

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Приведено результати аналізу можливості зниження гідравлічного ухилу під час плину гідросуміші за рахунок введення в пульпу розчинів гідродинамічно активних додатків.

THE ANALYSIS OF METHODS OF WORK EFFECTIVENESS INCREASING OF HYDROTRANSPORT SYSTEM

The analysis results of possibility of hydraulic slope derating when hydraulic liquid moving owing hydrodynamically active agent insertion into the pulp are adduced.

На обогатительных фабриках большей части горно-обогатительных комбинатов (ГОК) Украины отвод отходов обогащения осуществляется посредством напорных гидротранспортных комплексов, а на Вольногорском горно-металлургическом комбинате (ВГМК) и на Иршанском ГОКе напорные гидротранспортные комплексы используются также и для доставки исходных песков на обогатительные фабрики [1-7]. Такое широкое использование трубопроводного гидротранспорта на предприятиях горнорудной промышленности обусловлено характером транспортируемых материалов, а также технологической совместимостью с обогатительным оборудованием и преимуществами этого вида транспорта в данных условиях над конвейерным, автомобильным и железнодорожным [2, 3, 8].

Опыт украинских и зарубежных обогатительных фабрик показывает, что за время их функционирования протяженность магистралей гидротранспортных комплексов, обеспечивающих доставку перерабатываемого сырья и отвод отходов обогатительного производства, постоянно увеличивается [2, 3, 6-8]. По мере отработки месторождения фронт горных работ удаляется от обогатительной фабрики, что вызывает перемещение головной насосной станции и требует увеличения длины трубопровода. Кроме того, при заполнении хранилищ отходами обогащения в эксплуатацию вводят новые карты намыва хранилищ, что также требует увеличения длины трубопровода.

Периодическое удлинение трубопровода гидротранспортного комплекса без установки дополнительных насосов или увеличения диаметров рабочих колес ограничено возникновением критических режимов течения, которые резко снижают эффективность и надежность гидротранспортирования [4-6, 8].

Опыт эксплуатации карьерного гидротранспортного комплекса ВГМК показывает, что зачастую для обеспечения сверхкритических режимов работы после удлинения трубопровода необходима меньшая мощность, чем мощность еще одного насоса, а заменить существующие рабочие колеса на рабочие колеса с большим диаметром невозможно [3, 4, 6-8]. В этом случае установка еще одно-

го насоса значительно увеличивает капитальные затраты и энергоемкость гидротранспортирования, а также интенсифицирует износ трубопроводов, запорной арматуры и проточных частей других насосов. Кроме того, из-за нестабильности параметров транспортируемого материала карьерный гидротранспортный комплекс после удлинения трубопровода может периодически работать то в сверхкритических режимах, то в режимах с частичным заиливанием трубопровода, что снижает эффективность функционирования всей технологической цепочки от узла пульпообразования в карьере до батареи гидроциклонов на обогатительной фабрике [6-8].

В такой ситуации для обеспечения эффективности и надежности гидротранспортирования необходимо обеспечить регламентированную производительность гидротранспортного комплекса со скоростями, превышающими критическую. Это может быть обеспечено или повышением мощности используемых насосов, или снижением гидравлического сопротивления магистрали.

Проблема научно обоснованного решения данной проблемы актуальна и имеет большую практическую важность. С одной стороны, план разработки месторождений и введения в эксплуатацию новых карт намыва хранилища отходов определяется с учетом экономических, горно-геологических и экологических факторов, а поэтому, в принципе, не может учитывать режимы работы гидротранспортных комплексов. С другой стороны, важность ресурсо- и энергосбережения на предприятиях горнорудной промышленности регламентируется несколькими государственными и региональными программами, в частности, «Концепцией развития горно-металлургического комплекса Украины до 2010 года» и «Комплексной программой энергосбережения в Днепропетровской области».

