

УДК 622.7

**Ж. Цэвээнжав, Б. Алтантуяа, Б. Батбаяр**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА  
ГИДРОТРАНСПОРТА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ  
ПУЛЬПЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ РУДУ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОЛОН-ОВООТ**

*Выполнена исследовательская работа по измерению реологических элементов в пульпах с различными плотностями в целях конкретизации расчета энергетической необходимости гидротранспорта пульп и других гидравлических операций.*

*Ключевые слова: гидротранспорт, пульпа, скорость сдвига, реологические свойства, плотность пульпы.*

---

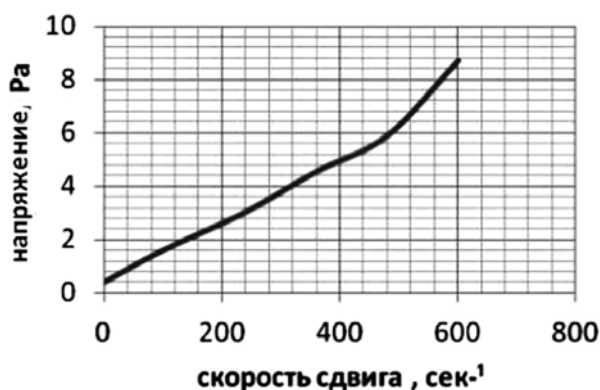
**Д**анная работа выполнялась в процессе проектирования обогатительной фабрики по извлечению золота на месторождении Олон-Овоот в районе южной Монголии. Основной технологией приняли чановое выщелачивание. Основной массой породообразующих компонентов является кварцдиоритовое рудное тело. Золото распределяется незначительно в свободной форме и, в основном, в пирите, который имел частично окисленный вид в верхних горизонтах месторождения. С целью конкретизирования расчета энергетической необходимости гидротранспорта пульп и других гидравлических операций, проводились лабораторные исследования реологического свойства пульпы образованной рудным материалом данного месторождения.

Исследовательская работа выполнена в Канадской лаборатории «Lakefield». Измерения реологических элементов проводились в пульпах с различными плотностями. Исследования показали, что текстропическое свойство пульп незначительно. Следовательно выводы о реологических свойствах пульпы можно сделать, ис-

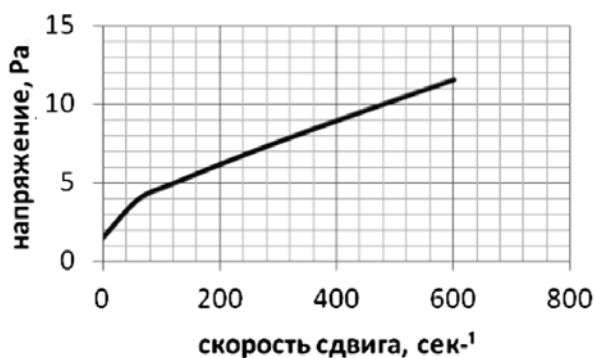
ходя из свойств первичных пульп, неподверженных сдвигу. Результаты реологических измерений пульп, введенных в лаборатории «Lakefield», показаны на рисунках.

Форму реологического характера пульпы (см. рисунки), образованной рудой Олон-Овоот, можно считать Бингамовской моделью в случае скорости сдвига выше  $50 \text{ сек}^{-1}$ . А в процессах гидротранспортных операций технологии выщелачивания скорости сдвига выше  $50 \text{ сек}^{-1}$ . Измерения реологических свойств пульпы проводились отдельно для различных плотностей.

