Горное дело
Mining

УДК 622.794.502

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В.И.АЛЕКСАНДРОВ, *д-р техн. наук, профессор, alexvict@spmi.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия
ИРЖИ СОБОТА, *профессор, jerzy.sobota@up.wroc.pl*
Университет природопользования, Вроцлав, Польша

Проблема снижения энергопотребления при гидравлическом транспорте продуктов переработки минерального сырья является одной из самых важных в горной промышленности. Увеличение концентрации твердой фазы в перекачиваемом потоке гидросмеси приводит с одной стороны к уменьшению объемной производительности гидротранспортной системы, а с другой к увеличению потерь давления и необходимого напора для преодоления гидравлических сопротивлений. Проблема минимизации удельного расхода энергии при гидравлическом транспорте продуктов обогащения особенно актуальна в настоящее время, когда в горной промышленности наметилась тенденция гидравлического транспортирования гидросмесей высоких концентраций и паст.

В статье показано, что удельная энергоемкость в определяющей степени зависит от производительности системы гидротранспорта по твердому материалу и эта зависимость имеет экстремальный характер. При малых концентрациях твердых частиц для обеспечения необходимой производительности необходимо перекачивать значительные объемы оборотной воды, что приводит к большим затратам электроэнергии. С увеличением концентрации происходит снижение объемного расхода пульпы и удельной энергоемкости процесса. Процесс снижения энергоемкости протекает до некоторого критического значения концентрации, при достижении которой с дальнейшим увеличением концентрации энергоемкость процесса увеличивается.

***Ключевые слова*:** пульпа, твердые частицы, концентрация, удельная энергоемкость, грунтовый насос.

Анализ теоретических зависимостей потерь напора при гидравлическом транспорте сыпучих материалов, например, хвостов обогащения минерального сырья в горной промышленности, показывает, что с увеличением концентрации их величина возрастает. Увеличение концентрации всегда приводит к увеличению производительности по твердому материалу, что само по себе весьма положительно. Вместе с тем рост удельных потерь напора, а следовательно и потребной мощности, может снизить эффект от увеличения производительности в связи с ростом потребной энергии. При этом увеличение концентрации твердого материала приводит к уменьшению расхода гидросмеси. В связи с этим, величина мощности (энергии), определяемая произведением потребного давления и расхода, будет уменьшаться при росте концентрации до некоторого предельного значения, при достижении которого должен происходить рост мощности. Нахождение максимума концентрации твердого материала в потоке гидросмеси, которому будет соответствовать минимум потребной мощности, является важной научно-технической задачей, решение которой будет способствовать увеличению эффективности рабочего процесса и оборудования гидротранспортного комплекса.

Удельная энергоемкость определяется [1, 5] мощностью, расходуемой при транспортировании 1 т твердого материала на расстояние 1 км, и может быть рассчитана по формуле

$$e = \frac{N}{q_{\text{тв}} L}, \tag{1}$$

где N – мощность, затрачиваемая на транспортирование гидросмеси, кВт; $q_{\text{тв}}$ – производительность системы по твердому материалу, т/ч; L – длина трубопровода (расстояние транспортирования), км.

Мощность, затрачиваемая на транспортирование гидросмеси, определяется параметрами перекачиваемого потока гидросмеси и численно равна произведению объемного секундного расхода $Q_{\text{см}}$ гидросмеси и давления, достаточного для преодоления гидравлических сопротивлений p, т.е.

$$N = \frac{Q_{\text{см}} p}{1000} = \frac{Q_{\text{см}} \rho_{\text{см}} g H}{1000}, \tag{2}$$

где $p = \rho_{\text{см}} g H$ – рабочее давление, Па; $\rho_{\text{см}}$ – плотность транспортируемой гидросмеси, кг/м^3; H – потребный напор (удельная энергия) системы гидротранспорта, м, равный произведению удельных потерь $i_{\text{см}}$ напора на длину L трассы трубопровода.

