

5. Максимально возможное изменение кинетической энергии сосуда между контактами при серии соударений башмаков с проводниками происходит по квадратичному закону от относительной горизонтальной скорости рабочих граней проводников в моментах контакта с башмаками.

6. Скорость горизонтального перемещения рабочей грани проводника в точке контакта с башмаком пропорциональна вертикальной скорости сосуда и углу наклона проводника к вертикали в пролете между ярусами армировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт // Минуглепром СССР, НИИ горной механики им. М.М.Федорова. – Донецк. -1985. -145 с.
2. Ильин С.Р. Влияние параметров диаграммы скорости подъема и эксцентриситета груза на динамику системы «сосуд-армировка» шахтных стволов / С.Р.Ильин // ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика. Межвед. Сб-к. науч. тр. Вып. 98.-Днепропетровск. -2012.
3. Лойцянский Л.Г. Теоретическая механика / Л.Г. Лойцянский, А.И.Лурье // Ленинград-Москва. - ГТТИ.-1933.-452С.
4. Ильин С.Р. Разработка и обоснование общей диагностической модели оборудования шахтных подъемных установок / С.Р.Ильин // ИГТМ НАН Украины. /Геотехническая механика. Межвед. Сб-к. науч. тр. Вып. 76.-Днепропетровск. -2008. -С. 44-63.

УДК 622.648.01 – 9:621.643.29

Д-р техн. наук Е.В. Семененко
(ИГТМ НАН Украины),
д-р техн. наук О.В. Витушко
(ООО «Шахтостроймонтаж»),
канд. техн. наук Н.А. Никифорова
(Национальная металлургическая академия Украины)

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА УГЛЯ

Методику А.Є. Смолдирева для розрахунку критичної швидкості та гідравлічного ухилу, узагальнену для випадків застосування труб з полівінілхлориду та поліетилену, а також використання розчинів гідродинамічно активних речовин, адаптовано під умови інженерних розрахунків з урахуванням досвіду розрахунків параметрів гідротранспорту вугілля й логарифмічного закону, який найчастіше використовується при визначенні коефіцієнта гідравлічного опору тертя.

ENGINEERING CALCULATION PROCEDURE OF COAL HYDROTRANSPORT PARAMETERS

The A.E. Smoldirev calculation procedure of critical velocity and hydraulic gradient generalized for the cases of use of polyvinylchloride and polyethylene pipes as well as application of drag reducing agents is adapted on conditions of engineering calculations taking into account experience of calculation of coal hydrotransport parameters and logarithmic law mostly used when determining drag coefficient.

Напорный гидротранспорт угля получил широкое распространение на угледобывающих и углеобогатительных предприятиях Украины. Однако, несмотря на более, чем полувековой опыт его использования для указанных технологий, достоверное определение параметров гидротранспорта угля – критической ско-

рости и гидравлического уклона [1 – 5] – является актуальным, поскольку доставка материала возможна только в сверхкритических режимах, а величина гидравлического уклона определяет мощность насосной станции и водопотребление технологической операции. На основе анализа более 20 методик расчета критической скорости и гидравлического уклона при течении пульп для повышения достоверности расчетов была модернизирована методика А.Е. Смолдырева [6 – 8]. Это позволило расширить область применения метода расчета, распространив его на гидротранспорт по трубам, изготовленным из различных материалов, а также гидротранспорт в присутствии гидродинамически активных веществ. Одновременно с этим расчеты по вновь предложенной методике усложнились ввиду отказа от использования необоснованного принципа суперпозиции вкладов мелких и кусковых фракций при определении критической скорости гидротранспортирования. Более сложная, нелинейная функциональная зависимость критической скорости от характеристик мелких и кусковых фракций позволила исключить неопределенность при выборе значений эмпирических коэффициентов, однако требует разветвленного алгоритма расчетов [6 – 8]. Это препятствие преодолимо при поверочных и оценочных расчетах, однако вызывает значительные затруднения при аналитических исследованиях режимов работы гидротранспортных систем и обосновании эффективных скоростей и концентраций пульпы. Помимо этого, степенной закон, использованный при разработке метода для описания зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, ограничивает прикладное использование методики, так как значения показателя степени и коэффициента пропорциональности для него не всегда приводятся в справочной литературе. Эти значения известны, как правило, для новых труб, изготовленных из полиэтилена или поливинилхлорида, однако для стальных труб и бывших в употреблении труб из других материалов чаще используется логарифмический закон, и в литературе приводятся соответствующие ему коэффициенты [9, 10].