Вопрос снижения гидравлических сопротивлений при течении гидросмеси и воды рассматривался в работах отечественных и зарубежных специалистов [1, 3-10]. Анализ результатов этих исследований позволил выделить следующие методы, которые могут быть применены для условий гидротранспорта: наложение на поток продольных пульсаций скорости [3, 10], покрытие внутренней поверхности труб материалом с низким коэффициентом трения [4, 10], наложение вибрационного воздействия на трубопровод [11], добавка к несущей среде гидродинамически активных веществ [9-14], использование дополнительных струйных насосов [4].

Наложение на поток продольных пульсаций скорости предлагается осуществлять периодическим изменением поперечного сечения потока с помощью задвижки в напорном патрубке насоса [10]. При этом частота пульсаций скорости выбирается в зависимости от инертности частиц транспортируемого материала таким образом, чтобы они не успевали оседать на дно за то время, когда скорость будет ниже критической. К недостаткам этого метода относят постоянные пульсации давления и непрямые гидравлические удары, действие которых приводит к разгерметизации сварных швов, фланцевых соединений и узлов насосов. Кроме того, использование этого метода на установках с диаметром трубопровода 630 мм и производительностью около 3000 м³/ч представляется

затруднительным.

Метод наложения вибрационного воздействия на трубопровод предполагает генерирование вибрации стенок трубопровода. Этот метод хорошо зарекомендовал себя для технологических трубопроводов небольшого диаметра и протяженности. Применительно же к магистральным комплексам ему присущи те же недостатки, что и предыдущему методу.

Использование дополнительных струйных насосов позволяет в некоторых случаях повысить транспортирующую способность потока, однако при этом снижается концентрация гидросмеси, что увеличивает энергоемкость процесса и потребление воды [4]. Применение этого способа для магистральных трубопроводов еще в достаточной степени не изучено.

Наиболее перспективными для гидротранспортных комплексов, на наш взгляд, являются методы снижения гидравлических сопротивлений за счет покрытия внутренней поверхности труб материалом с низким коэффициентом трения или добавлением в несущую среду гидродинамически активных веществ.

С целью снижения коэффициента трения предлагалось покрытие внутренней поверхности стальных труб полиэтиленом или поливинилхлоридом [4, 10]. Это обеспечивало бы низкий коэффициент трения и прочность при давлениях, характерных для работы гидротранспортных комплексов. Однако развитие отечественной и зарубежной промышленности позволило за последние годы существенно продвинуться в создании труб и запорной арматуры из полимерных материалов. Сегодня известны технологии, позволяющие выпускать трубы, фасонные части и запорную арматуру диаметром более полуметра, выдерживающие давление до 16 атмосфер, что позволяет использовать полиэтиленовые трубы вместо стальных не только для подачи питьевой и технической воды, но и для гидротранспортирования исходных песков на обогатительную фабрику, а также для отведения отходов обогатительного производства.

Однако расчет гидравлического сопротивления таких труб затруднен отсутствием данных о зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса. Отечественные производители пластиковых труб не располагают такими данными, а зарубежные производители или приводят номограммы с диапазонами расходов не характерными для гидротранспортных комплексов ГОКов, или указывают, что эта величина для пластиковых труб меньше, чем для чугунных труб в 100, а то и 1000 раз.

Известно, что растворение в воде высокомолекулярных полимеров приводит к снижению гидравлических сопротивлений при ее течении по трубам [10, 11-14]. Однако вопрос о снижении гидравлического сопротивления гидросмеси при добавлении гидродинамически активных веществ исследован недостаточно. С одной стороны гидродинамически активные вещества снижают турбулентные напряжения трения, а с другой, проявляя себя как флокулянты, увеличивают гидравлическую крупность транспортируемых частиц, чем способствуют повышению гидравлического уклона [9, 15, 16].

Цель работы – разработать математические модели процессов течения гид-

росмеси в сгустительном аппарате и в трубопроводе с учетом влияния добавок гидродинамически активных веществ.

Снижение энергоемкости процесса гидротранспортирования возможно также за счет использования в качестве несущей среды водных растворов высокомолекулярных полимеров очень малых концентраций, для которых гидравлический уклон пропорционален гидравлическому уклону при течении гидросмеси на основе воды:

$$i = ki_0, \quad (1)$$

где i – гидравлический уклон при течении гидросмеси с добавлением растворов высокомолекулярных полимеров; k – коэффициент снижения гидравлического уклона; i_0 – гидравлический уклон при течении гидросмеси без добавления растворов гидродинамически активных веществ.