Подставив соответствующее выражение для мощности, получим формулу (2) в следующем виде:

$$e = Q_{\text{см}} \frac{\rho_{\text{см}} g i_{\text{см}} L}{1000} \cdot \frac{1000}{3{,}6 q_{\text{тв}} L} = Q_{\text{см}} \frac{\rho_{\text{см}} g i_{\text{см}}}{3{,}6 Q_{\text{см}} \rho_{\text{тв}} c_{\text{тв}}} = \frac{\rho_{\text{см}} g i_{\text{см}}}{3{,}6 \rho_{\text{тв}} c_{\text{тв}}}. \tag{3}$$

Формула (3) показывает, что энергоемкость гидротранспортной системы зависит от величины концентрации твердых частиц в объеме транспортируемой гидросмеси. Формулу (3) можно представить в виде выражения

$$e = AB, \tag{4}$$

где $A = g/3{,}6\rho_{\text{тв}}$ – постоянный множитель, зависящий от плотности транспортируемых твердых частиц; $B = \rho_{\text{см}} i_{\text{см}} / c_{\text{тв}}$ – параметр, величина которого определяется концентрацией твердых частиц в объеме перекачиваемой гидросмеси, назовем его приведенной плотностью.

Комплекс B (приведенная плотность), имеющий размерность плотности, можно рассматривать, как критерий энергоемкости процесса гидравлического транспорта. Основной величиной, определяющей параметр B, является $i_{\text{см}}$ – потери напора, значение которых зависит от концентрации твердых частиц $c_{\text{тв}}$.

Приведенная плотность B зависит от соотношения величины расхода гидросмеси, определяемого концентрацией твердого материала, и значения необходимого (потребного) давления. Потребное давление является возрастающей функцией концентрации, а функция расхода – убывающей. Следовательно, кривые зависимости давления и расхода имеют единственное общее значение концентрации, которое в этом случае можно считать критическим значением $c_{\text{тв.кр}}$.

Для каждого вида гидросмеси, характеризующейся определенным гранулометрическим составом, необходимой производительностью по твердому материалу, имеется вполне определенная критическая концентрация. При концентрациях, меньших критической, потребная мощность гидротранспортной системы уменьшается с ростом концентрации. После достижения значения концентрации, равной критической, потребная мощность с дальнейшим ростом концентрации увеличивается.

На рис.1 приведены графические зависимости изменения расхода гидросмеси и потерь напора от величины концентрации, которые показывают, что обе кривые имеют общую характерную точку, соответствующую некоторому общему значению концентрации твердого материала.

Наличие критического значения концентрации твердого материала в объеме гидросмеси определяет минимальное значение приведенной плотности (параметра B). Кривые $Q(c_{тв})$ и $i_{см}(c_{тв})$ имеют общее решение, соответствующее критическому значению концентрации и минимальному значению приведенной плотности B как критерия энергоемкости, что подтверждается графиком зависимости энергоемкости от концентрации твердой фазы (рис.2).

Произведение расхода на потери давления определяет мощность процесса транспортирования, которая также будет иметь минимальное значение при достижении критической концентрации (рис.3).

Полученные теоретические зависимости по энергетическим затратам при течении гидросмесей по трубопроводам показывают, что всегда имеется некоторое предельное значение концентрации твердых частиц в объеме гидросмеси, при котором расходуемая мощность и удельная энергоемкость принимают наименьшие значения для заданных механических характеристик твердого материала. К таким характеристикам относятся гранулометрический состав твердых частиц, их крупность и плотность.

Покажем это на конкретном расчетном примере. Транспортируется 368 т/ч хвостов обогащения железной руды (Качканарский ГОК «Ванадий»). Плотность твердых хвостов 3450 кг/м^3. Длина гидротранспортного трубопровода 2 км. Необходимо определить концентрацию гидросмеси, соответствующую наименьшей энергоемкости процесса гидравлического транспорта.

Выразим расчетные параметры как функции концентрации.