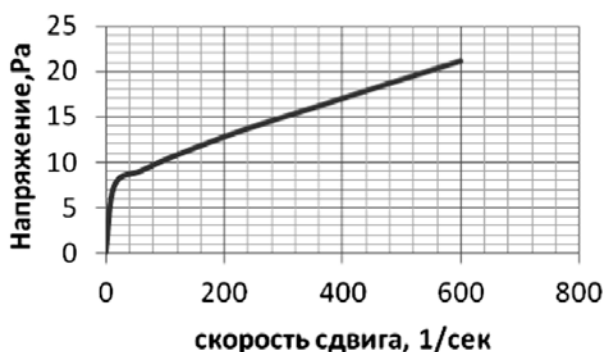
Пульповое состояние в операциях обогатительных фабрик изменяется в широких пределах относительно плотности. Поэтому отдельно измеренный результат реологического поведения пульпы данной плотности невозможно сравнить с другим состоянием пульпы другой плотности. Это обстоятельство с точки зрения теории не дает возможности отыскать критические точки реологических свойств пульпы и оптимизировать энергетическое состояние гидротранспорта. Для решения этой задачи потребовалось вывести обобщенную математическую модель реологического поведения, которая могла бы быть отне-



**Рис. 1. Зависимость напряжения и скорости сдвига при плотности пульпы 45,56 %**



**Рис. 2. Зависимость напряжения и скорости сдвига при плотности пульпы 50,61 %**



**Рис. 3. Зависимость напряжения и скорости сдвига при плотности пульпы 55,73 %**

сена к реологическому состоянию пульпы любой плотности.

В результате математической обработки данных исследовательской работы реологических свойств, была получена следующая реологическая модель. Эта модель представлена как непрерывная функция зависимости напряжений от скорости сдвига при определенной объемной плотности.

$$\tau = 0,0038199e^{24,5427646C} + 0,000924e^{9,732C} \frac{dv}{dr}, \quad (1)$$

где:  $\tau$  – напряжение, Па,  $C$  – объемная концентрация твердого пульпы, %,  $\frac{dv}{dr}$  – скорости сдвига сек<sup>-1</sup>.

Если характер реологического поведения пульпы, включающей руду Олон-Овоот, представить Бингамовской моделью, то можно выдвинуть следующее теоретическое предположение. Не усложняя объяснения допустим, что движение пульпы происходит в горизонтальных трубах и форма течения гомогенная. Тогда мощность энергии, необходимой для течения пульпы, можно представить в следующем виде:

$$N = \frac{4\tau L V_m}{D}, \quad (2)$$

где  $N$  – потребная мощность для течения пульпы,  $\tau$  – напряжение,  $L$  – дли-

на трубы,  $V_m$  – объемная производительность пульпы,  $D$  – диаметр трубы. Если вместо  $\tau$  подставить (1), получим

$$N = \frac{4 \cdot 0,0038199 e^{24,5427646C} L V_m}{D} + \frac{4 \cdot 000924 e^{9,732C} \frac{dv}{dr} L V_m}{D} \quad (3)$$

Если заменить скорость сдвига у стены трубы значением  $\frac{8v}{D}$ , так же  $v$  заменить значением  $\frac{4V_m}{\pi D^2}$ , вместо  $V_m$

подставить значение  $\frac{Q}{C\rho_s}$ , то после алгебраического преобразования получим

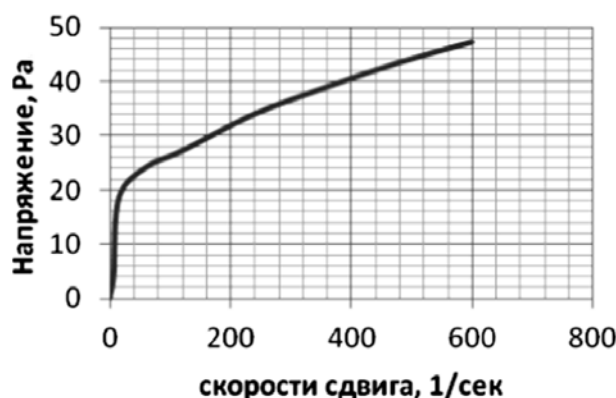
$$N = \left( \frac{4 \cdot 0,0038199 e^{24,5427646C}}{D} + \frac{4 \cdot 000924 e^{9,732C} \frac{32Q}{\pi D^3 \rho_s C}}{D} \right) \cdot \frac{QL}{C\rho_s}, \quad (4)$$

где  $N$  – потребная мощность для течения пульпы;  $L$  – длина трубы;  $C$  – объемная концентрация твердого компонента пульпы;  $Q$  – производительность по твердому;  $D$  – диаметр трубы;  $\rho_s$  – удельный вес твердого компонента.