В частности, существует положительный опыт применения очень разбавленных растворов полиакриламида (ПАА), представляющего собой карбоцепной полимер состава $[-CH_2-CH(CONH_2)-]_n$, при массовых долях от 0.003 до 0.0015% (см. рис. 1) [9, 10].

Явление уменьшения гидравлического сопротивления турбулентных потоков в присутствии полимеров называется эффектом Томса. Этот эффект обусловлен деформацией молекулярных клубков полимеров под действием продольного гидродинамического поля, при которой клубки разворачиваются и длинные линейные молекулы вытягиваются в направлении потока [12]. Эффект возрастает при увеличении молекулярной массы полимера. Кроме того, при прохождении раствора ПАА через центробежный насос снижается потребляемая мощность насоса, и увеличиваются его напор и КПД [12, 13]. Однако при многократном прохождении раствора ПАА через гидравлическую систему происходит деструкция полимера – разрыв его молекул и уменьшение молекулярной массы, что снижает эффект Томса [12, 13]. Очевидно, что в потоке гидросмеси за счет соударений молекул полимера с твердыми частицами транспортируемого материала деструкция полимера будет происходить в большей степени. Поэтому при введении полимеров во взвесенесущие потоки эффект снижения гидравлических сопротивлений проявляется в меньшей степени, чем при движении растворов полимеров [10].

Следует отметить, что ПАА содержит ионогенные группы $-NH_2$, имеющие основной характер, то есть относится к полиэлектролитам. В растворах таких полимеров цепи молекул могут самопроизвольно растягиваться и сокращаться (превращаться в клубки) при изменении pH раствора [17]. Кроме того, амиды карбоновых кислот способны взаимодействовать с водой с образованием соответствующих кислот. Частично гидролизованый ПАА содержит как группы $-NH_2$, так и кислотные группы $-COOH$, то есть является амфотерным. У такого электролита при определенном pH, соответствующем изоэлектрической точке, число ионизированных основных групп равно числу ионизированных кислотных групп.