Объемный расход пульпы

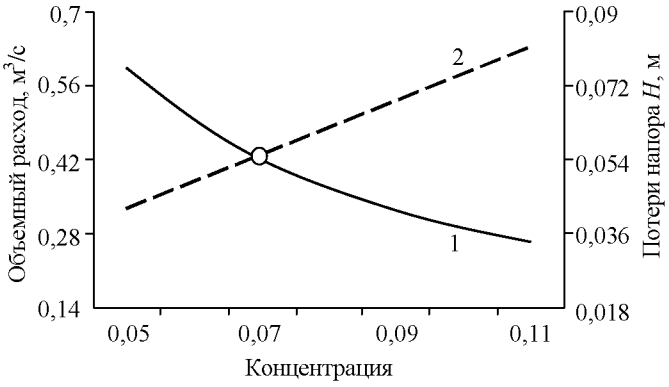


Рис.1. Графические зависимости расхода (1) и потерь напора (2) от концентрации твердой фазы

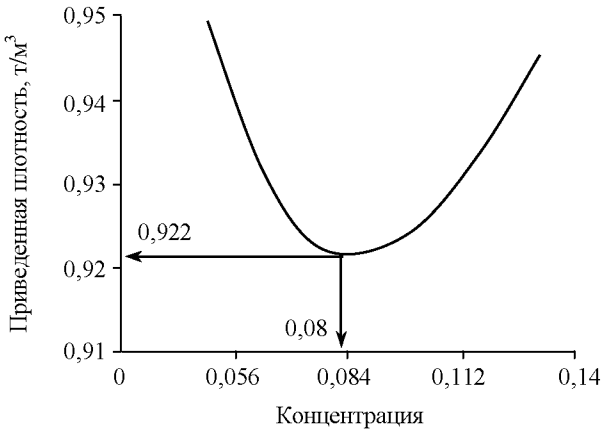


Рис.2. График изменения приведенной плотности от концентрации твердой фазы в объеме гидросмеси

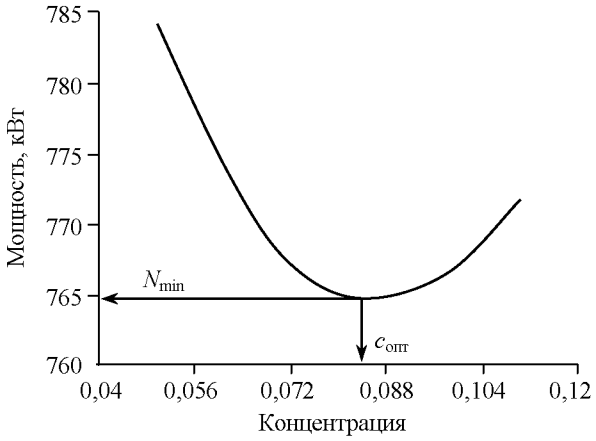


Рис.3. Зависимость мощности гидротранспорта от концентрации твердой фазы в потоке гидросмеси

$$Q = \frac{A_{тв}}{3600\rho_{тв}c_{об}} = \frac{368}{3600 \cdot 3{,}450c_{об}} = \frac{0{,}0296}{c_{об}}.$$

Диаметр трубопровода

$$D = 0{,}51 \cdot \left(\frac{q_{\text{тв}}}{c_{\text{об}}^{1{,}17} \rho_{\text{тв}}} \right)^{0{,}37} = 0{,}51 \left(\frac{368}{3600 \cdot 3{,}45 c_{\text{об}}^{1{,}17}} \right)^{0{,}37} = \frac{0{,}139}{c_{\text{об}}^{0{,}433}}.$$

Средняя скорость потока гидросмеси для принятого диаметра трубопровода

$$v_{\text{ср}} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0{,}0296}{c_{\text{об}} \pi} \left(\frac{c_{\text{об}}^{0{,}433}}{0{,}139} \right)^2 = \frac{1{,}95}{c_{\text{об}}^{0{,}134}}.$$