Таким образом, разработка такой инженерной методики расчета параметров гидротранспорта угля, которая могла бы без потери точности расчетов использоваться для аналитических исследований параметров и режимов работы гидротранспорта, а также основывалась на логарифмическом законе для описания зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, является актуальной.

С использованием полученных зависимостей и степенной зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса для случая применения гидродинамически активных веществ и полимерных трубопроводов параметры гидротранспорта могут быть определены по формулам [6 – 8]

$$V_{kp} = \begin{cases} 2^{-N} \sqrt{\frac{gD^{1+N}}{M\nu^N} \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{0,71w}{\sqrt{gd_{cp}\beta}} \right)^{2/3} \left(\sqrt[3]{1+\sqrt{1-q}} + \sqrt[3]{1-\sqrt{1-q}} \right)^2}^{2/3}, & q \leq 1 \\ 2^{-N} \sqrt{\frac{gD^{1+N}}{M\nu^N} \frac{R_3}{R_1} \frac{\varphi f}{0,217\beta} \cos^{2-2N} \left(\frac{1}{3} \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{q}} \right) \right)}, & 1 \leq q \end{cases} ; \quad (1)$$

$$q = \frac{0,148f^3}{\beta Fr_w^2} \frac{R_3^3}{R_1 R_2^2}; \quad \beta = \frac{\chi}{\alpha SR_1} - 1; \quad \chi = \frac{\varepsilon K}{1 - \varepsilon K}; \quad \lambda' = \frac{M\nu^N}{D^N V^N}; \quad \alpha = \frac{Ar(1 - SR_1)}{1 + ArSR_1};$$

$$i = \frac{\lambda' V^2}{2gD} + \alpha \left(R_1 \frac{\lambda' V^2}{2gD} + \frac{0,71}{\sqrt{\lambda'}} R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + \varphi f R_3 \right) S;$$

$$V_{kp} = \begin{cases} 2^{-N} \sqrt{\frac{gD^{1+N}}{M\nu^N} \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{0,71w}{\sqrt{gd_{cp}\beta}} \right)^{2/3} \left(\sqrt[3]{1+\sqrt{1-q}} + \sqrt[3]{1-\sqrt{1-q}} \right)^2}^{2/3}, & q \leq 1 \\ 2^{-N} \sqrt{\frac{gD^{1+N}}{M\nu^N} \frac{R_3}{R_1} \frac{\varphi f}{0,217\beta} \cos^{2-2N} \left(\frac{1}{3} \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{q}} \right) \right)}, & 1 \leq q \end{cases} ; \quad (2)$$

$$i = \frac{\lambda' V^2}{2gD} + Ar \left(\frac{0,71}{\sqrt{\lambda'}} R_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + \varphi f R_3 \right) S; \quad q = \frac{0,148f^3}{\beta Fr_w^2} \frac{R_3^3}{R_2^2}; \quad \beta = \frac{\chi}{ArS};$$

$$Ar = \rho_{\tau} - 1; \quad w = w_0 (1 - S)^{n_w}; \quad w_0 = Ar \left(0,68d_{cp} + \frac{t}{52} - 0,5 \right);$$

$$Fr_w = \frac{w}{\sqrt{2gd_{cp}}}; \quad \rho = \frac{\rho_{\tau}}{\rho_0}; \quad n_w = 5 - \lg \left(\frac{d_{cp} w_0}{\nu_0} \right); \quad d_{cp} = \sum d_i q_i,$$