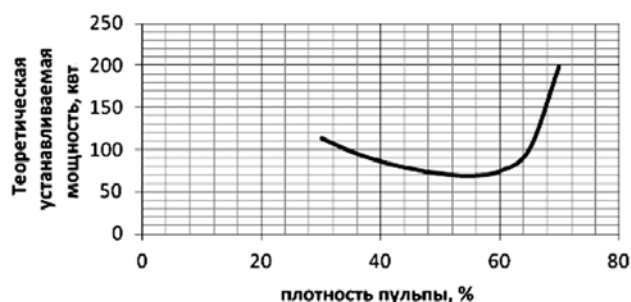
В конкретных ситуациях для обеспечения стабильности условий все значения кроме  $C$  считают постоянными параметрами,  $N$  можно представить как функцию, зависящую только от  $C$ . То есть  $N = f(C)$ . Это обстоятельство дает возможность найти критические точки и оптимальные энергетические условия для гидротранспорта и движения пульп для пульпы любой плотности. Математически это можно определить из дифференциального уравнения с участием интересующих нас параметров.

$$\tau(C) \rightarrow \min \Rightarrow \frac{d\tau(C)}{dC} = 0. \quad (5)$$

С помощью (5) можно определить наименьшее напряжение в поперечном сечении трубы при движении по ней пульпы в зависимости от плотности пульпы.



**Рис. 4. Зависимость напряжения и скорости сдвига при плотности пульпы 60,86 %**



**Рис. 5. Зависимость устанавливаемой мощности гидротранспорта от плотности пульпы**

$$УЭЗ \rightarrow \min \Rightarrow \frac{d \frac{N(C)}{Q}}{dC} = 0. \quad (6)$$

С помощью (6) можно найти удельную энергетическую затрату (УЭЗ) в зависимости от плотности пульпы. Решая уравнение (5) относительно объемной концентрации, рассчитали, что при ее значении 0,08 или 18 % -ном содержании по плотности твердого, напряжение в поперечном сечении течения пульпы в трубе диаметром 200 мм будет наименьшим. Данное обстоятельство является чисто теоретическим заключением (на практике оно может оказаться неоптимальным).

Теоретическая графоаналитическая информация об энергопотреблении гидротранспорта с учетом конкретных проектных данных в цикле измельчения приведена на рис. 5.

Графоаналитический метод показал хорошее соответствие практическим результатам. При пусконаладочных работах потребляемая мощность

в двигателе у зумпфа насоса, качающего-гося на гидроциклон, колебалась в пределах 65–79 кВт. При плотности выше 65 % зумпф заливало за счет сильного увеличения напряжения в поперечном сечении течения пульпы.

### Выводы

1. Реологическое поведение пульпы, включающей породы рудного тела Олон-Овоот, можно представить моделью Бингама при значении скорости сдвига выше 50 сек<sup>-1</sup>.

2. Наименьшее теоретическое напряжение в поперечном сечении течения пульпы в трубе диаметром 200 мм при производительности 83 т/ч находится при 18% содержании твердого в пульпе.

3. Наименьшая удельная затрата энергии для гидротранспорта пульпы, включающей породы рудного тела Олон-Овоот, находится при плотности около 60 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abbas A.Zaman. Techniques in rheological measurements, Fundamentals and Applications. University of Florida. 1998.
2. A.Mezei. M.Ashbury and I.Todd. Rheological aspects of nickel hydrometallurgy. The minerals, metals, Society. 2000. – P. 451–468.
3. Б.Батбаяр., Ж.Цэвээнжав. Баяжуулах уйлдвэрийн зутангийн реологийн судалгааны асуудалд. Монгол орны 90-дмдлөгийн албаны тулгамдсан асуудлууд ЭШБХ-ын эмхэтгэл. Улаанбаатар 2008. – № 1/10. **ГИАБ**

### Коротко об авторах

Цэвээнжав Ж. – кандидат технических наук, профессор,  
Алтантуяа Б. – кандидат технических наук, доцент,  
Батбаяр Б. – аспирант,  
Монгольский государственный университет науки и технологий.