Критическая скорость

$$v_{\text{кр}} = 7{,}8 c_{\text{об}}^{0{,}17} \sqrt[3]{D} = 7{,}8 c_{\text{об}}^{0{,}17} \sqrt[3]{\frac{0{,}139}{c_{\text{об}}^{0{,}433}}} = 4{,}04 c_{\text{об}}^{0{,}026}.$$

Соотношение критической и средней скорости потока гидросмеси в трубопроводе

$$\alpha = \frac{v_{\text{кр}}}{v_{\text{ср}}} = \frac{4{,}04 c_{\text{об}}^{0{,}026} c_{\text{об}}^{0{,}134}}{1{,}95} = 2{,}07 c_{\text{об}}^{0{,}16}.$$

Отметим в качестве пояснения, что если коэффициент $\alpha > 1$, то на его величину необходимо умножить расчетное значение дополнительных потерь напора $\Delta I_{\text{в}}$, расходуемых на транспортирование твердой фазы. В связи с этим, в расчетах желательно, чтобы средняя скорость потока пульпы несколько превышала критическую скорость. Если это условие не соблюдается, то трубопровод будет работать с неподвижным слоем осадка (слой заиления).

Потери напора на транспортирование оборотной воды по формуле Дарси – Вейсбаха

$$i_{\text{в}} = \lambda \frac{v_{\text{ср}}^2}{2gD} = \lambda \frac{1{,}95^2 c_{\text{об}}^{0{,}433}}{2g c_{\text{об}}^{0{,}268} \cdot 0{,}139} = 1{,}394 \lambda c_{\text{об}}^{0{,}165}.$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{ср}} D}{\nu},$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости оборотной воды, м^2/с.

Если $\text{Re} < 700000$, то течение происходит в турбулентной зоне трения и коэффициент $\lambda = \frac{0{,}31}{\lg(\text{Re} - 1)^2}$; если $\text{Re} \geq 700000$, то $\lambda = \left(1{,}74 + 2 \lg \frac{1}{2\frac{k}{D}} \right)^{-2}$, течение происходит в квадратичной зоне трения и коэффициент λ не зависит от числа Рейнольдса, а определяется только шероховатостью стенок трубы. Практика показывает, что для больших диаметров трубопроводов и действующих критических скоростей режим течения всегда квадратичный с постоянным значением коэффициента гидравлических сопротивлений $\lambda \approx 0{,}014$.

Дополнительные потери напора

$$\Delta i_{\text{в}} = 0{,}61 c_{\text{об}}.$$

Потери напора на транспортирование пульпы

$$i = i_{\text{в}} + \Delta i_{\text{в}} = 1{,}394 \lambda c_{\text{об}}^{0{,}165} + 0{,}61 c_{\text{об}} = 0{,}0195 c_{\text{об}}^{0{,}165} + 0{,}61 c_{\text{об}}.$$

Расчетная формула для дополнительных потерь напора принята по результатам экспериментальных исследований гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОК «Ванадий» [6].