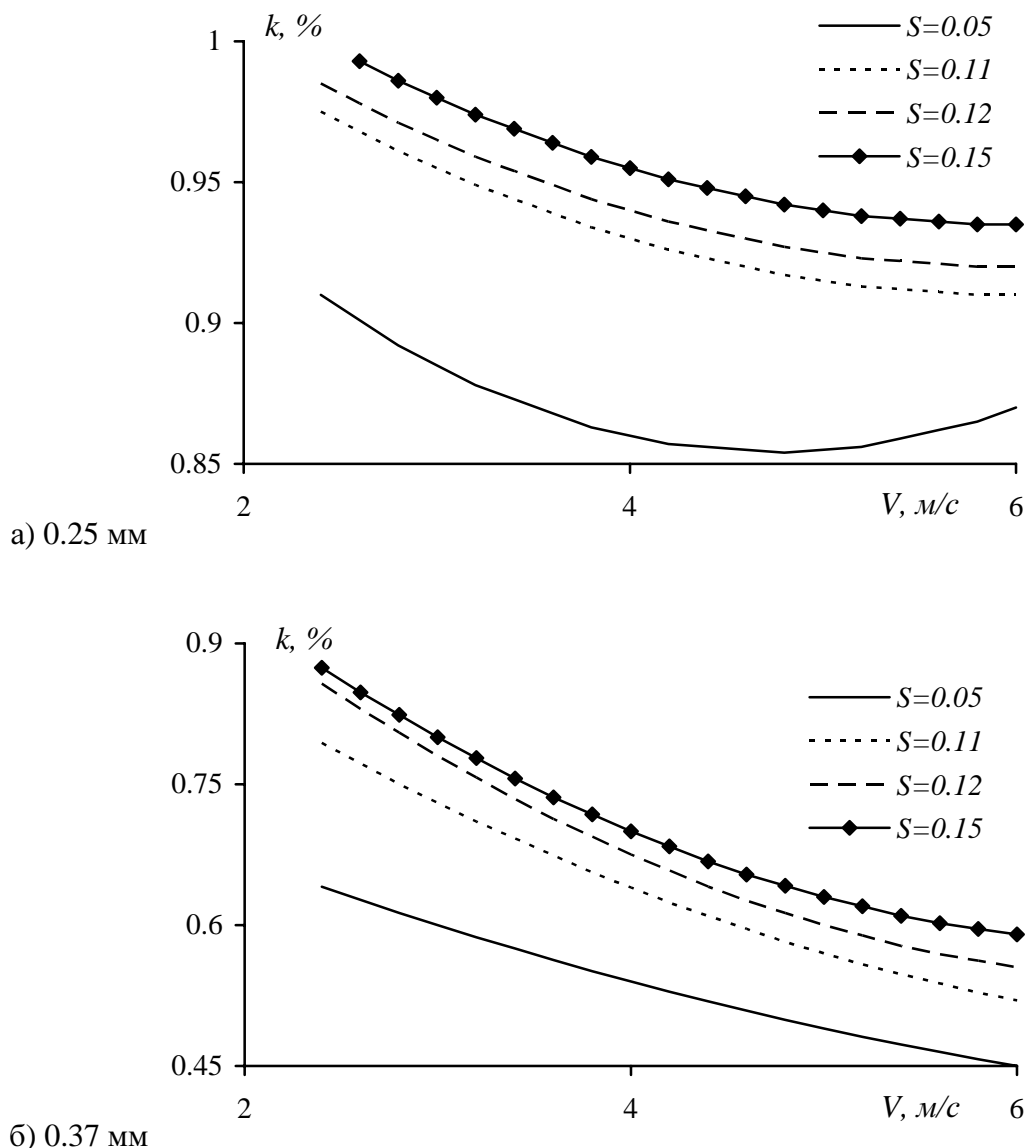


Рис. 1 – Зависимость величины k от скорости гидросмеси при различных значениях концентрации в трубопроводе $D = 0.2$ м с частицами плотностью $\rho = 3$ т/м³ [3]

Изоэлектрической точке соответствует наименьшая вязкость раствора, однако при этом молекулы полимера свернуты в наиболее плотные клубки [17]. Поэтому при рН, соответствующем изоэлектрической точке, эффект Томса должен сводиться к нулю. Распрямление молекул амфотерного полиэлектролита происходит как при увеличении, так и при уменьшении рН раствора. Поскольку гидролиз амидов кислот происходит при их кипячении с неорганическими кислотами и щелочами, то степень гидролиза ПАА можно регулировать. Таким образом, повысить эффект снижения гидравлических сопротивлений при гидротранспортировании с использованием ПАА можно будет путем выбора оптимального рН несущей среды при заданной степени гидролиза ПАА или оптимальной степени гидролиза для условий конкретного гидротранспортного комплекса.

ПАА, представляющий собой карбоцепной полимер состава $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CONH}_2)-]_n$, широко применяется при обогащении угля и некоторых руд в качестве флокулянта [15, 17]. ПАА чаще всего выпускается в виде 6-8 %-ного геля и может быть негидролизованым и гидролизованым. Частично гидролизованный ПАА содержит как группы $-\text{NH}_2$, обладающие слабыми основными свойствами, так и кислотные группы $-\text{COOH}$, то есть является амфотерным с преобладанием кислотных свойств. Для флокуляции угольных шламов применяется глубоко гидролизованный ПАА [15], который почти не содержит амидных групп и практически является анионоактивным, так как в результате диссоциации по кислотному типу макроионы несут отрицательный заряд. Наличие заряда способствует распрямлению гибких цепочек полимера, что благоприятно сказывается на его флокулирующей способности. Анионоактивные флокулянты хорошо флокулируют твердые частицы, несущие положительный заряд, в частности, частицы оксидов металлов. Однако нередко тонкие фракции в гидросмеси представлены глинистыми частицами, заряд которых отрицателен. В [17] отмечается слабое флокулирующее действие ПАА по отношению к частицам глины. Повышение эффективности флокуляции в этом случае может быть достигнуто сочетанием гидролизованного ПАА, молекулы которого представляют собой длинные цепи, с катионоактивным полиэтиленимином, молекулы которого имеют меньшую длину [12, 17]. Достаточно хорошо анионоактивные полимеры адсорбируются на отрицательно заряженных твердых частицах и в том случае, если поверхность частиц гидрофильна [17]. На процесс флокуляции влияет концентрация полимера в гидросмеси. Наиболее эффективны растворы с массовой долей ПАА 0,1 – 0,2 % [14]. При более низкой массовой доле ПАА эффект флокуляции снижается за счет большой удаленности макромолекул друг от друга, а при более высокой – за счет повышения вязкости раствора. Конформация полиэлектролитов, а, значит, и флокулирующий эффект, зависят также от рН среды.