где N , M – эмпирические коэффициенты степенной зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса; ν – кинематический коэффициент вязкости гидросмеси, м²/с; φ – коэффициент, учитывающий снижение трения частиц кусковых фракций о дно трубы; ε – коэффициент, учитывающий изменение константы М.А. Великанова; V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования, м/с; D – диаметр трубопровода, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; w – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции, м/с; S – объемная концентрация частиц тонкой фракции, д. ед.; d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции, м; Ar – параметр

Архимеда; ρ_T – средневзвешенная плотность транспортируемого материала, кг/м³; ρ_0 – плотность жидкости, кг/м³; ρ – относительная плотность твердого материала; R_1 – массовая доля в транспортируемом материале тонких фракций; R_2 – массовая доля в транспортируемом материале мелких фракций; R_3 – массовая доля в транспортируемом материале кусковых фракций; f – обобщенный коэффициент трения частиц кусковой фракции о нижнюю стенку трубы; i – гидравлический уклон пульпы, м вод. ст./м; λ – коэффициент гидравлического сопротивления трения; V – средняя расходная скорость гидросмеси, м/с; t – температура пульпы, °С; n_w – показатель степени; ν_0 – кинематический коэффициент вязкости несущей жидкости, м²/с; d_i – средняя крупность i -й фракции в составе мелких частиц, мм; q_i – содержание i -й фракции по весу в составе мелких частиц, д. ед.; K – константа М.А. Великанова; α – эффективный параметр Архимеда транспортируемого материала; Fr_w – критерий Фруда для частиц транспортируемого материала.

В соответствии с научно обоснованным подходом [6 – 8] в случае применения логарифмического закона при определении величины критической скорости гидротранспортирования используется следующее уравнение:

$$\sqrt{a} \frac{V_{kp}}{\lg(bV_{kp})} = \sqrt{2gD} \begin{cases} \sqrt[3]{\frac{\alpha}{\chi - \alpha SR_1} \frac{0,71w}{\sqrt{2gd_{cp}}} \frac{SR_2}{2} z(q)}, & q \leq 1 \\ \sqrt{\frac{\alpha}{\chi - \alpha SR_1} \frac{4}{3} fSR_3 z(q)}, & q > 1 \end{cases}; \quad (3)$$

$$z(q) = \begin{cases} \sqrt[3]{1 + \sqrt{1 - q}} + \sqrt[3]{1 - \sqrt{1 - q}}, & q \leq 1 \\ \cos\left(\frac{1}{3} \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{q}}\right)\right), & 1 < q \end{cases}; \quad b = \frac{D}{b'v}, \quad (4)$$

где a , b' – эмпирические коэффициенты логарифмической зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса.

Подстановка в выражение (3) степенной зависимости позволяет получить аналитическую зависимость для расчета критической скорости гидротранспортирования полидисперсных материалов [6 – 8], тогда как использование логарифмического закона приводит к нелинейному уравнению, решение которого можно получить только численными методами.

Однако с учетом порядка величин числа Рейнольдса, соответствующих критическому режиму течения гидросмеси, для правой части уравнения (3) возможно следующее разложение в степенной ряд [11]:

$$\frac{\lg(bV_{kp})}{bV_{kp}} \approx 0,43429 \frac{bV_{kp} - 1}{(bV_{kp})^2} + \dots,$$

с использованием которого уравнение (3) сводится к квадратному, решение которого в окончательном виде может быть записано так:

$$V_{kp} = \begin{cases} 2,53 \sqrt{\frac{gD}{a}} \sqrt[3]{\sigma \frac{w}{\sqrt{gd_{cp}}} R_2 z(q)}, & q \leq 1 \\ 4,63 \sqrt{\frac{gD}{a}} \sqrt{\sigma f R_3 z(q)}, & 1 < q \end{cases} \quad \sigma = \frac{S \frac{Ar(1-SR_1)}{1+ArSR_1}}{\chi - SR_1 \frac{Ar(1-SR_1)}{1+ArSR_1}}. \quad (5)$$