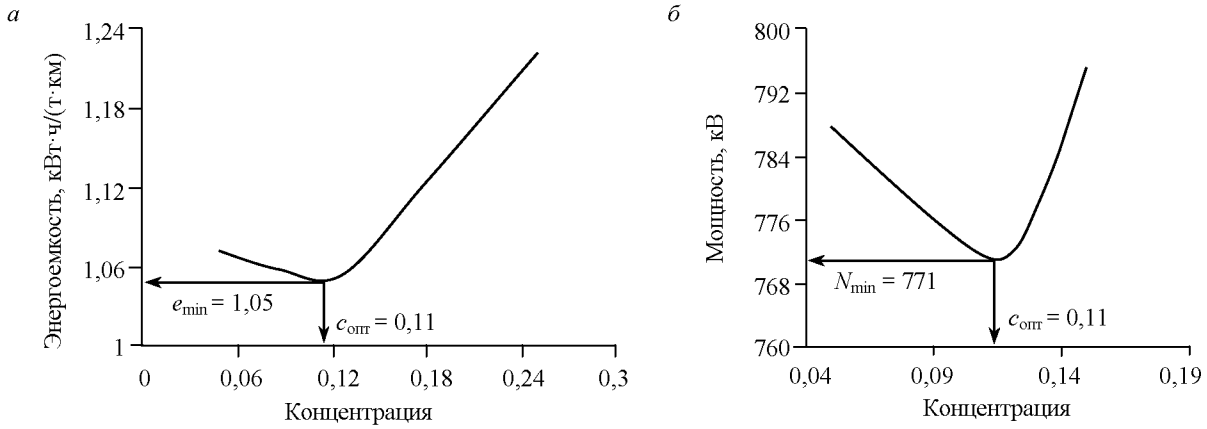


Рис.4. Графики зависимости удельной энергоемкости (*а*) и мощности (*б*) при гидротранспорте хвостов обогащения железной руды

Получим результаты расчета параметров гидротранспорта хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа «Ванадий»:

Концентрация	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
Расход, $м^3/с$	0,592	0,269	0,228	0,197	0,148	0,118	0,099
Диаметр, м	0,508	0,361	0,336	0,316	0,28	0,253	0,234
Средняя скорость, м/с	2,91	2,62	2,56	2,51	2,42	2,35	2,29
Критическая скорость, м/с	2,4	2,46	2,46	2,47	2,49	2,51	2,52
Коэффициент α	0,825	0,94	0,96	0,982	1,03	1,06	1,1
Потери напора по воде $i_в$, м	0,012	0,013	0,014	0,017	0,01	0,015	0,016
Потери напора по твердому $\Delta i_в$, м	0,030	0,067	0,087	0,089	0,12	0,152	0,183
Потери напора в трубопроводе i, м	0,042	0,08	0,093	0,106	0,137	0,167	0,199
Необходимый напор, м	84,8	161	186	211	274	336	398
Плотность смеси $\rho_{см}$, $кг/м^3$	1122	1269	1318	1367	1490	1612	1735
Мощность, кВт	787	771	777	795	846	898	943
Энергоемкость, кВт·ч/(т·км)	1,07	1,048	1,056	1,08	1,15	1,22	1,28

Из расчетных данных видно, что с увеличением концентрации твердого материала в объеме гидросмеси увеличиваются потери напора. Потребная мощность и удельная энергоемкость в диапазоне концентраций от 0,11 до 0,13 принимают наименьшие значения. Графики зависимости удельной энергоемкости и мощности, построенные по расчетным данным, приведены на рис.4.

Полученные теоретические зависимости о потреблении электроэнергии в потоке суспензии на трубопроводах показывают, что всегда есть некоторые ограничения значения концентрации твердых частиц в объеме, при которой энергоемкость и удельный расход электроэнергии принимают наименьшее значение для набора механических характеристик твердого материала. К таким характеристикам относятся распределение твердых частиц по крупности и плотность твердых частиц.

Для определения зависимости удельного расхода электроэнергии от плотности твердого материала были выполнены расчеты, результаты которых приведены в таблице.

Расчетные данные показывают, что наибольшее значение потребляемой энергии соответствует меньшему значению концентрации твердых частиц. Увеличение концентрации приводит к снижению потребления энергии до некоторого минимального значения. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к увеличению энергопотребления. Можно отметить также, что с увеличением плотности твердых частиц энергоемкость процесса уменьшается. Результаты расчета представлены на графиках зависимости расхода энергии от концентрации гидросмеси при изменении плотности твердых частиц от 4000 до 2400 $кг/м^3$ (рис.5).