Зависимость гидравлической крупности флокулы от концентрации флокулянта в гидросмеси выражается формулой [15]

$$\omega = \omega_0(1 + a\theta), \quad (2)$$

где ω – гидравлическая крупность флокулы; ω_0 – гидравлическая крупность твердых частиц сгущаемой гидросмеси; θ – массовая доля флокулянта в гидросмеси; a – эмпирический коэффициент, зависящий от объемной доли твердого в гидросмеси и интенсивности турбулентного перемешивания.

Зависимость (2) справедлива для таких малых значений меньших θ_1 , при которых флокулянт не влияет или почти не влияет на вязкость несущей среды. При больших значениях θ вязкость жидкой фазы увеличивается, что приводит к уменьшению интенсивности турбулентного перемешивания. В этом случае зависимость гидравлической крупности флокулы от концентрации флокулянта имеет вид [15]

$$\omega = \omega_0(1 + a\theta - b\theta^2), \quad (3)$$

где a и b – коэффициенты, которые должны определяться эмпирически для конкретных условий сгущения гидросмеси.

Таким образом, для частиц, гидравлическая крупность которых вычисляется по формуле Стокса, добавление ПАА равносильно некоторому увеличению диаметра частиц:

$$d_* = \psi d_0; \quad (4)$$

$$\psi = \sqrt{\frac{V_*}{V_0}(1 + a\theta - b\theta^2)}, \quad (5)$$

где V_*, V_0 – коэффициент кинематической вязкости соответственно раствора ПАА и воды.

Для расчета концентрации гидросмеси, уходящей через борт перелива сгустителя, и зависимости параметров течения сгущенной гидросмеси по трубопроводу на основании законов сохранения массы и импульса, а также с учетом формул (1) – (5), была разработана математическая модель течения пульпы в поверхностном слое сгустительной воронки и в основной зоне [18]:

$$\frac{d\varphi'}{dr} = -\frac{\omega\varphi'(1-\varphi')^2}{h'\sqrt{b-2gh'}}; \quad (6)$$

$$\frac{dh'}{dr} = -\frac{r\omega\varphi' + h'\sqrt{b-2gh'}}{r(b-3gh')}\sqrt{b-2gh'}; \quad (7)$$

$$h'(R_o) = 0.9\left(\frac{Q_o - Q}{\pi R_1 \sqrt{g}}\right)^{2/3}; \quad \varphi'(R_o) = \varphi_o;$$

$$b = 2.1\left(\frac{g[Q_o - Q]}{\pi R_1}\right)^{2/3}; \quad \varphi(0) = \varphi_c + (\varphi_o - \varphi_c)\frac{Q_o}{Q};$$

$$\frac{d\varphi}{dl} = 2\frac{\varphi^3(1-\varphi)^3}{\Delta_1 A_0 \delta} B_1 \cos \alpha + B_2 \frac{\varphi^3(1-\varphi)^3}{\Delta_1 A_0 \delta} \left(\sqrt{\frac{\delta}{\delta_*}} \sigma \frac{(1-\varphi)\sqrt{n-\varphi}}{\varphi(1-\varphi)} - \frac{ki_0}{4} \right); \quad (8)$$