Численный анализ зависимости $z(q)$ показывает (рис. 1), что вместо сложных функций (4) можно с достаточной степенью точности использовать их аппроксимации степенными функциями

$$z(q) = \begin{cases} 1,9756q^{0,0827}, & q \leq 1 \\ \frac{0,9981}{q^{0,0463}}, & 1 \leq q \end{cases}.$$

С учетом последних формул зависимость (5) может быть переписана в виде

$$V_{kp} = \begin{cases} 8,1352 \sqrt{gD} \sigma^{0,416} (R_3 f)^{0,2481} \left(\frac{wR_2}{\sqrt{gd_{cp}}} \right)^{0,1679}, & q \leq 1 \\ 8,8005 \sqrt{gD} \sigma^{0,4537} (R_3 f)^{0,3611} \left(\frac{wR_2}{\sqrt{gd_{cp}}} \right)^{0,0926}, & 1 < q \end{cases}.$$

При этом, если выделить два предельных случая, соответствующих монодисперсным материалам, представленным мелкими или кусковыми фракциями,

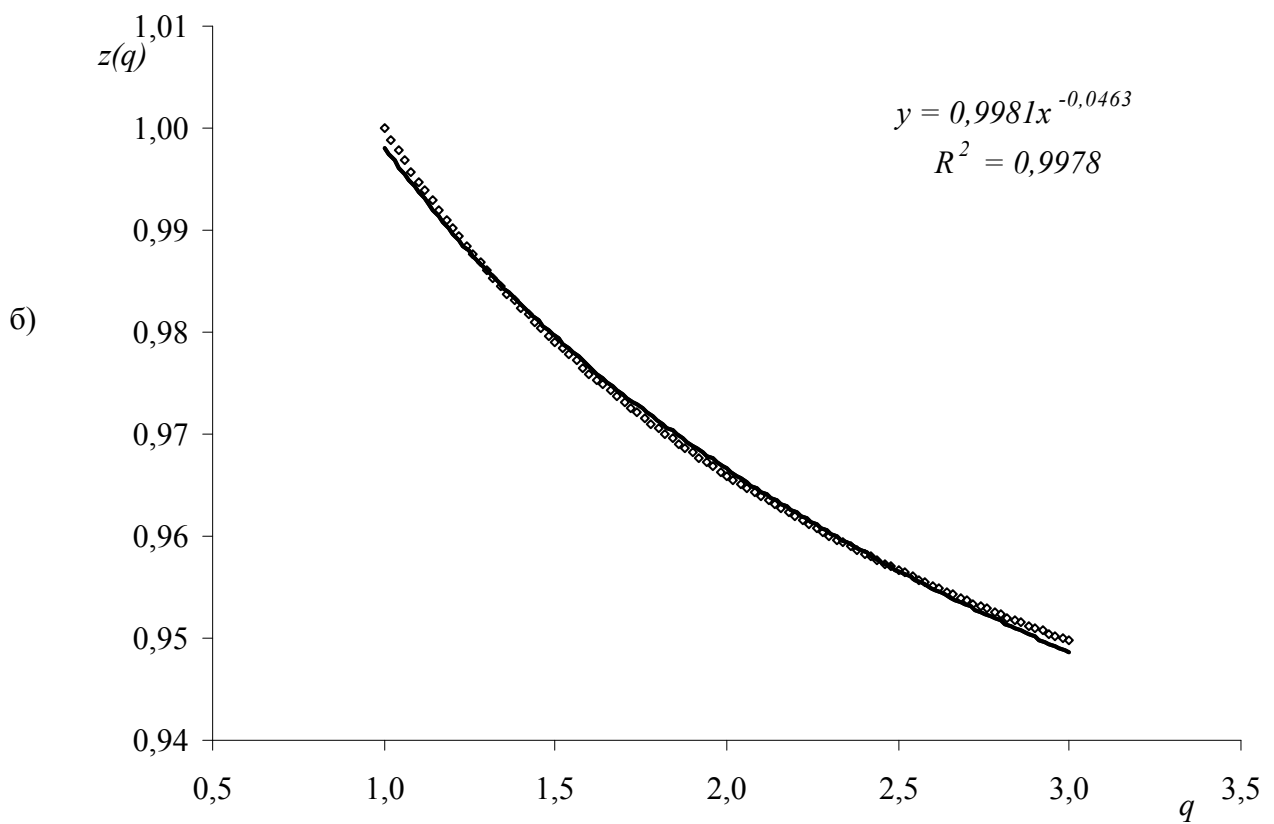
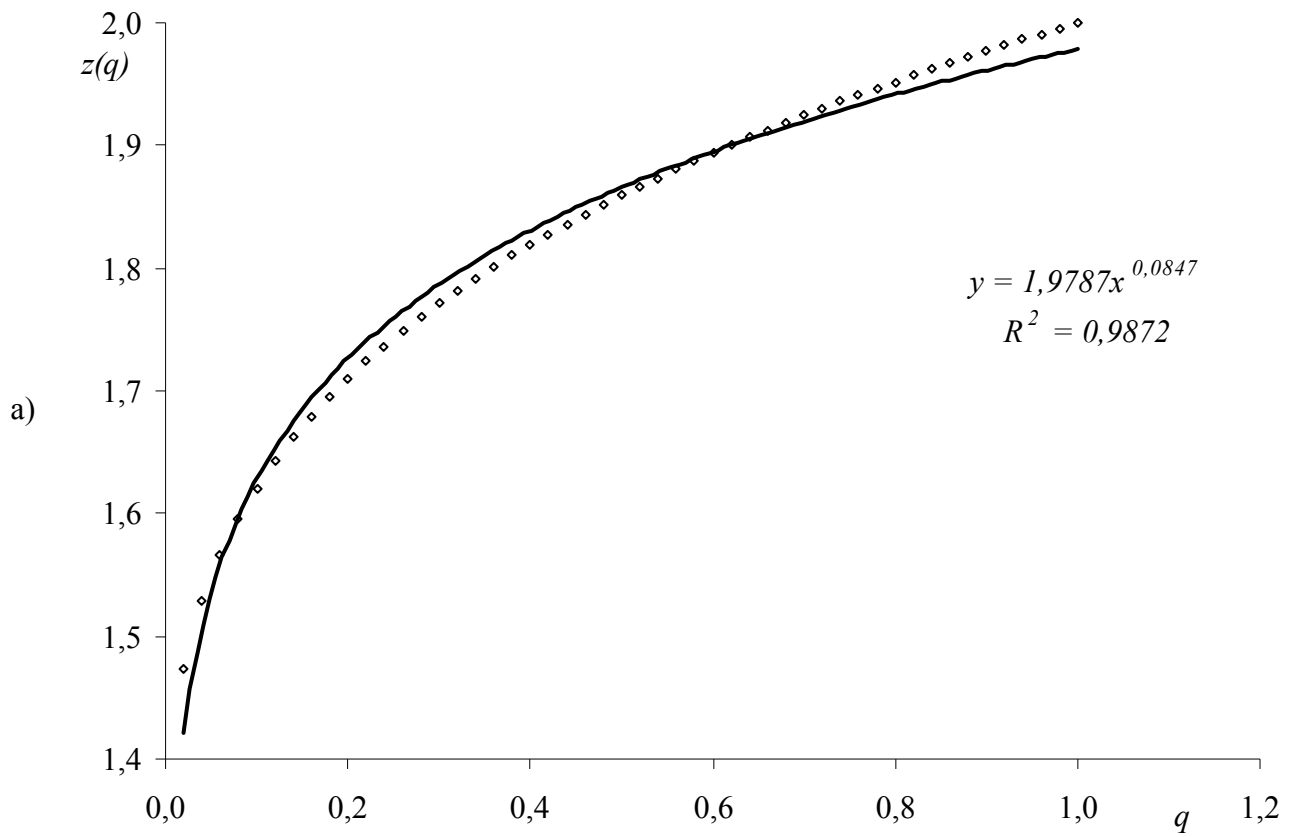