Мощность и удельная энергоемкость гидротранспортной системы при изменении плотности и концентрации твердого материала

Параметры	Производительность по твердому материалу $A_{тв}$ = 368 т/ч						
	Плотность твердого $\rho_{тв}$ = 4000 кг/м^3						
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N, кВт	400,24	319,99	308,96	298,98	291,38	287,37	286,5
e, кВт·ч/(т·ч)	0,534	0,435	0,42	0,406	0,396	0,39	0,389
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N, кВт	284,54	291,87	295,85	299,47	301,35	304,63	311,27
e, кВт·ч /(т·ч)	0,387	0,396	0,402	0,407	0,409	0,414	0,423
	Плотность твердого $\rho_{тв}$ = 3450 кг/м^3						
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N, кВт	442,34	347,31	333,75	326,7	309,04	298,56	295,47
e, кВт·ч/(т·ч)	0,601	0,472	0,453	0,443	0,420	0,405	0,401
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N, кВт	295,11	298,56	299,59	301,95	304,5	307,91	311,03
e, кВт·ч/(т·ч)	0,4	0,405	0,407	0,41	0,414	0,418	0,422
	Плотность твердого $\rho_{тв}$ = 2900 кг/м^3						
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N, кВт	501,3	386	368	354	333	320,6	314
e, кВт·ч/(т·ч)	0,681	0,524	0,5	0,481	0,452	0,435	0,427
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N, кВт	308	308,2	307,4	306	308	311,4	311
e, кВт·ч/(т·ч)	0,418	0,419	0,417,7	0,415	0,418	0,423	0,423
	Плотность твердого $\rho_{тв}$ = 2900 кг/м^3						
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N, кВт	528,1	399,4	387	372,3	347,8	331,7	322,1
e, кВт·ч/(т·ч)	0,717	0,543	0,526	0,506	0,472	0,451	0,438
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N, кВт	316	312,5	312,3	309,6	310	313,2	320
e, кВт·ч/(т·ч)	0,429	0,424	0,424	0,421	0,421	0,425	0,435
	Плотность твердого $\rho_{тв}$ = 2400 кг/м^3						
$c_{об}$	0,05	0,11	0,13	0,15	0,2	0,25	0,3
N, кВт	581,2	434,4	415,1	393,5	365	347,3	336,2
e, кВт·ч/(т·ч)	0,791	0,59	0,564	0,535	0,496	0,472	0,457
$c_{об}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
N, кВт	327,4	322,5	318,2	317,9	315,5	317,1	320
e, кВт·ч/(т·ч)	0,445	0,438	0,432	0,432	0,429	0,431	0,435

На графиках (рис.5) видно, что удельная энергоемкость уменьшается с увеличением плотности твердых частиц.

При проектировании систем гидротранспорта должна быть решена задача о величине концентрации твердого материала в объеме транспортируемой гидросмеси, от которой зависит мощность грунтовых насосов. Как правило, на практике этот выбор зависит от опыта инженера-проектировщика. Расчеты, выполненные в настоящей работе, показывают, что потребление энергии является сложной функцией, определяемой механическими характеристиками твердой фазы суспензии потока.

Величина энергии при гидравлическом транспорте, также как удельная энергоемкость на невысоких концентрациях гидросмеси, достигает наибольших значений и стремится к минимуму с увеличением объемного содержания твердого материала. После достижения минимума мощности и удельной энергоемкости с дальнейшим увеличением концентрации значения этих параметров увеличиваются.

Минимальное значение мощности и удельного расхода электроэнергии определяют наиболее эффективный режимы работы системы гидротранспорта и применяемого грунтового насоса с наибольшим значением КПД.