$$A_0 \frac{dh}{dl} = A_1 \cos \alpha - A_2 \frac{ki_0}{4} + A_3 \sqrt{\frac{\delta}{\delta_*}} \sigma \frac{(1-\varphi)\sqrt{n-\varphi}}{\varphi(1-\varphi)}; \quad (9)$$

$$B_1 = (\rho - 1)^2 \varphi^2 + (\rho^2 + \rho - 2)\varphi - (2\rho^2 - \rho + 1); \quad B_2 = (2\rho + 1) + (\rho - 1)\varphi;$$

$$\delta_* = \frac{gd^4\psi^2}{324\nu^2}; \quad \delta = \frac{(1+n)^2}{gF^2} Q^2; \quad \rho = \frac{\rho_T}{\rho_o}; \quad n = \frac{S^2}{(1-S)^2};$$

$$A_0 = \varphi^3(5 - 2\varphi) + (1 - \varphi)^3(2\rho + 1 - 2\rho\varphi)n;$$

$$A_3 = \rho\varphi(1-\varphi)^3 n - \varphi^3(1-\varphi); A_2 = \frac{3}{2}\varphi^3 + (1-\varphi)^3(2\rho+1)\frac{n}{2};$$

$$A_1 = \varphi^3[2\rho+3+(\rho-3)\varphi] + (1-\varphi)^3[2\rho+1-(1+\rho)\varphi]n; \sigma = \frac{1+0,15\text{Re}^{0,687}}{(1-\varphi)^{2,7}},$$

где φ' – текущая концентрация пульпы; r – текущий радиус поперечного сечения приповерхностного слоя, м; h' – высота слоя перелива, м; R_0 – радиус устройства подачи пульпы в сгустительную воронку, м; R_1 – радиус верхнего сечения сгустительной воронки, м; Q_0 – расход гидросмеси, подаваемой в воронку, м³/с; Q – расход пульпы, поступающей в трубопровод, м³/с; φ – концентрация пульпы, поступающей в трубопровод; φ_c – концентрация пульпы, уходящей через борт перелива; φ_0 – концентрация гидросмеси, подаваемой в воронку; Re – параметр Рейнольдса для частиц транспортируемого материала; h – давление потока в м. вод. ст.; l – текущая длина трубопровода, м; F – площадь сечения трубопровода, м²; α – угол наклона трубопровода к горизонту.

Для полученных условий методом Рунге-Кутта решалась система уравнений (6) и (7). Из решения системы дифференциальных уравнений (6), (7) получали распределение концентрации в слое перелива [18]. Были произведены расчеты концентрации пульпы в сливе сгустительной воронки (рис. 2) для следующих начальных условий: $R=1$ м, $R_0=0.15$ м, $\varphi_0=0.2$, $\rho_0=4800$ кг/м³, $\rho=1000$ кг/м³, $T=20^\circ\text{C}$, $R_s=0.00001$ м и $\psi=1, 10, 50$ и 100 .

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы. Концентрация ПАА и начальная концентрация твердого в пульпе, а также крупности частиц оказывают большое влияние на распределение концентрации твердого вещества внутри слоя перелива.

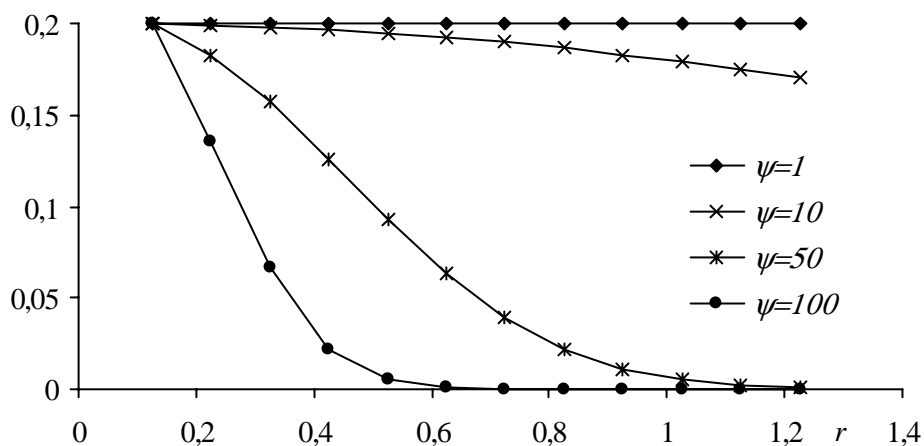


Рис. 2 – Распределение концентрации пульпы в слое перелива для различных значений коэффициента ψ

