкости напорное, зазор между стенками канала H достаточно мал по сравнению с его характерной длиной L , а по оси канала имеют место гармонические колебания. Число Рейнольдса будем полагать $Re \ll 1$.

Принципиальная схема качественного характера течения вязкой жидкости в щелевом (плоском) канале приведена на рисунке.

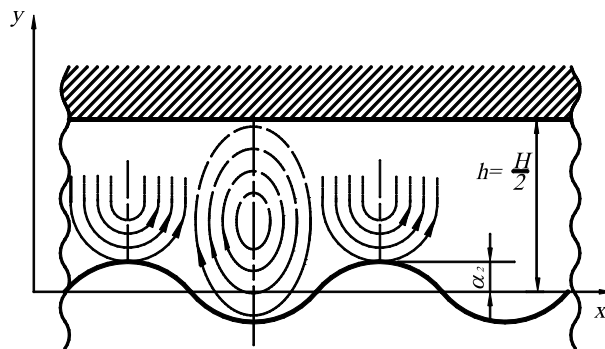


Схема течения вязкой жидкости в щелевом канале

Выделим в непосредственной близости к стенке канала, т.е. сразу за слоем прилипания, ламинарный подслой, за ним – зону основного напорного течения, а далее – ближе к оси канала центральную часть потока.

Закон движения центральной части потока, уравнения стенки канала и центральной части потока представим уравнениями вида:

$$x_t = x_0 + a \sin \omega t;$$

$$y_0 = h = \text{const};$$

$$y_c(x, t) = \bar{e} \sin k(x - a \sin \omega t),$$

где a , \bar{e} – амплитуды осцилляций центральной части потока и ее волновой поверхности; k – волновое число; ω – частота.

Введем безразмерные параметры:

$$\alpha = hk; \alpha_1 = ak; \alpha_2 = \bar{e} / h; \alpha_3 = k \Delta P / \rho a \omega^2; \alpha_4 = \nu k^2 / \omega,$$

где ρ , P – плотность и давление жидкости.

В этом случае уравнения Стокса, неразрывности и граничные условия следующие:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial t} &= -\alpha_3 \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_4 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= -\frac{\alpha_3}{\alpha^2} \frac{\partial P}{\partial y} + \alpha_4 \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial V}{\partial y} &= 0;\end{aligned}\tag{1}$$

$$y = \alpha_2 \sin(x - \alpha_1 \sin t); V = 0; U = \text{const};$$

$$y = l; V = U = 0.$$

Очевидно, для нулевого приближения, т.е. для гладкой стенки ($\alpha_2=0$; $V=0$) продольная скорость U – результирующая основного напорного и осциллирующего профилей скоростей. По физическому смыслу решение соответствует аналогичным известным, например, параллельному движению вязкой жидкости в зазоре между движущимися с постоянными скоростями верхней и нижней стенками [7].

Рассмотрим эффекты первого приближения, т.е. проявление "волнистости" центральной части потока с определенными гармоническими колебаниями. Первое приближение для U и P находится в виде системы уравнений (1), где $U = U_1$; $V = V_0$. Граничные условия на стенке

$$y = l; V_0 = U_1 = 0,$$

а для центральной части потока продольная и поперечная составляющие скорости в соответствии с работой [8] запишутся как:

$$U(y_c) = U(0) + \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_0 y_c + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right|_0 y_c^2 + \dots;$$

$$V(y_c) = V(0) + \left. \frac{\partial V}{\partial y} \right|_0 y_c + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right|_0 y_c^2 + \dots$$

Поскольку все искомые функции U_1 , V_0 , P_1 являются периодическими по x и t , то решение следует искать в виде двойных комплексных рядов Фурье [9], где суммирование проводится по целым числам от $-\infty$ до $+\infty$.

В качестве примера рассмотрим предельный случай высокочастотных и низкочастотных гармонических колебаний центральной части потока.