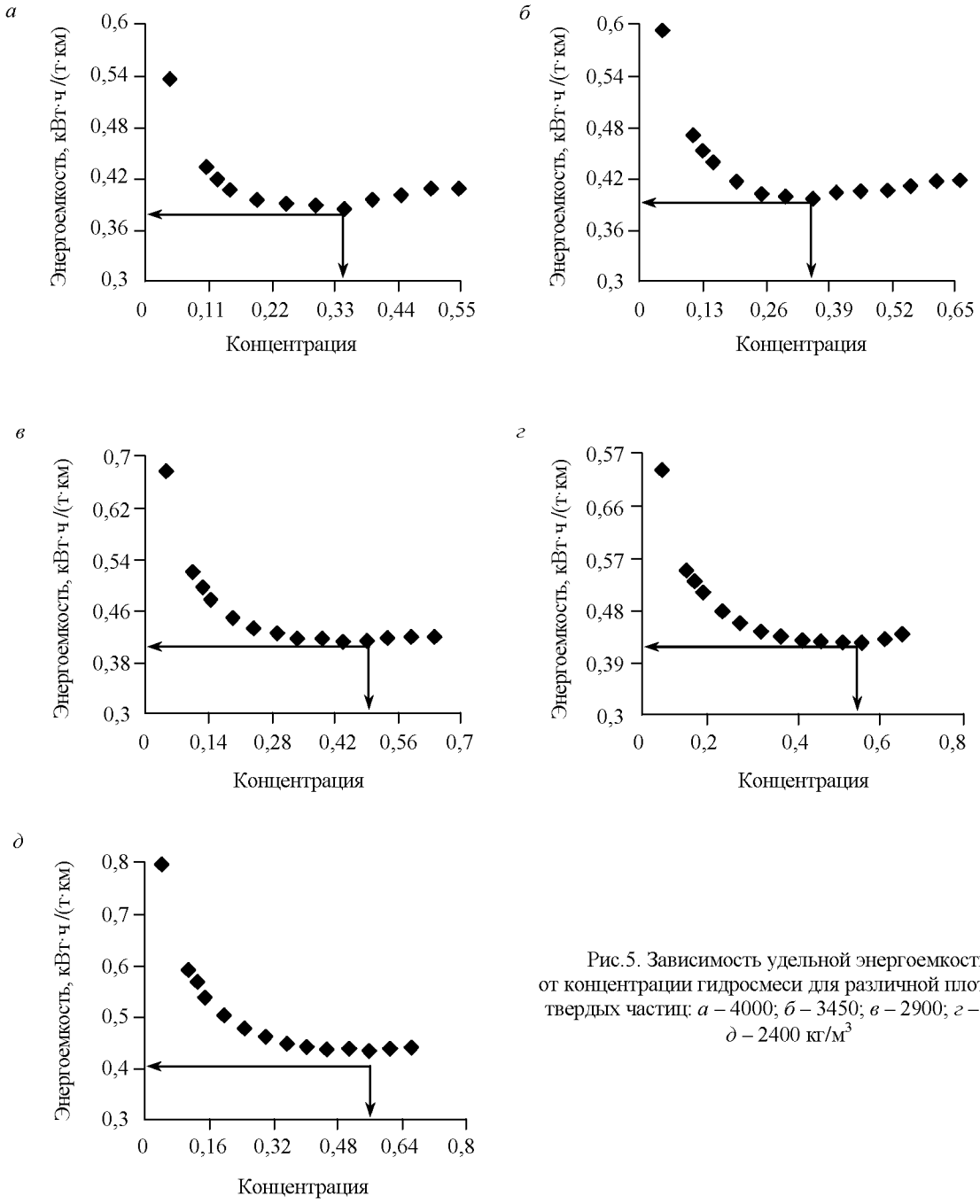


Рис.5. Зависимость удельной энергоемкости от концентрации гидросмеси для различной плотности твердых частиц: *а* – 4000; *б* – 3450; *в* – 2900; *г* – 2700; *д* – 2400 кг/м^3

По результатам выполненного теоретического исследования можно сделать следующие общие выводы:

1. Энергетические характеристики гидравлического транспорта для гидросмесей различных видов определяются концентрацией твердой фазы в потоке гидросмеси и плотностью твердых частиц.

2. Удельная энергоемкость гидравлического транспорта является сложной функцией основных параметров гидросмеси и имеет экстремум, соответствующий минимальному потреблению энергии и оптимальной концентрации твердой фазы в потоке гидросмеси.

3. С увеличением плотности твердой фазы энергопотребление гидротранспортной системы уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров В.И.* Энергоемкость гидравлического транспортирования крупнодисперсных и мелкодисперсных гидросмесей / В.И.Александров, П.Р.Махараткин, С.Ю.Авксентьев // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 6. С.39-44.