Из уравнений (8) и (9) видно, что при течении гидросмеси по трубопроводу добавление ПАА приводит не только к снижению гидравлических уклонов, но и способствует снижению сил межфазового взаимодействия. При этом учитываемое снижение эффекта Томса за счет деструкции полимера [14] правая часть уравнений (8) и (9) будет изменяться по длине трубы. Следовательно, при использовании ПАА величины φ и h будут переменными по длине трубопровода, если не используются специальные методы управления свойствами ПАА. В связи с этим перспективными являются исследования свойств растворов ПАА в оборотной воде и суспензиях, содержащих глинистые частицы, а также разработка методов управления величиной рН несущей среды в зависимости от минерального состава транспортируемого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блюсс Б.А., Сокил А.М., Гоман О.Г. Проблемы гравитационного обогащения титан-цирконовых песков. – Днепропетровск: Поліграфіст, 1999. – 190 с.
2. Блюсс Б.А., Головач Н.А. Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 126 с.
3. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семенов и др. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
4. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семенов. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
5. Блюсс Б.А., Семенов Е.В. Обеспечение рационального режима работы карьерного гидротранспортного комплекса // Сборник научных трудов НГУ. – №17. – Т. 1. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. – С. 228 – 233.
6. Шурыгин В.Д., Семенов Е.В. Обеспечение энергосбережения при использовании напорного гидротранспорта в технологиях добычи и переработки россыпей // Общегосударственный научно-технический журнал «Теория и практика металлургии». – 2004. – № 5. – С. 111 – 115.
7. Семенов Е.В., Шурыгин В.Д. Исследование возможных схем гидротранспортирования россыпей Малышевского месторождения // Научно – технический и производственный журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». - №6. – 2003. – С. 76 – 79.
8. Семенов Е.В. Перспективы повышения надежности и эффективности работы гидротранспортного комплекса ВГГМК // Научно – технический и производственный журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – №4. – 2004. – С. 74 – 78.
9. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, С.И. Криль, В.Ф. Очеретько. – Киев: Наукова думка, 1981. – 364 с.
10. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М., Недра, 1985. – 191 с.
11. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. – К.: Наук. думка, 2001. – 519 с.
12. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А.В. Ступин, П.В. Асланов, А.П. Симоненко, Н.В. Быковская, С.А. Фоменко // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74 – 81.
13. Погребняк В.Г., Писаренко А.А. Растворы полимеров в условиях пристеночной турбулентности и механизм снижения гидравлического сопротивления. // Прикладна гідромеханіка. – 2000. – Т. 2 (74), № 2. – С. 83 – 95.
14. Орел В.І., Чернюк В.В. Вплив деструкції розчину поліакриламід у на гідралічний опір раптового розширення труб. // Прикладна гідромеханіка. – 2005. – Т. 7 (79), № 1. – С. 50 – 55.
15. Шламы, их улавливание и обезвоживание // Т.Г. Фоменко, И.С. Благова, А.М. Коткин, В.С. Бутовецкий. – М.: Недра, 1968. – 203 с.
16. Справочник по обогащению углей / Под ред. И.С. Благова, А.М. Коткина, Л.С. Зарубина. – М.: Недра, 1984. – 614 с.
17. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: Химия, 1976. – 512 с.
18. Семенов Е.В., Бобров В.Б. Моделирование режима работы гидротранспортной установки с учетом процессов сгущения гидросмеси в зумпфах // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2001. – Вып. № 30. – С. 198 – 206.