Рис. 1 - График зависимости $z(q)$ в разных интервалах значений q

$$V_{kp} = \begin{cases} 8,9969 \sqrt{gD} \sqrt[3]{\frac{\sigma w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}}}, & R_3 = 0 \\ 8,3182 \sqrt{gD} \sqrt{\sigma f R_3}, & R_2 = 0 \end{cases},$$

то выражение для критической скорости можно записать в следующем виде:

$$V_{kp} = 8,1352 \sqrt{gD} \sigma^{0,416} (R_3 f)^{0,2481} \left(\frac{w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}} \right)^{0,0926} E_{kp}(q); \quad (6)$$

$$E_{kp}(q) = \begin{cases} \left(\frac{w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}} \right)^{0,0753}, & q \leq 1 \\ \frac{\sigma^{0,0377}}{0,9244} (R_3 f)^{0,113}, & 1 < q \end{cases}.$$

ИЛИ

$$V_{kp} = C \sqrt{gD} \sigma^N (R_3 f)^M \left(\frac{w R_2}{\sqrt{g d_{cp}}} \right)^K; \quad (7)$$

$$C = \begin{cases} 8,1352, & q \leq 1; \\ 8,8005, & 1 < q; \end{cases} \quad N = \begin{cases} 0,4160, & q \leq 1; \\ 0,4537, & 1 < q; \end{cases}$$

$$M = \begin{cases} 0,2481, & q \leq 1; \\ 0,3611, & 1 < q; \end{cases} \quad K = \begin{cases} 0,1679, & q \leq 1; \\ 0,0926, & 1 < q. \end{cases}$$

Формулы (6) и (7), в отличие от (1) и (2), впервые выражает мультипликативную зависимость критической скорости от свойств тонкой, мелкой и кусковой фракций, которая только корректируется в зависимости от соотношения параметров частиц фракций. При этом частицам каждой фракции соответствует свой сомножитель: σ – частицам тонких фракций; $R_2 Fr_w$ – частицам мелких фракций; $R_3 f$ – частицам кусковых фракций. За счет этого формулы (6) и (7)

очень удобны для аналитического исследования зависимости критической скорости на экстремумы, что необходимо при выборе рациональных режимов работы гидротранспортных систем и обосновании эффективных скоростей и концентраций пульпы.

Для проверки достоверности полученных зависимостей (3) – (7) были обработаны результаты экспериментальных исследований параметров гидротранспорта угля, которые были разбиты на две группы и обработаны в соответствии с формулами (3) – (7), после чего было проведено сравнение результатов экспериментов с результатами расчетов по предлагаемым формулам.

Использовались результаты экспериментов по гидротранспорту в трубопроводе диаметром 409 и 357 мм угля, в котором доля тонких частиц составляла от 0,04 до 0,08; мелких частиц – от 0,34 до 0,53; кусковых – от 0,39 до 0,62, с концентрацией пульпы 0,125 и 0,2. Поскольку погрешность расчетов критической скорости гидротранспортирования не превышала 12 %, то можно сделать вывод о возможности использования формул (3) – (7) для определения параметров гидротранспорта угля с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Таким образом, сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными [5], показывает, что предлагаемая методика адекватно описывает зависимости критической скорости и гидравлического уклона от концентрации пульпы для материалов различного гранулометрического состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
2. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
3. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. – М.: Недра, 1980. – 390 с.
4. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.
5. Булат А.Ф. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий / А.Ф. Булат, О.В. Витушко, Е.В. Семенов. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.
6. Витушко О.В. Усовершенствование методики расчета гидравлического уклона пульпы при гидротранспорте отходов обогащения / О.В. Витушко, Н.А. Никифорова, Е.В. Семенов // Науч.-аналит. и произв. журнал «Горное оборудование и электромеханика». – 2009. – № 10. – С. 41 – 44.
7. Витушко О.В. Усовершенствование методики расчета критической скорости при гидротранспорте отходов обогащения / О.В. Витушко, Н.А. Никифорова, Е.В. Семенов // Науч.-аналит. и произв. журнал «Горное оборудование и электромеханика». – 2009. – № 11. – С. 46 – 51.
8. Витушко О.В. Усовершенствование метода расчета параметров гидротранспорта полидисперсных материалов / О.В. Витушко, Н.А. Никифорова, Е.В. Семенов // Науч. - техн. и произв. журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность». – 2009. – № 6. – С. 66 – 69.
9. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.
10. П 59-72/ Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов. – Л.: Энергия, 1972. – 24 с.
11. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, 1983. – 172 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ СКЛАДУ ВИМІРІВ У ЗАДАЧІ КОНТРОЛЮ РУХУ ПІДЙОМНОЇ ПОСУДИНИ ШАХТНОГО ПІДНІМАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ ПРИ ОБМЕЖЕННІ ЧИСЛА ВИМІРІВ