2. *Babcock H.A.* Heterogeneous flow of heterogeneous solids. Advances in solid liquid flow in pipes and its application. Pergamon Press New York, 1970, p.125-148.

3. *Kamal El-Nahhas, Nageh Gad El-Hak, Magdy Abou Rayan* and *Imam El-Sawaf.* Effect of particle size distribution on the hydraulic transport of settling slurries. Thirteenth International Water Technology Conference. Hurghada, Egypt, 2009, p.198-210.

4. *Lahiri S.K., Ghanta K.C.* Minimize power consumption in slurry transport. National Institute of Technology. Durgapur. West Bengal. India, 2008, p.152.

5. *Gillies R.G., Hill K.B., McKibben M.J., Shook C.A.* Solids transport by laminar Newtonian flows. Powder Technology. Vol.104. 1999, p.269-277.

6. *Thomas D.G.* Transport characteristics of suspensions: Part VI – Minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes. AIChE J. Vol.8. 1998, p.373-378.

REFERENCE

1. *Aleksandrov V.I., Makharatkin P.N., Avksentiev S.Y.* Energoemkost' gidravlicheskogo transportirovaniya krupnodispersnykh i melkodispers-nykh gidrosmesei (*Specific power consumption of.hydraulic transportation of.mixtures with coarse and fine solid particles*). Gornoe oborudovanie i elektromekhanika. 2012. N 7, p.72-79.

2. *Babcock H.A.* Heterogeneous flow of heterogeneous solids. Advances in solid liquid flow in pipes and its application. Pergamon Press New York, 1970, p.125-148.

3. *Kamal El-Nahhas, Nageh Gad El-Hak, Magdy Abou Rayan* and *Imam El-Sawaf.* Effect of particle size distribution on the hydraulic transport of settling slurries. Thirteenth International Water Technology Conference. Hurghada, Egypt, 2009, p.198-210.

4. *Lahiri S.K., Ghanta K.C.* Minimize power consumption in slurry transport. National Institute of Technology. Durgapur. West Bengal. India, 2008, p.152.

5. *Gillies R.G., Hill K.B., McKibben M.J., Shook C.A.* Solids transport by laminar Newtonian flows. Powder Technology. Vol.104. 1999, p.269-277.

6. *Thomas D.G.* Transport characteristics of suspensions: Part VI – Minimum transport velocity for large particle size suspensions in round horizontal pipes. AIChE J. Vol.8. 1998, p.373-378.

POWER CONSUMPTION OF HYDRAULIC TRANSPORT OF PRODUCTS OF MINERAL PROCESSING

V.I.ALEKSANDROV, *Dr. of Engineering Sciences, Professor, alexvict@spmi.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia
JERZY SOBOTA, *Professor, jerzy.sobota@up.wroc.pl*
University of Environmental and Life Sciences, Wroclaw, Poland

The problem of decreasing power consumption by hydraulic transport systems remains to be the most important among other problems in the mining industry. The increase of solid material concentration in the volume of transported pulp leads to reduction of general pulp flow rate on the one hand and to increase of pressure losses and, accordingly, of a necessary head for overcoming hydraulic resistance on the other hand. The problem of minimizing power consumption in slurry transport is of particular relevance now when there is a tendency for hydraulic transport of highly-concentrated pulps and pastes to be widely used in the mining industry.

The article shows that the energy intensity to a certain extent depends on the performance of hydraulic transport of solid materials, and this dependence is of extreme nature. At low concentrations of solid particles large volumes of recycled water have to be pumped to provide the necessary performance, which leads to consumption of large amounts of electricity. The increase of concentration results in the decrease in the volumetric flow rate of the pulp and, accordingly, specific power consumption of the process. The process of reducing energy consumption takes place up to a certain critical value of the concentration above which a further increase in the concentration raises power consumption.

***Key words*:** slurry, solid particles, concentration, specific power consumption, slurry pump.