Для высокочастотных гармонических колебаний

$$\alpha_4 = \frac{vk}{\omega} \ll 1; \quad \alpha_3 = \frac{k\Delta P}{\rho a \omega^2} \ll 1; \quad \alpha_4 \sim \alpha_3.$$

При этих условиях профиль скорости основного напорного течения в нулевом приближении

$$U_0 = \frac{k\Delta P}{2\mu} y(y-h) + a\omega e^{-\frac{y}{h\sqrt{2\alpha_4}}} \cos\left(\frac{y}{h\sqrt{2\alpha_4}} - \omega t\right). \quad (2)$$

Амплитуда осциллирующего течения, наложенная на профиль скорости основного напорного течения, затухает при удалении от колеблющейся центральной части потока с глубиной проникновения порядка $h\sqrt{2\alpha_4}$ и длиной осцилляций $2\pi h\sqrt{2\alpha_4}$.

Вдоль профиля скорости напорного течения "бежит" волна с фазовой скоростью

$$V_\varphi = \sqrt{2\nu\omega}.$$

Вблизи "волнистой" движущейся центральной части потока появляется циркуляционно-периодическое (см. рисунок) течение, которое переходит в основное, не достигая стенки канала.

Следовательно, в целом напорный поток жидкости в плоском канале представляет собой сложную гидродинамическую структуру, а именно: на профиль скорости напорного движения наложена "бегущая" волна с периодическим возмущением от центральной части потока в виде высокочастотных "качающихся" циркуляционно-периодических течений. Очевидно, что интенсивность "качающихся" циркуляций невелика.

Для низкочастотных гармонических колебаний центральной части потока

(предельного случая), т.е. когда $\alpha_4 \gg 1$, $\alpha_3 \gg 1$, $\alpha_1 \ll 1$ получим решение для продольной и поперечной составляющих скорости потока вязкой жидкости и давления.

Качественный характер этого течения тот же, что и для случая высокочастотных колебаний (2). Однако нестационарные эффекты здесь проявляются слабее. На "выпуклостях" и "вогнутостях" центральной части потока течение слоистое. В нулевом приближении профиль скорости основного напорного течения корректируется практически с линейным по глубине законом распределения скорости, на который наложены эффекты первого приближения.

Таким образом, эффекты первого приближения ("волнистость" центральной части потока) проявляются в виде возмущения основного напорного течения вязкой жидкости нестационарными гармоническими колебаниями определенной частоты и амплитуды.

Список литературы

1. **Мещеряков Н.Ф.** Кондиционирующие и флотационные аппараты и машины. – М.: Недра, 1990. – 237 с.
2. А.с. СССР № 1659109, ВОЗД 1/14. Флотационная машина / Я.С. Гольдберг, В.И. Кривошеков и Т.М. Бразинская. – Опубл. 30.06.91, Бюл. Открытия. Изобретения № 24.
3. **Кривошеков В.И., Ермак О.А.** К определению коэффициента гидравлического сопротивления пенного потока // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 22(63). – С. 82–85.
4. **Кривошеков В.И.** Тонкослойная гидросепарация минеральных зерен // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2000. – Вип. 8(49). – С. 86–90.
5. **Рабинович Е.З.** Гидравлика. – М.: Недра, 1974. – 296 с.
6. **Сансиев В.Г.** Течение жидкости через щель колосникового сита тонкого грохочения // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2004. – Вип. 20(61). – С. 88–94.
7. **Слезкин Н.А.** Динамика вязкой жидкости. – М.: ГИТТЛ, 1955. – 520 с.
8. **Ван-Дейк М.** Методы возмущений в механике жидкости. – М.: Мир, 1967. – 310 с.
9. **Колмогоров А.Н., Фомин С.В.** Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1977. – 542 с.

© Кривошеков В.И., Ермак О.А., 2005

*Надійшла до редколегії 15.11.2005 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. О.Д. Полуляхом*