Найдено существование оптимального конечного значения продолжительности мерного интервала измерений мобильной системы контроля (МСК), при котором обеспечивается минимально допустимая точность. Адаптирована «задача Ельвинга», применяемая в космической отрасли, для оптимизации состава МСК ШПК, которая заключается в выборе оптимального состава некоррелированных измерений при ограничении их числа и доказано, что выбор универсального состава МСК необходимо проводить по универсальному критерию В.Г. Ершова, который заключается в том, что отыскивается минимум числа измерений при условии, что дисперсия оценки вектора измерений меньше или равна заданному положительному числу. Показано, что для повышения точности нескольких параметров ШПК каждому будет соответствовать свой оптимальный состав измерения МСК, который находится по универсальному критерию В.Г. Ершова.

OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF COMPOSITION IN A PROBLEM OF THE CONTROL OF MOVEMENT LIFTING VESSELS WINDERS COMPLEX DURING LIMITED NUMBER OF MEASUREMENTS

Found the existence of the optimal duration of the final value of the measurement interval dimensional mobile control system (MCS), which provides the minimum acceptable accuracy. Adapted "problem Elvinga", used in the space industry for the optimization of MCS MWD, which is to select the optimal composition of uncorrelated measurements in a limited number, and prove that the choice of universal MSCs to spend on universal criteria V.G. Ershov, which is what we seek a minimum number of measurements, provided that the variance of the vector measurement is less than or equal to a given positive number. It is shown that to improve the accuracy of several parameters MWD everyone will match your optimum composition measurements MSC, which is on a universal criterion V. G.Yershov.

Шахтний піднімальний комплекс (ШПК) це єдина ланка з'єднання гірської виробки з поверхнею, більша частина ШПК експлуатується понад нормативний термін, мають місце численні відмови і аварії, кількість яких постійно зростає. **29 липня 2011 року на шахті "Суходольська-Східна" (ДП "Краснодонвугілля")** при вибуху метану загинули **28** шахтарів; на шахті ім. Бажанова (ДП "Макіїввугілля") у результаті обвалення копра ШПК клітєвого стовбура загинули **11** шахтарів. Тому забезпечення високої надійності ШПК у вибухонебезпечних умовах їх експлуатації є однією з важливих науково-практичних проблем.

В ІГТМ наприкінці минулого століття під керівництвом академіка НАНУ А.Ф. Булата виконувалися дослідження, спрямовані на розробку телеметричного контролю [1, 2], керування й діагностики для кар'єрних похилих підйомників підприємств кольорової металургії Сибірського регіону й надглибоких вертикальних підйомів Норильська. На їхній основі була виконана розробка системи діагностики для застосування на шахтах Міністерства вугільної промисловості України (АС "ТЕРАКОД"). У силу економічних причин проект у повному обсязі реалізований не був. Частина системи була реалізована в системі екс-